

156131

T.C
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

150131

**KONVEKTİF-RADYATİF BİR KURUTUCU TASARIMI
VE KURUTMA PARAMETRELERİNİN İNCELENMESİ**

Duygu EVİN

DOKTORA TEZİ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ELAZIĞ, 2004



KONVEKTİF-RADYATİF BİR KURUTUCU TASARIMI VE KURUTMA PARAMETRELERİNİN İNCELENMESİ

Duygu EVİN

Doktora Tezi
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu tez, tarihinde aşağıda belirtilen jüri tarafından oybirliği /oyçokluğu ile başarılı / başarısız olarak değerlendirilmiştir.

Danışman: Prof. Dr. Vedat TANYILDIZI

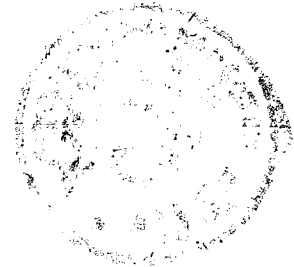
Üye: Prof. Dr. Yonay BİÇER

Üye: Prof. Dr. Dursun Pehlivan

Üye: Doç. Dr. Mustafa İNALI

Üye: Doç. Dr. Suat CANBAZOGU

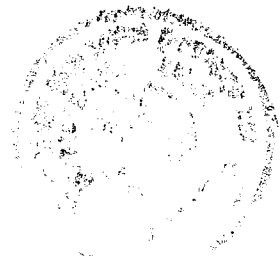
Bu tezin kabulü, Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 20/06/2025... tarih ve27-3..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.



TEŞEKKÜR

Doktora sürem boyunca desteğini esirgemeyen danışman hocam Prof. Dr. Vedat Tanyıldızı'na, bilimsel katkılarından dolayı Prof. Dr. Dursun Pehlivan'a, Doç. Dr. Mustafa İnallı'ya ve deney düzeneğinin tasarım ve imalatında emeği geçen eşim Yrd. Doç. Dr. Ertan Evin'e, Arş. Grv. Melek Gürkahraman'a, Teknik Ressam Sevinç Sadak'a ve F.Ü. Makine Mühendisliği Atelye personeline teşekkür ederim.

Ayrıca bu çalışma F.Ü. Araştırma Projeleri Yönetim Birimi (FÜBAP) tarafından 404 nolu proje olarak desteklenmiş olup, katkılarından dolayı teşekkür ederim.



İÇİNDEKİLER

Sayfa No

TEŞEKKÜR	I
İÇİNDEKİLER	II
ŞEKİLLER LİSTESİ	III
SİMGELER LİSTESİ	V
ÖZET	VI
ABSTRACT	VII
1. GİRİŞ	1
1.1 Literatür Araştırması	3
2. TEMEL TANIMLAR	7
2.1. Nem İçeriği	7
2.2. Kuruma Hızı	8
2.2.1. Sabit Kuruma Hızı periyodu	9
2.2.2. Azalan Kuruma Hızı periyodu	10
2.2.3. Kuruma Hızına Etki Eden Faktörler	11
3. NEM HAREKET MEKANİZMASI VE KURUTMA TEORİLERİ	12
3.1. Nem Hareket Mekanizması	12
3.2. Kurutma Teorileri	13
3.2.1. Sıvı Difüzyon Teorisi	13
3.2.2. Kapılar Teori	14
3.2.3. Buharlaştırma-Yoğuşma Teorisi	15
3.2.4. Luikov Teorisi	16
3.2.5. Krischer Teorisi	16
4. KURUTMA SİSTEMLERİ	18
4.1. Kabin Kurutucular	18
4.2. Tünel Kurutucular	19
4.3. Turbo-Tip (Dönen tepsili) Kurutucular	21
4.4. Konveyör Kurutucular	21
4.5. Dönel Kurutucular	23
4.6. Tambur Kurutucular	25
4.7. Püskürtmeli Kurutucular	26
4.8. Akışkan Yatak Kurutucular	28
4.9. Flaş (Pnömatik) Kurutucular	31

4.10. Dondurarak Kurutma Sistemleri.....	33
4.11. Mikrodalga Kurutma Sistemleri	34
5. ZİT AKIŞLI KONVEKTİF-RADYATİF KURUTUCU	36
5.1. Deney Tesisatı	36
5.1.1. Yükleme Ünitesi.....	37
5.1.2. Kurutma kolonu.....	38
5.1.3. Kolektör Ünitesi	41
6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR VE SONUÇLAR.....	42
6.1. Deneylerin Yapılışı.....	42
6.2. Deney Şartları.....	43
6.2.1. Ayçekirdeği Kurutma Deneyleri	43
6.2.1.1. Açık Sistem Deneyleri.....	43
6.2.1.2. Kapalı Sistem Deneyleri.....	55
6.2.1.3. Açık ve Kapalı Sistemin karşılaştırılması	63
6.2.2. Soya Fasulyesi Kurutma Deneyleri	68
6.2.2.1. Açık Sistem Deneyleri.....	68
7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	75
KAYNAKLAR.....	78
ÖZGEÇMİŞ.....	82

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2.1. Toplam nem içeriği ve kuruma hızının zamanla değişimleri.....	8
Şekil 2.2. Karakteristik bir kuruma eğrisi	9
Şekil 3.1. Gözenekli bir katının kurutulması sırasında meydana gelen nem hareketi.....	12
Şekil 4.1. Kabin kurutucu.....	18
Şekil 4.2. Tünel Kurutucu	19
Şekil 4.3. Basit bir paralel akış tünel kurutucu.....	20
Şekil 4.4. Turbo-tip kurutucu	21
Şekil 4.5. İki geçişli konveyör kurutucu	22
Şekil 4.6. Konveyör kurutucu	22
Şekil 4.7. Zıt akışlı dönel kurutucu	23
Şekil 4.8. Dönel kurutucu.....	24
Şekil 4.9. Konvansiyonel ve buhar borulu dönel kurutucular.....	24
Şekil 4.10. Tek tamburlu kurutucu.....	25
Şekil 4.11. Alttan beslemeli tek tamburlu kurutucu.....	26
Şekil 4.12. Püskürtmeli kurutucu	27
Şekil 4.13. Püskürtmeli kurutucuda kullanılan atomizerler	27
Şekil 4.14. Akışkan yatak kurutucu	29
Şekil 4.15. Distribütör plakaları	29
Şekil 4.16. Titreşimli akışkan yatak kurutucu.....	30
Şekil 4.17. Fıskıran yatak kurutucu.....	31
Şekil 4.18. Flaş kurutucunun şematik resmi.....	32
Şekil 4.19. Flaş kurutucu.....	32
Şekil 4.20. Dondurarak kurutma sisteminin temel bir konfigürasyonu.....	33
Şekil 4.21. Atlas Ray™ dondurarak kurutma sistemi	34
Şekil 4.22. Linn High Therm Gmbh patentli mikrodalga kurutucu	35
Şekil 5.1. Sürekli tip zıt akışlı konvektif-radyatif kurutucunun şematik resmi.....	36
Şekil 5.2. Sürekli tip zıt akışlı konvektif-radyatif kurutucunun önden görüntüsü	37
Şekil 5.3. Besleme bunkerinin görüntüsü.....	38.
Şekil 5.4. Konvektif-radyatif kurutma kolonu	40
Şekil 5.5. Elektrik Kontrol panosu.....	40
Şekil 5.6. Kolektör haznesi	41
Şekil 5.7. Kolektör haznesinin arkadan görüntüsü.....	41

Şekil 6.1. Birinci periyot sonu ayçekirdeği relatif nem içeriğinin hava hızı ve sıcaklığı ile değişimi	44
Şekil 6.2. İkinci periyot sonu ayçekirdeği relatif nem içeriğinin hava hızı ve sıcaklığı ile değişimi	45
Şekil 6.3. Üçüncü periyot sonu ayçekirdeği relatif nem içeriğinin hava hızı ve sıcaklığı ile değişimi	45
Şekil 6.4. 40 °C hava sıcaklığında 1., 2. ve 3. periyot sonlarındaki relatif nem içeriklerinin hava hızı ile değişimi	47
Şekil 6.5. 50 °C hava sıcaklığında 1., 2. ve 3. periyot sonlarındaki relatif nem içeriklerinin hava hızı ile değişimi	48
Şekil 6.6. 60 °C hava sıcaklığında 1., 2. ve 3. periyot sonlarındaki relatif nem içeriklerinin hava hızı ile değişimi	49
Şekil 6.7. 70 °C hava sıcaklığında 1., 2. ve 3. periyot sonlarındaki relatif nem içeriklerinin hava hızı ile değişimi	49
Şekil 6.8. Her dört hava sıcaklığı için her üç periyot sonu relatif nem içeriklerinin hava hızı ile değişimi	50
Şekil 6.9. 40 °C hava sıcaklığında hava hızına bağlı olarak 1.periyot kuruma hızı Değişimi	51
Şekil 6.10. 50 °C hava sıcaklığında hava hızına bağlı olarak 1.periyot kuruma hızı Değişimi	52
Şekil 6.11. 60 °C hava sıcaklığında hava hızına bağlı olarak 1.periyot kuruma hızı Değişimi	52
Şekil 6.12. 70 °C hava sıcaklığında hava hızına bağlı olarak 1.periyot kuruma hızı Değişimi	53
Şekil 6.13. Hava sıcaklığının ayçekirdeğinin kuruma hızı üzerindeki etkisi	53
Şekil 6.14. 1.periyot sonu ayçekirdeği relatif nem içeriğinin hava sıcaklığı ve parçacık ortalama hızına bağlı olarak değişimi.....	54
Şekil 6.15. Birinci periyot sonu ayçekirdeği relatif nem içeriğinin hava hızı ve sıcaklığı ile değişimi	55
Şekil 6.16. İkinci periyot sonu ayçekirdeği relatif nem içeriğinin hava hızı ve sıcaklığı ile değişimi	56
Şekil 6.17. Üçüncü periyot sonu ayçekirdeği relatif nem içeriğinin hava hızı ve sıcaklığı ile değişimi	56
Şekil 6.18. 40 °C hava sıcaklığında 1., 2. ve 3. periyot sonu relatif nem içeriklerinin hava hızı ile değişimi.....	57

Şekil 6.19. 50 °C hava sıcaklığında 1., 2. ve 3. periyot sonu relatif nem içeriklerinin hava hızı ile değişimi.....	57
Şekil 6.20. 60 °C hava sıcaklığında 1., 2. ve 3. periyot sonu relatif nem içeriklerinin hava hızı ile değişimi.....	58
Şekil 6.21. 70 °C hava sıcaklığında 1., 2. ve 3. periyot sonu relatif nem içeriklerinin hava hızı ile değişimi.....	58
Şekil 6.22. Her dört hava sıcaklığı için her üç periyot sonu relatif nem içeriklerinin hava hızı ile değişimi.....	59
Şekil 6.23. 40 °C hava sıcaklığında hava hızına bağlı olarak 1.periyot sonu kuruma hızı değişimi	60
Şekil 6.24. 50 °C hava sıcaklığında hava hızına bağlı olarak 1.periyot sonu kuruma hızı değişimi	60
Şekil 6.25. 60 °C hava sıcaklığında hava hızına bağlı olarak 1.periyot sonu kuruma hızı değişimi	61
Şekil 6.26. 70 °C hava sıcaklığında hava hızına bağlı olarak 1.periyot sonu kuruma hızı değişimi	61
Şekil 6.27. Hava sıcaklığının ayçekirdeğinin kuruma hızı üzerindeki etkisi	62
Şekil 6.28. Ayçekirdeğinin 1.periyotta relatif nem içeriğinin hava sıcaklığına bağlı olarak tanecik hızı ile değişimi.....	62
Şekil 6.29. 1.periyot sonu ayçekirdeği relatif nem içeriğinin açık ve kapalı sistem için karşılaştırılması	63
Şekil 6.30. 2.periyot sonu ayçekirdeği relatif nem içeriğinin açık ve kapalı sistem için karşılaştırılması	64
Şekil 6.31. 3.periyot sonu ayçekirdeği relatif nem içeriğinin açık ve kapalı sistem için karşılaştırılması	64
Şekil 6.32. 40°C hava sıcaklığında ayçekirdeğinin 1. periyot kuruma hızının açık ve kapalı sistem için karşılaştırılması	65
Şekil 6.33. 50°C hava sıcaklığında ayçekirdeğinin 1. periyot kuruma hızının açık ve kapalı sistem için karşılaştırılması	65
Şekil 6.34. 60°C hava sıcaklığında ayçekirdeğinin 1. periyot kuruma hızının açık ve kapalı sistem için karşılaştırılması	66
Şekil 6.35. 70 °C hava sıcaklığında ayçekirdeğinin 1. periyot kuruma hızının açık ve kapalı sistem için karşılaştırılması	66
Şekil 6.36. Farklı hava sıcaklıklarında ayçekirdeğinin 1. periyot kuruma hızının açık ve kapalı sistem için karşılaştırılması	67

Şekil 6.37. 1. periyot sonu soya fasulyesi relatif nem içeriğinin hava hızı ve sıcaklığı ile değişimi	68
Şekil 6.38. 2. periyot sonu soya fasulyesi relatif nem içeriğinin hava hızı ve sıcaklığı ile değişimi	69
Şekil 6.39. 3. periyot sonu soya fasulyesi relatif nem içeriğinin hava hızı ve sıcaklığı ile değişimi	69
Şekil 6.40. 50°C hava sıcaklığında 1., 2. ve 3. periyot sonu soya fasulyesi relatif nem içeriklerinin hava hızı ile değişimi	70
Şekil 6.41. 70°C hava sıcaklığında 1., 2. ve 3. periyot sonu soya fasulyesi relatif nem içeriklerinin hava hızı ile değişimi	70
Şekil 6.42. Her iki hava sıcaklığı için her üç periyot sonu soya fasulyesi relatif nem içeriklerinin hava hızı ile değişimi	71
Şekil 6.43. 50°C hava sıcaklığında hava hızına bağlı olarak 1.periyot sonu kuruma hızı değişimi	72
Şekil 6.44. 70 °C hava sıcaklığında hava hızına bağlı olarak 1.periyot sonu kuruma hızı değişimi	72
Şekil 6.45. Hava sıcaklığının soya fasulyesinin kuruma hızı üzerindeki etkisi	73
Şekil 6.46. Farklı hava sıcaklıklarında soya fasulyesinin 1.periyot sonu relatif nem içeriğinin parçacık ortalama hızı ile değişimi	73

SİMGELER LİSTESİ

- A : Yüzey alanı, m^2
E : Aktivasyon enerjisi, kJ/kg
 h_m : Konvektif kütle transfer katsayısı, m/s
 h_T : Konvektif ısı transfer katsayısı, W/m^2K
 K_L : Sıvı difüzivitesi, m^2/s
 K_v : Buhar difüzivitesi, m^2/s
L : Suyun buharlaşma ısısı, kJ/kg
 M_{yb} : Yaş baza göre nem içeriği, %yb
 M_{kb} : Kuru baza göre nem içeriği, %kb
 P_v : Su buharı basıncı, Pa
r : Yarıçap, m
 R_v : Su buharı için gaz sabiti, $kJ/(kg K)$
T : Sıcaklık, $^{\circ}C$
t : Zaman, s
 W_s : Su kütlesi, kg
 W_o : Başlangıç kütlesi, kg
 W_k : Kuru madde kütlesi, kg
 W_t : Malzemenin herhangi bir t zamanındaki kütlesi, kg
 ρ_s : Katı yoğunluğu, kg/m^3
 μ : Dinamik viskozite, Pa.s

ÖZET

Doktora Tezi

KONVEKTİF-RADYATİF BİR KURUTUCU TASARIMI VE KURUTMA PARAMETRELERİNİN İNCELENMESİ

Duygu EVİN

Fırat Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

2004, Sayfa: 82

Bu çalışmada, konvansiyonel kurutuculardan farklı yeni bir zıt akışlı sürekli tip konvektif-radyatif kurutucu tasarlanarak imal edilmiştir. Kurutucunun ana parçası olan düşey kolon içerisindeki yukarı yönlü hava akışı, parçacıkların kontrollü düşmelerini sağlamaktadır. Sekiz adet PID sıcaklık kontrollü radyatif çubuk ısıtıcının bulunduğu kurutma kolonu, kurutma işlemi için birleşik konvektif-radyatif ısı transferi sağlamaktadır. Kurutma deneyleri, kurutma kolonu çıkışının girişe bağlandığı kapalı devre ve açık devre durumlarında yapılmıştır.

Kurutucuya ait kurutma parametrelerinin tespiti için farklı hava sıcaklıklarında ve hava hızlarında açık ve kapalı sistem olarak vinimik cinsi ayçekirdeği ve soya fasulyesi için kurutma deneyleri yapılmıştır. Ayçekirdeği kurutma deneyleri, açık ve kapalı sistemde 40, 50, 60 ve 70°C hava sıcaklık değerleri sabit tutularak her bir sıcaklık için 2.4, 2.8, 3.2 ve 3.6 m/s hava hızlarında; soya fasulyesine ait kurutma deneyleri ise, açık sistemde 50 ve 70°C hava sıcaklıkları sabit tutulmak suretiyle her bir sıcaklık için 2.8, 3.2, 3.6, 4 ve 4.4 m/s hava hızlarında yapılmıştır.

Fışkıran yataktakine benzer şekilde, kurutma havası ve yaş katı cisim arasındaki mükemmel temas sebebiyle sağlanan yüksek ısı ve kütle transferinin bir sonucu olarak yüksek kuruma hızı gerçekleştirilmiştir. Daha ileri bir avantaj olarak konvektif ve radyatif ısı transferinin birlikte uygulanması, özellikle kurutmanın başlangıç safhalarında yüzey neminin hızlı çekilmesi ve yüksek kuruma hızı sağlamaktadır. Kurutma periyotları süresince, kolonda kalma süresinin kısa olması dikkate değer ölçüde enerji tasarrufu sağlamakta ve ısıya duyarlı malzemelerin gerektirdiği yüksek sıcaklıklarda hızlı kuruma için kullanıma izin vermektedir.

Anahtar Kelimeler: düşerken kurutma, konvektif-radyatif kurutma, kolon kurutucu.

ABSTRACT

Ph.D. Thesis

DESIGN OF A CONVECTIVE-RADIATIVE DRYER AND INVESTIGATING ITS DRYING PARAMETERS

Duygu EVİN

Fırat University
Graduate School of Science and Technology
Department of Mechanical Engineering

2004, Page: 82

In this study, a novel counter-current type continuous convective-radiative dryer, different from the conventional dryers, is designed and manufactured. Downfall velocity of the particles is controlled by upward air flow through a vertical column composing the main part of the dryer. The drying column, equipped with eight radiative bar-heaters controlled by a PID temperature control system, provides combined convection and radiation heat transfer for drying process. Drying experiments were conducted in open circuit flow and in a closed cycle in which the outlet of the drying column is connected to the inlet.

Drying experiments were conducted for sunflower and soybeans in open and closed cycles to determine the drying parameters of the dryer at different drying air temperatures and velocities. 40, 50, 60 and 70°C drying air temperatures and 2.4, 2.8, 3.2 and 3.6 m/s air velocities were used for open and closed cycle sunflower drying experiments; and soybeans were dried at 50 and 70°C drying air temperatures for 2.8, 3.2, 3.6, 4 and 4.4 m/s drying air velocities.

As a consequence of high heat and mass transfer rates, high drying rates were achieved owing to the perfect contact between the drying air and the wet solids, similarly in spouted beds. Downfall drying requires less pumping power than spouted beds. As a further advantage, application of combined convective and radiative heat transfer ensured fast removal of surface moisture and provided faster drying rates, especially during the initial stages of drying. Short residence time during the drying periods, provides significant energy savings and permits the usage for heat-sensitive materials necessitating fast drying at high temperatures.

Key Words: downfall drying, convective-radiative drying, column dryer.

1. GİRİŞ

Kurutma, bir maddeden nemin çeşitli metotlarla uzaklaştırılmasıdır. Kimyasal, mekanik, vakum, vb. tekniklerle kurutmanın yanı sıra “termal kurutma”, en yaygın olarak kullanılan kurutma metodudur. Termal kurutma, madde yüzeyi ile çevresi arasında ve madde içerisinde ısı ve kütle transferinin olduğu karmaşık bir termodinamik ve fizyokimyasal işlemdir [1,2]. Kurutulacak maddedeki suyun uzaklaştırılması amacıyla gerekli ısıнын maddeye transfer edilme mekanizmasına bağlı olarak “konveksiyon kurutma”, “kontak kurutma” ve “radyasyon kurutma” olmak üzere başlıca üç farklı kurutma yöntemi söz konusudur [1].

Konveksiyon kurutmada, suyun buharlaşması için gerekli ısı, bir gaz (çoğunlukla hava) tarafından taşınır. Sıcak gazın kurutulacak maddenin içinden, üzerinden ve arasından geçirildiği bu yöntem, genel olarak “sıcak hava ile kurutma” tekniği olarak bilinir. Kurutulan maddenin niteliklerine bağlı olarak bu yöntemin, tünel kurutucular, akışkan yatak kurutucular, püskürtmeli kurutucular gibi değişik uygulamaları vardır.

Kontak kurutma yönteminde, buharlaşma için gerekli ısı, iletim yoluyla sağlanır. Yani, kurutulacak madde hareketsizken veya hareket ederken temas ettiği sıcak yüzeyden maddeye ısı aktarılır. Bu yöntemin de çok çeşitli uygulamaları mevcut olup, en yaygın örneği tambur kurutuculardır.

Radyasyon kurutmada kurutulacak maddeye ısı, herhangi maddi bir taşıyıcı gerekmeksizin, civardaki bir radyasyon alanından ulaştırılmaktadır.

Kurutma, gıda endüstrisinden ilaç sektörüne kadar çok çeşitli endüstriyel uygulamalarda kullanılan bir işlemdir. Suyun buharlaşma gizli ısısı ve nispeten endüstriyel kurutucuların düşük enerji etkinliği sebebiyle, uygulamalarda kurutma süresinin artışı, kurutma işlemi için yüksek enerji ihtiyacı doğurur [2]. Çoğu ülkelerde endüstriyel enerji tüketiminin büyük bölümü, kurutma işlemleri için tüketilmektedir; İngiltere’de bu oran %7; Sovyetler Birliği’nde ise %10 gibi yüksek bir değerdedir [3]. Sanayileşme sürecinde bulunan ülkemizde ise kurutma işlemi, enerji tüketimi açısından önemli bir yer tutmakta ancak, kurutmada kullanılan enerjinin genel enerji tüketimindeki payını ifade eden bir çalışma bulunmamaktadır.

Mujumdar [4], endüstriyel kurutucuların sınıflandırılması ve seçimi üzerine yaptığı araştırmasında, yeni kurutucular geliştiren araştırmacılara yol göstermektedir: SPIN (“Katılara uygulanan İşlemlerin Endüstriyel Ağı”- İngiltere) tarafından yapılan en son araştırma sonuçlarına yer vermiş ve kurutucu seçiminin tüm şirketlerin ana problemi olduğunu vurgulamıştır. İşlemin şekline, ısı transfer mekanizmasına, kurutucudaki malzemenin sabit veya hareketli olmasına, işlem basıncına, kurutma ortamına, kurutma sıcaklığına, kurutma ortamı ile

kurutulan katıların birbirine göre izafi hareketine, geçiş sayısına ve kurutucuda kalma süresine göre kurutucu tiplerini -kabaca- belirlemiş, ardından alt sınıflandırmalar yapmıştır [4].

Mujumdar [4], artan endüstriyel ihtiyaçların bir sonucu olarak, hızla yeni kurutucuların geliştirilmekte olduğunu belirterek, kurutucular ve kurutma işlemi ile ilgili olarak her yıl, Amerika’da 250’nin üzerinde; Avrupa’da ise yaklaşık 80 patentin kabûl edildiğini vurgulamaktadır. Pek çok yeni teknoloji önümüzdeki on veya yirmi yıl içerisinde konvansiyonel kurutucuların yerini alacaktır. Ancak, yeni teknolojilerin kullanımı konvansiyonel kurutuculara nazaran, aslında daha riskli ve büyük ölçekli uygulamaları daha zor olduğundan, bu kurutucuların benimsenmeleri zaman almaktadır. Konvansiyonel olmayan bu yeni tip kurutucuların çoğu henüz tamamlanarak uygulamaya geçmemiş, ticari manada ancak pek azı belirli ürünler için başarıyla kullanılmaktadır [4].

Bu çalışmada, konvansiyonel kurutuculardan farklı, yeni bir “zıt akışlı sürekli tip konvektif-radyatif kurutucu” geliştirilmiştir. Radyasyon ve konveksiyon ısı transfer mekanizmalarının birlikte kullanıldığı PID kontrollü düzenekte kurutulacak katı, düşey ısıma borusu içerisinde hava akışına zıt yönde kontrollü düşürölmektedir. Bu sürekli tip kurutucunun kurutma parametrelerinin belirlenmesi için bazı zirai gıda ürünleri ile bir seri deneyler yapılmıştır. Enerji tasarrufu amacıyla kurutucu kapalı ve açık sistem olarak çalıştırılmış ve her iki sistem için de deneyler tekrarlanmıştır.

Bir kurutucunun optimum performansla çalışmasında işlem şartları ve kurutulacak malzeme önem taşımaktadır: Kurutma havası hızı, kurutma havası sıcaklığı ile malzemenin yapısı ve nem içeriğı ürün kalitesini etkilemektedir[2]. Hava sıcaklığının 40-250°C aralığında; hava hızının ise çok geniş bir aralıkta değıştirilebildiğı deney düzeneğinde gıda ürünleri yanı sıra -yüksek sıcaklıkta kurutmaya müsait- kimyasallar ve diğer pek çok inorganik ürün de kurutulabilmektedir.

Nemli ürünün kurutma havası içerisine dağıldığı bu kurutucuda kurutma havası-nemli katı temasının çok iyi sağlanması sebebiyle, yüksek ısı ve kütle transferi ve dolayısıyla yüksek kuruma hızı sağlanmaktadır. Konvektif kurutmada parça yüzeyinde sağlanabilecek en yüksek sıcaklık yaş termometre sıcaklığı olacak iken, bu çalışmada uygulanan radyatif ısıtma sayesinde parçanın söz konusu yüzey sıcaklığı, yaş termometre sıcaklığının üzerine çıkartılmakta, ürüne olan ısı transferi artırılmaktadır. Radyatif-konvektif ısı transfer mekanizmalarının birlikte kullanılmasıyla, kurumanın özellikle başlangıç safhalarında yüzey nemi hızla uzaklaştırılmakta ve böylece kuruma hızı artmaktadır. Kurutma kolonunda kalma süresinin kısa olması enerji tasarrufu sağlamakta, ayrıca bu özellik yüksek sıcaklıkta hızlı kurumanın istendiğı ısıya duyarlı malzemelerde bu kurutucunun kullanımını mümkün kılmaktadır.

Bir kurutucuda kurutulacak katılar granül, kristal, toz, dilim veya sürekli levha gibi farklı şekillerde ve çok farklı özelliklerde olabilmektedir [5]. Bu çalışmada geliştirilen kurutucu, partikül boyutu büyük, boyut dağılım aralığı düşük katıların kurutulması için uygun bir yapıya sahiptir.

1.1 Literatür Araştırması

Konu ile ilgili geniş bir literatür taraması yapılmış ve bu çalışmaya ışık tutabilecek araştırmalardan bazıları aşağıda kısaca sıralanmıştır.

Chandran ve diğ. [6], katıların akışkan yatak kurutulması üzerine yaptıkları çalışmada, reçine ve kumun akışkan yatak kurutucuda kurutulmasını inceleyip bir kinetik model çıkarmışlardır. Kurutma kinetiği modelinde, bir sabit hız periyodunu bir azalan hız periyodunun izlediği ve katıların karışımının ideal karışım olduğu kabûlleri yapılmıştır. Sürekli akışkan yatak kurutucuya bir spiral takılarak performansı artırılmış ve geliştirilen spiral akışkan yatak kurutucunun performansının yüksek Peclet sayısında, kesikli akışkan yatak kurutucunun performansıyla, düşük Peclet sayısında ise tekil sürekli akışkan yatak kurutucunun performansıyla benzeşmekte olduğu görülmüştür. Deneylerde katıların farklı nem içerikleri, partikül büyüklükleri, katı tipleri, fazların akış debileri, ortam sıcaklığı gibi parametrelerin etkileri incelenmiştir. Sabit kuruma hızı periyodunda kuruma hızı, hava sıcaklığı ve debisinin artışı ile artmış, partikül boyutu ve yatak yüksekliğinin artması ile azalmıştır.

Dimatti ve diğ. [7], ilkbahar buğdayının kesikli çalışan bir akışkan yatak kurutucuda kurutulması üzerine yaptıkları çalışmada, yatak yüksekliği, hava hızı, katının başlangıç nem içeriği ve hava sıcaklığının kuruma hızı üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Hasattan hemen sonra oldukça yüksek neme sahip buğdaya benzetebilmek amacıyla buğdaylar şartlandırılmıştır. Şartlandırılmış buğday için gaz hızı ve yatak yüksekliğinin kuruma hızları üzerinde herhangi bir etkisi olmadığı; ancak, çok daha yüksek derecede yüzey nemine sahip buğdayın gerek hava hızına gerekse sıcaklığa bağlı kuruma karakteristikleri gösterdiği sonucuna varılmıştır. Yatak içerisinde iyi bir karışım elde edildiğinden, sıcaklık dağılımının üniform olduğu ve kuruma süresinin diğer kurutma cihazlarına nazaran çok daha kısa olduğu tespit edilmiştir.

Thomas ve Varma [8], granül gıdaların akışkan yatakta kurutulması üzerine yaptıkları çalışmada, farklı hava sıcaklık ve debilerinde, farklı büyüklüklerde granül gıdaların (yeşil biber ve hardal) kesikli akışkan yatakta kurumalarını deneysel olarak incelemişlerdir. Kuruma kinetiği için büzülen gövde modeli teklif edilmiş ve deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Malzemelerin her birinin kurumada sabit hız ve azalan hız periyotları görülmüş ve malzemenin yapısına bağlı olarak azalan hız periyodunun lineer olmayabileceği tespit edilmiştir. Sabit hız periyodu

için hız sabiti ve kritik nem içeriğinin, partikül boyutu ve katıların kütlesinin yanısıra ısıtma ortamının sıcaklık ve hızına bağlı olduğu bulunmuştur. Kesikli akışkan yatak kurutucudan elde edilen kuruma kinetiği kullanılarak, katıların ideal karışımının gerçekleştiği kabulüyle, sürekli akışkan yatak kurutucunun performansı belirlenmiştir.

Can ve Eryener [9], güneş enerjisi ile ısıtılmış hava yardımıyla kabak çekirdeği kurutulmasını teorik ve deneysel olarak araştırmış ve kurutma kinetiğine etki eden ve kuruma hızını artıran en önemli parametrenin kurutma havası sıcaklığı olduğunu tespit etmişlerdir. Kabak çekirdekleri, tek tabaka halinde tepsili bir kurutucuda doğal ve cebri konveksiyonla kurutulmuş ve kuruma eğrileri çıkarılmıştır.

Krell ve diğ. [10], katıların akışkan yataktaki akış rejimleri ve ısı ve kütle transferini incelemiş, bu konuyla ilgili en önemli ampirik korelasyonları karşılaştırıp tartışmışlardır. Bu korelasyonlar deneysel incelemeler neticesinde türetildiğinden, farklı şartlar için uygulamaya koymadan önce gerekli kabûllerle yeniden düzenlenilmesi gerektiği vurgulanmıştır.

Abid ve diğ. [11], mısır tanelerinin akışkan yatakta kurutulması sırasındaki ısı ve kütle transfer mekanizmalarının deneysel ve teorik analizini yapmışlardır. İnert partiküller içeren bir akışkan yataktaki mısır tanelerinin kurutulması üzerine yapılan bu kinetik çalışma, ısı ve kütle transfer mekanizmalarının öncelikle malzemenin içyapısı tarafından sınırlandırıldığını göstermektedir. Isı ve kütle transfer mekanizmalarının analizi, Luikov'un tersinmez termodinamik esasına dayalı modelinden hareketle yapılmıştır. İnert partikül olarak kum kullanılmış ve sabit kuruma hızı periyodu görülmemiştir.

Kannan ve Varma [12], katıların kesikli akışkan yatakta kurutulması için bir model önermiş ve bu modelde yatağın, katı fazı, ara gaz fazı ve kabarcık fazı olmak üzere üç faza ayrılabilceği ve bu fazlar arası ısı ve kütle transferinin olduğu kabûllerini yapmıştır. Model, kabarcık büyüklüğü, kabarcık yükselme hızı ve kabarcık hacim kesrini dikkate almakta, sabit ve azalan kuruma hızı periyotlarını da kapsamaktadır. Kullanılan model sonuçları, bu çalışmada elde edilen deneysel veriler ve literatürdeki verilerle karşılaştırılmıştır.

Prasad ve diğ. [13], durgun, yarı-akışkan, akışkan kurutma şartlarının sağlanabildiği laboratuvar tipi bir kurutucu tasarlamış ve imal etmiştir. Bu üç şart için ham pirincin kurutma deneyleri yapılmış, kurutma işleminde kurutma havası akış debisi ve sıcaklığının kurutma süresi ile verimi üzerindeki etkileri analiz edilerek optimum kurutma şartları tespit edilmiştir. Ayrıca, farklı oranlarda taze havayla karıştırılan kurutma havasının sirkülasyonunun toplam kurutma verimi üzerindeki etkisi incelenmiştir.

Dutta ve Bhadwaj [14], küresel tahılların kuruma davranışını inceleyen bir çalışma yapmışlardır. Çalışmalarında, küresel şekilli tahıllar için difüzyon eşitliğinin çözümünde Crank-

Nicholson implicit numerik metodu uygulanmış ve elde edilen nümerik veriler genel olarak küresel bir tanenin kuruma karakteristiklerini sergileyen eğriler olarak sunulmuştur.

Kiranoudis ve diğ. [15], katıların kurutulmasında sürekli işlem gören kurutucu tiplerinin seçimi üzerine bir çalışma yapmıştır. Konvektif endüstriyel tip kurutucuların seçimleri, tasarımları ve birbirine olan işlevsel üstünlükleri üzerine kurulu olan çalışmalarında, özellikle konveyör-kayış, akışkan yatak ve dönel kurutucuların tasarım ve işlem performansları araştırılmıştır.

Uçkan [16], akışkan yataklı sistemlerde tanecikle gaz arasındaki ısı ve kütle geçişi karakteristiklerini araştırmıştır. Çalışmasında, ısı, kütle ve momentum geçişi arasındaki benzeşim incelenmiş, ısı ve kütle geçişi katsayılarını veren eşitlikler toplu olarak sunulmuştur.

Mohr (1992), kurutma koşullarında biyolojik ürünler içinden nem transportunun kinetiği çalışmasında, belirli kurutma koşullarında, bazı biyolojik ürünler (patates, elma, ekmek mayası, yumurta akı) içinden nem transportunun kinetiği ile ilgili deneysel sonuçları incelemiş ve efektif nem transport katsayılarını tesbit etmiştir [17].

Syahrul ve diğ. [2], nemli katıların akışkan yatakta kurutulmasının termal modellemesini yapmış ve bu modeli, literatürde mısır için yapılan deneysel sonuçlarla doğrulamıştır. Giriş havası sıcaklığı, hava hızı ve malzemenin başlangıç nem içeriğinin etkilerini araştırmak için parametrik bir inceleme yapılmış, mısırın nem içeriğinin düşmesiyle ve dolayısıyla kuruma zamanının artmasıyla, akışkan yatak kurutmanın termal etkinliğinin ani olarak düştüğü belirlenmiştir. Bu da malzemeden olan nem transferinin ziyadesiyle hava sıcaklığı, hava hızı ve malzemenin nem içeriğine bağlı olduğunu göstermektedir.

Ratti ve Crapiste [18], farklı kurutma şartları altında bir laboratuvar tipi tepsili kurutucuda patates, elma ve havuç dilimleri için deneysel kuruma eğrileri elde ederek, gıdaların kurutulması sırasındaki ısı transfer katsayılarının elde edilmesi üzerine bir çalışma yapmıştır.

Sharma ve diğ. [19], güneş enerjili kabin tipi bir sebze ve meyve kurutucusu tasarlamış ve yarı-endüstriyel olarak tanımlanan bu kurutucuda üzüm, kayısı ve domatesin kurutulmasına ait bir seri deney yaparak kurutucunun deneysel performansını tespit etmişlerdir.

Cronin ve Kearney [20], tepsili bir sebze kurutucusu için ampirik Page eşitliğini temel alan bir model kurmuş ve Monte Carlo tekniği ile çözmüşlerdir. Söz konusu çalışmada, sabitleri ve istatistik verileri elde etmek amacıyla bir seri deney yapılmıştır.

Raghavan ve Langlois [21], sürekli akışlı dönel tamburlu bir tünel tahıl kurutucu imal etmişlerdir. Katı parçacıklar arası ısı transferinin hedeflendiği bu çalışmada ısı transferini artırmak ve dolayısıyla daha hızlı bir kuruma elde etmek için granül inert bir ortam kullanılmakta, silindirik kurutucu içerisine alınan tahıl, ısıtılmış olan bu granül ortamla karıştırılmaktadır. Granül haldeki madde, silindirik kurutucunun iç kısmından bir helezon ile

taşınmakta ve silindirin dış kısmındaki ceketle ısıtılarak dolaştırılmaktadır. Tahılın girişte ısıtıcı ortam ile karıştırılması, silindirik tünel içerisinde ilerlemesi, tahılın kuruması ve granül ortamdan ayrılması işlemlerinin tamamı tambur içerisinde gerçekleşmektedir.

Militzer [22], konvektif kurutucuların termo-ekonomik modeli ve optimizasyonu üzerine bir çalışma yapmıştır. Bu çalışmada, kurutucu optimizasyonu için maliyet ve işlem modelleri üzerine kurulu genel bir yaklaşım önerilmiş ve örnek olarak sürekli akışlı bir akışkan yatak kurutucu kullanılmıştır.

Verdijck ve diğ. [23], patates nişastasının pnömatik kurutulmasına ait bir modelleme yapmıştır. Bu çalışmada, beslemedeki değişimlerin sonucu olarak ortaya çıkan ürün kalitesindeki değişikliklerin modellenmesi amacıyla endüstriyel bir pnömatik kurutucunun dinamik bir modeli kurulmuştur.

Levy ve Borde [24], pnömatik bir kurutucuda yoğun olmayan faz akışı için bir boyutlu kararlı hâl matematiksel modeli geliştirmiş ve bu modeli büyük ölçekli bir pnömatik kurutucuda nemli PVC partiküllerinin kurutulmasına uygulamışlardır. Radford [25] ise pnömatik taşımali sistemlerdeki partikül kurumasını incelemiş ve bir model geliştirmiştir.

Belegina ve Crapiste [26], gıda partiküllerinin pnömatik kurumasını modellemiş ve bu modeli patates partiküllerinin farklı şartlar altındaki kurutulmasını simule etmek için uygulamışlardır. Ayrıca bu çalışmada, hava hızı, hava sıcaklığı ve partikül büyüklüğünün etkisi incelenmiştir.

Bu çalışmada ise, “sürekli tip-zıt akışlı bir konvektif-radyatif düşey kurutucu” geliştirilmiş, bu kurutucunun kurutma parametrelerinin belirlenmesi için farklı hava hızlarında ve sıcaklıklarında ayçekirdeği ve soya fasulyesi ile deneyler yapılmıştır.

2. TEMEL TANIMLAR

2.1. Nem İçeriği

Bir malzemedeki nem miktarı yaş veya kuru baza göre, ondalık ya da yüzde olarak, ifade edilebilmektedir. Yaş baza göre nem M_{yb} , bir üründe bulunan su kütlesinin kurutulmamış malzeme kütlesine oranı olup,

$$M_{yb} = \frac{W_s}{W_o} \quad (2.1)$$

eşitliğiyle ifade edilmektedir [2, 62]. Kuru baza göre nem M_{kb} ise, üründe mevcut olan su kütlesinin ürünün kuru madde kütlesine oranı olup,

$$M_{kb} = \frac{W_s}{W_k} \quad (2.2)$$

eşitliğiyle ifade edilmektedir. Bu eşitliklerde, malzemedeki su kütlesi, başlangıç kütlesi ve kuru madde kütlesi sırasıyla W_s , W_o , W_k ile temsil edilmektedir. Yaş ve kuru baza göre nem içerikleri aşağıdaki eşitlikler yardımıyla birbiriyle ilişkilendirilmiştir [62]:

$$M_{yb} = 1 - \left[\frac{1}{(M_{kb} + 1)} \right] \quad (2.3)$$

$$M_{kb} = \left[\frac{1}{(1 - M_{yb})} \right] - 1 \quad (2.4)$$

Ağırlık kayıplarının ölçüldüğü kurutma deneylerinde, malzemenin herhangi bir t zamanındaki nem içeriği (M_{tkb} ve M_{tyb}) aşağıdaki eşitlikler yardımıyla hesaplanabilmektedir [62]:

$$M_{tkb} = \left[\frac{(M_{okb} + 1)W_t}{W_o} \right] - 1 \quad (2.5)$$

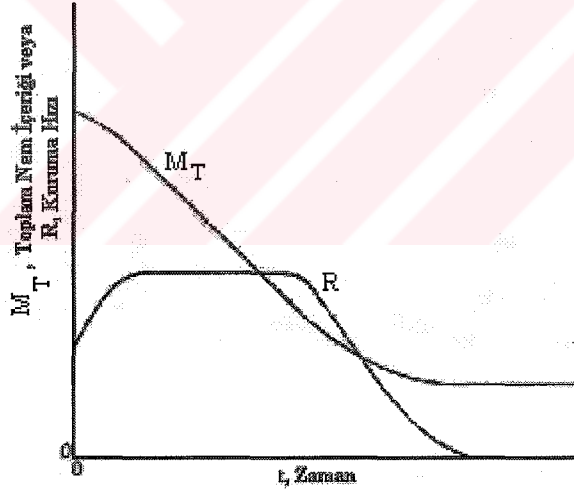
$$M_{tyb} = 1 - \left[\frac{(1 - M_{oyb}) W_o}{W_t} \right] \quad (2.6)$$

Burada; W_t malzemenin herhangi bir t zamanındaki kütlesi, M_{okb} ve M_{oyb} ise sırasıyla malzemenin başlangıçtaki kuru ve yaş baza göre nem içeriklerini göstermektedir.

Bir kurutma işleminde kurutma havası genellikle tamamen kuru olmayıp bir miktar nem içermektedir ve belirli bir rölatif neme sahiptir. Dolayısıyla, kurutma sonundaki maddenin nem içeriği, giriş havası nem içeriğine tekabül eden denge nem içeriğinden daha az olamamaktadır. Giriş havasıyla uzaklaştırılamayan yaş katı içerisindeki suyun bu bölümüne denge nemi denir[5].

2.2. Kuruma Hızı

Birim zamanda birim alandan buharlaşan su kütlesi kurutma hızını belirlemektedir. Kaliteli ürün eldesi ve ısı ekonomisi bakımından kurutma hızı önem taşımaktadır. Şekil 2.1’de toplam nem içeriği ve kuruma hızının zamanla değişimleri görülmektedir [5].

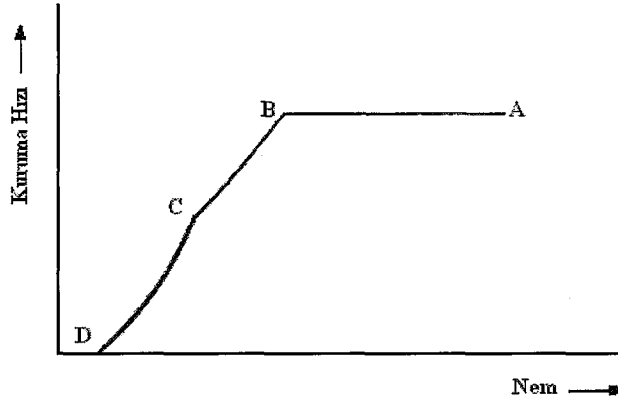


Şekil 2.1 Toplam nem içeriği ve kuruma hızının zamanla değişimleri

(M_T-t) grafiğinde kurutma süresi ilerledikçe toplam nem içeriği düşmektedir. Kısa bir süre sonra katı buharlaşma sıcaklığına kadar ısıtıldığında, grafik lineer olarak azalmakta ve yataya asimptot olarak kurutma sonlanmaktadır. $(R-t)$ grafiğinde ise kuruma hızı önce sabit kalmakta, sonra azalmakta ve malzeme denge nem içeriğine ulaştığında sıfır olmaktadır [5].

Hava ile kurutma işlemi, biri sistemin buharlaşmakta olan saf sudan ibaret olduğu düşünülen kurutma (sabit kuruma hızı periyodu), diğeri ise madde içi kontrolle oluşan kurutma

(azalan kuruma hızı periyodu) olmak üzere temel iki kısımdan oluşmaktadır [30]. Lewis(1921), Sherwood (1929) ve diğer pek çok araştırmacı kuruma işleminin “sabit hız periyodu” ve bir ya da iki “azalan hız periyodu”na ayrılabilirdiğini göstermişlerdir [31]. Şekil 2,2’deki kuruma hızı-nem içeriği grafiğinde, A-B sabit kuruma hızı periyodunu, B-C birinci azalan kuruma hızı periyodunu, C-D ise ikinci azalan kuruma hızı periyodunu göstermektedir.



Şekil 2.2 Karakteristik bir kuruma eğrisi

2.2.1. Sabit Kuruma Hızı periyodu

Sabit kuruma hızı periyodunda kütle transferi, katı maddenin yüzeyindeki sıvı filminden buharlaşma ile gerçekleşmektedir. Islak kaldığı sürece katı maddenin yüzey sıcaklığı, havanın yaş termometre sıcaklığına eşit olarak değişmekte, hava sıcaklığı sabitse sabit kalmaktadır. Ancak, katı maddeye, radyasyonla veya sıcak yüzeylerle direk temas sonucu iletimle ısı transferi olması durumlarında yüzey sıcaklığı, yaş termometre sıcaklığından yüksek olmaktadır; bu durumda ara yüzeydeki buhar miktarı yükselmekte ve kuruma hızı da buna bağlı olarak artmaktadır [5].

Katı maddenin içinden yüzeye transfer edilen sıvı miktarı yüzeyde buharlaşan sıvı miktarına eşit olduğu sürece yüzey ıslak kalmaktadır. Böylece katıdan nemin uzaklaştırılması, katı madde çevresindeki şartlar tarafından kontrol edilmektedir. Isı ve kütle transferine karşı direnç sadece hava akımına bağlı olduğundan, sabit hava şartları için kuruma hızı zamanla değişmemektedir [9, 30].

Yüzey buharlaşma hızı, malzemeyi çevreleyen durgun hava içerisindeki buhar filminden gerçekleşen su buharı difüzyon hızıyla elde edilir ki bu hız, yaş termometre sıcaklığındaki malzeme yüzeyinde ve kurutma havasında kısmî su buharı basınçları arasındaki fark ile orantılıdır. Difüzyon hızı, artan hava hızı ile artmaktadır; çünkü durgun buhar film

kalınlığı azalmaktadır. Bu periyotta kuruma hızı serbest bir sıvı yüzeyinden gerçekleşen buharlaşma için geliştirilen korelasyonlardan kolaylıkla hesaplanabilmektedir. Bu hesaplamalar, Eşit.2.1 de görüldüğü gibi, ısı veya kütle transferini temel almaktadır [5, 18, 19, 30–32].

$$\frac{dM}{dt} = \frac{h_T A \Delta T}{L} = \frac{h_m A \Delta P_v}{R_v T} \quad (2.1)$$

Bu eşitlikte; T mutlak sıcaklık, h_T konvektif ısı transfer katsayısı, A yüzey alanı, ΔT kurutma havasının kuru ve yaş termometre sıcaklıkları farkı, h_m konvektif kütle transfer katsayısı, ΔP_v yaş termometre sıcaklığındaki malzeme yüzeyindeki ve kurutma havasındaki kısmî su buharı basınçları farkı, L suyun buharlaşma ısısı ve R_v ise su buharı için gaz sabitidir [31].

2.2.2. Azalan Kuruma Hızı periyodu

Sabit kuruma hızı periyodunun sonunda madde içinden yüzeye olan nem göçü artık serbest su yüzeyinden gerçekleşen buharlaşma miktarını karşılayamamaktadır [30]. Yüzeye olan nem akış hızının artık buharlaşma hızına eşit olmadığı bir kritik noktaya ulaşılmaktadır. Katının başlangıç nem içeriği azalan kuruma hızı periyodunun başlangıcı olan bu kritik noktanın altında ise sabit kuruma hızı periyodu oluşmamaktadır[30]. Azalan kuruma hızı periyodunda, kurutulan katı maddenin yüzeyinde bazı kuru kısımlar oluşmaya başlamakta ve bazı kısımlar da ıslak kalmaya devam etmektedir. Böylece, buharlaşma yüzeyi azalmakta ve dolayısıyla toplam yüzey için kuruma hızı düşmektedir [31].

Devam eden kurutma işlemi ile birlikte yüzeyin her tarafı tamamen kurumakta ve faz değişim düzlemi katı maddenin içine çökmektedir. İkinci azalan kuruma hızı periyodu olarak adlandırılan bu periyotta kuruma hızı tamamen madde içi nem hızı tarafından kontrol edilmektedir [31]. Nem malzemenin iç kısımlarından arafaz yüzeyine sıvı difüzyonuyla gelmekte ve kuru bölgeden buhar difüzyonuyla geçmektedir. Kuru ve nisbeten nemli bölge arasındaki sınır yüzeyi malzemenin iç kısımlarına doğru hareket etmekte ve kuruma hızı daha da düşmektedir [32]. Buharlaşma ısısı buharlaşma bölgelerine iletimle transfer edilmekte ve katı yüzey sıcaklığı havanın kuru termometre sıcaklığına yaklaşmaktadır [5].

Azalan kuruma hızı periyodu, kütle transferi kontrolünün -genellikle- madde içerisinde yer alması sebebiyle oldukça karmaşık bir olaydır. Bu periyottaki ısı ve kütle transferini ifade eden kısmî diferansiyel denklemlerinin çözümü, özellikle büzülme etkisi ve nem içeriği ile sıcaklığa bağlı özellikler dikkate alındığında, oldukça zaman alan önemli hesaplamaları

gerektirmektedir [18]. Sabit kuruma hızı periyodunda kuruma hızı basit hesaplamalarla tespit edilebildiğinden, kuruma teorileri genellikle azalan kuruma hızı periyodu ile sınırlıdır [31].

2.2.3. Kuruma Hızına Etki Eden Faktörler

Kuruma hızı, ısı ve kütle transferine etki eden faktörler tarafından kontrol edilmektedir. Bu faktörlerin başlıcaları, hava ile kurutmada havanın sıcaklığı, nemi ve kurutucudaki hızı, kurutulacak maddeye maksimum yüzey alanı kazandıracak geometrik düzenleme (parça iriliği, şekli, yığın kalınlığı v.s.) ve kurutulan maddenin başta kimyasal bileşimi olmak üzere kendine özgü yapısal özellikleridir [1].

Sabit kuruma hızı periyodunda kuruma hızı, ısı ve kütle transfer katsayılarına, kurutma havası ile temas eden madde yüzey alanına, numûnenin geometrisine ve katının ıslak yüzeyi ile gaz akımı arasındaki sıcaklık ve nem farkına bağlıdır. Madde içindeki nem akış mekanizması bu periyotta kuruma hızını etkilememektedir [31].

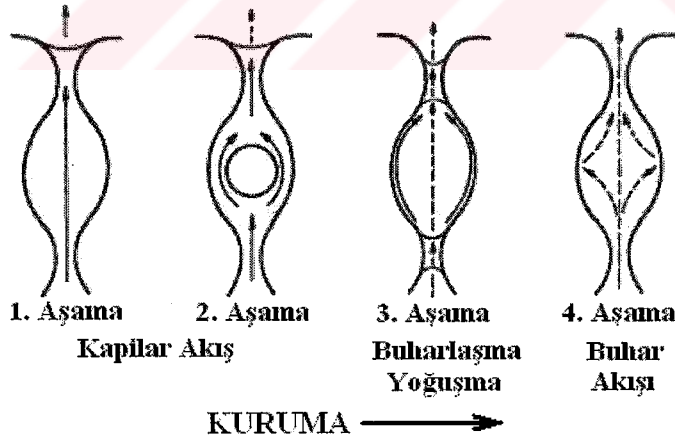
Kurutma hızına etki eden -kurutulan madde özellikleri dışındaki- faktörler optimize edilebilmektedirler. Mesela, hava hızı arttıkça kuruma hızı da artmaktadır. Kurutulan maddenin yüzeyinde kuruma sırasında, sürekli durgun bir buhar filmi mevcuttur. Bu film sürekli olarak uzaklaştırılarak filmin oluşması önlenirse suyun yüzeyden buharlaşma hızı artar. Böylece hava hızı, bu buhar filmini devamlı olarak sürüklemek suretiyle kuruma hızını artırıcı yönde etkide bulunmaktadır. Ancak hava hızı gibi optimize edilebilecek diğer faktörler, kurumanın başlangıç aşamalarında çok etkiliyse de, kurumanın ileri aşamalarında kuruma hızını, kurutulmak istenilen maddenin özellikleri ve dolayısıyla nem hareket mekanizmaları nispeten belirlemektedir; çünkü kuruma hızı, alt tabakalardaki suyun yüzeye taşınma hızı ile sınırlıdır [1].

3. NEM HAREKET MEKANİZMASI VE KURUTMA TEORİLERİ

3.1. Nem Hareket Mekanizması

Literatürde bir katı içerisindeki nem hareketi için aşağıdaki muhtemel mekanizmaların bulunduğu belirtilmektedir. Konsantrasyon gradyentleri sebebiyle sıvı difüzyonu, kısmî buhar basıncı gradyentleri sebebiyle buhar difüzyonu (sıcaklık gradyentlerinden dolayı), kapiler kuvvetler sebebiyle sıvı hareketi, toplam basınçtaki farklılıklar sebebiyle sıvı veya buhar akışı (dış basınç, büzülme, yüksek sıcaklıklar ve kapileriteden dolayı), effüzyon (knudsen) akışı (buhar moleküllerinin ortalama serbest yolu yaklaşık olarak gözeneklerin çapı kadarsa bu akış gerçekleşir) [31].

Gözenekli bir katının kurutulması sırasında meydana gelen nem hareketi Şekil 3.1’de görülmektedir. Kurutmanın başlangıcında yani sabit kuruma hızı periyodunda, malzeme tamamen ıslaktır ve hidrolik bir gradyent altında sıvı akışı oluşmaktadır (1. aşama). Bu durumda, tüm buhar basıncını kullanarak bağlarından kurtulan nem, yüzeye ve en geniş kapilerlere ilerlemektedir. Kaybolan nemin yerini almak üzere hava kesecikleri şekillenmektedir (2. aşama). Yüzey yaklaşık olarak yaş termometre sıcaklığındadır. Gözenek ve kapillerlerin çaplarında küçülme vardır ve büzülme hacmi yaklaşık olarak buharlaşan su hacmine eşittir.



Şekil 3.1 Gözenekli bir katının kurutulması sırasında meydana gelen nem hareketi

Nem büyük ölçüde kapilariteyle transfer edilmektedir ve daha ileri kurutmayla nem içeriği azalır, eşzamanlı bir buhar hareketi başlar. Sıcaklık yaş termometre sıcaklığının üstüne yükselir; artık su, difüzyonla da hareket etmektedir.

Daha sonra kuruma hızı ani olarak düşer. Artık en ince kapillerlerde tutulmakta olan nem kapiler duvarları boyunca veya birbirini izleyen buharlaşma ve yoğuşma yoluyla sıvı köprüleri arasından ilerleyebilir (3. aşama). Bu, De Vries'in (1957) tanımladığı sıvı destekli buhar transferidir [31]. Su buharı kısmî basıncı düşmektedir. Büzülme hâlâ mevcuttur, fakat çok az seviyededir. İlerleyen kuruma safhasında artık malzemenin tüm iç kısımları kurumaktadır (4. aşama).

3.2. Kurutma Teorileri

Kurutma, madde yüzeyi ve çevresi arasında ve madde içinde ısı ve kütle transferinin olduğu karmaşık bir termofiziksel ve fizyokimyasal bir işlemdir [14]. Isı ve kütle transferinin iç içe birlikte gerçekleşmesi sebebiyle kurutma sırasındaki mekanizmalar oldukça karmaşıktır. Ayrıca, kurutulacak malzemelerin çeşitliliği ve yapıların karmaşıklığı üniversal, ittifakla kabûl edilen bir kinetik modele müsaade etmemektedir. Oluşan işlemlerin daha iyi anlaşılması ve yeterli bir kinetik modelin seçilmesi için deneysel çalışmaların da yapılması önemlidir [11].

Kurutma sırasında nem, sıvı veya buhar fazında veya her iki halde hareket edebilir. Dolayısıyla, bir kurutma işleminde sıvı difüzyon teorisi, kapılar teori veya buharlaşma-yoğuşma teorisinin tek başına kullanımı, kuruma işleminin fiziksel manasına ters düşmektedir. Bu teoriler temel ve birbirlerini tamamlayıcı niteliktedirler ve bunlar temel alınarak yeni teoriler üretilmiştir.

3.2.1. Sıvı Difüzyon Teorisi

Lewis (1921), Newman (1931), Sherwood (1929) ve diğer pek çok araştırmacı bir katının kurumasında nem hareketinin sıvı difüzyonu ile olduğunu genel akış mekanizması olarak teklif etmiştir [31]. Bu sebeple Fick Difüzyon eşitliği,

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \nabla(K_L \nabla M) \quad (3.1)$$

sabit difüzyon katsayıları, izotropi, veya 1. dereceden sınır şartları gibi çeşitli kabûllerle kullanılmıştır [31].

Araştırmacılar, sıvı difüzyon teorisini özellikle gıda ve hububat kurutulmasında tercih etmişlerdir. Becker ve Sallans (1956), Bakker-Arkema ve Hall (1965), Hamdy ve Johnson

(1968), Henderson (1974) difüzyon eşitliklerinin çözümünü kullanmış ve difüzyon katsayısını sabit veya lineer olarak sıcaklık ve/veya konsantrasyona bağlı; ya da Arrhenius tipi,

$$K_L = K_{L0} \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \quad (3.2)$$

olarak kabul etmişlerdir (E aktivasyon enerjisi, R gaz sabiti, T mutlak sıcaklık) [31].

Difüzyon teorisinde büzülme, sertleşme veya sorpsiyon izotermi dikkate alınmamakta difüzyon katsayısı ise fiziksel manasını yitirmektedir. Sıvı difüzyonunun kurumunun tüm safhalarında nem transferi için tek bir mekanizma olması kabûlü pek çok eleştiriye marûz kalmıştır. Difüzyon denklemlerinin, bazı katılar için alınan deneysel değerlerle uyum sağladığı araştırmalar varsa da, bu denklemlerin fiziksel geçerliliği problemi mevcuttur. Sıvı difüzyon teorisinin kabûl görmesindeki muhtemel sebep, difüzyon denklemlerinin çözümünün logaritmik davranışının deneysel kuruma eğrilerine olan benzerliğidir.

3.2.2. Kapılar Teori

Kapilarite, sıvı ve katı arasındaki moleküler etkileşim sebebiyle bir katı içerisindeki ara yüzeylerden veya katı yüzeyi üzerinden olan bir sıvı akışıdır. Bu olayı ilk kez Buckingham “kapilar potansiyel” kavramı ile analiz etmiştir.

Kapiler potansiyel Ψ , bir kılcal damardaki kıvrımlı hava-su ara yüzeylerindeki su ve hava arasındaki basınç farkıdır. Bu ara yüzey, suyun yüzey gerilmesi sonucunda ortaya çıkar. Kapilar-sıvı akışı için ,

$$J_L = -K_H \nabla \Psi \quad (3.3)$$

eşitliği yazılabilir. Burada Ψ kapiler potansiyel ve K_H ise doymamış hidrolik iletkenliktir.

İzotermal şartlar için kapiler potansiyelin genellikle nem konsantrasyonu gradyenti ile orantılı olduğu kabûl edilir. Bu durumda yukarıdaki denklem,

$$J_L = -K_H \rho_s \nabla M \quad (3.4)$$

halini alır (ρ_s katı yoğunluğu) . Burada,

$$K_H = \frac{\sigma \cos \theta}{4\mu r^2 f(r)} \int_0^{r_1} r^2 f(r) dr \quad (3.5)$$

olup, $f(r)$, r yarıçapındaki gözenek büyüklüğü dağılımı için diferansiyel eğri; r_0 , r_1 , kapillerlerin yarıçaplarının sırasıyla minimum ve maksimum değerleri; μ dinamik viskozite, σ yüzey gerilmesidir [31].

Ceaglske ve Hougen (1937) granül katıların kurutulmasında su akışının tamamen kapiler kuvvetlerle gerçekleştiğini ve dolayısıyla su konsantrasyonundan bağımsız olduğunu belirtmiş, bir deneyle nem akışının artan konsantrasyon doğrultusunda olabileceğini göstermişlerdir [31]. Miller ve Miller (1955) ise bunu, itici kuvvetin yüzey gerilmesi olmasına bağlamışlardır. Katıların iç ara yüzeylerinde bulunan suyun hareketi yerçekimi ve kapilarite ile olmaktadır. Hougen ve arkadaşları (1940), kağıt, deri, boya pigmentleri, mineraller, kil, toprak ve kum gibi ince tozlar, ve granül katıların kurutulmasında kapiler sıvı akış denkleminin uygulanabileceğini belirtmiştir [31].

Gıda kurutulmasında, kapiler akış genellikle kurumanın yüksek nem içeren ilk safhasında temel mekanizmalardan biri olarak kabûl edilmiştir.

3.2.3. Buharlaştırma-Yoğuşma Teorisi

Henry (1939), bir katının gözenekleri içerisindeki bir maddenin diğer bir maddeye difüzyonu üzerine çalışmalar yapmıştır [31]. Teorisinde difüze eden maddeyi sadece buhar ile sınırlandırmamasına rağmen, çalışmada ve bunu temel alan tüm modifiye edilmiş modellerde nemin tamamen gaz fazında hareket ettiği kabûl edilmiştir. Henry, eş zamanlı ısı ve kütle difüzyonunu dikkate alan bu teorisi, gözeneklerin katı içerisinde bir sürekli boşluklar ağı olduğu ve ayrıca difüzyon katsayısının sabit olduğu kabûllerini yapmıştır.

Buhar fazındaki nem hareketi Gurr ve arkadaşları (1952), ile Kuzmak ve arkadaşları (1957) tarafından kanıtlanmıştır [31]. Yaptıkları deneysel çalışma sonucunda, toprak gibi gözenekli bir malzemede, sıcaklık gradyenti sebebiyle suyun hareket etmesi durumunda, sıvı fazda bir akışın olmadığını bulmuşlardır. Dolayısıyla akış buhar fazında oluşmaktadır. Ancak bir basınç gradyenti varsa, akış tamamen sıvı fazda oluşur.

Harmathy (1969), Henry'nin modelini daha da geliştirerek buharlaştırma-yoğuşma teorisi kabûllerini esas alıp sistemin tüm nem içeriğini, sıcaklık ve basıncını veren bir denklem sistemi elde etmiştir [31]. Harmathy, kapilar akış mekanizmasının Bagnoli'nin ifade ettiği gibi düşen hız periyodu başlangıcında yegâne mekanizma olmadığını, aynı zamanda difüzyonla buhar transferinin de oluştuğunu belirtmiştir.

Henry'nin teorisini esas alan diğer bazı araştırmacılar tahıllardaki nem hareketi için biraz daha farklı modeller geliştirmişlerdir. Young (1969) modifiye edilmiş bir Lewis sayısı tanımlamıştır [31]. Bu değiştirilmiş Lewis sayısı 60'tan büyükse kurutma işlemini tarif etmek için kütle transfer denklemi tek başına yeterli, değilse ısı transferi önem arz etmektedir.

3.2.4. Luikov Teorisi

Luikov (1966), nemin termal difüzyonu buluşunu ortaya koymuş ve sıcaklık gradyentinin de malzemelerdeki nem transferine yol açan bir faktör olduğu belirlemiştir. Teorisini geliştirirken termodinamiğin tersinmezlik prensiplerini uygulamıştır [31].

Luikov, kapiler gözenekli katılarda ısı ve kütle transferi için buhar difüzyonu ve sıvı difüzyonu sebebiyle oluşan akıların iki bölümden oluştuğunu kabûl etmiştir. Bunlardan biri toplam konsantrasyon gradyenti ve diğeri ise sıcaklık gradyentidir. Böylece Luikov eşitlikleri,

$$\frac{\partial M}{\partial t} = K_{11} \nabla^2 M + K_{12} \nabla^2 T \quad (3.6)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = K_{21} \nabla^2 M + K_{22} \nabla^2 T \quad (3.7)$$

olarak ifade edilmektedir (M nem, T sıcaklık, K katsayı).

Gıda ve hububat kurutmada Luikov eşitlikleri özellikle Rusya'da yaygın olarak kullanılmıştır. Philip ve De Vries (1957), nem ve sıcaklık gradyantlerinin birlikte bulunduğu gözenekli malzemelerdeki nem ve ısı transferini ifade eden ve Luikov' un eşitliklerinin çok benzeri olan bir dizi eşitlik türetmiştir [31]. Biyolojik malzemelere uygulandığında her iki model de benzer sonuçlar vermektedir. Bu yaklaşımda temel olarak, suyun gerek buhar difüzyonu ve gerekse kapilarite ile hareket ettiği kabûl edilmektedir.

3.2.5. Krischer Teorisi

Krischer (1963), çeşitli gözenekli ortamlardaki ısı ve kütle transferinin geniş bir bilimsel analizini yapmış ve bu çalışması kurutma teorilerinin gelişiminde esas teşkil etmiştir [31]. Krischer' in teorisinde kurutma sırasında nem hareketinin sıvı fazda kapilariteyle, buhar fazında ise buhar fazındaki bir gradyent ile gerçekleştiği kabûl edilmektedir. Krischer eşitlikleri biraz modifiye edilmiş haliyle,

$$J_L = -K_L \rho_L \nabla M \quad (3.8)$$

$$J_v = -K_v \nabla P_v \quad (3.9)$$

olup, burada K_L ve K_v sırasıyla sıvı ve buhar difüzyiviteleridir.

Berger-Pei (1973), Krischer modelini temel alarak Berger-Pei modelini geliştirmiştir[31]. Berger-Pei modelinin dayandığı kabûllerden bazıları şunlardır: Sıvı transferi, kapiler akış ve konsantrasyon gradyentleri sebebiyle; buhar difüzyonu ise, buhar-basınç gradyentleri sebebiyle olmaktadır. Kurutma sırasında sıvı içeriği, kısmî buhar basıncı ve sıcaklık malzeme içerisinde herhangi bir yerde dengededir. Tüm kütle ve ısı transferi parametreleri sabittir. Fick difüzyon kanunu geçerlidir.

Krischer modeli çok çeşitli gıda malzemelerine uygulanmış ancak, Berger-Pei modeli biyolojik malzemelere uygulanmamıştır [31].



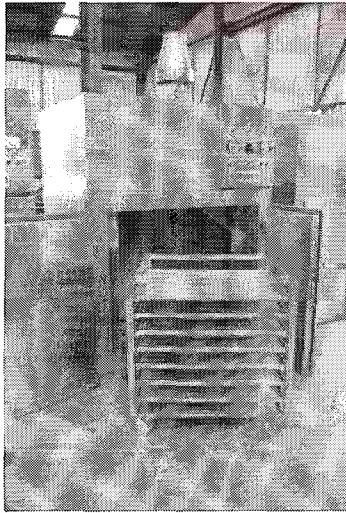
4. KURUTMA SİSTEMLERİ

19. yüzyılda üretim miktarlarının artmasıyla suni kurutucular kullanılmaya başlanılmış, ilk olarak 1840'larda tepsili kabin tipi kurutucular kullanılmıştır. Bu yüzyılın sonlarına doğru kurutma teknolojisindeki gelişmeler yoğunlaşmış ve günümüzde kullanılmakta olan kurutucuların pek çoğunun prototipleri teklif edilmiştir. Mesela, Alman Patent Kurumunun kurulmasından bir yıl sonra 1877'de bir radyant ısıtıcı kurutucu, üç yıl sonra bir vakum kurutucu ve 1896'da bir pnömatik taşınabilir kurutucu patenti alınmıştır. Günümüzde "modern" bir gelişme olarak adlandırılan ve üzerinde çokça çalışılan akışkan yatak kurutucu fikrinin bile elli yıllık geçmişi vardır [3].

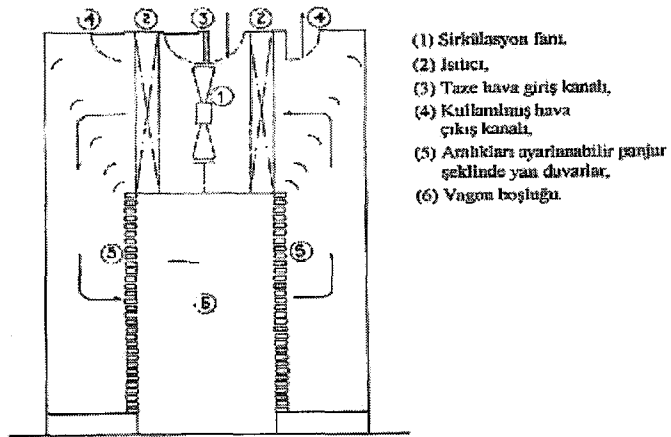
Kurutucular ve kurutma ile ilgili olarak her yıl Amerika'da 250'nin üzerinde; Avrupa'da ise yaklaşık 80 patent kabul edilmektedir. Pek çok yeni teknoloji önümüzdeki on veya yirmi yıl içerisinde konvansiyonel kurutucuların yerini alacaktır [4].

4.1. Kabin Kurutucular

Son yıllardaki çalışmaların çoğu sürekli tip kurutucular üzerinde yoğunlaşmış olmasına rağmen konvansiyonel tepsili kabin kurutucular da basit ve çok yönlü kullanımları sebebiyle hâlâ kullanılmaktadır [20]. Şekil 4.1'de bir kabin kurutucu konstrüktif ve şematik olarak gösterilmiştir.



a) Konstrüktif görüntüsü [39]



b) şematik resmi [1]

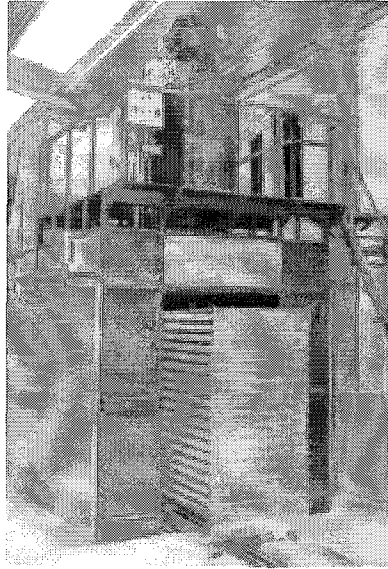
Şekil 4.1 Kabin kurutucu

Çok çeşitli kabin kurutucu tipleri varsa da hepsinin ilkesi aynıdır. Kurutulacak ürün, alt tarafı ızgara şeklindeki tepsilere yerleştirilir. Üst üste istif edilen tepsiler kurutma kabine alınır. Tüm kurutma işlemi boyunca tepsiler hareketsiz kalır. Sıcak hava, kabinin ayarlanabilen panjurlardan ibaret olan yan duvarlarından girerek tepsilerin arasından geçer ve yine aynı şekilde yan duvardan kabin dışına çıkarak ısıtıcıya ulaşır. İhtiyaca göre sıcak hava yanlardan yada alttan üste doğru dairesel bir hareketle de dağıtılabılır [1, 5, 33].

Kabin kurutucular geleneksel kesikli tip kurutuculardır. Bu kurutucularda yükleme ve boşaltma elle yapıldığından işçilik çok artmaktadır. Kabin kurutucularda karşılaşılan diğer önemli bir sorun da tepsiler üzerinde her yerde aynı kurutma hızının sağlanamamasıdır. Bunun başlıca nedeni, kurutucu içerisindeki yetersiz ve üniform olmayan hava hareketidir [33]. Sıcak havanın kurutma hücreğine ilk girdiği tarafta bulunan ürünün daha hızlı kurummasına karşın, diğer kısımlardaki ürünlerin kuruma hızı düşüktür. Bu sebeplerle kurutma sonunda kurutucunun farklı yerlerinden alınan ürünlerde üniform bir nem içeriği bulunmamaktadır. Bunu önlemek üzere hava sirkülasyon fanı zaman zaman pozisyon değiştirilerek çalıştırılır veya bu amaçla uygun pozisyona sabit olarak yerleştirilmiş çift fan kullanılır [1, 33].

4.2. Tünel Kurutucular

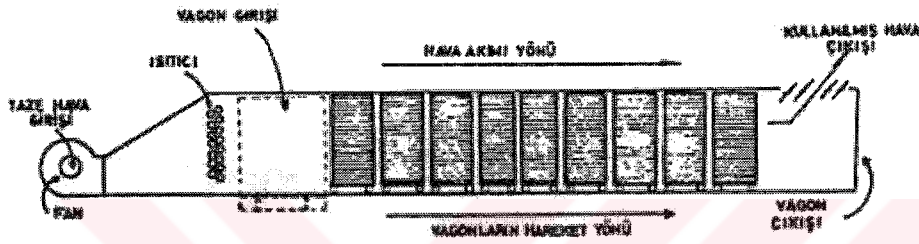
Tünel kurutucular, kabin kurutucuların daha gelişmiş şeklidir. Tünel kurutucuların kabin kurutuculardan en önemli farkı, sıcak hava ile temas halindeki tepsi istiflerinden oluşan vagonların, bir tünel boyunca ray üzerinde hareket etmesidir. Şekil 4.2 'de bir tünel kurutucu görülmektedir.



Şekil 4.2 Tünel Kurutucu [42]

Kurutulacak taze ürün taşıyan bir vagon tünele sokulurken, diğer uçtan kurumuş ürün yüklü olan başka bir vagon tünelden çıkar [1,33]. Ürünün nem içeriğinin istenilen değere düşürülebilmesi için kurutucuda kalma süresi yeterince uzun olmalıdır [33].

Hava ile ürünün birbirlerine göre hareket yönlerine göre paralel akışlı yada zıt akışlı tünel kurutucular mevcuttur [1, 20]. Hava ve ürünün aynı yönde ilerlediği paralel akışlı tünel kurutucularda sıcak hava, önce taze ürünle karşılaşır, gittikçe soğuyup nemi artarken, daha ileri düzeyde kurumuş olan ürünle temas eder. Şekil 4.3’de basit bir paralel akış tüneli şematik olarak gösterilmiştir [20].



Şekil 4.3 Basit bir paralel akış tüneli kurutucu [20].

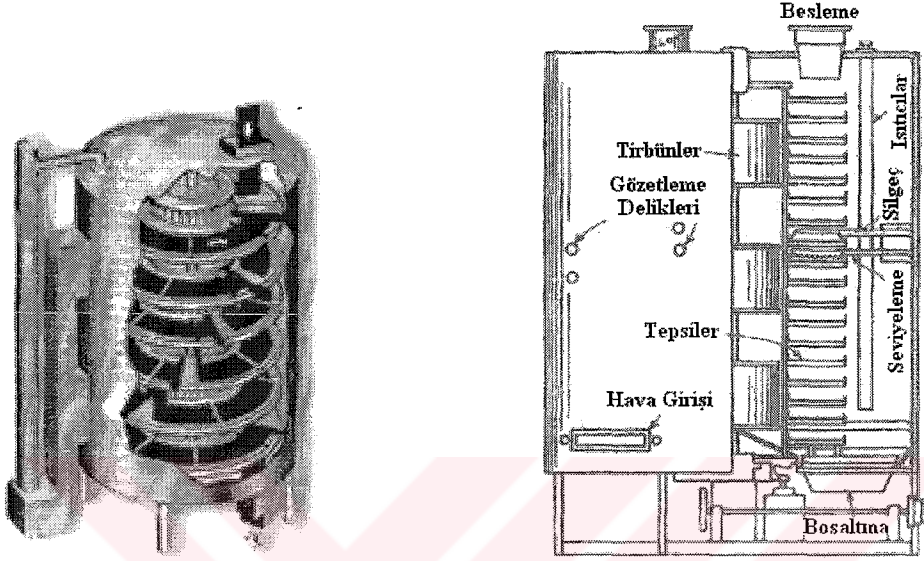
Meyve ve sebzelerin kurutulmasında en yaygın olan sistemler paralel veya zıt akış tünelleridir. Zıt akış tüneli ile paralel akış tünelinin kurutma karakteristikleri farklıdır. Paralel akış tünellerinde, başlangıçta kuruma hızı çok fazladır. Materyalin yüzeyi çok süratli kuruduğu için, yüzeyinde çok az bir buruşma belirir; fakat, parçacıkların içinde boşluk ve çatlaklar oluşur. Ayrıca kurutma tünelinin sonunda kurutucu hava nispeten soğuk ve fazla nemli olduğu için, kurutmanın son aşaması çok yavaş gerçekleşir.

Sıcak hava ile vagonların hareketinin birbirine zıt yönde olduğu zıt akış tünellerinde ise, madde kurudukça daha uygun kurutma şartları ile karşılaşır. Kurutmanın ilk aşamasında ürün, sıcaklığı nispeten daha düşük ve daha nemli hava ile karşılaştığından, kurutulan maddenin içinde nem dağılımındaki değişim fazla olmaz ve dolayısıyla, tam ve engelsiz bir buruşma olur. Zıt akış tüneli özellikle erik gibi yumuşak meyvelere çok uygundur. Aksi halde kurumanın ilk aşamasında bunlarda öz suyu dışarı akar [1].

Tünel kurutucuların prensip olarak aynı, ancak kurutulan malzemenin yapısına göre modifiye edilmiş çeşitleri vardır [33]

4.3. Turbo-Tip (Döner tepsi) Kurutucular

Turbo-tip kurutucular, kabin kurutuculara benzemekte olup ancak, sürekli işlem gören kurutuculardır. Şekil 4.4’de bir turbo-tip kurutucu konstrüktif ve şematik olarak gösterilmiştir.



a) Wyssmont patentli Turbo-Kurutucu® [43]

b) Turbo-tip kurutucunun şematik resmi [33]

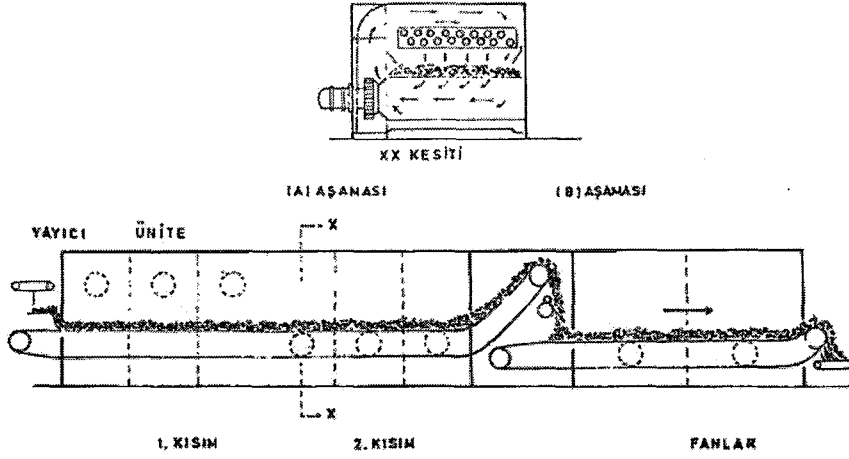
Şekil 4.4 Turbo-tip kurutucu

Turbo-tip kurutucularda, 60 dev/s ’den düşük bir devirle dönen düşey bir şaft çevresinde, belirli aralıklarla üst üste yerleştirilmiş dairesel tepsiler bulunmaktadır. Besleme en üst tepside yapılmaktadır. Tepsi döndükçe ürün bir süpürücü kol yardımıyla tepside bulunan açıklıktan bir alttaki tepsiye dökülmektedir. Bu yolla ürün kurutucunun en altına kadar ilerleyerek buradan boşaltılmaktadır. Kurutma gazı kurutucunun altından yukarı doğru hareket etmekte ve yavaşça dönen türbin fanları vasıtasıyla tepsilerin üzerinden sirküle edilmektedir [33, 34].

4.4. Konveyör Kurutucular

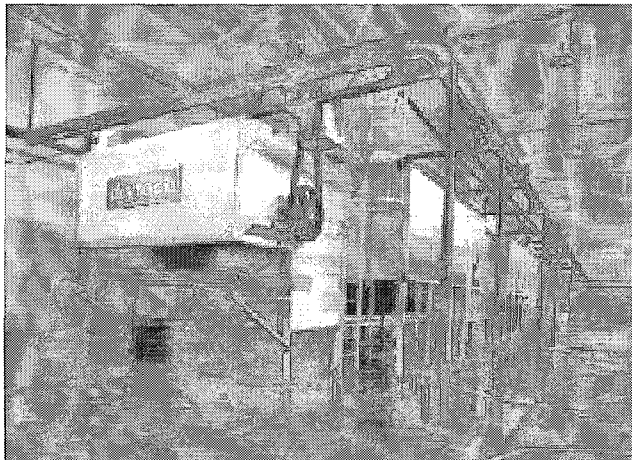
Sürekli bant kurutucular olarak da adlandırılan konveyör kurutucularda, tünel kurutuculardaki tepsi ve vagonların yerini sürekli çalışan bir bant almaktadır. Elek şeklindeki bir bantla taşınan ürüne, alttan veya üstten sıcak hava verilmektedir [1, 5, 33, 34]. Konveyör kurutucular genellikle ürünün bir banttan diğerine transfer edildiği çok geçişli üniteler olarak yapılmaktadırlar. Çok geçişlilik sayesinde ürünün kurutucuda kalma süresi artmaktadır [1, 34].

Şekil 4.5’de iki geçişli bir konveyör kurutucu görülmektedir. Şekilde görüldüğü gibi, kurutucu iki ayrı banttandır oluşmaktadır. İlk bant yaş ürünün hızla kuruduğu, ikinci bant ise oldukça kurumuş ürünün son nem içeriğine kadar kuruduğu aşamayı oluşturmaktadır. Birinci aşama, genellikle her biri fan ve ısıtıcıya sahip birbirinden ayrı bölmelerden oluşmaktadır [1].



Şekil 4.5 İki geçişli konveyör kurutucu [1].

Optimum kurutma şartlarını sağlamak amacıyla her bölmede sıcaklık ve nem içeriği bakımından birbirine bağlı olmayan farklı nitelikte hava kullanılmakta, kurutma son derece kontrollü ve hızlı olarak yürütülebilmektedir. Bunun gibi her bölmede bir öncekinin aksi yönde hava akımı kullanma imkânı da bulunmaktadır [1, 5, 15]. Şekil 4.6’da sebzelerin kurutulduğu çok geçişli bir konveyör kurutucu görülmektedir.



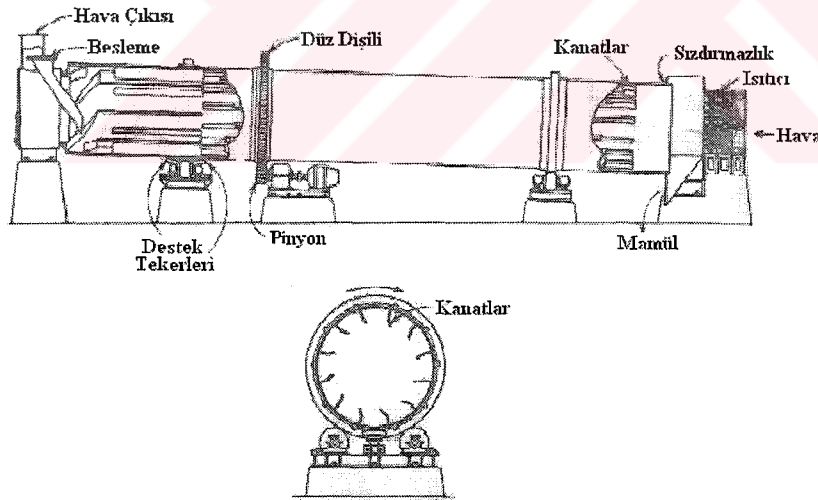
Şekil 4.6 Konveyör kurutucu [39]

Konveyör kurutucular çok çeşitli endüstrilerde kullanılmaktadır. Gıda endüstrisinde özellikle hayvan yiycekleri, meyve, sebze ve tahıl gibi ürünlerin kurutulmasında kullanılırlar. Ürünün konveyör kurutucuda kalış süresi genellikle 2-3 saat olup, konveyör kurutucuların boyutları kapasiteye bağlı olarak değişebilmektedir. Uzun bir bant yerine, üst üste birçok bant şeklindeki düzenlemeleri daha yaygındır.

4.5. Dönel Kurutucular

Dönel kurutucular, yataya eğimli olarak yerleştirilen içerisinde taşıyıcı kanatlar bulunan dönel bir silindirden oluşmaktadır. Dönel silindir içerisine yerleştirilmiş kanatlar vasıtasıyla kurutulmak istenen mamül dönme hareketi sonucu sürekli olarak silindir boyunca harmanlanır [15, 33]. Harmanlamayı gerçekleştiren bu kanatların farklı konstrüktif tipleri mevcuttur. Kurutulmak istenen mamülün karakteristiğine bağlı olarak bu kanatların silindir içerisindeki dizilişleri helisel ve düz olmak üzere farklılık arz etmektedir. Dönel kurutucular kurutulacak katının ve kurutma havasının hareket yönlerine göre paralel yada zıt akışlı olabilmektedir.

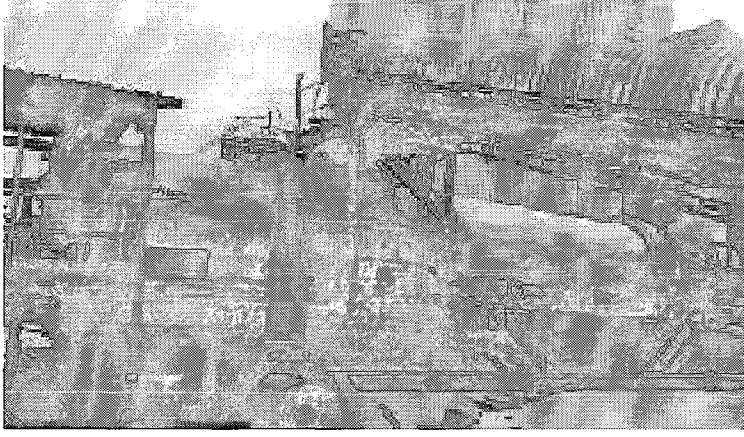
Şekil 4.7’de tipik bir zıt akışlı direk sıcak havalı dönel kurutucu şematik olarak görülmektedir. Silindir yatayla küçük bir açı (1-5°) yapacak şekilde monte edilmiştir.



Şekil 4.7 Zıt akışlı dönel kurutucu [33]

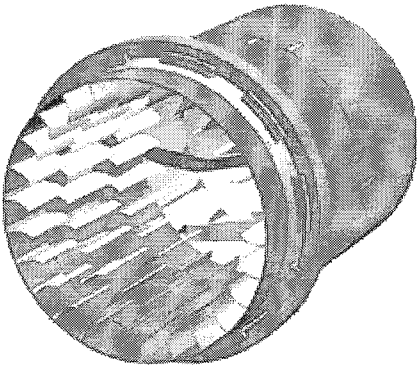
Dönme sonucu kurutucu içerisinde silindir duvarından yukarı doğru kaldırılan mamül en üst noktadan aşağı doğru düşerken sıcak hava içerisinden geçmiş olur. Aynı zamanda bu havaya kaldırma hareketi mamülün kurutucu boyunca ilerlemesine de yardımcı olmaktadır [33]. Aşırı derecede ısıtılmayan mamüllerin kurutulmasında ısıtılmış hava kullanılırken, mineral,

kum, kil gibi mamûllerin kurutulmasında yanmış gaz kurutucu gaz olarak kullanılır. Şekil 4.8’de bir dönel kurutucu görülmektedir.

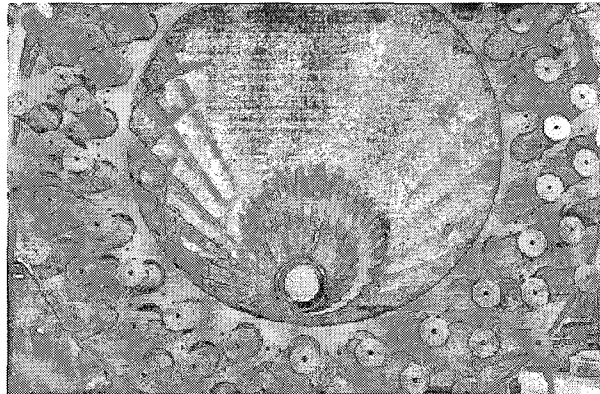


Şekil 4.8 Dönel kurutucu [39]

Kurutulmak istenen mamûlün kurutma havasıyla direk temas halinde olduğu bu konvansiyonel dönel kurutucuların yanısıra aynı prensiple çalışan ancak sıcak hava ile direk temasın olmadığı buhar borulu dönel kurutucular da mevcuttur [33]. Bu kurutucularda ısı, dönel silindir içerisine yerleştirilmiş ve içlerinden buhar veya başka bir termal akışkanın aktığı boruların arasından geçen mamûle iletim yoluyla transfer olur. Borular, taşıyıcı kanat görevi de yaparak mamûlü silindir içerisinde sirküle ederler [33]. Şekil 4.9’de konvansiyonel bir dönel kurutucu silindirinin besleme ucuna yerleştirilmiş spiral kanatlar ve buhar borulu bir dönel kurutucudaki çok sıralı borular görülmektedir.



a) Konvansiyonel spiral kanatlar[39]



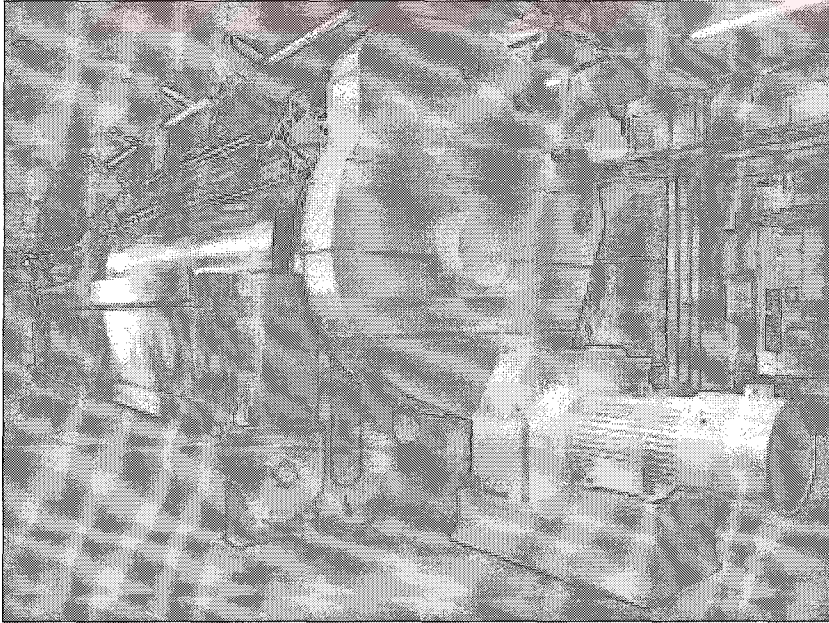
b) Çok sıralı buhar boruları[39]

Şekil 4.9 Konvansiyonel ve buhar borulu dönel kurutucular

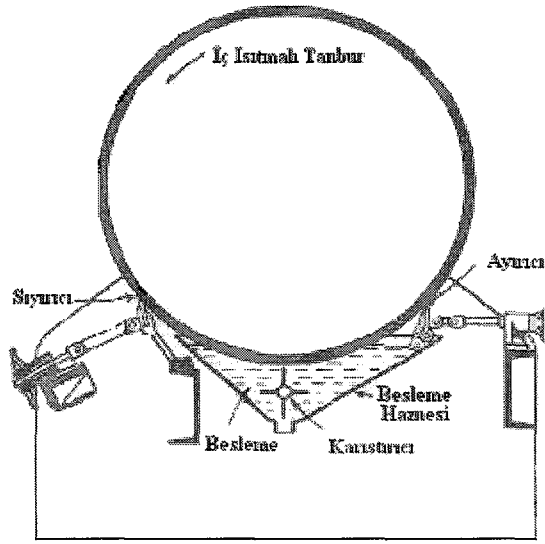
Roto-Louvre olarak adlandırılan kurutucular da dönel kurutucuların bir türü olup sistem, içeride mamûlün kurutulmasını sağlayan panjur benzeri kanatlardan oluşturulmuş bir silindir ve dışta ise içteki silindiri zarf şeklinde saran ve sıcak havanın bu panjurlar içerisinden akışını sağlayan bir dış tamburdan oluşmaktadır. Kurutulacak olan mamûl tipik dönel kurutucularda olduğu gibi harmanlanmamakta sadece düşük dönme hareketi sebebiyle altüst olmaktadır. Bu esnada dış zarf üzerinden gelen hava mamûl içerisinden geçerek ürünün kurumasını sağlamaktadır [33].

4.6. Tambur Kurutucular

Tambur Kurutucular sıvı veya yarı-sıvı malzemelerin kurutulmasında kullanılmaktadırlar. Şekil 4.10'daki alttan beslemeli tek tamburlu kurutucu, Şekil 4.11'de şematik olarak görülmektedir. Bu kurutucuda, yavaşça dönen içten buhar ısıtmalı metal bir tambur sürekli olarak kurutulacak sıvı veya yarı-sıvı malzemeyle dolu besleme kabına batmakta ve kurutulacak ürün tambur yüzeyine ince bir tabaka halinde sıvanmaktadır. İçten ısıtmalı metal tamburdan iletilen ısı vasıtasıyla malzemedeki nem buharlaşmakta ve kurumuş malzeme tambur yüzeyinden bir bıçakla sürekli olarak kazınmaktadır. Bu tip bir kurutucuda kontrol faktörü difüzyondan ziyade ısı transferidir [33]. Isı transferi iletim yoluyla gerçekleştiğinden bu kurutuculardaki kurutma işlemi kontak kurutma yöntemine girmektedir.



Şekil 4.10 Tek tamburlu kurutucu [40]



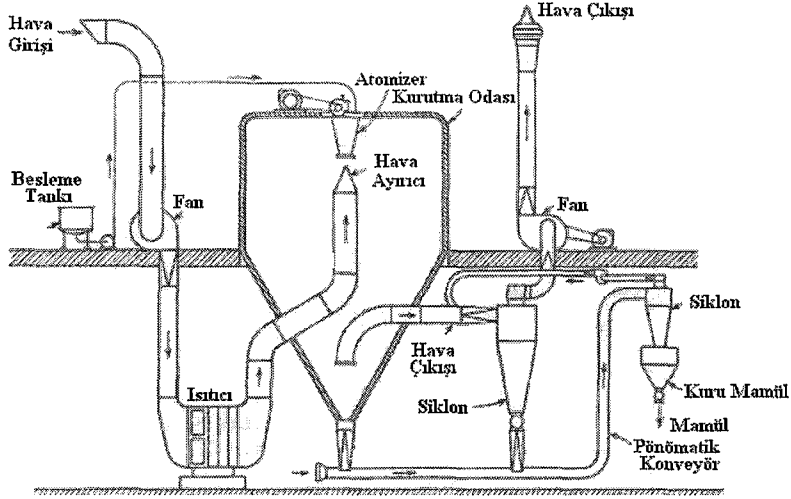
Şekil 4.11 Alttan beslemeli tek tamburlu kurutucu [33]

Çift tamburlu kurutucular ise, yan yana paralel olarak yerleştirilmiş ve birbirlerine zıt yönde dönen iki tamburdan oluşmaktadır. Besleme yukarıdan iki tambur arasına yapılabilmekte, ayrıca iki tamburun birbirine olan mesafesi ayarlanmak suretiyle sıcak yüzeydeki film kalınlığı kontrol altında tutulabilmektedir [1].

Tambur kurutucular bir aspirasyon düzeninin altında çalıştırılmak suretiyle kuruma sırasında oluşan nemli ve sıcak hava emilip atılmaktadır. Vakumlu tambur kurutucularda ise tambur bir vakum hücresinde çalıştırılmakta ve kuruma düşük sıcaklıklarda gerçekleştirilmektedir [33].

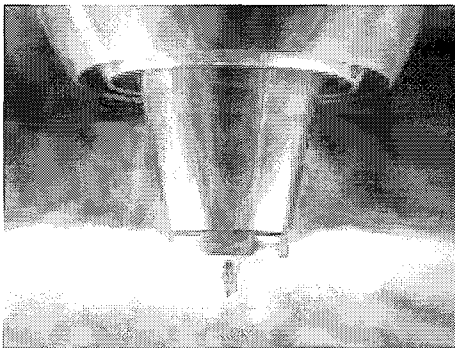
4.7. Püskürtmeli Kurutucular

Püskürtmeli kurutma, hem partikülün şekillendirildiği hem de kurutulduğu özel bir kurutma işlemidir. Şekil 4.12’de bir püskürtmeli kurutucu şematik olarak gösterilmiştir. Kurutma odasına püskürtülen sıvı, ısıtılmış hava içerisine küçük zerrecikler halinde dağılmaktadır. Dağılan bu sıvı zerrecikleri hızla buharlaşarak kurumakta ve kuruyan toz yığını kurutma odasının konik tabanına düşerken kullanılan sıcak gaz siklon gibi bir toz toplayıcısından geçmektedir. Püskürtülen sıvının ve gazın hareket yönüne göre kurutucu paralel veya zıt akışlı olabilmektedir.

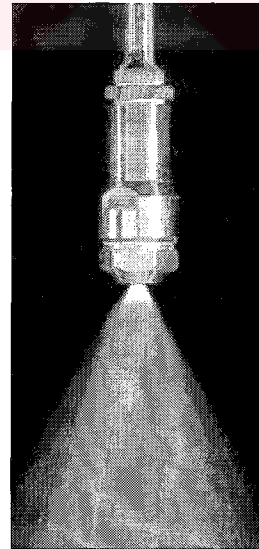


Şekil 4.12 Püskürtmeli kurutucu [33]

Püskürterek kurutmada ilke, kurutulacak ürünün atomize edilmesi ile son derece geniş bir yüzey kazandırılması ve böylece sıcak hava içinde hızlı bir kuruma sağlanmasıdır. Atomizasyon, optimum buharlaşma şartlarının sağlandığı ve dolayısıyla istenilen özelliklerdeki ürünün elde edildiği adım olduğundan, püskürtmeli bir kurutma cihazının en önemli kısmı atomizerdir. Bu amaçla, nozullar veya dönel diskli atomizerler kullanılmaktadır [1, 34, 37]. Şekil 4.13’de dönel diskli ve püskürtmeli nozullu atomizerler görülmektedir.



a) Dönel diskli atomizer



b) Nozul atomizer

Şekil 4.13 Püskürtmeli kurutucuda kullanılan atomizerler [39].

Dönel diskli atomizerde besleme hızla dönen bir diskin merkezine yapılmakta ve kurutulacak malzeme, santifürüj (merkez-kaç) etkisiyle merkezden çevreye doğru hareket etmektedir. Ürün, diski zerreciklere ayrılmış olarak terk emektedir. Dönel atomizerler düşük basınç sistemleridir. Püskürtmeli nozullarda ise ürün yüksek basınçta nozula pompalanır. Basınç enerjisi kinetik enerjiye dönüştürülerek ürün nozuldan yüksek hızlı bir film olarak çıkar ve film yırtılarak zerreciklere ayrılır [37].

Püskürtmeli kurutucularda ürün ve gazın temas süresi çok kısa olduğundan, ürünün ısı duyarlılığına bağlı olarak nispeten yüksek sıcaklıklarda gaz kullanılabilmektedir. Ayrıca temas süresinin çok kısa olması etkili bir gaz-zerrecik karışımı gerektirmektedir; bunu sağlamak için çok sayıda kurutma odası tasarlanmıştır. Püskürtmeli kurutucuların tasarımını gerçekleştirirken minimum deneysel çalışma sağlamak amacıyla lojik prosedürler üzerine detaylı çalışmalar yapılmıştır [33].

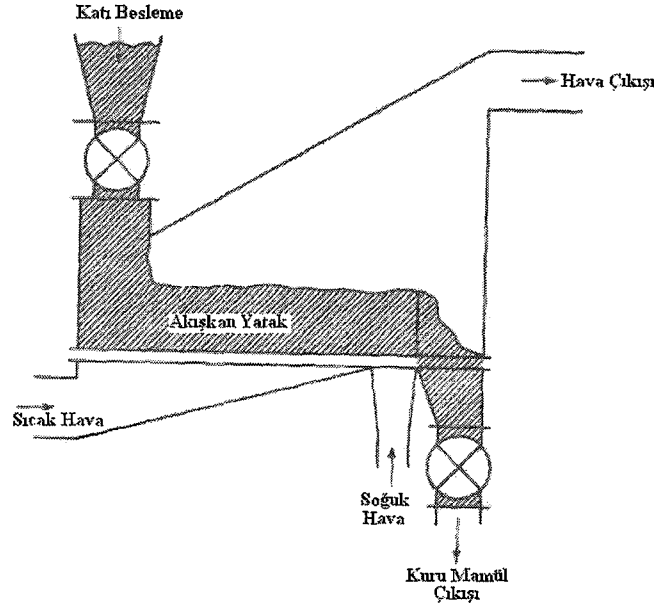
Püskürtmeli kurutucular süt, yumurta gibi gıda ürünleri, sabun ve deterjan gibi çok çeşitli ürünlerin kurutulmasında kullanılmaktadır.

Püskürtmeli kurutucuların avantajları şöyle sıralanabilmektedir: Kurutma şartları sabit tutulduğunda kurutma boyunca toz özellikleri sabit kalmaktadır. İstenilen özellikleri karşılayacak çok çeşitli kurutucu tasarımı mümkündür. Püskürtmeli kurutma, gerek ısı duyarlı gerekse ısı dirençli malzemelere uygulanabilmektedir. Sürekli ve kolay bir kurutma işlemi olup tam otomatik kontrole adapte edilebilmektedir. Günümüzde püskürtmeli kurutucular programlanabilir lojik kontrolörler (PLC) tarafından kontrol edilmektedir [34].

4.8. Akışkan Yatak Kurutucular

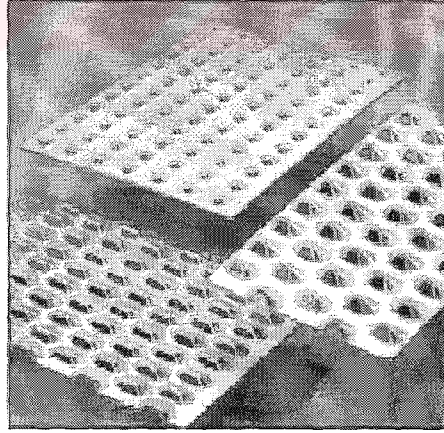
Bir akışkan yatak kurutucuda, ısıtılmış hava veya sıcak gaz bir distribütör plakasından geçerek kurutucunun kesit alanına homojen olarak dağılmakta ve kurutulmak istenilen ürünü akışkanlaştırarak kurutmaktadır. Kurutucunun üst kısmından çıkan gaz, beraberinde kurutulan malzemenin çok ince tanelerini taşımış olabileceğinden, siklon gibi bir toplayıcıdan geçirilmektedir. Şekil 4.14’de bir akışkan yatak kurutucu şematik olarak görülmektedir [33].

Akışkan yatak kurutucularda, kurutulacak ürün alttan belirli bir hızla verilen sıcak hava ile adeta askıda kalmakta yani akışkan bir yatak halinde bulunmaktadır [1]. Akışkan yatak kurutucular, sahip oldukları yüksek kuruma hızı, yataktaki üniform ve kontrol edilebilir sıcaklık, yüksek termal etkinlik ve daha düşük kurutma zamanı sebebiyle diğer konvansiyonel tekniklerden çok daha avantajlıdır. Ayrıca, bu kurutucular otomasyona kolaylıkla adapte edilebilir olup; karıştırma, sınıflandırma, kurutma ve soğutma gibi işlemlerle kombine edilebilmektedirler [6, 7].



Şekil 4.14 Akışkan yatak kurutucu [33].

Kurutucuya gönderilen sıcak gaz doğrusal veya doğrusal olmayan deliklere (nozül) sahip özel olarak tasarlanmış bir distribütör plakasından geçmektedir. Şekil 4.15’de Niro patentli optimum distribütör plakaları görülmektedir.



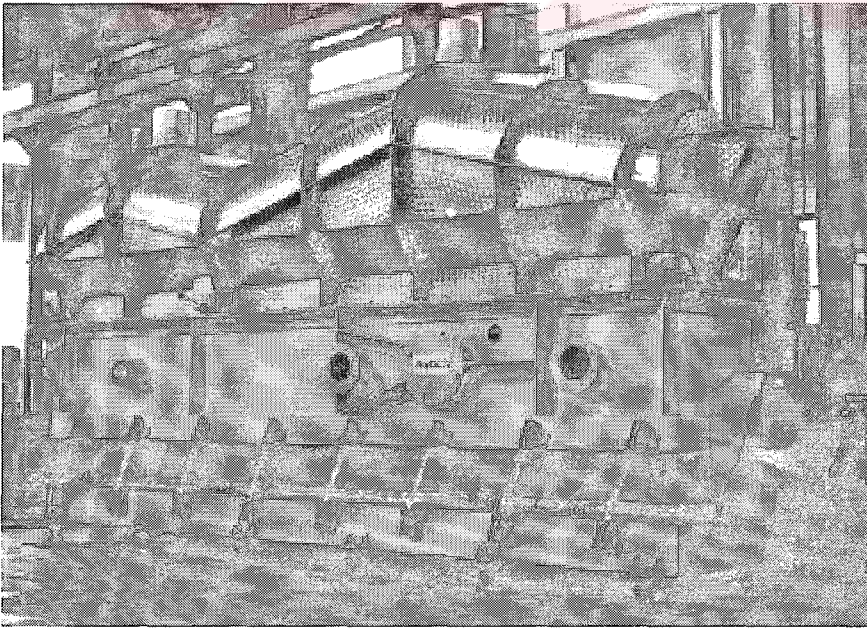
Şekil 4.15 Distribütör plakaları [41]

Kesikli işlem gören akışkan yataklar, ısıya duyarlı ve az miktarlardaki ürünlerin kurutulmasında tercih edilmektedir. Kolaylıkla seçilebilir işlem şartlarına sahip yatağın homojenliğinden dolayı, işlemin herhangi bir anındaki ürün kalitesi üniformdur [6]. Sürekli

kurutmada, partiküllerin kurutucu içinde kalma süreleri farklılık gösterebileceğinden kurutucudan alınan ürün farklı mertebelerde kurutulmuş partiküller içerir. Sürekli akışkan yatak kurutucuların performansını belirlemek açısından katıların karıştırılma karakteristikleri önemlidir. Literatürde, silindirik akışkan yataklar için katıların karışımının ideal karışım olduğu kabûlü yapılırken, dikdörtgen kesitlilerde sonlu bir eksenel Peclet sayısı yaklaşımı yapılmaktadır [6].

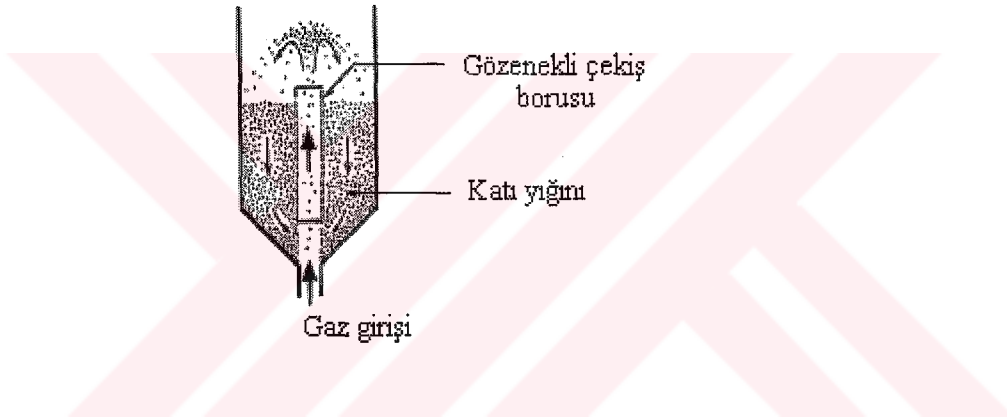
Literatürde akışkan yatak kurutucuların tasarımı ve işletilmesi üzerine çok az çalışma mevcuttur. Akışkan yatak işlemlerinin tüm çeşitleri üzerinde daha fazla sistematik çalışma yapılmalıdır. Ayrıca, endüstriyel kurutuculardan elde edilen verilerle çeşitli tasarım parametrelerinin karşılaştırılmasına da ihtiyaç vardır.

Akışkan yatak kurutucuların, kurutucu gövdesinin sabit veya hareketli olmasına göre iki konstrüktif tipi mevcuttur. Statik akışkan yatak kurutucularda, silindirik ya da dikdörtgen kesitli olabilen kurutucu gövdesi sabit olup, kesikli veya sürekli işlem görmektedir. Titreşimli akışkan yatak kurutucularda ise kurutucu gövdesi titreşimle veya salınımla hareket ederek üniteye kurutulacak malzemenin hareketine yardımcı olmakta ve bu sebeple de nispeten partikül boyut dağılımı geniş, partikül şekli düzensiz, veya aşınmayı önlemek için akışkanlaşma hızının düşük tutulduğu ürünlerin kurutulmasında tercih edilmektedir. Titreşimli sistemler, akışkanlaşma için gerekli güçle beraber işletme masraflarını da azaltmaktadır. Şekil 4.16'da bir titreşimli akışkan yatak görülmektedir.



Şekil 4.16 Titreşimli akışkan yatak kurutucu [39]

Fıskıran(spouted) yatak kurutucular ise, akışkanlaşmanın sağlanamadığı nispeten büyük partiküllerin (>1mm) kurutulmasında etkindir [28]. Bu tip kurutucularda akışkan, katı partiküllerin bulunduğu haznenin altındaki konik kanaldan verilmekte ve katı partikülleri yatağın düşey eksenindeki kolon boyunca yukarı doğru sürükleyerek fıskiye gibi fıskırmasına sebep olmaktadır. Fıskıran partiküller, daha sonra kolon çevresindeki halka bölgeye düşmektedirler [33]. Dolayısıyla fıskıran bir yatak, bir seyreltik çekirdek bölge ve bir de yoğun halka bölge olmak üzere iki bölgeden oluşmaktadır. Son zamanlarda özellikle tahıl kurutulması üzerine yapılan çalışmalarda, yatak merkezinde, bu iki bölgeyi birbirinden ayıran silindirik "çekiş boruları" kullanılmaktadır [27, 35]. Fıskıran yataklar üzerindeki çalışmalar, özellikle Kanada ve Sovyetler Birliği'nde, buğday, bezelye gibi büyük boyutlardaki (2-10 mm) malzemelerin kurutulması üzerine yoğunlaşmaktadır [35]. Şekil 4.17'de çekiş borulu bir fıskıran yatak kurutucunun şematik resmi görülmektedir [27].



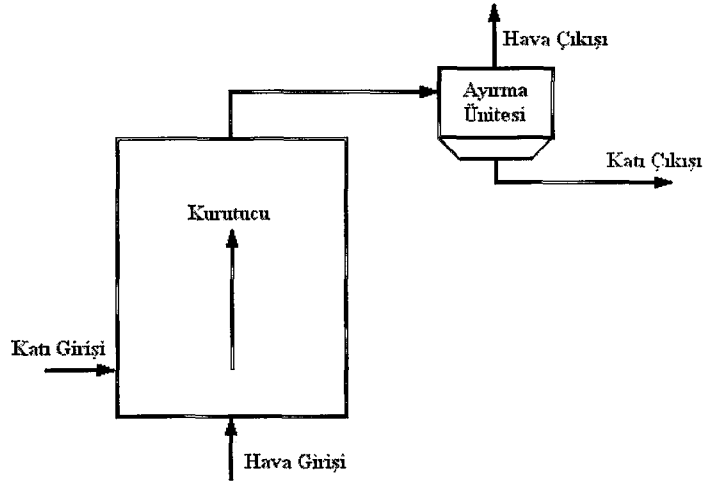
Şekil 4.17 Fıskıran yatak kurutucu [27].

Çekış borulu fıskıran yataklar, kurutma ve diğler uygulamalar için ticari açıdan kullanılabilir görülmektedir [36]. Bu teknik üzerine pek çok inceleme yapılmış olmasına rağmen, yapılan tüm çalışmalar laboratuvar ölçekli yatak kurutucu ile sınırlı kalmıştır. Endüstriyel olarak uygulamaya geçirilememiş olan bu alanda daha çok çalışma yapılmasına ihtiyaç vardır [29, 36]. Kanada'da McGill Üniversitesi Muşumdar Laboratuvarında [36, 60, 61] ve Tayland'da King Mongkut Üniversitesinde bu konu üzerine yoğun incelemeler yapılmaktadır [29, 59, 67].

4.9. Flaş (Pnömatik) Kurutucular

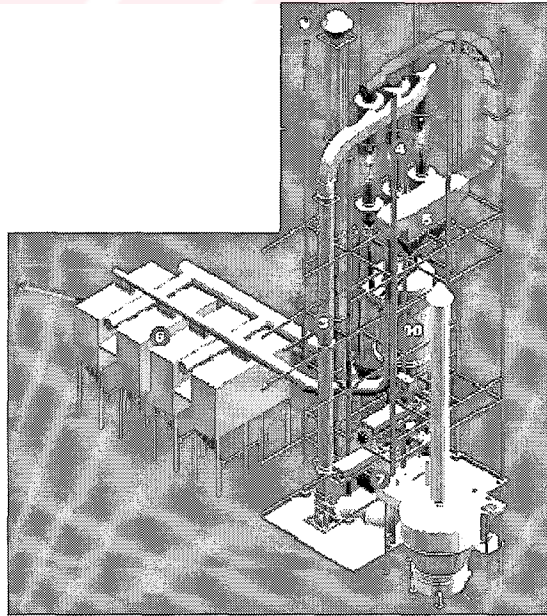
Flaş kurutucularda partiküller sıcak hava tarafından taşınmak suretiyle kurutucu boyunca paralel akışlı hareket ettirilerek kurutulmakta, daha sonra bir gaz ayırma ünitesine (genellikle bir siklon sistemine) gelmektedir [23, 24]. Sürekli tip konvektif kurutma işlemi,

paralel akışlı hareket, nispeten küçük partikül boyutu, kurutucu içerisinde kısa kalma süresi ile karakterize edilen bu tip kurutucular, kurutucu olma vasıflarının yanı sıra pnömatik taşıyıcılardır [23, 24]. Şekil 4.18’de bir flaş kurutucunun şematik resmi görülmektedir [23].



Şekil 4.18 Flaş kurutucunun şematik resmi [23]

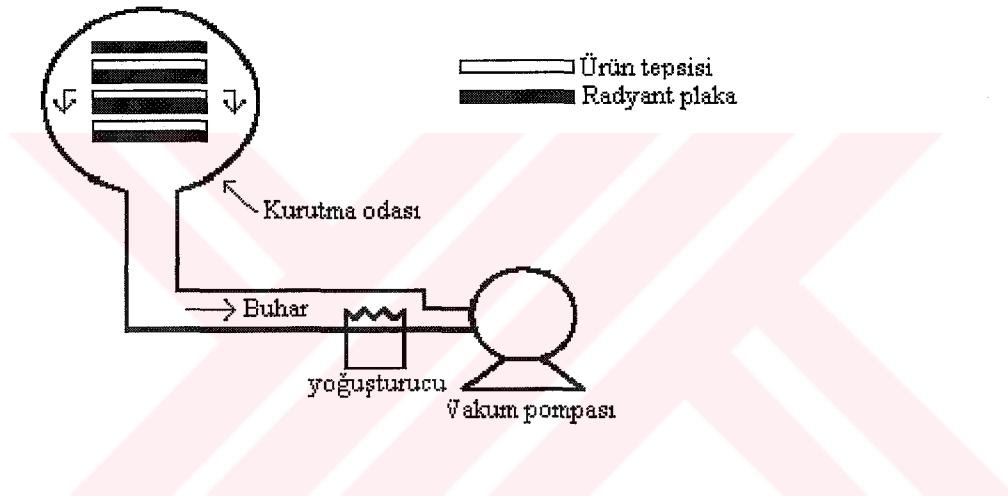
Serbest akış halinde olan granül katılar hızla (~ 25 m/s) akan gaz akımı içerisinde dağılarak birkaç saniye kurutucuda kalmaktadırlar. Bu tip kurutucuların gaz akım yolu için, düz boru, kavisli (deveboynu) boru veya bir dizi siklonlardan oluşan konfigürasyonları vardır. Nispeten yüksek hız sebebiyle fan gücü artmakta, partiküllerde darbeler ve aşınmalar olabilmektedir. Şekil 4.19 de bir pnömatik kurutucu görülmektedir.



Şekil 4.19 Flaş kurutucu [39]

4.10. Dondurarak Kurutma Sistemleri

Isıya duyarlı maddeler dondurarak kurutma yöntemiyle kurutulabilmektedir. Bu metot, dondurma ve kurutma olmak üzere iki temel adımdan oluşmaktadır. Kurutulacak madde önce çok soğuk havaya maruz bırakılarak dondurulmakta sonra, bir vakum odasına yerleştirilmektedir [33]. Küçük buz kristallerine sahip ve amorf bir ürün elde etmek için dondurma işlemi çok hızlı yapılırken, kurutma işleminde basınç buzun süblimleşmesine müsaade edecek şekilde düşürülmekte ve süblimleşme sonucu ortaya çıkan buhar bir buhar ejektörü veya vakum pompasıyla pompalanmaktadır. Şekil 4.20’de dondurarak kurutma sisteminin temel bir konfigürasyonu görülmektedir [34].

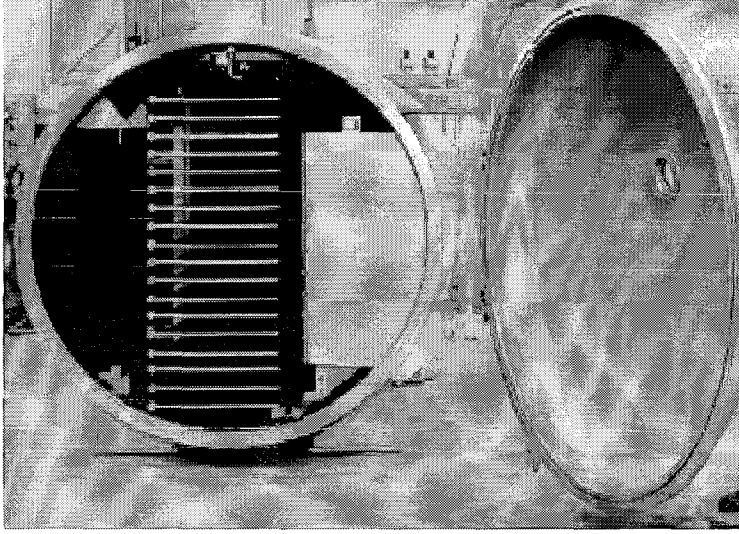


Şekil 4.20 Dondurarak kurutma sisteminin temel bir konfigürasyonu [34]

Süblimleşme için gerekli ısı ürünün arka yüzeyinden yani, katının üzerinde bulunduğu tepsi veya raf gibi bir yüzeyden verilebileceği gibi buharlaşan nemin ürünü terk ettiği zıt yüzeyden de verilebilir. Isı kaynağı olarak genellikle radyant ısıtıcı veya pahalı olmasına rağmen suyun yüksek dielektrik sabiti sebebiyle dielektrik ısıtma yöntemi kullanılmaktadır [33].

Dondurarak kurutma ilk olarak kuru plazma ve kan ürünlerinin üretilmesinde geniş ölçüde kullanılmış, daha sonra antibiyotiklere ve biyolojik malzemelere de endüstriyel bazda uygulanmıştır. Bu metot aynı zamanda gıdaların raf ömürlerini uzatan etkili bir metottur [34]. Kurutma sırasında ortamda hava bulunmaması ürünün oksidasyonunu veya kimyasal modifikasyonlar sebebiyle oluşabilecek bozulmaları önlemektedir. Yüksek sıcaklıklarda görünüm, yapı, doku ve tad olarak değişime uğrayan ürünler, kurumanın vakum altında çevre sıcaklığından daha düşük sıcaklıklarda gerçekleştiği bu metodla minimum zararlar

kurutulabilmektedirler [34]. Şekil 4.21’de Atlas-Niro inc. tarafından üretilen bir Atlas Ray™ dondurarak kurutma sistemi görülmektedir.



Şekil 4.21 Atlas Ray™ dondurarak kurutma sistemi [41]

Dondurarak kurutmanın başlangıcında ısı ve kütle akısına karşı düşük direnç sebebiyle kurutma hızı yüksektir. Ancak kuruma ilerledikçe donmuş malzeme üzerinde oluşan tabaka sebebiyle kuruma hızı düşer. Ürünü çevreleyen bu kuru tabaka ısı transferine karşı bir izolasyon malzemesi gibi görev yapar. Ayrıca, kuru tabaka kalınlığı arttıkça kütle transferi de azalmaktadır. Bunun sebebi, süblimasyon ara yüzeyinden ürün yüzeyine olan difüzyon işleminin azalmasıdır [34].

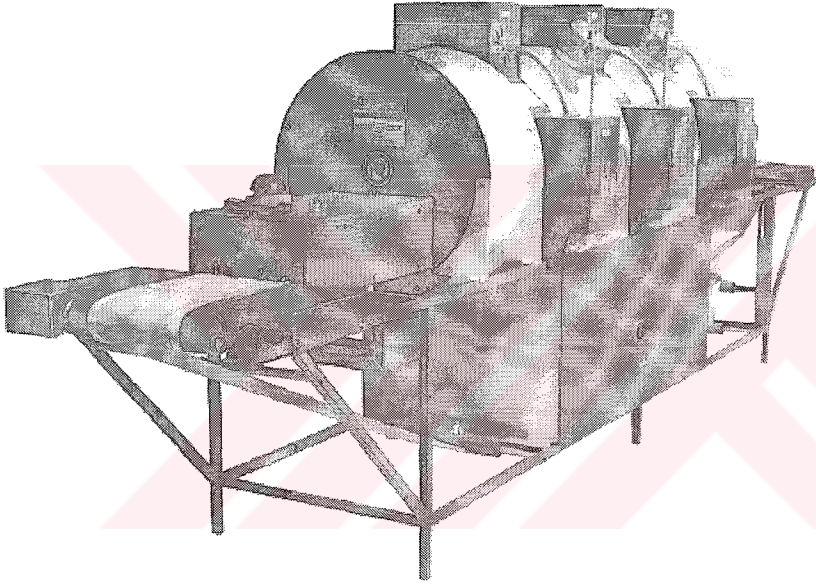
4.11. Mikrodalga Kurutma Sistemleri

Mikrodalgalar, malzeme içerisinden geçerken malzeme içerisindeki kimyasal bileşenler arasındaki bağları harekete geçirerek ısı üreten elektromanyetik dalgalardır. Mikrodalga ısıtmada malzeme içerisindeki nem hızla buharlaşma sıcaklığına gelecek şekilde bir ısıtma söz konusudur. Böylece aşırı ısıtmaya maruz bırakılmadan kaliteli kurumuş ürün elde edilmektedir. Suyun dielektrik özelliklerinden dolayı, mikrodalga kurutma özellikle yüksek nem içeren ürünler için daha uygundur [38].

Kaliforniya Eyalet Üniversitesi Kurutulmuş Gıdalar Teknolojisi Laboratuvarı’nda mikrodalga kurutmanın endüstriyel uygulamaları üzerine yoğun çalışmalar yapılmakta olup, Pitt-Des Moines firması ile birlikte 2000 yılında bir mikrodalga-vakum kurutucu (MIVAC®)

geliştirilmiştir [34]. 100 farklı meyve, sebze ve diğer gıdaların 130°F 'ın altında başarılı bir şekilde kurutulabildiği bu mikrodalga-vakum işlemi bir kanal içerisinde vakum altında gerçekleşmektedir. Kanalda, bir konveyör sistemi ve bir mikrodalga ünitesine ek olarak bir de radyant ısı kaynağı bulunmaktadır.

Linn High Therm Gmbh (2000), mikrodalga teknolojisi kullanarak yeni kurutma sistemleri geliştirmişlerdir. Şekil 4.22'de sürekli kurutmada kullanılan Linn High Therm Gmbh patentli bir mikrodalga kurutucu görülmektedir [34]. Bu kayışlı sistemlerde daha üniform bir alan dağılımı elde etmek için mikrodalga jeneratörleri (magnetron) silindirin ekseni etrafına spiral olarak yerleştirilmiştir.



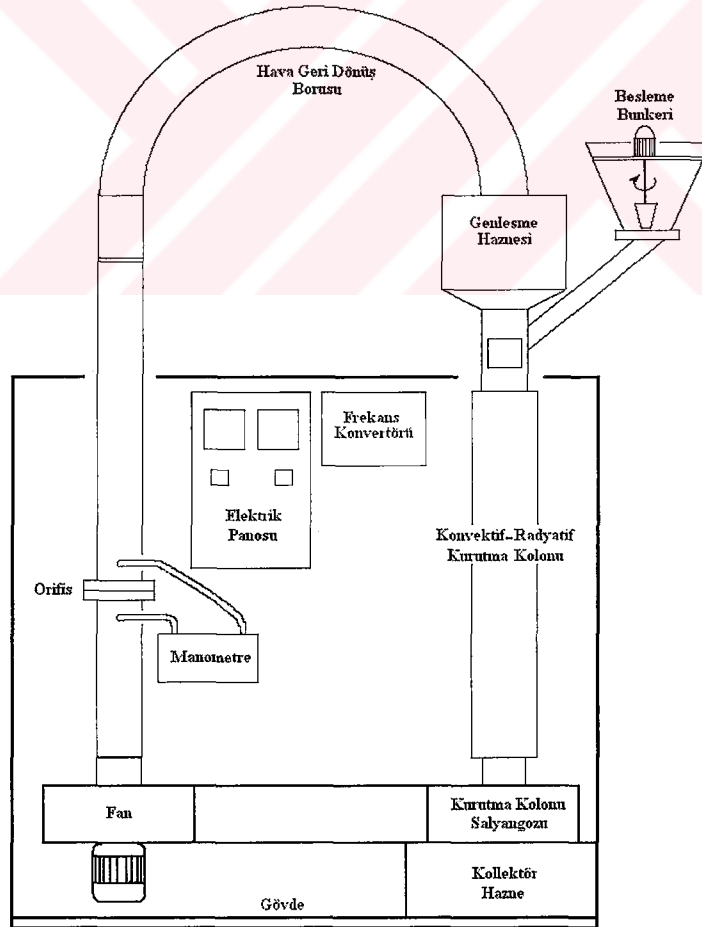
Şekil 4.22 Linn High Therm Gmbh patentli mikrodalga kurutucu [34].

5. ZIT AKIŞLI KONVEKTİF-RADYATİF KURUTUCU

5.1. Deney Tesisatı

Bu çalışmada, kurutma deneylerini gerçekleştirmek amacıyla Fırat Üniversitesi Makina Mühendisliği Bölümü imkânları kullanılarak konvansiyonel kurutuculardan farklı yeni bir “sürekli tip zıt akışlı konvektif-radyatif kurutucu” tasarlanmış ve imal edilmiştir.

Sistemin ana parçasını, radyatif ısıtıcılarla teçhiz edilmiş düşey bir kurutma kolonu oluşturmaktadır. Kolonun alt tarafındaki radyal fanın gönderdiği hava, zorlanmış konveksiyonla ısı aktardığı katı partiküllerin düşüşünü de yavaşlatmakta, kolon içerisinde daha uzun süre kalmalarını sağlamaktadır. Kurutulacak partiküller için, kolonun üst kısımda yükleme ve alt kısmında ise toplama üniteleri bulunmaktadır. Sistem, düşey kolonun üst çıkışı ile altta fan girişi irtibatlandırılarak, kapalı bir çevrim oluşturacak şekilde de çalıştırılabilmektedir. Şekil 5.1’de sistemin şematik resmi ve Şekil 5.2’de ön cepheden görüntüsü verilmiştir.



Şekil 5.1 Sürekli tip zıt akışlı konvektif-radyatif kurutucunun şematik resmi



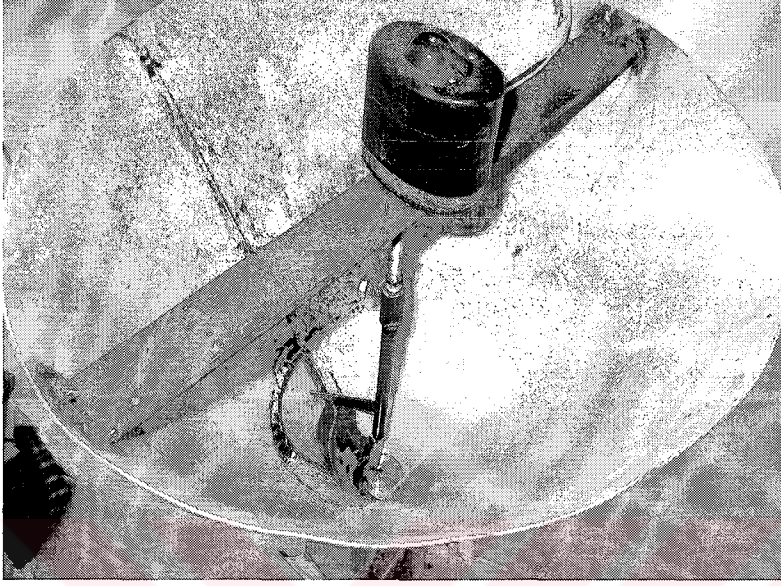
Şekil 5.2 Sürekli tip zıt akışlı konvektif-radyatif kurutucunun önden görüntüsü

5.1.1. Yükleme Ünitesi

Yükleme ünitesi, 50 cm yüksekliğinde, tabanı 6 cm ve üst kısmı 50 cm çapında olan koni geometriye sahip bir besleme bunkeri şeklinde imal edilmiştir.

Kurutma esnasında besleme debisini ayarlayabilmek amacıyla bunkerin tabanına bir ayarlanabilir sürgülü klape yerleştirilmiştir. Ayrıca bu klape bir tespit cıvatası yardımıyla sabitlenerek, çalışma esnasındaki titreşimler sebebiyle besleme debisinin değişmesi önlenmiştir. Yine aynı şekilde besleme debisini sabit tutabilmek amacıyla bunker içerisine bir 12 V DC motor yerleştirilmiş ve motor miline trapez geometriye sahip 2 mm kalınlığında bir sac levha kuple edilmiş ve karıştırıcı milin bunker besleme ağzından 1 cm yukarıda hareket etmesi

sağlanmıştır. Bu sayede katı partiküllerin sistemi besleme regülasyonu yapılmıştır. Şekil 5.3’de besleme bunkerinin resmi verilmiştir.



Şekil 5.3 Besleme bunkerinin görüntüsü.

Bunker üzerindeki besleme regülatör motoru ana sistemden bağımsız olarak kontrol edilebilecek şekilde tasarlanmış ve imal edilmiştir. Bu sayede her deney öncesinde sistemden bağımsız olarak çalıştırılmış ve kurutulacak mamûlün bunker çıkış ağzına yapışması veya tıkaması engellenmiştir. Ayrıca kurutulacak malzemenin bunker içerisindeki seviyesini gözleyebilmek amacıyla bunker üzerine bir gözleme penceresi açılmıştır. Bunkerin besleme çıkışı ise düşey radyatif kurutma kolonuna 6 cm çapında bir boruyla monte edilmiştir. Besleme borusu, kurutma kolonunun düşey eksenine 45° açı yapacak şekilde imal edilmiştir. Ayrıca besleme borusunun kurutma kolonu içerisinde kalan ağız kısmı, kurutulacak malzemenin hareketini -havanın türbülans etkisiyle- engellememesi için, kolon eksenine dik açı yapacak şekilde şekillendirilmiştir.

5.1.2. Kurutma kolonu

Kurutma düzeneğinin ana kısmını oluşturan konvektif-radyatif kurutma kolonu, 2 m yüksekliğinde 16 cm iç çapa sahip ve 5 mm et kalınlığındaki borudan imal edilmiştir. Boru içerisinde ısıtılma şekil faktörünü 1 yapabilmek amacıyla, boru içerisi 430 kalite paslanmaz saca tamamen kaplanmıştır. Yine boru içerisine 8 adet 1000 W gücünde 180 cm boyunda ve 10

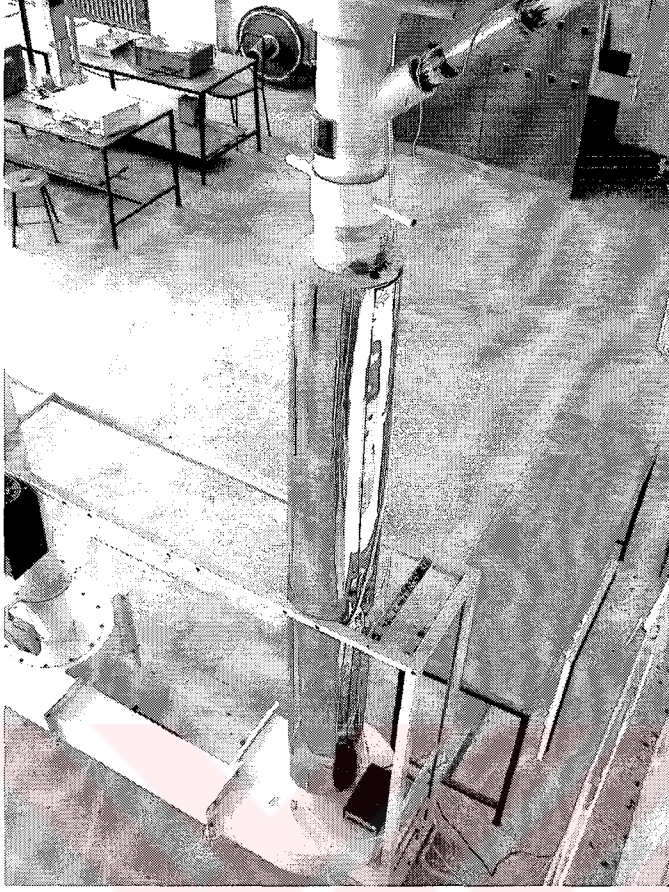
mm çapında radyant ısıtıcılar yerleştirilmiştir. Radyant ısıtıcılar, yüksek sıcaklığa dayanıklı silikonlu elektrik bağlantı kablolarıyla bağlanmış ve kolon cıdarından dışarı çıktıkları noktalarda hava kaçaklarını engellemek amacıyla 400°C 'ye dayanabilen silikon izolasyon maddesiyle kaplanmışlardır. Ayrıca bu ısıtıcılar gerek kolon üzerindeki klemensler ve gerekse elektrik panosu üzerindeki pako şalterler vasıtasıyla farklı güçlerde ve farklı konumlarda devreye alınabilecek şekilde tasarlanmış ve imal edilmiştir. Yapılan deneylerin tamamında, karşılıklı iki adet radyant ısıtıcı 1000 W güçle çalıştırılmış, 1000 W gücünde diğer iki ısıtıcı ise sıcaklık kontrolü amacıyla kullanılmıştır. Sistemde sıcaklık kontrolü, boyutları sisteme özel Elimko Pt-100 rezistans termometreler (RTD' ler) yardımıyla yapılmıştır. RTD' ler 1/2" vidalı gövdeye sahip olduklarından, sistemdeki yerlerine vidalanarak monte edilmiştir. Bu sayede RTD' lerin kolonun metal gövdesine teması engellenmiştir. Sıcaklık kontrolü için referans olarak, kurutma kolonu çıkış sıcaklığı esas alınmıştır. Ayrıca kolonun girişinde bulunan Pt-100 sayesinde giriş sıcaklığı da gözlenmiştir. Sistemde sıcaklıkların tespiti ve kontrolü için Houg Young marka MX9 model PID kontrollü sıcaklık ölçerler kullanılmıştır. Çoklu girişi olan bu sıcaklık ölçerler, kullanılan her tip sıcaklık algılayıcısı için programlanabilmektedir. Sıcaklık göstergesiyle ısı algılayıcıların kombine kalibrasyonu ise yine cihaz tarafından otomatik olarak yapılabilmekte ve bu sayede kullanılan her hava debisi ve her sıcaklık için cihazın bu özelliğinden (Auto-tunning) istifade edilerek 0.1°C hassasiyetle deneyler gerçekleştirilmiştir. Sıcaklık göstergeleri PID (Proportional Integral Derivative) kontrollü olduğundan kurutma kolonunun ısı ataletleri bu cihazlar tarafından algılanabilmekte ve bu sayede hassas çalışma şartları elde edilebilmektedir.

Kurutma kolonundaki ısı kayıplarını en aza indirmek amacıyla kolon 5 cm kalınlığında cam yünü şilte ile izole edilmiş ve izolasyon malzemesinin dış yüzeyi ise kolonun tabanına, ortasına ve üst kısmına yerleştirilen 3 adet flanş yardımıyla 430 kalite paslanmaz sac ile kaplanmıştır.

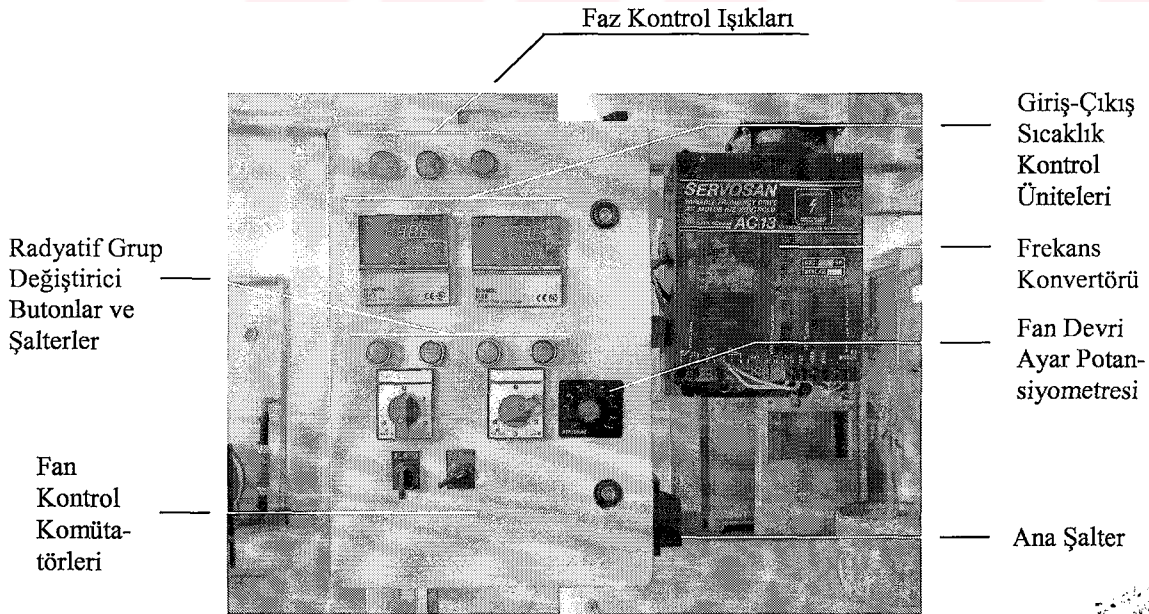
Kurutma kolonu içerisinde kurutulacak malzemenin hareketini gözleyebilmek amacıyla, kolonun üst kısmına bir gözetleme penceresi açılmıştır.

Kurutma esnasında parçacık ağırlıkları ortalama ağırlığın altında olan malzemeler, akışa dik kesit alanlarına etkiyen kuvvete bağlı olarak hava akımına kapılabilmektedirler. Bunu engellemek amacıyla, kolon çıkışına 50 cm yüksekliğinde 40 cm çapında bir genişleme haznesi yerleştirilmiş, bu sayede bu bölgede hava hızının düşmesi sağlanarak parçacık sürüklenme kuvveti minimum değere indirilmiştir. Ayrıca içi boş, daha küçük ağırlıktaki partiküllerin saçılmalarını önlemek üzere kolon çıkışına bir tel filtre yerleştirilmiştir.

Şekil 5.4' te konvektif-radyatif kurutma kolonu, Şekil 5.5'te ise kontrol panosu görülmektedir.



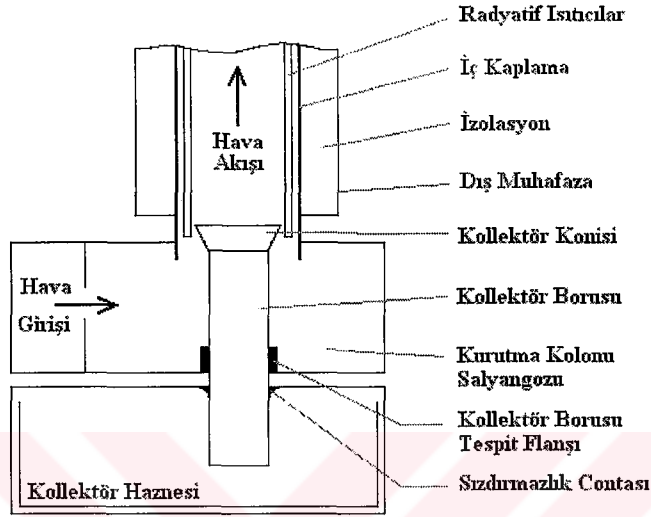
Şekil 5.4. Konvektif-radyatif kurutma kolonu



Şekil 5.5. Elektrik Kontrol Panosu

5.1.3. Kolektör Ünitesi

Konvektif-radyatif kurutma kolonunun alt kısmında, kurumuş haldeki malzemenin toplama haznesine aktarılabilmesi için bir konik ağızlı kolektör kullanılmıştır. Bu kısmın şematik resmi Şekil 5.6' de, arka cepheden görüntüsü ise Şekil 5.7' de verilmiştir.



Şekil 5.6. Kolektör haznesi

50 cm uzunluk ve 6 cm çaplı kolektörün üstünde 10 cm çaplı konik toplama ağzı bulunmaktadır. Çalışma esnasında titreşim sebebiyle kolektör borusunun aşağıya doğru kaymasını engellemek amacıyla kurutma kolonu salyangozu üzerine bir flanş monte edilmiş ve bu flanş üzerindeki 3 adet M8 gömme başlı vida yardımıyla hava akışında herhangi bir süreksizliğe müsaade etmeksizin boru sabitlenmiştir.



Şekil 5.7. Kolektör haznesinin arkadan görüntüsü

6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR VE SONUÇLAR

6.1. Deneylerin Yapılışı

Deneylerde ayçekirdeği ve soya fasulyesi olmak üzere iki farklı zirai gıda ürünü kullanıldı. Vinimik cinsi ayçekirdeği Elazığ Karadeniz Birlik Yağ Fabrikasından, soya fasulyesi ise Elazığ Tarım İl Müdürlüğünden temin edildi.

Deney numûneleri, elemek ve ardından elle temizlemek suretiyle yabancı maddelerden temizlendi, hafif ve küçük boyutlu olanları ayıklandı. Ayıklanmış numûneleri deney başlangıç nemine getirmek için nemlendirilerek karıştırıldı ve kapalı kaplar içerisine yerleştirilerek soğutucuda 48 saat süreyle bekletildi; difüzyonla nemin taneler içinde homojenliği sağlandı. [7, 57, 58, 63]. Nemlendirme işlemi sırasında Protimeter marka dijital tahıl nem ölçme cihazı kullanıldı. Ayrıca numûne, etüvde 105°C 'de sabit tartıma gelinceye kadar kurutulmak suretiyle numûnenin başlangıç nem içeriği kuru baza göre hesaplandı.

Deney düzeneği çalıştırılarak fan devreye alındı. Konvertör yardımıyla fanın devri ve dolayısıyla hava debisi ayarlandı. Hava debisi, manometreden ölçülen değerler yardımıyla tesbit edildi. İstenen sayı ve kombinasyonda ısıtıcı -kontrol paneli vasıtasıyla- devreye alınarak hava sıcaklık ayarı yapıldı. Konvertör vasıtasıyla ayarlanan debideki havanın sıcaklığının 0.1°C hassasiyetle sabit kalması amacıyla, sıcaklık kontrol cihazının auto-tuning özelliği devreye sokuldu. Sistem, hava debisi ve çevre havası şartlarına bağlı olarak sıcaklık sabitlemeyi otomatik olarak tamamlayınca kontrol paneli üzerinden sinyal alındı, PID kontrol sistemiyle birlikte çalışan Pt-100 algılayıcılarla ölçülen hava sıcaklık değerleri ve Extech 444731 nem ölçme cihazı ile ölçülen hava nem değerleri kaydedilerek deney başlatıldı. Bu işlemler her deney için tekrarlandı.

Nemli çekirdekler Avery Berkel marka (6 kg x 0,1 g) dijital terazi ile tartılarak yükleme bunkerine yerleştirildi. Bunker klapesi ayarlanmak suretiyle katı debisi sabitlendi ve nemli ürünün kurutma kolonuna girişi başlatıldı. Bu sırada bunker içerisinde çekirdek besleme regülatörü çalıştırılarak, katı akışında olabilecek tıkanma ve süreksizlikler önlenmiş oldu. İçi parlak saçla kaplı silindirik düşey kurutma kolonu iç çevresine, eşit aralıklarla yerleştirilen radyant çubuk ısıtıcıların arasından, yukarı yönlü hava akışıyla çekirdeklerin “kontrollü düşmesi” sağlanmakta, böylelikle kurutma kolonunda kalma süreleri uzatılmaktadır. Konvertör sayesinde hava hızının çok geniş bir değişim aralığında yapılabilen deneylerde katının hareketi, kolon üzerine yerleştirilmiş ısıya dayanıklı bir cam gözlem penceresi ile gözlemlendi. Hava hızına bağlı olarak katı parçacıkların, kolon boyunca kuruyarak toplama kabına kontrollü inişi

sağlandı. Böylece, 1. periyot tamamlanmış oldu. Toplama çekmecesinden alınan ürün tartılarak kaplara konuldu. Kapalı kaplarda yarım saatlik dinlendirmenin (temperleme) ardından aynı kurutma işlemi, 2. ve 3. periyotlarda da tekrarlandı. Soya fasulyesi için de aynı kurutma işlemi uygulandı.

Kurutma kolonu içerisindeki çekirdek hızının tespit edilmesi amacıyla, ortalama boyuta sahip tek bir çekirdek tanesi, kurutma deneylerinde kullanılan aynı hava hızı ve sıcaklıklarda bunkerden gönderildi ve bu işlem on defa tekrarlanarak ortalama çekirdek hızı bulundu. Soya fasulyesi için de aynı işlemler tekrarlandı.

6.2. Deney Şartları

Kurutucuya ait kurutma parametrelerinin tespiti için, farklı hava sıcaklıkları ve hava hızlarında açık ve kapalı sistem olarak, deney başlangıç nem içeriği %26 kb olan vinimik cinsi ayçekirdeği ve %24 kb olan soya fasulyesi için kurutma deneyleri yapılmıştır. Ayçekirdeğine ait kurutma deneyleri, açık ve kapalı sistemde 40, 50, 60 ve 70 °C hava sıcaklık değerleri sabit tutularak her bir sıcaklık için 2.4, 2.8, 3.2 ve 3.6 m/s hava hızlarında; soya fasulyesine ait kurutma deneyleri ise açık sistemde 50 ve 70 °C hava sıcaklıkları sabit tutulmak suretiyle her bir sıcaklık için 2.4, 2.8, 3.2, 3.6, 4 ve 4.4 m/s hava hızlarında yapılmıştır.

6.2.1. Ayçekirdeği Kurutma Deneyleri

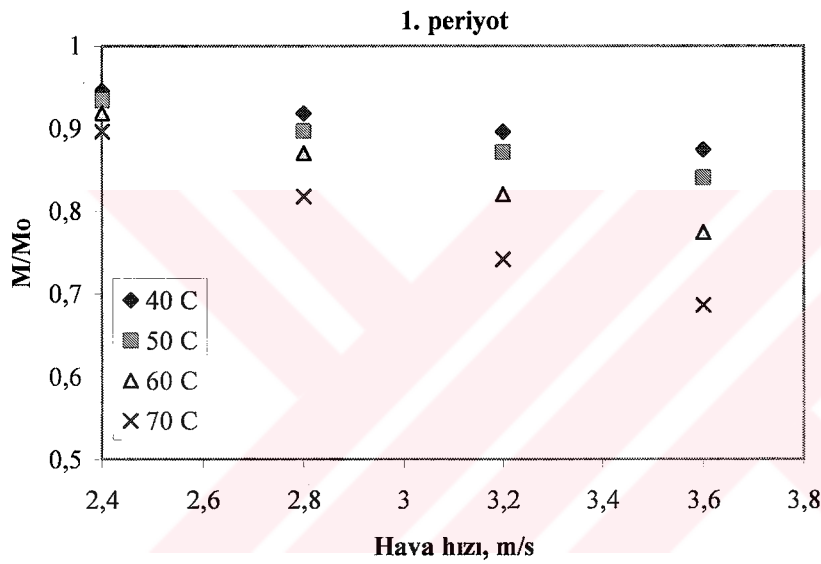
6.2.1.1. Açık Sistem Deneyleri

Zıt akışlı konvektif-radyatif kurutucuda ayçekirdeği kurutularak, kurutma parametrelerinin kuruma hızı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Ayçekirdeği nem içeriğinin başlangıç nem içeriğine oranı olarak tanımlanan “relatif nem içeriği” (M/Mo) değişimleri, 1., 2. ve 3. kuruma periyotları için, hava hızı ve sıcaklığına bağlı olarak, sırasıyla Şekil 6.1-6.3’te görülmektedir.

Kurumayı sağlamak için, kurutulan maddenin yüzeyinde, kuruma sırasında oluşan durgun buhar filmi sürekli olarak uzaklaştırılmalıdır. Artan hava hızıyla orantılı olarak film kalınlığı azalmakta, difüzyon hızı ve yüzeyden uzaklaştırılan nem miktarı yani buharlaşma hızı artmaktadır, kuruma hızlanmaktadır [1]. Bu kurutucuya has bir özellik olarak kolonda yukarı yönlü hareketli hava akımı, kurutmayı hızlandırmanın yanı sıra, parçacıkların -artan hava hızı ile orantılı şekilde- serbest düşmelerini önlemekte, sistemde daha uzun süre kalmalarını ve

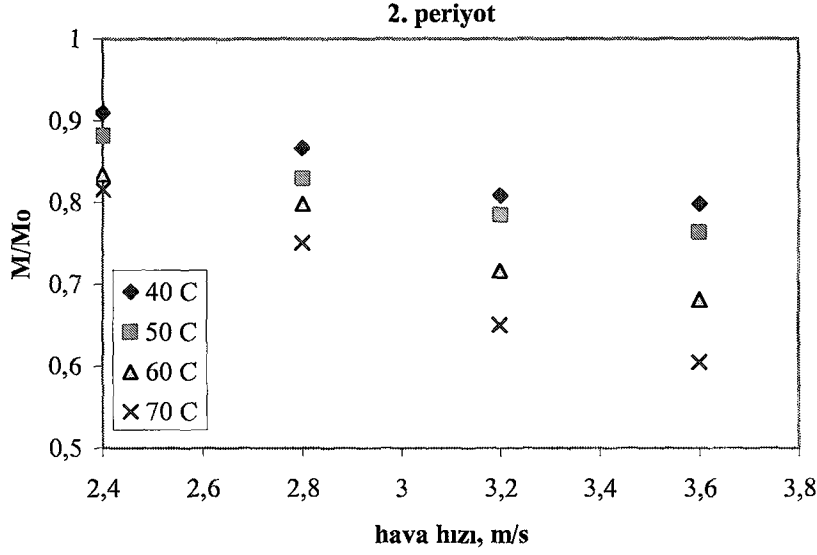
dolayısıyla uzaklaştırılan nem miktarının artmasını sağlamaktadır. Dolayısıyla hava hızı eksenini yaklaşık bir zaman ekseni. 70°C hava sıcaklığı için en düşük hava hızında 3. periyot sonunda ayçekirdeği relatif nem içeriği 0.79 iken, en yüksek hava hızında bu değer 0.564'e düşmüştür.

Can ve Eryener [9], kabak çekirdeğinin tepside ince tabaka halinde kurutulmasında, çekirdeklerin kurutma kinetiğine etki eden en önemli parametrenin kurutma havası sıcaklığı olduğunu, kurutma havası hızının ise nem taşınımını kolaylaştırıcı rolünden dolayı ikincil bir etkiye sahip olduğunu gözlemlemiş ve kurutma havası sıcaklığı ile hızının artışına bağlı olarak kabak çekirdeği kuruma hızının arttığını tespit etmişlerdir.

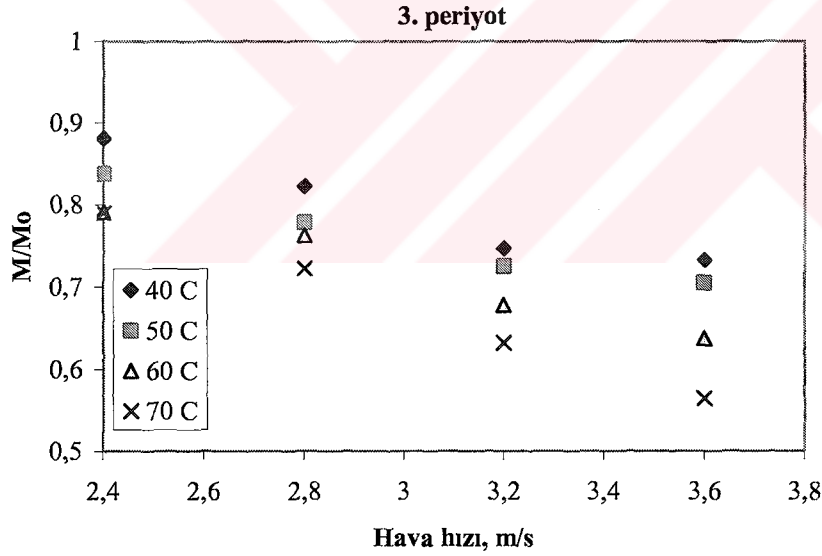


Şekil 6.1 Birinci periyot sonu ayçekirdeği relatif nem içeriğinin hava hızı ve sıcaklığı ile değişimi

Syahrul ve diğ. [2] ise, buğday gibi büyük nemli parçacıkların akışkan yatakta kurutulabilirliği üzerine yaptıkları çalışmalarında hava hızının, parçacıkların nem içeriğinin kurutma süresi ile değişimine etkisini incelemiş ve hava hızındaki yaklaşık %15 düşüşün kurutma süresini çok az değiştirdiğini gözlemlemişlerdir.



Şekil 6.2. İkinci periyot sonu ayçekirdeği relatif nem içeriğinin hava hızı ve sıcaklığı ile değişimi



Şekil 6.3. Üçüncü periyot sonu ayçekirdeği relatif nem içeriğinin hava hızı ve sıcaklığı ile değişimi

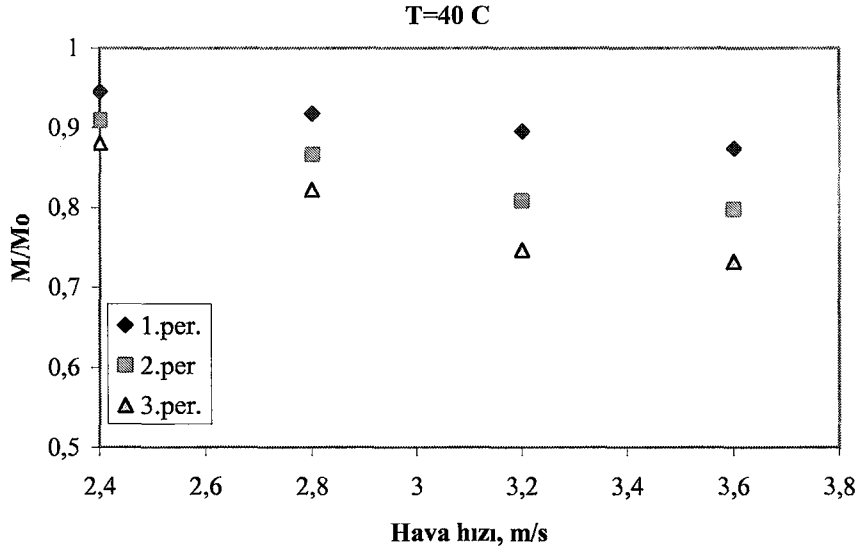
Her üç periyotta da sıcaklığın yükselmesiyle birlikte daha fazla nem uzaklaştırıldığı görülmektedir. Ancak, 40°C ve 50°C sıcaklıklarda bünyede kalan nem miktarındaki hafif düşme, 70°C sıcaklıkta daha keskin bir düşüşe sebep olmaktadır. 40°C hava sıcaklığında en yüksek hava hızında 3.periyot sonundaki ayçekirdeği relatif nem içeriği 0.732 iken, aynı hava hızında 70°C’de bu değerin 0.564 olduğu tespit edilmiştir. Radyasyonun veya iletimin ihmal

edilememesi durumlarında ara yüzey sıcaklığı yaş termometre sıcaklığından yüksektir ve dolayısıyla kuruma hızı da buna bağlı olarak artmaktadır [5]. Hajidavalloo ve Hamdullahpur [64], tahılların akışkan yatakta kurutulması üzerine yaptıkları çalışmada kurutma havası sıcaklığının tahılların kuruma hızı şiddeti üzerinde hava hızına nazaran çok daha önemli bir etkisi olduğunu tespit etmişlerdir. Dimattia ve diğ. [7], bahar buğdayının akışkan yatakta kurutulmasında 39°C düşük yatak sıcaklığındaki kuruma hızının 58°C yüksek sıcaklığına nazaran çok daha yavaş olduğunu gözlemlemişlerdir. Bu sonucu, nemin ağırlıklı olarak madde içi difüzyonla uzaklaştırıldığına ve bir buğday tanesinin merkezi ile hava arasındaki sıcaklık farkının itici güç teşkil ettiğine bağlamışlardır. Dolayısıyla, sıcaklık ne kadar yüksek olursa itici gücün o kadar artacağını ve madde içi nemin uzaklaştırılmasının çok daha kolay olacağını belirtmişlerdir.

Syahrul ve diğ. [2], kurutma havası sıcaklığının buğdayın akışkan yatakta kurutulması konusunda yaptıkları çalışmada kurutma havası sıcaklığının malzemenin kuruma süresi üzerinde en önemli etkiye sahip olduğunu gözlemlemiş ve sıcaklık artışı ile birlikte aynı kurutma periyodu için parçacıkların nem içeriğinin etkili bir şekilde arttığını ve farklı sıcaklıklardaki kuruma hızı eğrileri arasında çok büyük bir fark olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca, sıcaklığın yükselmesi aynı kurutma periyodunda kurutma havası entalpisini de artırmaktadır [2].

Şekil 6.4-6.7 'de sırasıyla 40, 50, 60 ve 70°C hava sıcaklıkları için ayçekirdeği relatif nem içeriğinin hava hızı ve periyot sayısına bağlı olarak, değişimi görülmektedir. İstenen nem miktarına düşürebilmek amacıyla parçacıklar kolondan üç kez geçirilmiştir. Kurutulan malzeme periyotlar arasında, "temperleme" süresince ısı verilmeksizin bekletilmekte, nemin malzeme içerisinde difüzyonu sonucu parçacık içerisinde homojen bir nem dağılımı elde edilmektedir. Bu sayede parçacığın dış yüzeyi ile iç kısmı arasında oluşabilecek gerilmeler de en aza indirilmektedir. Bu esnada hem taneler içerisindeki nem gradyentlerinin dağılması (dissipate) tanelerin en dış tabakasının aşırı kurumasını ve dolayısıyla çatlakları ve kırılgenliği engelleyerek ürün kalitesini artırmakta, hem de sistemin sürekli tip olması sebebiyle kurutma işlemine devam ediyor olması enerji tasarrufu sağlamakta ve kurutma sisteminin kapasitesini artırmaktadır [29, 65].

Fışkıran yataklarda, parçacıkların sirkülasyonunda halka bölgedeki bekleme sırasında da aynı mekanizma işlemektedir. Zira bu yoğun bölgede kayda değer bir kurutma gerçekleşmemekte, ısı ve kütle transferi parçacıkların pnömatik olarak taşındığı fışkıрма bölgesinde gerçekleşmektedir.



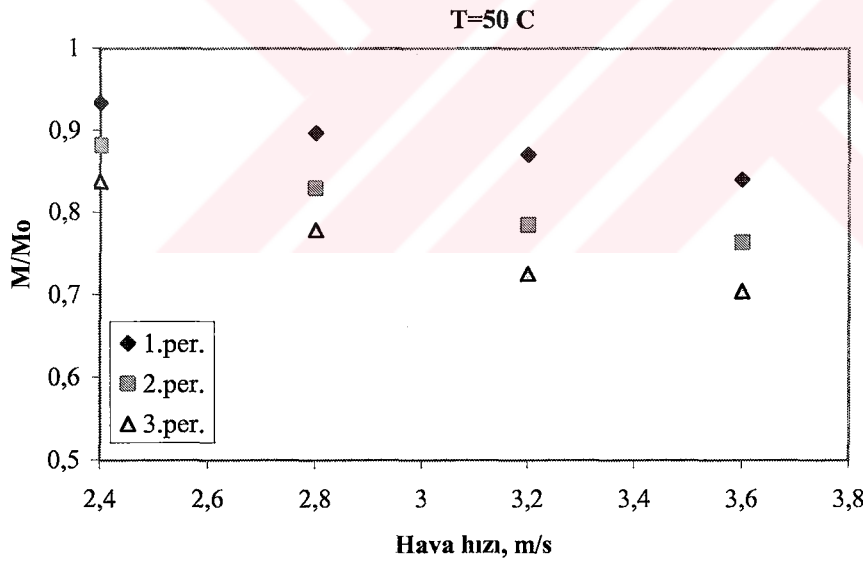
Şekil 6.4. 40 °C hava sıcaklığında 1., 2. ve 3. periyot sonlarındaki relatif nem içeriklerinin hava hızı ile değişimi

Madhiyanon ve diğ. [29], çeltiğin fişkırın yatakta kurutulması üzerine yaptıkları çalışmada, kurutma işleminin yüksek hava sıcaklığında gerçekleştirilmesine rağmen çeltik kalitesini etkilemediğini deneysel olarak gözlemlemiş ve bunu çeltiklerin kurutma bölgesi dışındaki sirkülasyonu sırasında temperlenerek tahıl içerisindeki nemin homojen bir şekilde dağılmasına ve tahılın kurummasının gerçekleştiği fişkırma bölgesinde çok kısa bir süre kalmasına bağlamışlardır. Dolayısıyla, fişkırma kanalından geçen tanenin iç ve dış yüzeyi arasında daha az gerilme oluşmakta ve tahılların yüksek sıcaklıklarda zarar görmeden kurumaları sağlanmaktadır. Tulasidas ve diğ. [1993] de tanelerin fişkırın yatakta temperlenmesinin tane içerisindeki nem dağılımında homojenliğe sebep olduğunu ifade etmişlerdir [29].

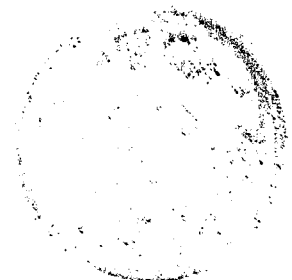
Fışkırın yataktakiyle aynı şekilde -ancak sistem dışında- uygulanan temperleme işlemi, konvektif-radyatif kurutma kolonunda ayçekirdeği kurutulmasında da iyi sonuç vermektedir. En yüksek hava hızı ve sıcaklığında 1. periyot sonu relatif nem içeriği 0.686 iken, 2. periyot sonunda bu değer 0.605'e, 3. periyot sonunda ise 0.564'e düşürülmüştür. 3. periyottan sonra ayçekirdeğinin depolanması sırasında bu nem daha da aşağılara düşecektir. Zira Wiset ve diğ. [65], %18-31 yb aralığındaki nem içerikleri için akışkan yatak kurutucuların etkin kurutucular olduğunu belirtmiş, tahıl nem içeriğinin %18'in altında olması durumunda nemin yüzeye difüze etmesi için daha uzun zamana ihtiyaç duyulduğunu ve tahıl kırılganlığının artarak çatlamalara yol açtığını belirterek, bu tip kurutucuların kullanımı için en uygun yolun iki kademeli bir

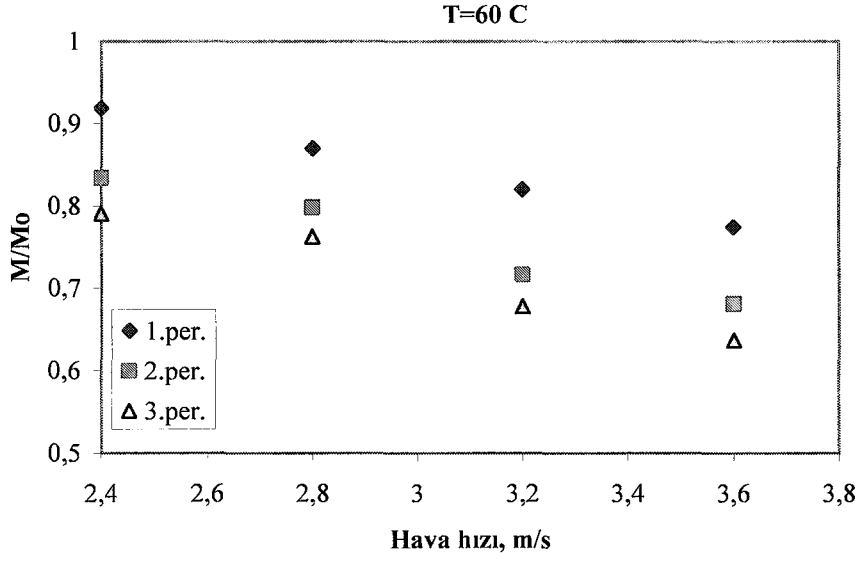
kurutma sistemi olduğunu ifade etmişlerdir. Bu kurutma stratejisinde, yüksek nem içeriğine sahip tahıllar (yaklaşık %31 yb) akışkan yatakta, yüksek hava sıcaklığında hızlı kurutularak nem içerikleri yaklaşık olarak %18yb'ye düşürülmektedir. İkinci aşamada nemin uzaklaştırılması işlemi tamamen endospermdeki nemin difüzyonu ile olmaktadır ki bu işlem çok yavaştır ve tahılın depolanması sırasında gerçekleşebilir. Böylece depoda kurutma (in-store drying) olarak da adlandırılan ikinci aşama kurutma ile nemin %14yb' ye düşmesi sağlanmakta, maliyet düşmekte ve optimum ürün kalitesi sağlanmaktadır.

Kurutma işlemlerinde konvansiyonel sabit enerji uygulamasının aksine yeni geliştirilen fasıllı (intermittent) kurutma işlemlerinde özellikle bio malzemelerin kuruma kinetiğine uygun olması için zamanla değişen ısı girişi ve hava akışı sağlanmaktadır. Temperleme işlemi, son yıllarda kullanılmaya başlanılan fasıllı kurutma tekniğinde de uygulanmakta; kurutma işleminin durdurulduğu bu bekleme periyodu sonrasında bio malzemenin yüzeyindeki nem içeriği arttığında ısıtma yeniden başlamakta ve kuruma hızı yükselmektedir. Bu işlem termal enerji kullanımının düşmesine sebep olmasının yanı sıra konvektif kurutucularda kullanılan hava miktarını azaltıp, ürün kalitesini artırmaktadır [68].

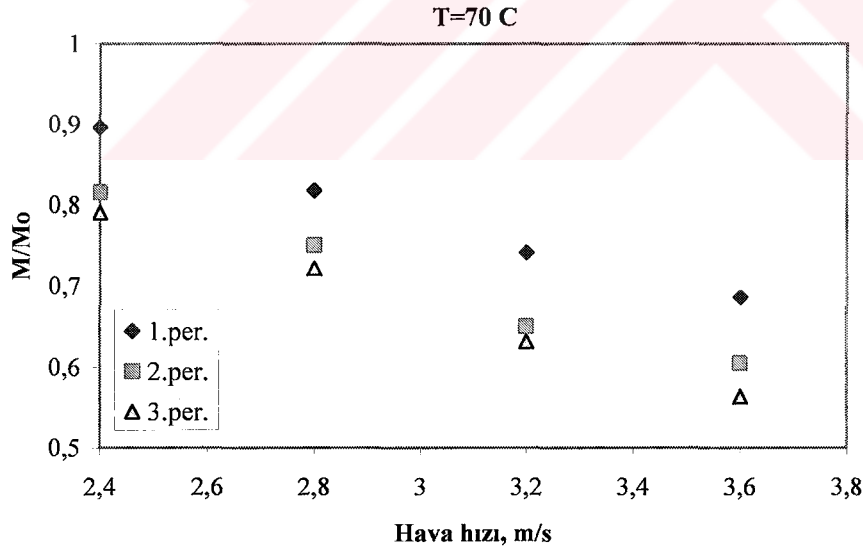


Şekil 6.5. 50 °C hava sıcaklığında 1., 2. ve 3. periyot sonlarındaki relatif nem içeriklerinin hava hızı ile değişimi





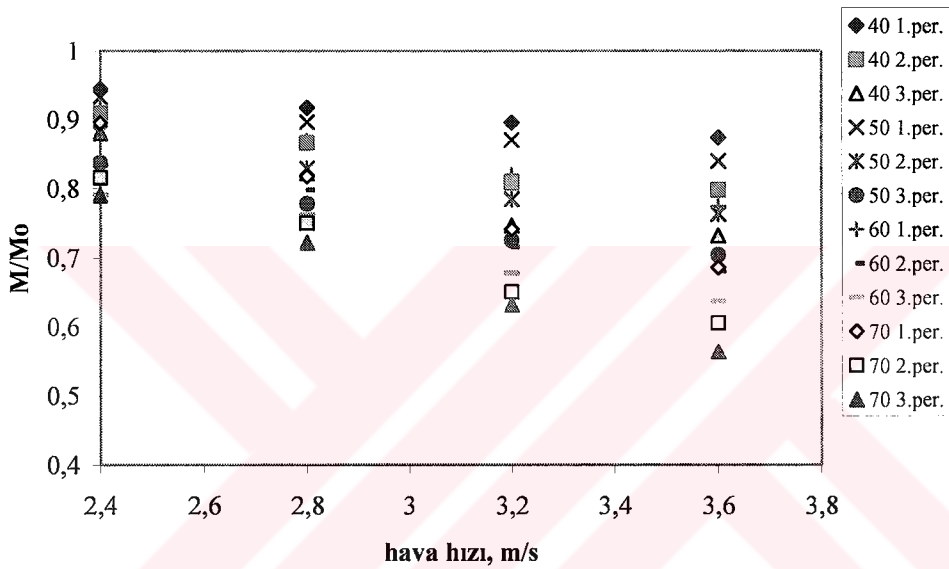
Şekil 6.6. 60°C hava sıcaklığında 1., 2. ve 3. periyot sonlarındaki relatif nem içeriklerinin hava hızı ile değişimi



Şekil 6.7. 70°C hava sıcaklığında 1., 2. ve 3. periyot sonlarındaki relatif nem içeriklerinin hava hızı ile değişimi

Şekil 6.8’de 40, 50, 60 ve 70°C hava sıcaklıklarında, her üç periyot sonu için relatif nem içeriğinin hava hızı ile değişimi verilerek bir karşılaştırma yapılmış ve en fazla nemin 3.6 m/s

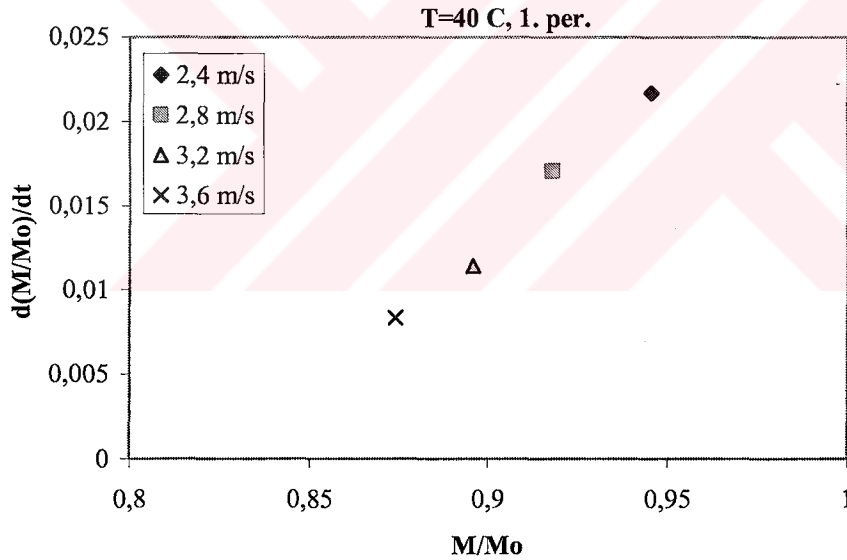
hava hızında, 70°C hava sıcaklığı ile 3.periyot sonunda uzaklaştırıldığı görülmüş, çekirdek nemi %26 kb'den depolama için uygun bir nem içeriği olan %14.6 kb değerine indirilmiştir. Ayçekirdeğinin kurutulmasında bu hava hızı ve sıcaklıkta konvektif-radyatif kurutucu en yüksek verimle çalışmaktadır. Şekil 6.8'de , 3.6 m/s hava hızında 40°C hava sıcaklığında ayçekirdeğinin kolondan üç kez geçirilmek suretiyle düşürülen nem içeriğinin, aynı hava hızında 70°C'de bir kez geçirileninkinden daha düşük olduğu görülmektedir. Ayrıca, 70°C hava sıcaklığında 2.4 m/s hava hızında 3. periyot sonu düşürülen relatif nem içeriği 0.790 iken, aynı hava sıcaklığında 3.6 m/s hava hızı için 1. periyot sonunda bu değer 0.686 dır.



Şekil 6.8. Her dört hava sıcaklığı için her üç periyot sonu relatif nem içeriklerinin hava hızı ile değişimi

Şekil 6.9-6.12'de 1. periyotta sırasıyla 40, 50, 60 ve 70°C hava sıcaklıkları için, konvektif-radyatif kurutma kolonunda ayçekirdeğinin kuruma hızının hava hızına bağlı olarak değişimi ve bu dört grafiğin birleştirildiği Şekil 6.13'de ise, sıcaklığın kuruma hızı üzerindeki etkisi açıkça görülmektedir. Kurumanın azalan kuruma hızı evresinde gerçekleştiği, bünyede kalan nem miktarı azaldıkça kuruma hızının azaldığı ve yükselen sıcaklıkla birlikte arttığı görülmektedir. En yüksek kuruma hızı 70°C hava sıcaklığında elde edilmiştir. Parçacıkların kurutma havasına maruz kalmasının hemen ardından malzeme yüzeyindeki nem, ısı ve kütle transferine karşı dış direncin düşük olması sebebiyle hızla uzaklaştırılmaktadır. Ancak daha sonra difüzyona karşı iç direncin yüksek olmasından dolayı nemin uzaklaştırılma hızı azalmaktadır [64]. Hajidavalloo ve Hamdullahpur [64], tahılların akışkan yatakta kurutulması üzerine yaptıkları çalışmada farklı sıcaklıklardaki kuruma hızı eğrileri arasında belirgin bir fark

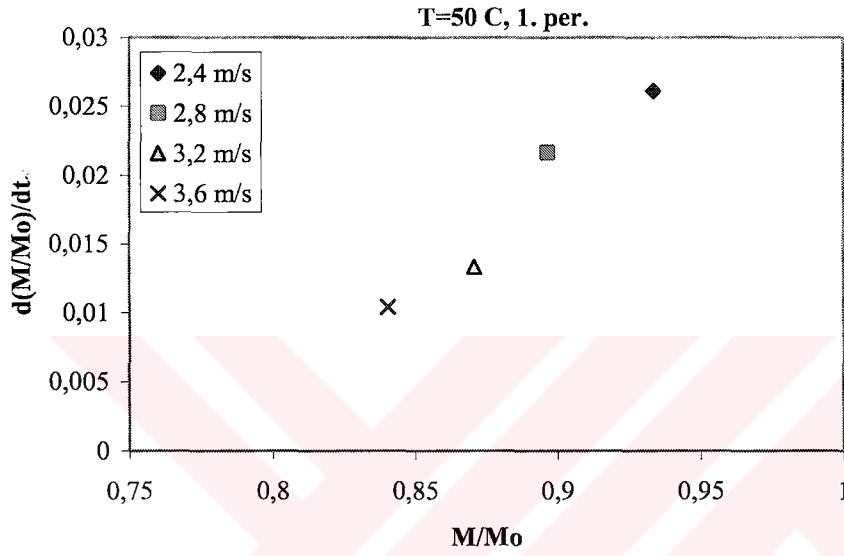
gözlendiğini ve başlangıç evresinde -yüzey neminin ani buharlaşması sebebiyle- kuruma hızının daha yüksek olduğunu ve tüm yüzey nemi buharlaşmaya kadar azaldığını belirtmişlerdir. Ülkü ve Uçkan [48], kurutucu gaz hızı ve sıcaklığının akışkan yatakta mısır kurumasına etkisini incelemiş, akışkan yatakla dolgulu yatak arasında kurutma hızı açısından bir karşılaştırma yapıldığında, akışkan yatağın düşük sıcaklıkta %15, yüksek sıcaklıkta %54 daha hızlı bir kurutma sağladığı görülmüştür. Bu sonuç ise akışkanlaşmanın temas yüzeyini artırarak kurumayı hızlandırmasına bağlanmıştır. Konvektif-radyatif kurutma kolonunda, -fışkıran yatak kurutucular ve pnömatik kurutucularda olduğu gibi- konvansiyonel tepsili kurutuculara nazaran daha büyük temas yüzeyi, daha yüksek ısı ve kütle transfer katsayıları ve dolayısıyla yüksek kurutma kapasitesi mevcuttur. Bu sistemde kurutulan parçacıklar için temas yüzeyi, ince tabaka kurutma ve hatta kesikli tip akışkan yatak kurutmadakine nazaran çok daha büyüktür; yüksek ısı ve kütle transferi katsayıları dolayısıyla yüzey nemi hızla buharlaşmaktadır. Ayrıca radyasyonla da ısı transferi gerçekleştiğinden ayçekirdeğinin -soğurma özelliklerine de bağlı olarak- kuruma hızı oldukça yüksek olmaktadır.



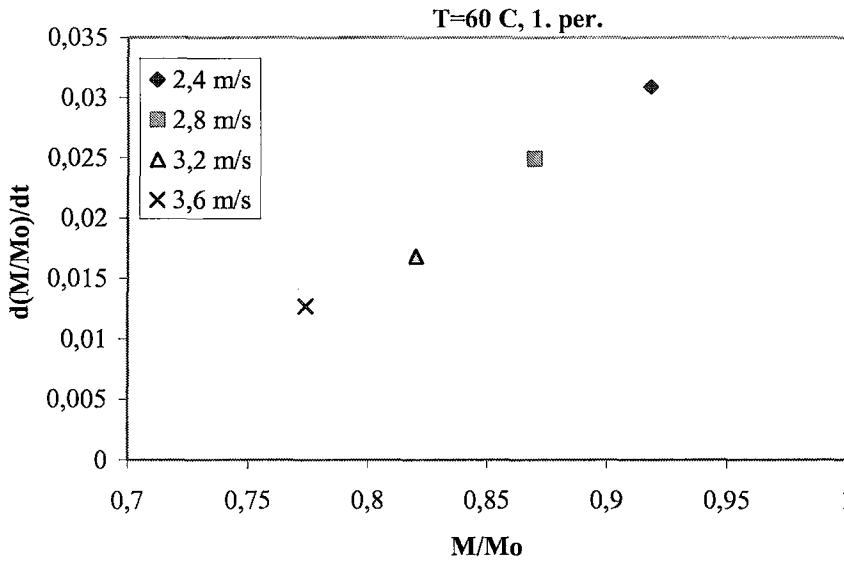
Şekil 6.9. 40°C hava sıcaklığında hava hızına bağlı olarak 1.periyot kuruma hızı değişimi

Nemli tahılların yüksek sıcaklıkta hızla kurutulması işlemi için geliştirilen mekanik sistemlerde yüksek sıcaklıklarda hava kullanıldığından, ısının tahıl kalitesine zarar vermesini önlemek için kurutucuda kalma süresi kısa olmalıdır. Akışkan yatak ve fışkıran yatak kurutucular, yüksek sıcaklık kurutucularıdır [65]. Bu çalışmadaki konvektif-radyatif kurutucuda, ürün ve kurutma havası arasındaki temas yüzeyinin büyük olması ve dolayısıyla

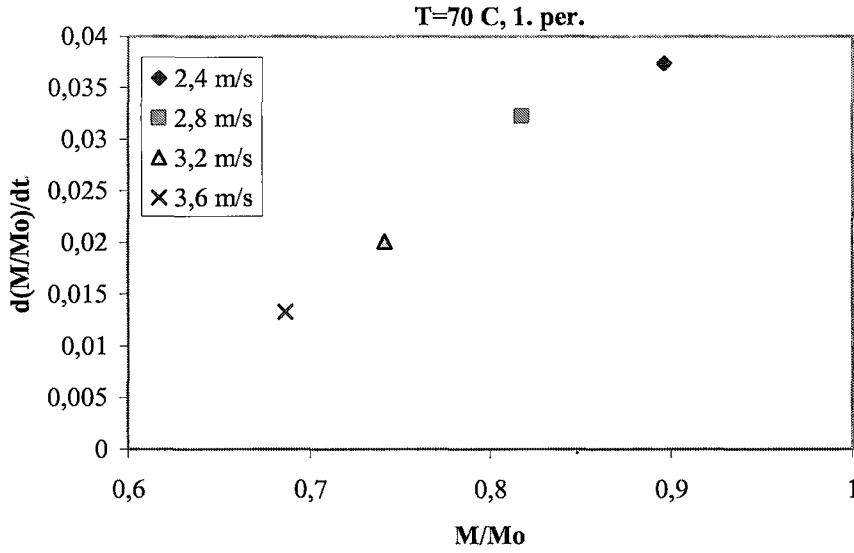
yüksek ısı ve kütle transferi sağlaması, ayrıca konveksiyonun yanı sıra radyasyonla ısı transferi de bulunması sebepleriyle kurutma hızı oldukça yüksektir. Kurutucuda kalma süresi kısa olduğundan ürüne zarar vermeden yüksek hava sıcaklıklarında kurutma yapılabilmektedir. Bu nedenlerle konvektif-radyatif kurutucu, özellikle endüstriyel uygulamaya henüz geçirilememiş üzerinde yoğun olarak çalışılan fişkıran yatak kurutuculara alternatif olabilecek bir yüksek sıcaklık kurutucusudur.



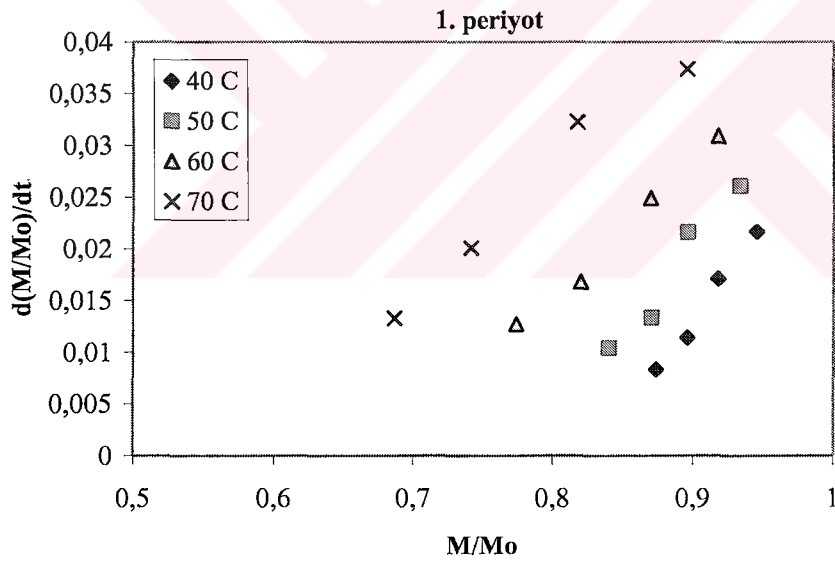
Şekil 6.10. 50°C hava sıcaklığında hava hızına bağlı olarak 1.periyot kuruma hızı değişimi



Şekil 6.11. 60°C hava sıcaklığında hava hızına bağlı olarak 1.periyot kuruma hızı değişimi

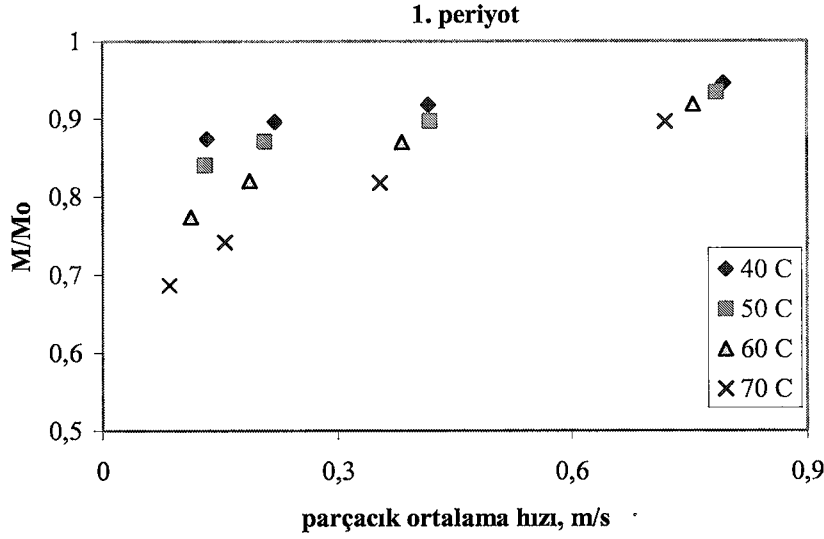


Şekil 6.12. 70°C hava sıcaklığında hava hızına bağlı olarak 1.periyot kuruma hızı değişimi



Şekil 6.13. Hava sıcaklığının ayçekirdeğinin kuruma hızı üzerindeki etkisi

Şekil 6.14'de 1.periyot sonu ayçekirdeği relatif nem içeriğinin hava sıcaklığı ve çekirdek ortalama hızına bağlı olarak değişimi gösterilmiştir. Hava hızı arttıkça çekirdeğin maruz kaldığı sürüklenme kuvveti artmakta, dolayısıyla çekirdek hızı azalmaktadır. Azalan çekirdek hızı ile birlikte bünyede kalan nem miktarı da düşmektedir. Ayrıca sıcaklık arttıkça daha da azalan nem içeriği sebebiyle aynı hava hızı için aynı sürüklenme kuvvetine karşı ağırlık azalacağından çekirdek hızı, düşmektedir.



Şekil 6.14. 1.periyot sonu ayçekirdeği relatif nem içeriğinin hava sıcaklığı ve parçacık ortalama hızına bağlı olarak değişimi

Genel olarak bakıldığında, ayçekirdeği karşıt akışlı sürekli tip konvektif-radyatif kurutma kolonunda 3.6 m/s hava hızında, 70°C hava sıcaklığı ile kurutulduğunda 1.periyot sonunda nem içeriği %26 kb'den %17.8 kb'ye düşürülmüştür. Kurutma kolonunda kalma süresinin saniyeler mertebesinde olduğu dikkate alındığında uzaklaştırılan nem miktarı ve kuruma hızı konvansiyonel tepsili kurutuculara nazaran oldukça yüksektir. Bu sonuç, kurutma kolonundaki tanelerin ara faz yüzeylerinin konvansiyonel kurutuculara nispeten çok daha büyük olmasına ve konveksiyonun yanı sıra radyasyonla ısı transferinin de gerçekleşmesine bağlanabilir. Ayrıca periyotlar arası bekletme süreleri, nem gradyentinin düzenlenerek ayçekirdeğinin kolonda iyi bir kuruma kinetiği sergilemesine sebep olmuş, üçüncü periyot sonunda nem içeriği %14.6 kb'ye düşürülmüştür.

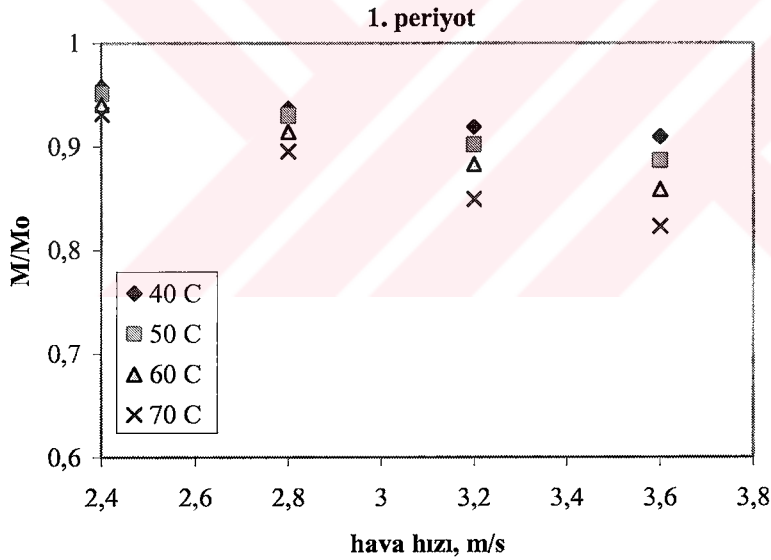
Madhiyanon ve diğ. [29], yüksek hava sıcaklığında fişkırma yatakta çeltiğin nem içeriğini %20-30 kb'den %14.4-21.5 kb nem içeriği aralığına kadar düşürmüşlerdir. Bu çalışmada, tahılın yatakta kalma süresinin 9-17 dakika olduğu, ancak bu sürenin büyük bir bölümünün, kurutmanın olmadığı sirkülasyon bölgesinde harcandığına dikkat çekilerek, tahılların fişkırma bölgesinde ancak saniyeler mertebesinde bir sürede bulundukları vurgulanmıştır. Ayrıca, kuruma hızının konvansiyonel tepsili kurutuculara nispeten çok yüksek ve akışkan yatak ile mukayese edildiğinde nemin uzaklaştırılması için geçen sürenin önemli ölçüde kısa olduğunu (1.5-2 dakika) belirtmişlerdir. Bu sonuç ise fişkırma bölgesinde ara faz

yüzeyinin büyük olmasına ve sirkülasyon bölgesinde tanedeki nemin üniform olarak dağılmasına bağlanmıştır.

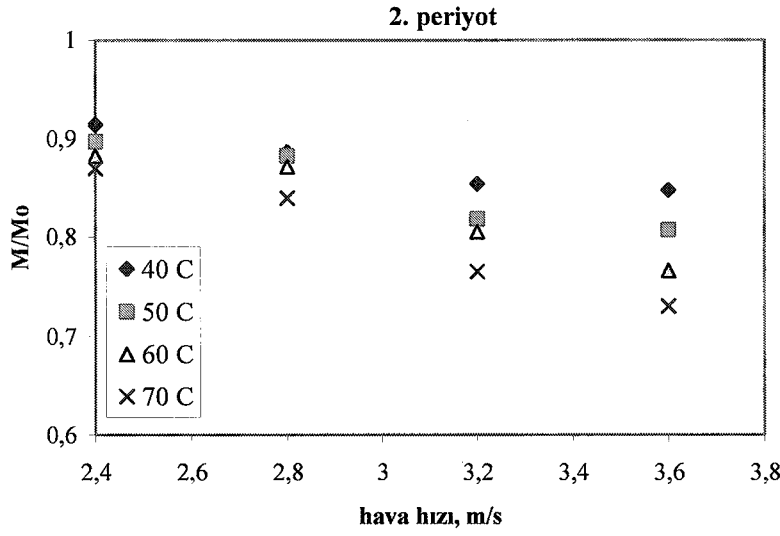
Zirai ürünlerin kurutulmasına ilişkin pek çok çalışma bulunmasına karşın ayçekirdeğinin kurutulması ile ilgili çalışmaya pek rastlanmamıştır. Syarief ve diğ. [66], ayçekirdeklerini konvansiyonel bir tepsili kurutucuda kurutarak, ayçekirdeğinin kuruma hızını etkileyen en önemli parametrenin hava sıcaklığı olduğunu, bu parametreyi sırasıyla hava hızının ve çekirdeğin başlangıç nem içeriğinin izlediğini belirtmişlerdir.

6.2.1.2. Kapalı Sistem Deneyleri

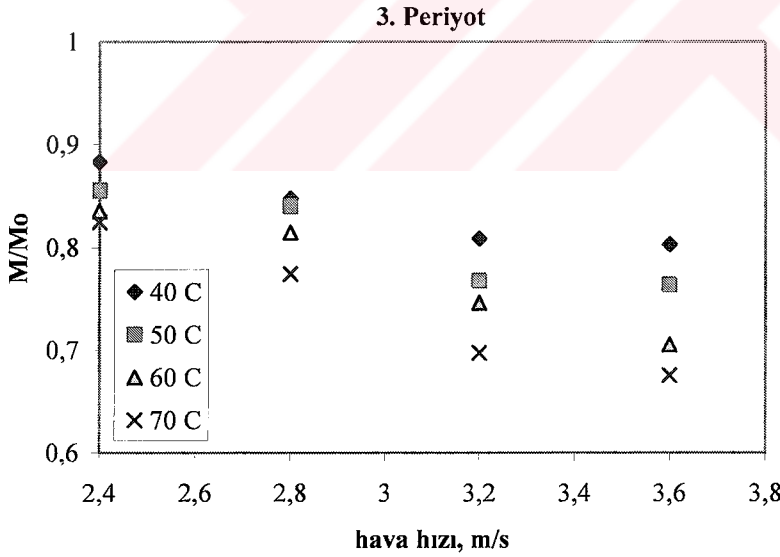
Şekil 6.15-6.17’de kapalı sistemde sırasıyla 1., 2., ve 3. periyot sonu relatif nem içeriklerinin hava sıcaklığı ve hızı ile değişimleri görülmektedir. Her üç periyotta da artan hava hızı ve sıcaklığıyla birlikte uzaklaştırılan nem miktarı da artmaktadır.



Şekil 6.15. Birinci periyot sonu ayçekirdeği relatif nem içeriğinin hava hızı ve sıcaklığı ile değişimi



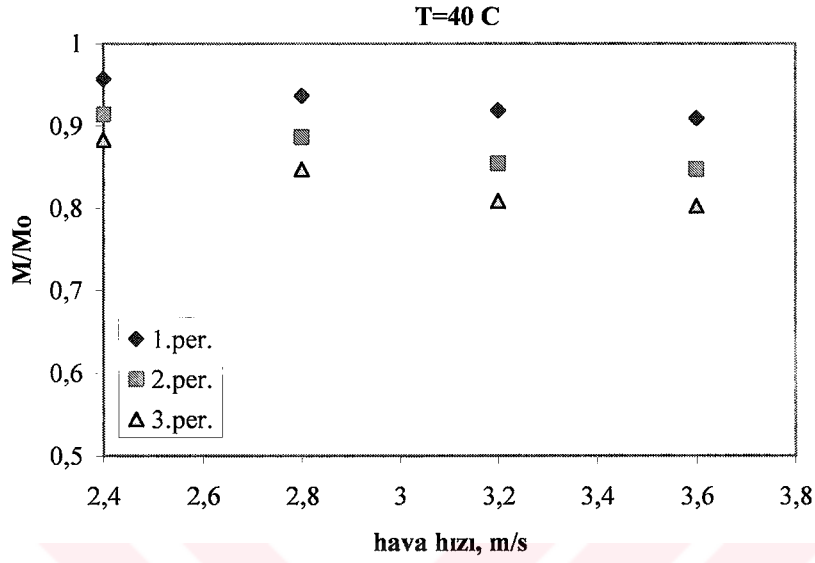
Şekil 6.16. İkinci periyot sonu ayçekirdeği relatif nem içeriğinin hava hızı ve sıcaklığı ile değişimi



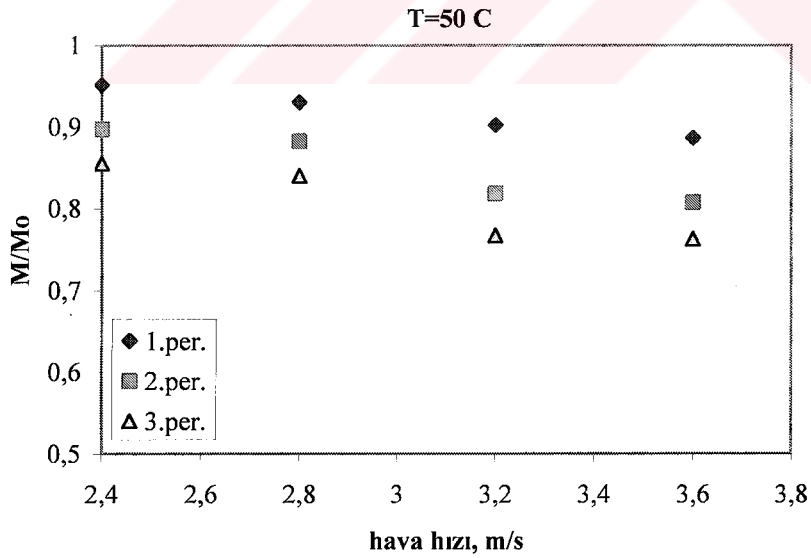
Şekil 6.17. Üçüncü periyot sonu ayçekirdeği relatif nem içeriğinin hava hızı ve sıcaklığı ile değişimi

Şekil 6.18-6.21’de sırasıyla 40, 50, 60 ve 70°C hava sıcaklıkları için ayçekirdeği relatif nem içeriğinin hava hızı ve periyot sayısına bağlı olarak, değişimi görülmektedir. Özellikle 60 ve 70°C hava sıcaklıklarında, 1. ve 2. periyot sonu nem içerikleri arasındaki farkın 2. ve 3.

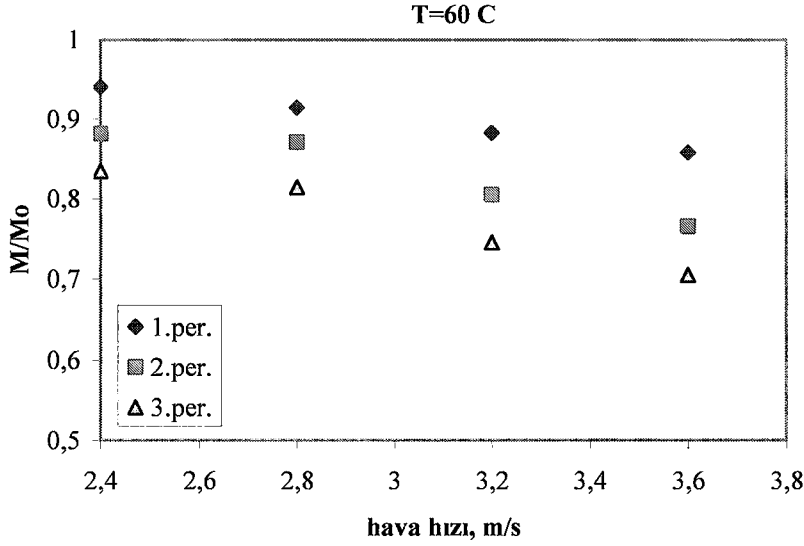
periyotlar arasındakinden daha büyük olduğu görülmektedir. Zira, uzaklaştırılan nem miktarı arttıkça kuruma hızı düşmekte ve son periyotta kuruma yavaşlamaktadır.



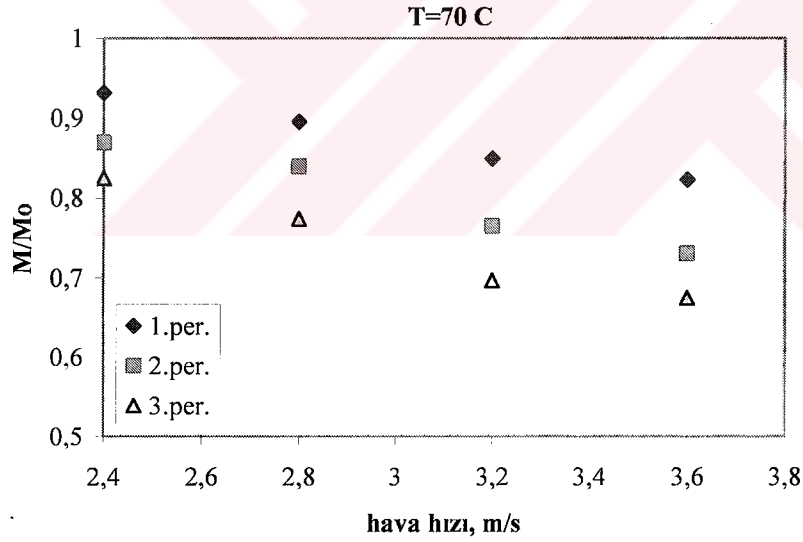
Şekil 6.18. 40 °C hava sıcaklığında 1., 2. ve 3. periyot sonu relatif nem içeriklerinin hava hızı ile değişimi



Şekil 6.19. 50 °C hava sıcaklığında 1., 2. ve 3. periyot sonu relatif nem içeriklerinin hava hızı ile değişimi



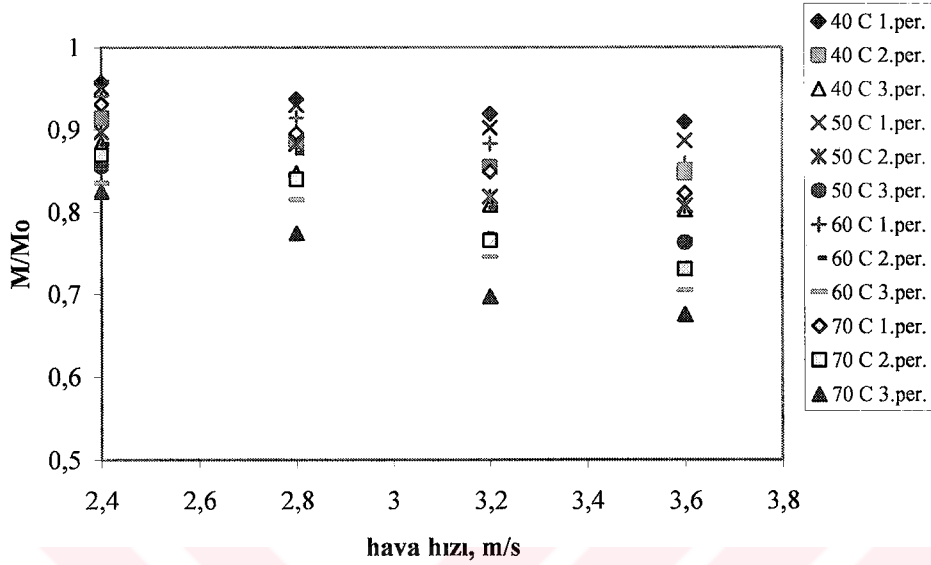
Şekil 6.20. 60 °C hava sıcaklığında 1., 2. ve 3. periyot sonu relatif nem içeriklerinin hava hızı ile değişimi



Şekil 6.21. 70 °C hava sıcaklığında 1., 2. ve 3. periyot sonu relatif nem içeriklerinin hava hızı ile değişimi

Şekil 6.22’de 40, 50, 60 ve 70°C sıcaklıklarında, her üç periyot sonu için hava hızı ile relatif nem içeriği değişimi verilerek bir karşılaştırılma yapılmış ve en fazla nemin 3.6 m/s hava hızında, 70°C hava sıcaklığı ile 3.periyot sonunda uzaklaştırıldığı görülmüştür. Relatif nem içeriği 0.675’e düşürülerek çekirdek nemi %26 kb ’den %17.5 kb değerine indirilmiştir. Bu şekilde, en yüksek hava hızında 40°C hava sıcaklığında kolondan iki kez geçirilmek suretiyle

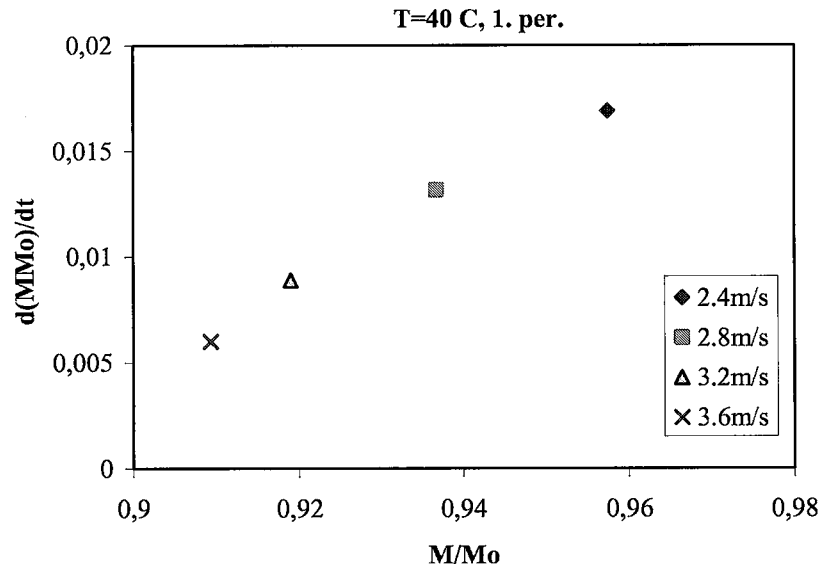
düşürülen relatif nem içeriği 0.847 iken, aynı hava hızında 70°C hava sıcaklığında 1. periyot sonunda 0.822’dir.



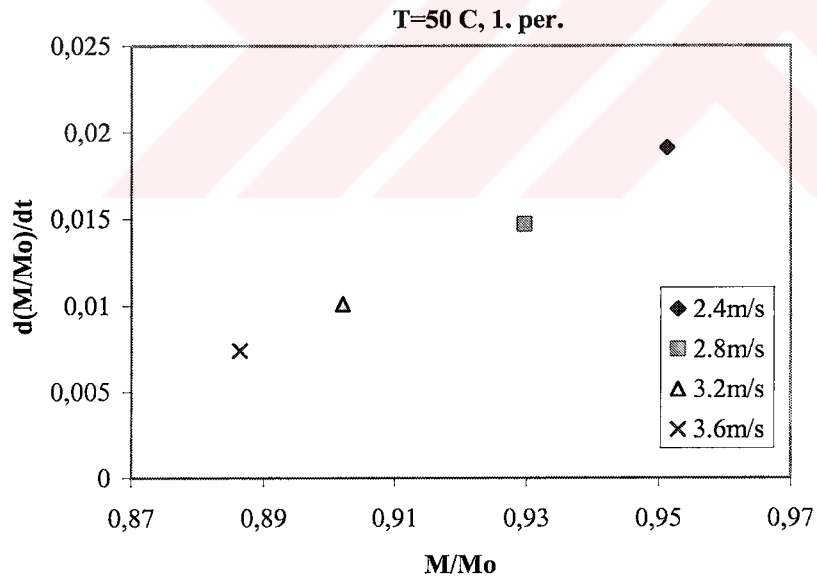
Şekil 6.22. Her dört hava sıcaklığı için her üç periyot sonu relatif nem içeriklerinin hava hızı ile değişimi

Şekil 6.23-6.26’da 1.periyotta sırasıyla 40, 50, 60 ve 70°C hava sıcaklıkları için, konvektif-radyatif kurutma kolonunda kapalı sistemde hava hızının ayçekirdeğinin kuruma hızına etkisi ve bu dört grafiğin birleştirildiği Şekil 6.27’de ise sıcaklığın kuruma hızı üzerindeki etkisi görülmektedir.

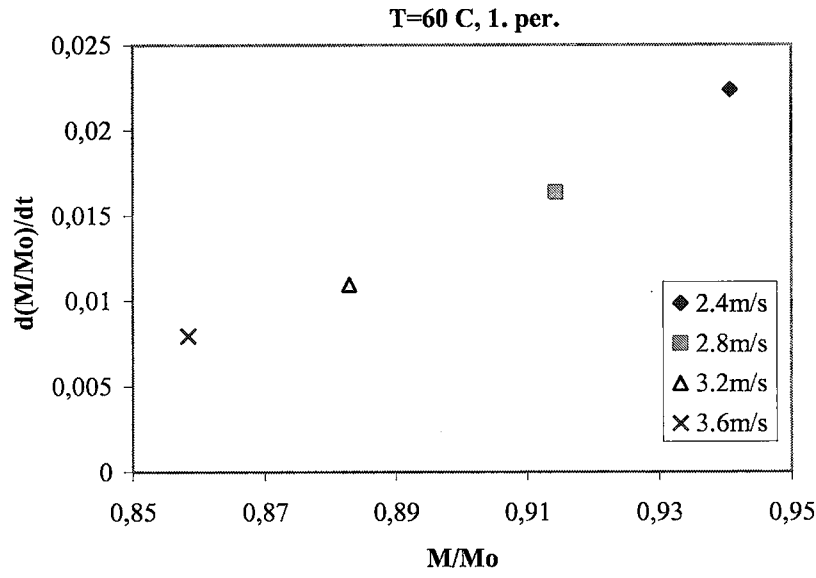
Şekilde, kurumanın azalan kuruma hızı evresinde gerçekleştiği, bünyede kalan nem miktarı azaldıkça kuruma hızının azaldığı ve yükselen sıcaklıkla birlikte arttığı görülmektedir. En yüksek kuruma hızı, açık sistemde olduğu gibi 70°C hava sıcaklığında elde edilmiştir.



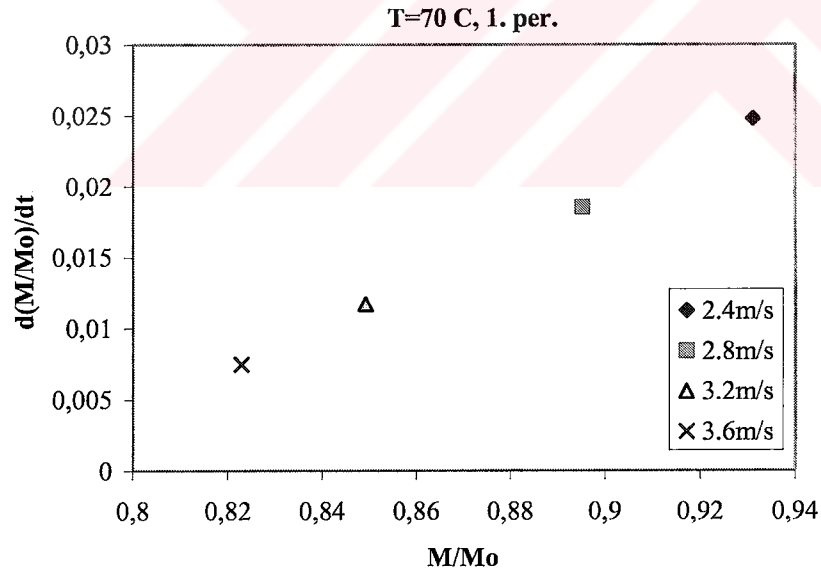
Şekil 6.23. 40°C hava sıcaklığında hava hızına bağlı olarak 1.peryot sonu kuruma hızı değişimi



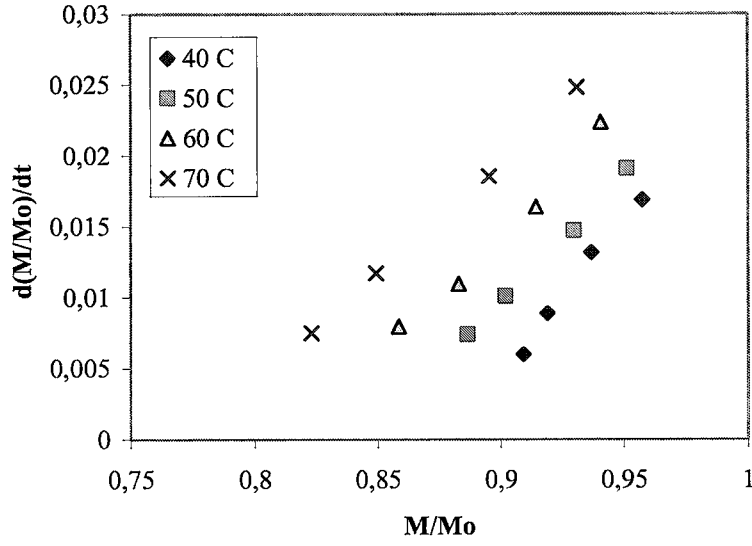
Şekil 6.24. 50°C hava sıcaklığında hava hızına bağlı olarak 1.peryot sonu kuruma hızı değişimi



Şekil 6.25. 60°C hava sıcaklığında hava hızına bağlı olarak 1.periyot sonu kuruma hızı değişimi

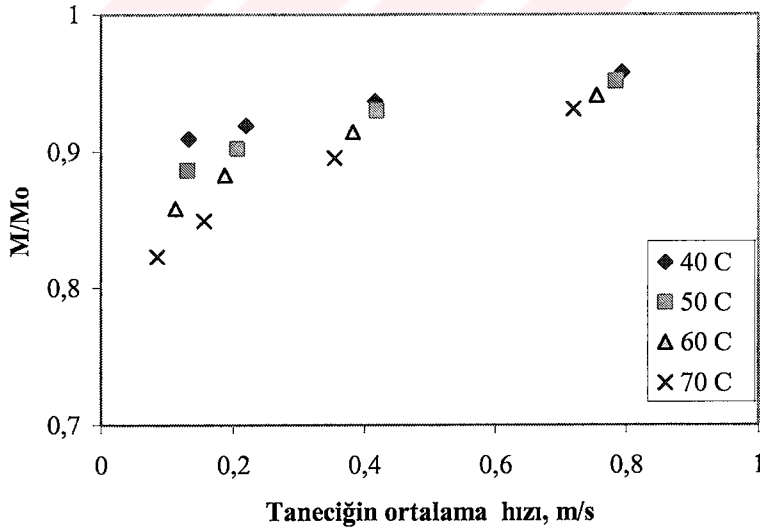


Şekil 6.26. 70°C hava sıcaklığında hava hızına bağlı olarak 1.periyot sonu kuruma hızı değişimi



Şekil 6.27. Hava sıcaklığının ayçekirdeğinin kuruma hızı üzerindeki etkisi

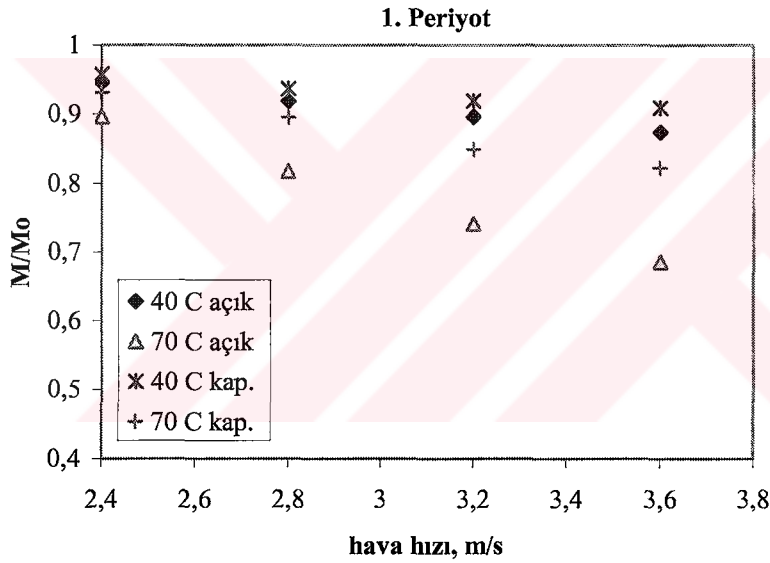
Şekil 6.28’de farklı hava sıcaklıklarında ayçekirdeğinin 1. periyotta kurutulmasında relatif nem içeriğinin çekirdek ortalama hızı ile değişimi görülmektedir. Tüm sıcaklıklarda çekirdek hızının azalması ile birlikte bünyede kalan nem miktarı düşmektedir.



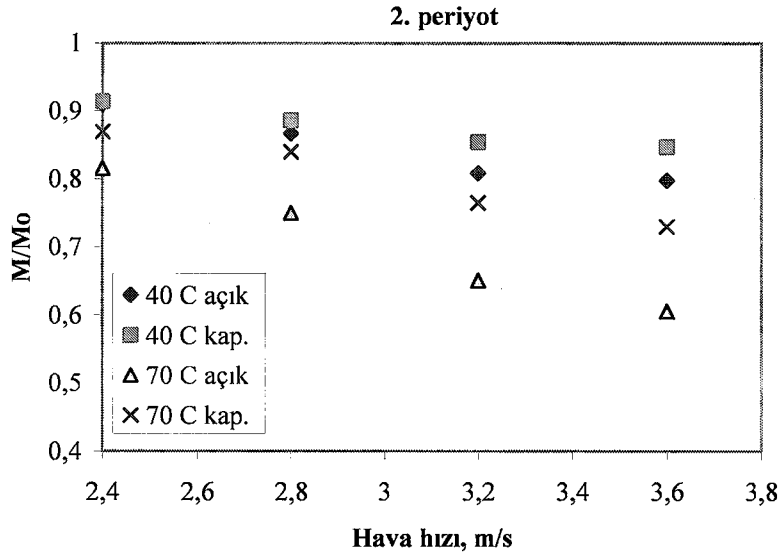
Şekil 6.28 Ayçekirdeğinin 1.periyotta relatif nem içeriğinin hava sıcaklığına bağlı olarak tanecik hızı ile değişimi

6.2.1.3. Açık ve Kapalı Sistemin karşılaştırılması

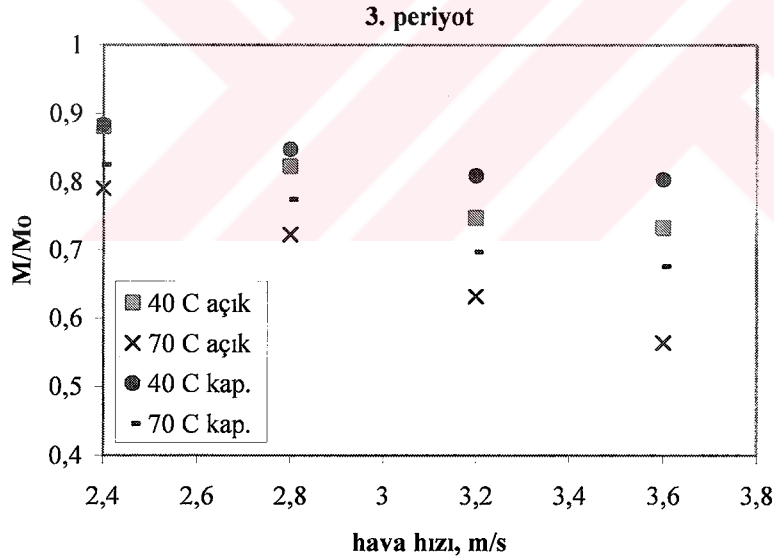
Şekil 6.29-6.31’de sırasıyla 1., 2. ve 3. periyot sonu ayçekirdeği relatif nem içerikleri hava sıcaklığı ve hızına bağlı olarak, açık ve kapalı sistem için karşılaştırılmıştır. Yükselen sıcaklıkla beraber uzaklaştırılan nem miktarı arttığından, kapalı sistemin verimi açık sisteme nazaran düşmektedir. Ancak 70°C hava sıcaklığında uzaklaştırılan nem miktarının çok yüksek olması sebebiyle kapalı sistemin verimindeki düşüş, bu sıcaklıkta dikkat çekicidir. Periyotlar ilerledikçe kuruma hızı düştüğünden aynı sıcaklık ve hava hızı için açık sistemin kapalı sisteme olan üstünlüğü azalmaktadır.



Şekil 6.29. 1.periyot sonu ayçekirdeği relatif nem içeriğinin açık ve kapalı sistem için karşılaştırılması

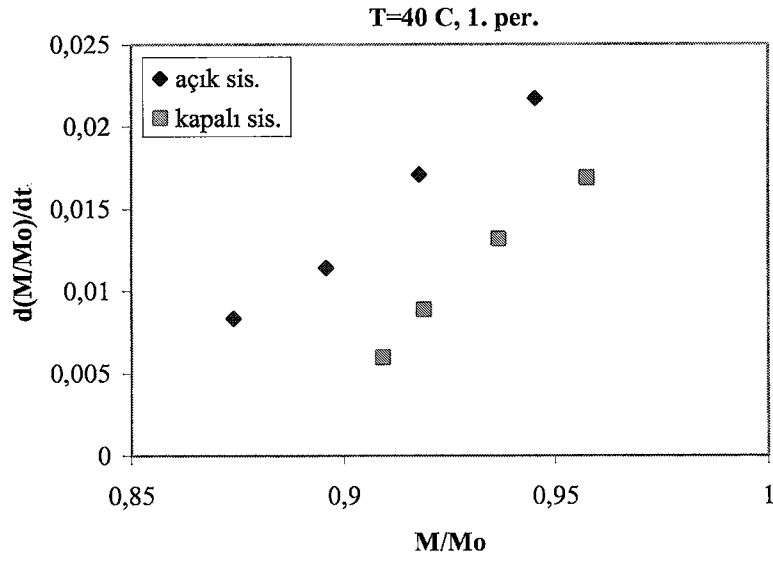


Şekil 6.30. 2.periyot sonu ayçekirdeği relatif nem içeriğinin açık ve kapalı sistem için karşılaştırılması

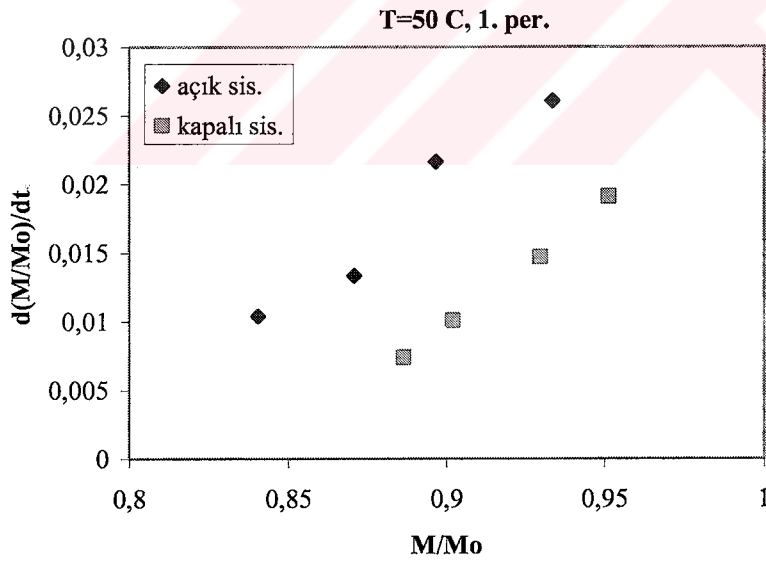


Şekil 6.31. 3.periyot sonu ayçekirdeği relatif nem içeriğinin açık ve kapalı sistem için karşılaştırılması

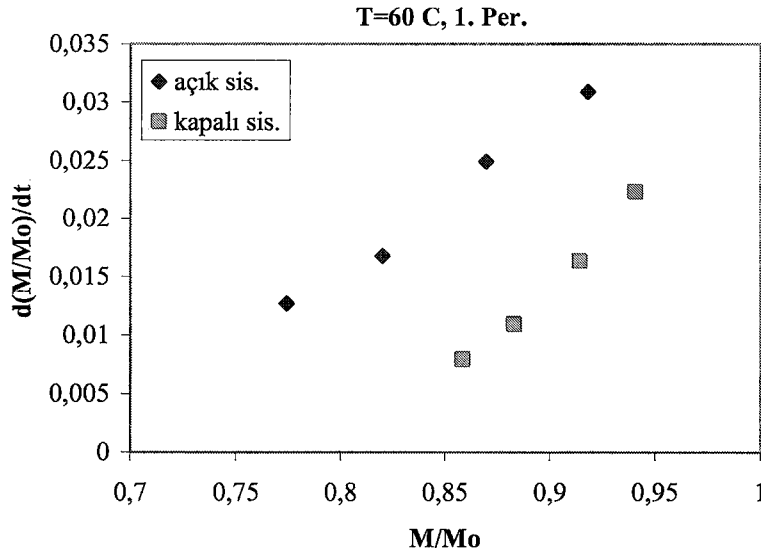
Şekil 6.32-6.35’de sırasıyla 40, 50, 60 ve 70°C hava sıcaklıklarında ayçekirdeğinin 1.periyot kuruma hızı eğrileri açık ve kapalı sistem için karşılaştırılmakta ve tüm sıcaklıklar için açık sistem kuruma hızının daha yüksek olduğu görülmektedir. Ancak bütün eğriler, kuruma eğrisinin birinci azalan kuruma hızı periyodundakine benzer karakterdedir.



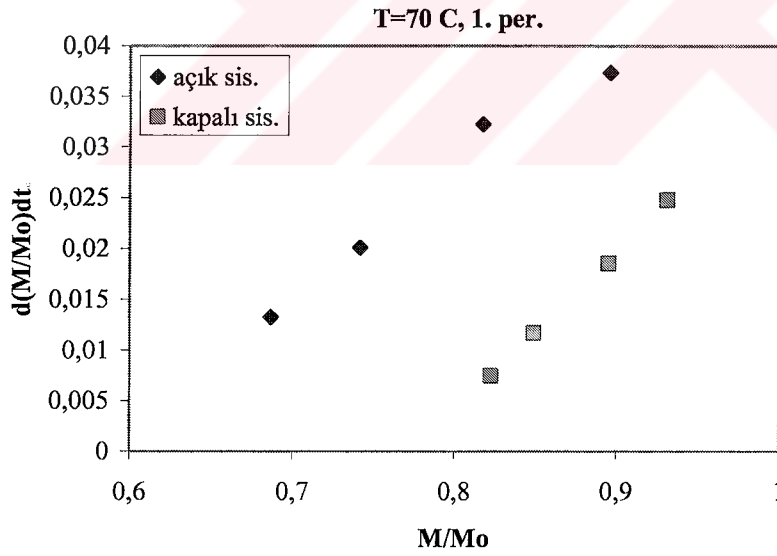
Şekil 6.32. 40°C hava sıcaklığında ayçekirdeğinin 1. periyot kuruma hızının açık ve kapalı sistem için karşılaştırılması



Şekil 6.33. 50°C hava sıcaklığında ayçekirdeğinin 1. periyot kuruma hızının açık ve kapalı sistem için karşılaştırılması



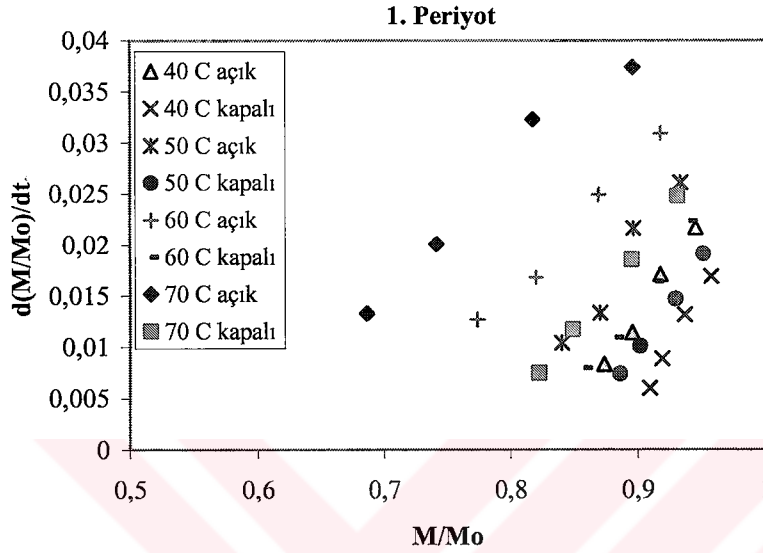
Şekil 6.34. 60°C hava sıcaklığında ayçekirdeğinin 1. periyot kuruma hızının açık ve kapalı sistem için karşılaştırılması



Şekil 6.35. 70 °C hava sıcaklığında ayçekirdeğinin 1. periyot kuruma hızının açık ve kapalı sistem için karşılaştırılması

Şekil 6.36’da ise tüm sıcaklıklar için açık ve kapalı sisteme ait kuruma hızı eğrileri tek bir grafikte verilerek karşılaştırılmıştır. Özellikle 60°C ve 70°C yüksek hava sıcaklıklarında açık

sistemde elde edilen kuruma hızları kapalı sisteme göre çok yüksektir. Bu şekilde, kapalı sistemin 70°C hava sıcaklığındaki ayçekirdeği kuruma hızı yaklaşık olarak açık sistemde 50°C 'deki kuruma hızı kadardır.



Şekil 6.36. Farklı hava sıcaklıklarında ayçekirdeğinin 1. periyot kuruma hızının açık ve kapalı sistem için karşılaştırılması

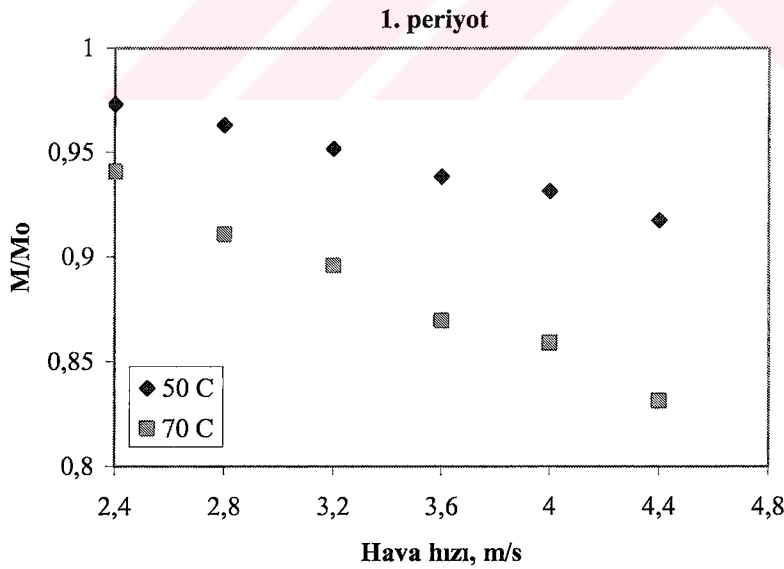
Literatürde termal verimi artırmak ve enerji tasarrufu sağlamak amacıyla kurutma sistemlerinde, egzost gazı tekrar sirküle edilmek suretiyle kurutma yapılmaktadır [66, 13]. Tahılların kurutulması çalışmalarına ait egzost havası nem analiz sonuçları, çıkış havası neminin kurumanın başlangıç safhasında hızla arttığını ancak kurumanın ilerleyen safhalarında değişimin az olduğunu göstermiştir [64]. Havanın başlangıçtaki bu yüksek nemi, malzeme yüzeyindeki nemin hızla uzaklaştırılmasına bağlanabilir. Yüzey neminin tamamen uzaklaştırılmasının ardından malzemenin düşük kütle difüzyon katsayısı sebebiyle geriye kalan nem kolayca uzaklaştırılamayacağından, egzost havası relatif neminde ani bir düşüş olmaktadır. Çıkış gazının düşük nem içermesi ise kurutma havasının tekrar kullanılması için avantaj sağlamakta, egzost gazının yüksek entalpisi ve düşük nemi sebebiyle kurutma işleminde tekrar kullanılarak kurutma işleminin verimi artırılmaktadır[64]. Konvektif-radyatif kurutucunun sürekli tip bir sistem olması sebebiyle çıkış havası neminde benzer bir değişim görülmemiş, çıkış havası nemindeki saniyelik düşüşler yerini tekrar yüksek nem değerlerine bırakmıştır, zira yüksek nem içeriğine sahip çekirdekler kolon içerisine sürekli olarak akmaktadır. Dolayısıyla özellikle daha fazla nemin bünyeden uzaklaştırıldığı yüksek sıcaklıklarda kapalı devre olarak

gerçekleştirilen kurutma deneylerinde, kuruma hızı açık sisteme nazaran çok düşük çıkmıştır. 1.periyotta 70°C hava sıcaklığı ve 3.6 m/s hava hızında açık sistemde ayçekirdeğinin kuruma hızı, kapalı sistemdekinin 1.7 katı iken, aynı hava hızı için 40 °C sıcaklıkta 1.3 katı daha yüksektir.

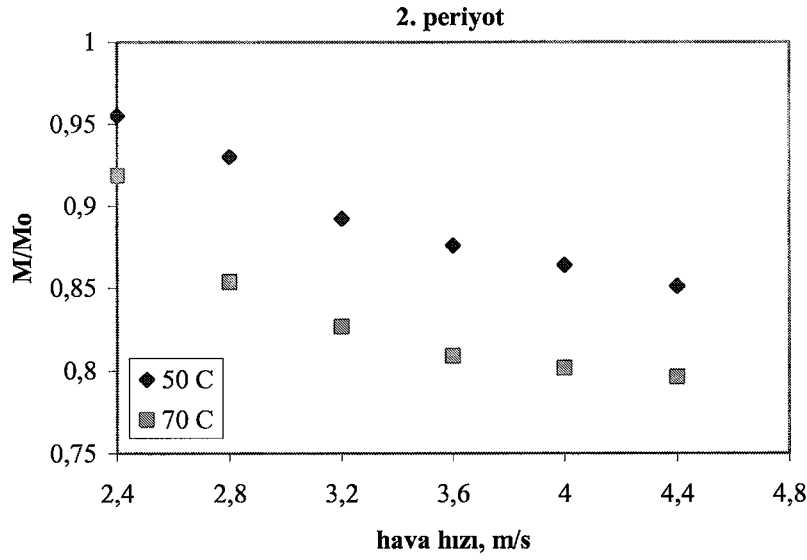
6.2.2. Soya Fasulyesi Kurutma Deneyleri

6.2.2.1. Açık Sistem Deneyleri

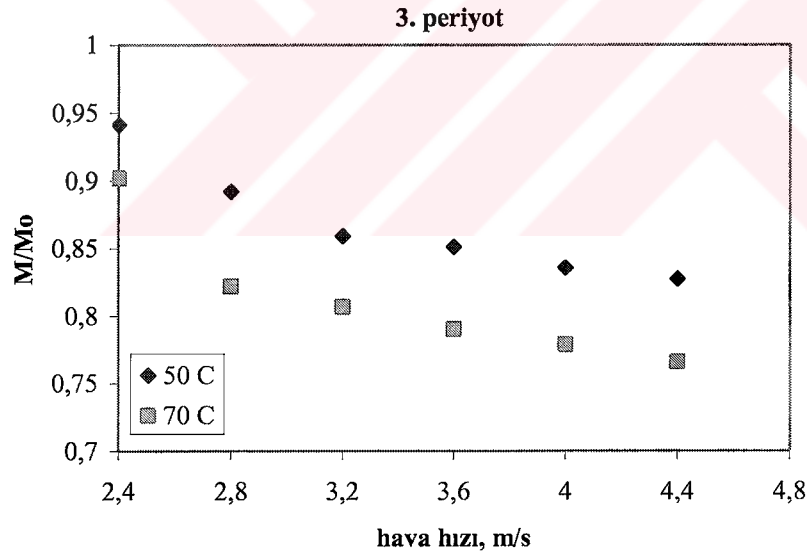
Şekil 6.37-6.39'da sırasıyla 1., 2. ve 3. kurutma periyotlarına ait relatif nem içeriklerinin hava hızı ve sıcaklığına bağlı olarak değişimleri görülmektedir. Hava sıcaklığı arttıkça bünyede kalan nem miktarı azalmaktadır. Hutchinson ve Otten [46], soya fasulyelerinin ince tabaka kurutulması üzerine yaptıkları bir çalışmada, kuruma hızına etki eden en önemli parametrenin sıcaklık olduğunu, artan sıcaklıkla beraber kuruma hızının da arttığını, ancak hava debisinin kuruma hızı üzerinde önemli bir etkisi olmadığını gözlemlemişlerdir. Zira kütle difüzyon hızı, termal iletkenlik ve buharlaşma gizli ısı gibi kurutma ile ilgili malzeme özelliklerinin çoğu sıcaklığa bağlı olup, hava debisi ise konvektif kütle transferini etkilemektedir [46].



Şekil 6.37. 1. periyot sonu soya fasulyesi relatif nem içeriğinin hava hızı ve sıcaklığı ile değişimi

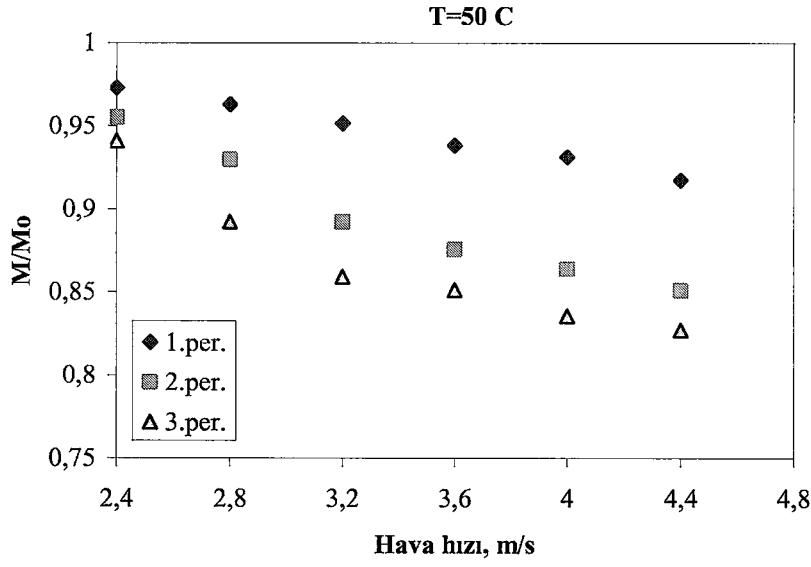


Şekil 6.38. 2. periyot sonu soya fasulyesi relatif nem içeriğinin hava hızı ve sıcaklığı ile değişimi

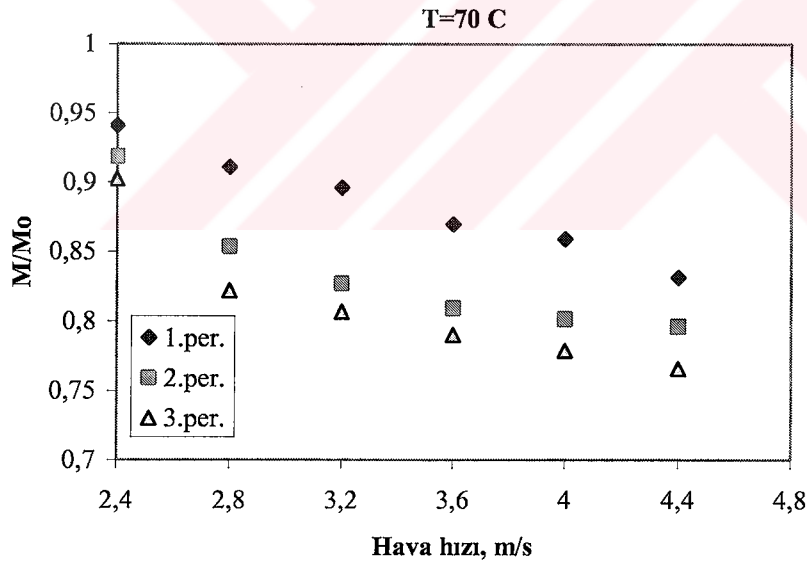


Şekil 6.39. 3. periyot sonu soya fasulyesi relatif nem içeriğinin hava hızı ve sıcaklığı ile değişimi

Şekil 6.40-6.41'de sırasıyla 50°C ve 70°C hava sıcaklıklarında, soya fasulyesinin 1., 2. ve 3. kurutma periyotlarındaki relatif nem içeriklerinin hava hızı ile değişimleri görülmektedir. Hava hızı arttıkça bünyede kalan nem miktarı her üç periyotta da azalmakta ancak üçüncü periyotta bu azalma miktarı diğer iki periyottakine nispeten düşmektedir.



Şekil 6.40. 50°C hava sıcaklığında 1., 2. ve 3. periyot sonu soya fasulyesi relatif nem içeriklerinin hava hızı ile değişimi

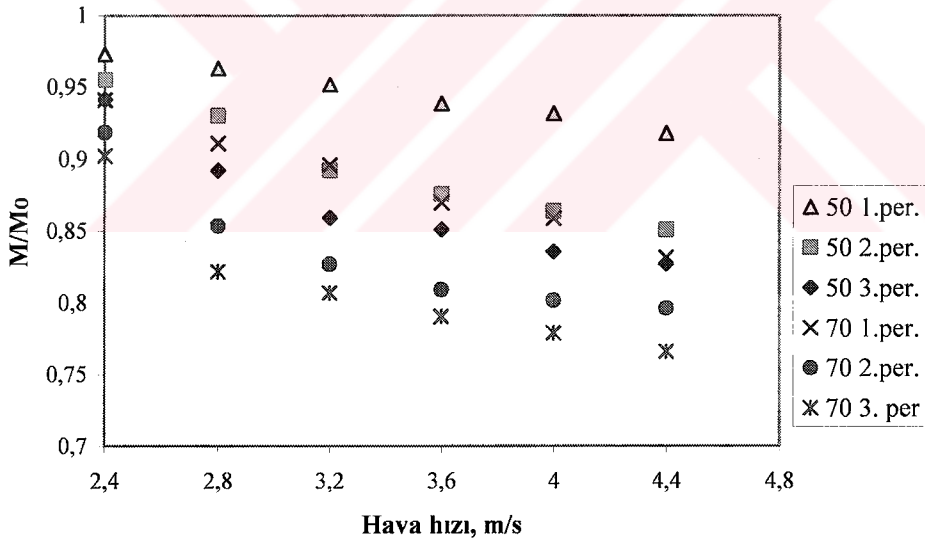


Şekil 6.41. 70°C hava sıcaklığında 1., 2. ve 3. periyot sonu soya fasulyesi relatif nem içeriklerinin hava hızı ile değişimi

Şekil 6.42’de 50°C ve 70°C hava sıcaklıklarında, her üç periyot sonu için hava hızı ile relatif nem içeriği değişimi verilerek bir karşılaştırılma yapılmış ve en fazla nemin 4.4 m/s hava hızında, 70°C hava sıcaklığı ile 3. periyot sonunda uzaklaştırıldığı görülmüştür. Soya

fasulyesinin kurutulmasında, konvektif-radyatif kurutucu bu hava hızı ve sıcaklığında en yüksek verimde çalışacaktır. Relatif nem içeriği 0.766'ya düşürülerek numûnenin nem içeriği %24 kb'den %18.3 kb değerine indirilmiştir. Soya fasulyesinin konvektif-radyatif kurutma kolonunda kurutulması sonucu ulaşılan nem miktarı depolama için yüksek bir değerde olup, %5.7'lık bir nem düşüşünün sağlandığı bu kurutucuda kuruma hızı ise tepsili kurutuculara nazaran çok yüksektir.

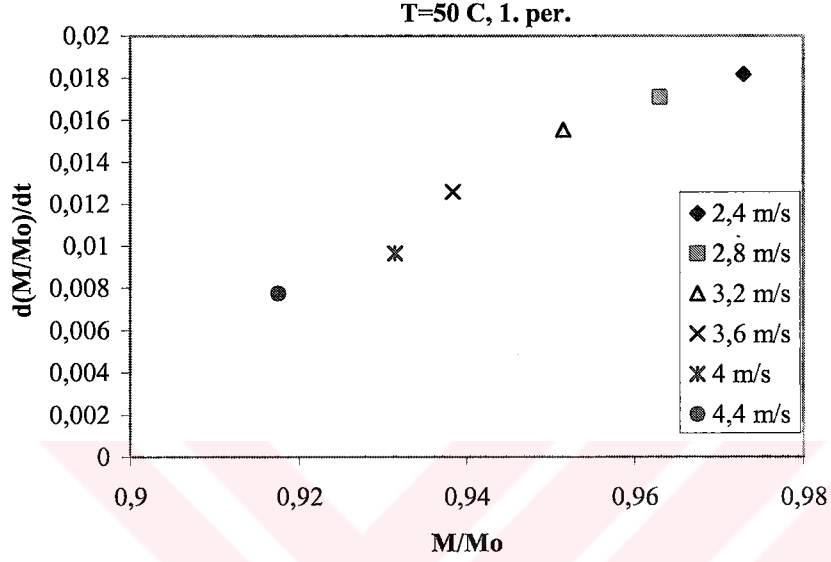
Nemli tahılın iki aşamalı kurutulmasını öneren ve ACIAR (Avustralya Uluslararası Araştırma Merkezi) tarafından desteklenen bir tahıl kurutma projesinde, birinci aşamada tahıl kalitesine zarar vermeden ürünün bir yüksek sıcaklık kurutucusunda belirli bir nem içeriğine kadar hızlı bir şekilde kurutulması ve sonrasında havalandırma sistemli bir depoda yavaş kurumaya bırakılması öngörülmektedir. Bu çalışmada, %25-30 neme sahip çeltik hızla %18 nem içeriğine kadar kurutulmasının ardından güvenle depolanarak havalandırmayla (aeration) %14 nem içeriğine, yavaşça düşürülmektedir. Böylece ikinci aşama kurutma ile hem aşırı kuruma olmadan ürün kalitesi korunmuş olmakta hem de enerji tasarrufu sağlanmaktadır [67].



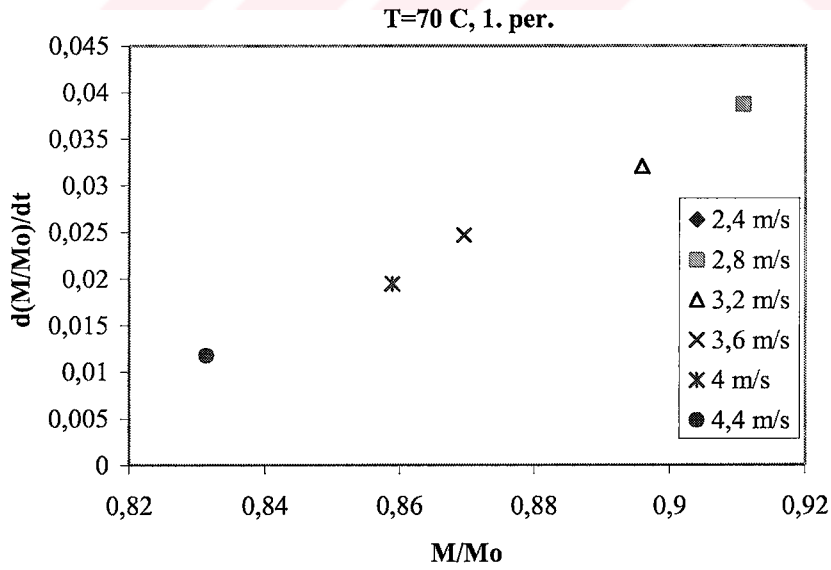
Şekil 6.42. Her iki hava sıcaklığı için her üç periyot sonu soya fasulyesi relatif nem içeriklerinin hava hızı ile değişimi

Şekil 6.43-6.44'de sırasıyla 50 ve 70°C hava sıcaklıkları için, konvektif-radyatif kurutma kolonunda soya fasulyesinin 1.periyot kuruma hızının hava hızına bağlı olarak değişimi ve bu iki grafiğin birleştirildiği Şekil 6.45'de ise sıcaklığın kuruma hızı üzerindeki etkisi görülmektedir. 50 ve 70°C hava sıcaklıklarında kuruma hızının relatif nem içeriği ile

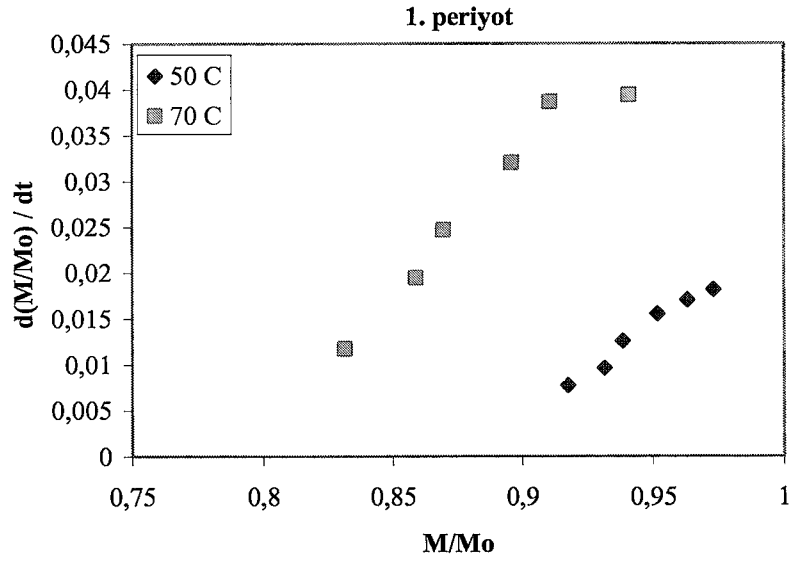
değişimi, kurumanın azalan kuruma hızı evresinde gerçekleştiğini, bünyede kalan nem miktarı azaldıkça kuruma hızının azaldığını ve yükselen sıcaklıkla birlikte arttığını göstermektedir. En yüksek kuruma hızı 70°C sıcaklıkta elde edilmiştir.



Şekil 6.43. 50°C hava sıcaklığında hava hızına bağlı olarak 1.periyot sonu kuruma hızı değişimi

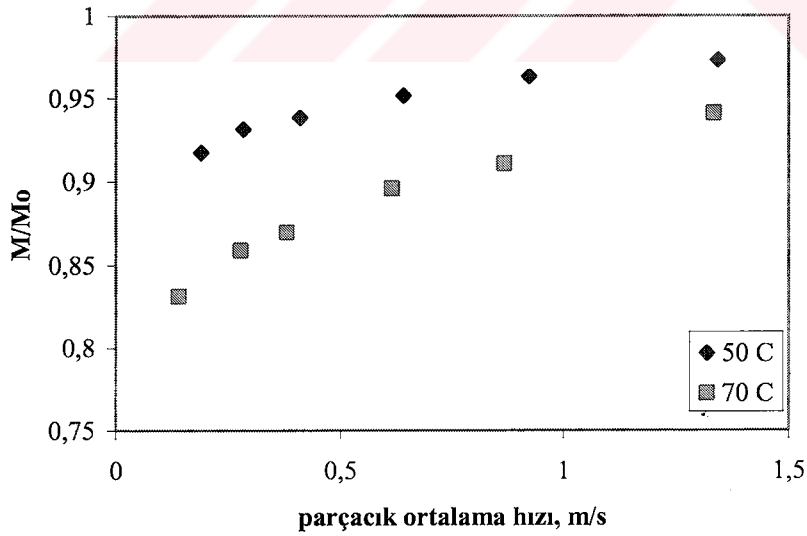


Şekil 6.44. 70 °C hava sıcaklığında hava hızına bağlı olarak 1.periyot sonu kuruma hızı değişimi



Şekil 6.45. Hava sıcaklığının soya fasulyesinin kuruma hızı üzerindeki etkisi

Şekil 6.46’da farklı hava sıcaklıklarında soya fasulyesinin 1.periyot sonu relatif nem içeriğinin parçacık hızı ile değişimi görülmektedir.



Şekil 6.46. Farklı hava sıcaklıklarında soya fasulyesinin 1.periyot sonu relatif nem içeriğinin parçacık ortalama hızı ile değişimi

Tüm sıcaklıklarda parçacık hızının azalması ile birlikte bünyede kalan nem miktarı düşmektedir. Artan hava hızı ile birlikte parçacık hızının düşmesinin yanı sıra sıcaklığın artması da çekirdek hızının düşmesine sebep olmaktadır. Ancak sıcaklığın bu etkisi yüksek bir kuruma hızının elde edildiği ayçekirdeğinin kurutulmasında daha dikkat çekicidir. Zira, yüksek sıcaklıklarda ayçekirdeğinin kurutulması sırasında uzaklaştırılan nem miktarı, soya fasulyesinden uzaklaştırılan nem miktarına nazaran daha fazla olup ağırlık kaybı artmakta, azalan sürüklenme kuvveti ile birlikte çekirdek hızı daha fazla azalmaktadır.



7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, literatürde sözü edilen kurutuculardan gerek akış tipi, gerekse ısı transfer mekanizması açısından farklılık arz eden bir sürekli tip kurutucu tasarlanarak imal edilmiş; sisteme ait kurutma parametrelerinin tespiti için farklı numûnelerle deneyler yapılmıştır. Söz konusu zıt akışlı konvektif-radyatif kurutucuda yapılan deneylerin sonuçlarına ait değerlendirme ve öneriler aşağıda verilmiştir:

1. Ayçekirdeğinin kurutulmasında en yüksek verim, 3.6 m/s hava hızı ve 70 °C hava sıcaklığında elde edilmiştir. Bu optimum şartlarda 1. periyot sonunda başlangıç nem içeriği % 26 kb 'den % 17.8 kb'ye, 3. periyot sonunda ise % 14.6 kb nem içeriğine düşürülmüştür. Nihâî olarak elde edilen nem içeriği, depolama şartları için uygundur. Konvansiyonel tepsili kurutuculara nazaran daha yüksek temas yüzeyi, daha yüksek ısı ve kütle transfer katsayıları ve dolayısıyla yüksek üretim hızı mevcuttur. Bu sistemde kurutulan parçacıklar için temas yüzeyi, ince tabaka kurutma ve hatta kesikli tip akışkan yatak kurutmadakine nazaran çok daha fazla olup, yüksek ısı ve kütle transferi katsayıları dolayısıyla yüzey neminin buharlaşması çok hızlı gerçekleşmektedir. Ayrıca ısı transferi, konveksiyon yanı sıra radyasyonla da gerçekleştiğinden, ayçekirdeğinin kuruma hızının oldukça yüksek olduğu tespit edilmiştir.
2. Soya fasulyesinin kurutulmasında en yüksek verim 4.4 m/s hava hızı ve 70 °C hava sıcaklığında elde edilmiştir. Bu optimum şartlarda 1. periyot sonunda başlangıç nem içeriği %24 kb 'den % 19.9 kb'ye, 3. periyot sonunda ise %18.3 kb'ye düşürülmüştür. Kuruma hızı oldukça yüksek olmasına rağmen, nem içeriği depolama şartlarına indirilememiştir. Literatürde, yüksek sıcaklıkta hızlı kurutma yapabilen partikül-hava temas yüzeyi geniş kurutucularda, kurutulan ürünün neminin hızla belli bir nem içeriğine kadar düşürüldüğü, kalan nemin ise depolama sırasında çevre sıcaklığındaki havalandırma ve çok yavaş kuruma ile gerçekleştirildiği, özellikle son zamanlarda sürekli tip yüksek sıcaklık kurutucularında bu stratejinin uygulandığı belirtilmektedir. Soya fasulyesine de böyle bir ikinci safha kurutma yapılarak yavaş kurumaya bırakmak uygun olacaktır.
3. Konvektif-radyatif kurutucunun sürekli tip bir sistem olması sebebiyle, özellikle daha fazla nemin bünyeden uzaklaştırıldığı yüksek sıcaklıklarda, kapalı devre olarak gerçekleştirilen deneylerde uzaklaştırılan nem miktarı açık sisteme nazaran düşük çıkmış, açık sistemde optimum şartlarda kurutulan ayçekirdeğinin kuruma hızı, aynı şartlarda kapalı çevrim ile

kurutulanınkinden 1.7 kat fazla olmuştur. Bu bulgu sonucunda, birinci periyotta açık sistem, diğer periyotlarda ise egzost havası çevriminin kullanılmasının kurutma verimini artıracakı düşünülmektedir. Ayrıca egzost havası bir hava şartlandırma odasından geçirilip nem kontrolü yapılırsa, kapalı sistemin kurutma verimi artacak, enerji tasarrufu sağlanabilecektir; ancak, nem kontrolü ve taze hava egzost gazı karışımının sağlanması için kurutucuya ek üniteler ilave edilmesi gereklidir.

4. Sunulan düzenekte, temas yüzeyinin mükemmelliğine ve radyatif ısıtmaya bağlı olarak kuruma hızının artması sonucu toplam kurutma sürenin kısılması, enerji verimi açısından, önerilen kurutucu tipi lehine büyük avantaj sağlamaktadır.
5. Kurutucuda kalma süresinin kısa olması, malzemenin yüksek sıcaklıklarda zarar görmeden kurutulabilmesini sağlamaktadır. Özellikle, çeltik, ayçekirdeği, kabak çekirdeği, soya fasulyesi gibi akışkan yatak için çok büyük olan, Geldart tipi D grubu malzemelerinin kurutulması için konvektif-radyatif kurutucunun kullanımı çok uygundur.
6. Sunulan kurutucu sistemin çalışma prensibi, diğer kurutuculardan oldukça farklıdır. Kurutulmakta olan parçacıkların kontrollü düşme hareketi, sistemin sürekli tip olması, konveksiyonun yanı sıra -konvansiyonel kurutucularda ihmâl edilen- radyasyonun varlığına karşılık ölçme imkânlarının sınırlılığı gibi zorluklar sebepleriyle, sistem için bir ısı ve kütle transferi modeli kurulması, daha ileri çalışma ve ölçme tekniklerini gerektirmektedir. Yığın içerisinde hareket eden çekirdeğin yüzey sıcaklığını ve hızını ölçmek üzere, ileri teknoloji gerektiren sıcaklıkölçer ve fiber optik algılayıcıların kullanılması durumunda, model kurmak mümkün olabilecektir
7. Radyasyonun etkin olması sistemin çok yüksek sıcaklıklara çıkabilmesine imkan vermektedir. Bu sebeple, PVC, polimer gibi malzemelerin de konvektif-radyatif kurutucuda kurutulmasının iyi sonuç vereceği düşünülmektedir.
8. Son yıllarda fasılalı kurutma tekniği (intermittent kurutma) olarak adlandırılan ve konvansiyonel tekniklerin aksine, kurutma şartları sabit tutulmayarak hava hızı ve sıcaklığının zamanla değiştirildiği bir kurutma tekniği geliştirilmiştir [68]. Bu tekniğin konvektif-radyatif kurutucu için çok uygun olduğu görülmektedir. Zira, deney düzeneği fasılalı kurutmayı sağlayabilecek elektrik donanımına sahiptir. Sıcaklığın PID kontrollü olması, fan devrinin bir konvertör yardımıyla değiştirilerek kurutma havası debisinin

otomatik ve hassas olarak kontrol edilebilmesi, radyatif ısıtıcıların istenen sayı ve kombinasyonlarda pano üzerinden otomatik olarak devreye alınıp çıkartılabilmesi ve ısıtıcıların gücü değiştirilerek farklı ısı girişi sağlanabilmesi, deney düzeneğine ait tüm kurutma parametrelerini kurutma süresince otomatik olarak değiştirebilme imkanı vermektedir. Yapılan deneylerde sabit hava sıcaklığı ve hava hızı şartları kullanılmıştır. Fasilalı kurutma tekniğinin konvektif-radyatif kurutucuda, ancak “kesikli yükleme-teker periyotta kurutma” durumunda iyi sonuçlar verebileceği öngörülmektedir. Ancak bu çalışmadaki konvektif-radyatif kolonda gerçekleştirilen “çok periyotlu kurutma” da bir tür fasılalı kurutmadır. Periyotlar arasında, kurutmanın olmadığı, ancak nem gradyentinin düzeltildiği, -temperleme süresi olarak tanımlanan- bekleme süresince enerji kullanılmamakta, bu sayede ardışık periyotlarda kurutma hızlanmaktadır. Enerji sarfiyatını azaltan bu uygulama fişkıran yataklarda kendiliğinden gerçekleşmektedir.

9. Sistem sürekli tip olduğundan endüstriyel kullanıma çok uygundur. Yarı endüstriyel bir prototip olan bu kurutucu, gerek otomatik donanımı gerekse yeni çalışma prensibi ve yüksek kurutma hızı ile KOSGEB veya TÜBİTAK projesi olabilecek nitelikte, yeni bir sistemdir ve geliştirme projesi olarak sunulması düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

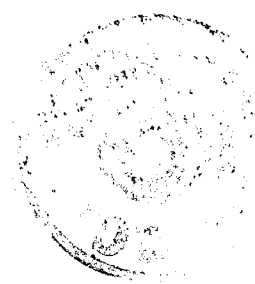
1. Cemeroğlu, B. ve Acar, J., 1987, *Meyve ve Sebze İşletme Teknolojisi*, Gıda Teknolojisi Derneği.
2. Syahrul, S., Hamdullahpur, F., Dincer, I., 2002, Thermal analysis in fluidized bed drying of moist particles, *Applied Thermal Engineering*, 22, 1763-1775.
3. Keey, R.B., 1980, Theoretical foundations of drying technology, In: A.S. Mujumdar (ed.), *Advances in Drying (volume 1)*, Hemisphere, USA, 1-23.
4. Mujumdar, A.S., 2000, Classification and selection of industrial dryers, chapter 2, in: S. Devahastin (ed.), *Mujumdar's Practical Guide to Industrial Drying*, Exergex, Montreal.
5. McCabe, W.L., Smith, J.C., Harriot, P., 1993, *Unit Operations of Chemical Engineering*. McGraw-Hill, inc., USA.
6. Chandran, A.N., Rao, S.S., Varma, Y.B.G., , 1990, Fluidized bed drying of solids, *AIChE J.*, 36, No.1, 29-38.
7. Dimatti, D.G., Amyotte, P.R., 1996, Hamdullahpur F., Fluidized bed drying of large particles, *Trans. ASAE*, 39, No.5, 1745-1750.
8. Thomas, P.P., Varma, Y.B.G., 1992, Fluidized bed drying of granular food materials, *Powder Technology*, 69, No.3, 213-222.
9. Can, A. ve Eryener, D., 2000, Güneş enerjisi ile ısıtılmış hava yardımıyla kabak çekirdeği kurutulmasının teorik ve deneysel araştırılması, 12. Ulusal Isı Bilimi ve Tekniği Kongresi, Sakarya, 29-34.
10. Krell, L., Künne, H.-J., Mörl, L., 1990, Flow regimes and heat and mass transfer in gas-fluidized beds of solids, *International Chemical Engineering*, 30, No.1, 45-56.
11. Abid, M., Gibert, R., Laguerie, C., 1990, An experimental and theoretical analysis of the mechanisms of heat and mass transfer during the drying of corn grains in a fluidized bed, *International Chemical Engineering*, 30, No.4, 632-642.
12. Kannan, C.S., Rao, S.S., Varma, Y.B.G., 1994, A kinetic model for drying of solids in batch fluidized beds, *Ind. Eng. Chem. Res.*, 33, 363-370.
13. Prasad, B.V.S., Chandra, P.K., Bal, S., 1994, Drying parboiled rough rice in stationary, semi-fluidized, and fluidized conditions, *ASAE*, 37, No.2, 589-594.
14. Dutta, S.K., Nema, V.K., Bhardwaj, R.K., 1988, Drying behaviour of spherical grains, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 31, No.4, 855-861.
15. Kiranoudis, C.T., Maroulis, Z.B., 1996, Marinos-Kouris, D., Drying of solids: Selection of some continuous operation dryer types, *Computers Chem. Engng.*, 20, 5177-5182.
16. Uçkan, G., 1987, Akışkan yataklarda tanecikle gaz arasında ısı ve kütle geçişi, *Mühendis ve Makina*, 28, No. 332, 21-24.

17. Mohr, K.-H, Kurutma koşullarında biyolojik ürünler içinden nem transportunun kinetiği, çeviren: A. Can, 1992, Mühendis ve Makina, 33, No.392, 9-12.
18. Ratti, C. and Crapiste, G.H., 1995, Determination of heat transfer coefficients during drying of foodstuffs, J. Food Process Engineering, 18, 41-53.
19. Sharma, V.K., Colangelo, A., Spagna, G., 1993, Experimental performance of an indirect type solar fruit and vegetable dryer, Energy. Convers. Mgmt., 34, No. 4, 293-308.
20. Cronin, K. And Kearney, S., 1998, Monte Carlo Modelling of a vegetable tray dryer, J. Food Engineering, 35, 233-250.
21. Raghavan, G.S.V., Langlois, R., 1984, Design of a continuous flow tunnel grain dryer utilizing a recirculating granular medium, In: A. S. Mujumdar (ed.), Drying '84, Hemisphere Publishing Corp., New York, 193-196.
22. Militzer, K.E., 1984, The thermo-economic model of convective dryers and its optimization, In: A. S. Mujumdar (ed.), Drying '84, Hemisphere Publishing Corp., New York, 409-413.
23. Verdijck, G.J.C., Weiss, M., Preisig, H.A., 1998, Modelling of a pneumatic dryer for potato starch, Journal of Food Engineering, 37, 243-258.
24. Levy, A., Borde, I., 1999, Steady state one dimensional flow model for a pneumatic dryer, Chemical Engineering and Processing, 38, 121-130.
25. Radford, R.D., 1997, A model of particulate drying in pneumatic conveying systems, Powder Technology, 93, 109-126.
26. Pelegrina, A.H., Crapiste, G.H., 2001, modelling the pneumatic drying of food particles, J. Food Engineering, 48, 301-310.
27. Ishikura, T., Nagashima, H., Ide, M., 2003, Hydrodynamics of a spouted bed with a porous draft tube containing a small amount of finer particles, Powder Technology, 131, 56-65.
28. Freitas, L.A.P., Freire, J.T., 2000, Heat transfer in a draft tube spouted bed with bottom solids feed, Powder Technology, 114, 152-162.
29. Madhiyanon, T., Soponronnarit, S., Warunee, T., 2000, Continuous drying of paddy in two dimensional spouted bed, Kasetsart J. (Nat. Sci.), 34, 308-314.
30. Chirife, J., 1983, Fundamentals of the drying mechanism during air dehydration of foods, In: A.S. Mujumdar (ed.), *Advances in Drying (volume 2)*, Hemisphere, USA, 73-103.
31. Fortes, M., Okos, M.R., 1980, Drying Theories: Their base and limitations applied to foods and grains, In: A.S. Mujumdar (ed.), *Advances in Drying (volume 1)*, Hemisphere, USA, 119-155.
32. Szentgyorgyi, S., Molnar, K., Orvos, M., 1984, Computer calculation method of the falling rate period of drying, In: A. S. Mujumdar (ed.), Drying '84, Hemisphere, New York, 83-87.
33. Treybal, R.E., 1981, *Mass-Transfer Operations*. McGraw-Hill, Singapore.



34. Vega-Mercado, H., Gongora-Nieto, M.M., Barbosa-Canovas, G.V., 2001, Advances in dehydration of foods, J. Food Engineering, 49, 271-289.
35. Gupta, R., Mujumdar, A.S., 1983, Recent developments in fluidized bed drying, In: A.S. Mujumdar (ed.), *Advances in Drying (volume 2)*, Hemisphere, USA, 73-103.
36. Mujumdar, A.S., 1984, Spouted bed technology- a brief review, In: A.S. Mujumdar (ed.), *Drying '84*, Hemisphere, New York, 193-196.
37. Masters, K., 1980, Spray drying, In: A.S. Mujumdar (ed.), *Advances in Drying (volume 1)*, Hemisphere, USA, 269-298.
38. Prakash S., Jha, S.K., Data, N., 2003, Performance of blanched carrots dried by three different driers, J. Food Engineering, article in press.
39. Drytech Engineering, Irvine, CA. <http://www.drytecheng.com/>
40. R. Simon (Dryers) Ltd. Nottingham England. <http://www.simon-dryers.co.uk/>
41. GEA Niro Inc., USA. <http://www.niroinc.com/>
42. Technochimica Sass. S.R.L., Italy. <http://www.tecnosass.com/>
43. Wyssmont Company. <http://www.wyssmont.com/>
44. Hoebink, J.H.B.J. and Rietema, K., 1980, Drying granular solids in a fluidised bed-II, Chemical engineering Science, 35, 2257-2265.
45. Marks, P.B., Maier, D.E., Bakker-Arkema, F.W., 1993, Optimization of a new in-bin counterflow corn drying system, ASAE, 36, No.2, 529-534.
46. Hutchinson, D. and Otten, L., 1983, Thin layer air drying of soybeans and white beans, J. Fd. Technol., 18, 507-522.
47. Miller, W.M., 1978, Surface moisture drying analysis of citrus fruit, Trans. ASAE, 1237-1241.
48. Ülkü, S. ve Uçken, G., 1985, Kurutucu gaz hızının ve sıcaklığının akışkan yatakta mısır kurumasına etkisi, Isı Bilimi ve Kongresi 5. Ulusal Kongresi, İTÜ, 691-699.
49. Ece, M.C., Cihan, A., 1993, A liquid diffusion model for drying rough rice, ASAE, 36, No.3, 837-840.
50. Sieniutycz, S. and Szwast Z., 1984, Optimal multistage crosscurrent fluidized drying with product recycle, In: A. S. Mujumdar (ed.), *Drying '84*, Hemisphere Publishing Corp., New York, 49-61.
51. Kunii, D., Levenspiel, O., 1969, *Fluidization Engineering*. John Wiley & sons, USA.
52. Incropera, F.P. and De Witt, D.P., 1990, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer* John Wiley & sons, Canada.
53. *Teknik Tarım*, 2000, Tarım ve Köy İşleri Müd.

54. Wyrwal, J., 1988, Some theorems in Luikov's theory of heat and mass transfer in capillary-porous bodies, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 31, No.12, 2543-2546.
55. Diamante, L.M. and Munro, P.A., 1991, mathematical modelling of hot air drying sweet potato slices, *Int. J. Food Science and Technology*, 26, 99-109.
56. Qi, J.S. and Krishnan, C., 1996, Mathematical modeling of continuous cross-flow diffusion-controlled dryers, *Chemical Engineering Science*, 51, No.21, 4769-4780.
57. Ting, K.C., White, G.M., Ross, I.J., Loewer, O.J., 1980, Seed coat damage in deep-bed drying of soybeans, *Trans. ASAE*, 80, 1293-1296.
58. Kahveci, K., 1998, Çeltiğin yığın halinde kuruma davranışı, Doktora Tezi, Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
59. ACIAR Postharvest Newsletter, 1999, No. 49, p.5
60. Jumah, R.Y., Mujumdar, A.S., Raghavan, G.S.V., 1998, Aerodynamics of a novel rotating jet spouted bed, *Chemical Engineering Journal*, 70, 209-219.
61. Devahastin, S., Mujumdar, A.S., 2001, Some hydrodynamic and mixing characteristics of a pulsed spouted bed dryer, *Powder Technology*, 117, 189-197.
62. Ekechukwu, O.K., 1999, Review of solar-energy systems I : an overview of drying principles and theory, energy conversion and management, 40, 593-613.
63. Dias, S.R.S., Futata, F.P.L., Carvalho, J.A., Couto H.S., Ferreira, M.A., 2004, Investigation of food grain drying with pulsating air flows, *Int. Comm. Heat Mass Transfer*, 31, 3, 387-395.
64. Hajidavalloo, E. and Hamdullahpur, F., 2000, Thermal analysis of a fluidized bed drying for crops. Part II: Experimental results and model verification, *Int. J. Energy Res.*, 24, 809-820.
65. Wiset, L., Srzednicki, G., Driscoll, R., Nimmuntavin, C., Siwapornrak, P., 2001, Effects of high temperature drying on rice quality, *Agricultural Engineering International: the CIGR Journal of Scientific Research and Development*, Manuscript FP 01 003. Vol. III.
66. Syarief, A.M., Morey, R.V., Gustafson, R.J., Thin layer drying rates of sunflower seed, 1984, *Trans. ASAE*, 195-200.
67. ACIAR Postharvest Newsletter, 2001, No. 57, p.9-10.
68. Chua, K.J., Mujumdar, A.S., Chou, S.K., 2003, Intermittent drying of bioproducts – an overview, *Bioresource Technology*, 90, 3, 285-295.



ÖZGEÇMİŞ

Araştırmacı 1971 yılında Elazığ'da doğdu. 1989 yılında Elazığ Anadolu Lisesi'nden, 1993 yılında Fırat Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümünden mezun oldu ve aynı yıl F.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Mak. Müh. Anabilim dalında yüksek lisansa başladı. 1995 yılında F.Ü. Makine Müh. Bölümü Termodinamik Anabilim dalında araştırma görevlisi olarak göreve atandı ve 1996 yılında yüksek lisans çalışmasını tamamladı. Halen aynı görevde çalışmakta olup, evli ve bir çocuk annesidir.

