



**FOTOVOLTAİK/TERMAL (PV/T) DESTEKLİ,
HAVA KOLEKTÖRLÜ KURUTMA SİSTEMİNİN
DENEYSEL İNCELENMESİ**

**2024
YÜKSEK LİSANS TEZİ
ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ**

Abdoulaye Mahamat AZALO

**Tez Danışmanı
Prof. Dr. Sezayi YILMAZ**

**FOTOVOLTAİK/TERMAL (PV/T) DESTEKLİ, HAVA KOLEKTÖRLÜ
KURUTMA SİSTEMİNİN DENEYSEL İNCELENMESİ**

Abdoulaye Mahamat AZALO

**Tez Danışmanı
Prof. Dr. Sezayi YILMAZ**

**T.C.
Karabük Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalında
Yüksek Lisans Tezi
Olarak Hazırlanmıştır**

**KARABÜK
Ağustos 2024**

Abdoulaye Mahamat AZALO tarafından hazırlanan “FOTOVOLTAİK/TERMAL (PV/T) DESTEKLİ, HAVA KOLEKTÖRLÜ KURUTMA SİSTEMİNİN DENEYSEL İNCELENMESİ” başlıklı bu tezin Yüksek Lisans Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. Sezayi YILMAZ

Tez Danışmanı, Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından Oy Birliği ile Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir. 08/08/2024

Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)

İmzası

Başkan : Dr. Öğr. Üyesi Şafak ATAŞ (KBÜ)

Üye : Prof. Dr. Sezayi YILMAZ (KBÜ)

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Hakan DUMRUL (ŞÜ)

KBÜ Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulu, bu tez ile, Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Doç. Dr. Zeynep ÖZCAN

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü



“Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu; ayrıca bu kuralların ve ilkelerin gerektirdiği şekilde, bu çalışmadan kaynaklanmayan bütün atıfları yaptığımı beyan ederim.”

Abdoulaye Mahamat AZALO

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

FOTOVOLTAİK/TERMAL (PV/T) DESTEKLİ, HAVA KOLEKTÖRLÜ KURUTMA SİSTEMİNİN DENEYSEL İNCELENMESİ

Abdoulay Mahamat AZALO

Karabük Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Enerji Sistemleri Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Tez Danışmanı

Prof. Dr. Sezayi YILMAZ

Ağustos 2024, 102 sayfa

Günümüzde enerji verimliliği ve yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı, endüstriyel uygulamalarda giderek daha fazla önem kazanmaktadır. Bu bağlamda, güneş enerjisiyle çalışan kurutma sistemleri, tarım, gıda işleme ve endüstriyel üretim gibi alanlarda büyük bir potansiyele sahiptir. Özellikle Fotovoltaik/Termal (PV/T) gizli ısı depolama sistemi ile desteklenen hava kolektörlü kurutma sistemleri, bu alanda önemli bir araştırma konusu olarak öne çıkmaktadır.

Bu çalışmada, PV/T ısı geri kazanımlı, hava-su ısıtma kolektörlü ve gizli ısı depolama sistemi ile desteklenen bir kurutma sisteminde, nane kurutma süreci ve sistemin performansı deneysel olarak incelenmiştir.

Sistem, güneş enerjisini hem elektrik hem de ısı enerjisine dönüştüren PV/T panellerden oluşmakta ve güneş enerjisinin sürekliliğini sağlamak amacıyla gizli ısı depolama sistemi ile entegre edilmektedir. Deneyler, 25 Haziran 2024 tarihinde Karabük ili iklim koşullarında gerçekleştirilmiştir. Ortalama ışınım değeri 683 W/m^2 olarak kaydedilmiş ve PV/T ünitesinin ortalama verimi %30 olarak hesaplanmıştır. Kurutma sisteminin toplam ısı kazancı, ışınım miktarının en yüksek olduğu saat 13:45'te $795,56 \text{ W}$ olarak kaydedilmiş olup, ortalama ısı kazancı ise $409,31 \text{ W}$ olarak hesaplanmıştır. Ortalama sistem verimliliği %61,26 olarak belirlenmiştir.

Nane kurutma sürecinde, başlangıçta 80 gram olan ürün ağırlığı, kurutma süresi boyunca sürekli azalarak saat 13:45 itibarıyla 14 grama sabitlenmiştir. Naneler, $4,94 \text{ g su/g}$ kuru madde nem içeriğinden $0,0589 \text{ g su/g}$ kuru madde nem içeriğine kadar kurutulmuştur.

Anahtar Kelimeler : Güneş enerjisi, Kurutma, Havalı güneş kolektörleri, Fotovoltaik/Termal (PV/T) kolektör.

Bilim Kodu : 92802

ABSTRACT

M. Sc. Thesis

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF PHOTOVOLTAIC/THERMAL (PV/T) SUPPORTED AIR COLLECTOR DRYING SYSTEM

Abdoulaye Mahamat AZALO

Karabuk University

Institute of Graduate Programs

Department of Energy Systems Engineering

Thesis Advisor:

Prof. Dr. Sezayi YILMAZ

August 2024, 102 pages

In this study, the mint drying process and the performance of a drying system supported by a PV/T heat recovery, air-ater heating collector, and latent heat storage system were experimentally investigated. The system consists of PV/T panels that convert solar energy into both electricity and heat energy, and it is integrated with a latent heat storage system to ensure the continuity of solar energy. The experiments were conducted on June 25, 2024, under the climatic conditions of Karabük province. The average irradiance was recorded as 683 W/m², and the average efficiency of the PV/T unit was calculated to be 30%.

The total heat gain of the drying system was recorded as 795.56 W at 13:45, when the irradiance was at its peak, with an average heat gain of 409.31 W. The average system efficiency was determined to be 61.26%.

During the mint drying process, the initial product weight of 80 grams continuously decreased throughout the drying period and stabilized at 14 grams by 13:45. The moisture content of the mint was reduced from 4.94 g water/g dry matter to 0.0589 g water/g dry matter.

Keywords : Solar Energy , Drying, Solar air collectors, Photovoltaic/Thermal (PV/T) collectors

Science Code : 92802



TEŞEKKÜR

Bu tez alıőmasının tamamlanmasında büyük katkıları olan danıőmanım Sayın Prof. Dr. Sezayi YILMAZ'a en derin teőekkürlerimi sunarım. Kendisinin engin bilgi ve tecrübesi, yol gösterici liderliği ve her daim teşvik edici yaklaőımı, bu çalışmanın baőarisının temel taőları olmuştur. Özellikle, bilimsel merakımı uyandıran ve araştırma yeteneklerimi geliőtiren değerli rehberliği için minnettarım. Zorlu anlarda gösterdiği sabır ve destek, bu süreci benim için daha anlamlı ve öğretici kıldı.

Bu süreçte beni sürekli destekleyen ve motive eden aileme, özellikle annem ve babama minnettarım. Onların inancı ve sevgisi, en büyük g kaynağım oldu.

Karabük Üniversitesi Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü'ndeki tüm ğretim üyelerine ve çalıőanlarına, değerli görüőleri ve yardımları için teşekkür ederim. Ayrıca, çalıőmalarımda bana destek olan arkadaőlarıma ve meslektaőlarıma da teőekkürü bir borç bilirim.

Bu alıőma, bana inanan ve destek olan herkese ithaf edilmiştir. Hepinize en içten teőekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

| | <u>Sayfa</u> |
|---|---------------------|
| KABUL..... | ii |
| ÖZET..... | iv |
| ABSTRACT..... | vi |
| TEŞEKKÜR..... | viii |
| İÇİNDEKİLER | ix |
| ŞEKİLLER DİZİNİ..... | xii |
| ÇİZELGELER DİZİNİ | xv |
| SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ | xvi |
| | |
| BÖLÜM 1 | 1 |
| GİRİŞ | 1 |
| | |
| BÖLÜM 2 | 8 |
| LİTERATÜR TARAMASI..... | 8 |
| | |
| BÖLÜM 3 | 26 |
| KURUTMA VE GÜNEŞ ENERJİLİ KURUTUCULAR..... | 26 |
| 3.1 KURUTMA..... | 26 |
| 3.2. KURUTMA YÖNTEMLERİNİN ÇESİTLERİ..... | 27 |
| 3.2.1. Açık Güneş Kurutma Sistemi | 27 |
| 3.2.2. Doğrudan Güneş Kurutma Sistemi..... | 28 |
| 3.2.3. Dolaylı Güneş Kurutma Sistemi | 28 |
| 3.2.4. Karışık Modlu Güneş Kurutma Sistemi | 28 |
| 3.3. GÜNEŞ ENERJİLİ KURUTUCULAR | 30 |
| 3.4. GÜNEŞ ENERJİLİ KURUTUCULARIN SINIFLANDIRILMASI | 31 |
| 3.4.1. Doğrudan Güneş Enerjili Kurutucular..... | 32 |
| 3.4.2. Dolaylı Güneş Enerjili Kurutucular..... | 32 |
| 3.4.3. Karışık Modlu Güneş Enerjili Kurutucular | 33 |

| | |
|---|-----------|
| 3.3.4. Zorlanmış Konveksiyonlu Güneş Kurutucular..... | 34 |
| BÖLÜM 4 | 35 |
| PV/T SİSTEMLER VE TERMAL ENERJİ DEPOLAMA YÖNTEMİ | 35 |
| 4.1 PV/T SİSTEMLER..... | 35 |
| 4.1.1. Fotovoltaik Hücreler..... | 35 |
| 4.1.1.1 Fotovoltaik Hücre Yapısı..... | 36 |
| 4.1.1.2 Fotoelektrik Etki | 37 |
| 4.1.1.3 Yarı İletkenler ve Doping Teknikleri..... | 38 |
| 4.1.1.4 Sıcaklık ve PV Hücre Verimliliği | 39 |
| 4.1.1.5 Isı Alıcılarla PV Paneli Soğutma Teknikleri..... | 40 |
| 4.1.1.6 Isı Alıcılarının Çalışma Prensibi..... | 40 |
| 4.1.1.7 Isı Alıcılarının Fotovoltaik Hücrelerde Kullanımı..... | 41 |
| 4.1.2. PV/T KOLEKTÖRLER | 42 |
| 4.1.2.1 Havalı (Hava Soğutmalı) PV/T Kolektörler | 43 |
| 4.1.2.2 Sıvılı (Sıvı Soğutmalı) PV/T Kolektörler | 43 |
| 4.1.2.3 Faz Değiştiren Malzeme (FDM) PV/T Kolektörler:..... | 44 |
| 4.1.2.4 Isı Borulu PV/T Kolektörler | 44 |
| 4.2 TERMAL ENERJİ DEPOLAMA SİSTEMİ | 46 |
| 4.2.1 DUYULUR ISI DEPOLAMA YÖNTEMİ | 47 |
| 4.2.2 GİZLİ ISI DEPOLAMA YÖNTEMİ | 47 |
| 4.2.2.1 Faz Değiştiren Malzemelerin Isı Üretimi ve Yönetimi..... | 49 |
| BÖLÜM 5 | 52 |
| MATERYAL VE METOT | 52 |
| 5.1. FOTOVOLTAİK/TERMAL (PV/T) DESTEKLİ, HAVA KOLEKTÖRLÜ KURUTMA SİSTEMİ | 52 |
| 5.1.1 Hava Soğutmalı (PV/T) Güneş Kolektörü..... | 55 |
| 5.1.2. Hava- su Isıtmalı güneş kolektörü | 57 |

Sayfa

| | |
|--|------------|
| 5.1.3 Faz Değiştiren Materyalleri (FDM) ile Zenginleştirilmiş Isı Eşanjörü ... | 58 |
| 5.1.4 Kurutma Fırını | 60 |
| 5.1.5 Isı Geri Kazanım Cihazı | 62 |
| 5.1.6 Sistem Fanı | 63 |
| 5.1.7 Sirkülasyon Pompası | 64 |
| 5.1.8 Direnç Devresi | 64 |
| 5.1.9 Nane Bitkisi | 65 |
| 5.1.10 Kurutma Süreci..... | 66 |
| 5.2. SİSTEM PERFORMANS ANALİZİ..... | 68 |
| BÖLÜM 6 | 77 |
| BULGULAR VE DEğERLENDİRME..... | 77 |
| BÖLÜM 7 | 97 |
| SONUÇ VE ÖNERİLER..... | 97 |
| KAYNAKLAR | 98 |
| ÖZGEÇMİş | 102 |

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

| | |
|--|----|
| Şekil 1.1. Dünya'nın güneş enerjisi atlası [5]. | 3 |
| Şekil 1.2. Türkiye'nin güneş enerjisi atlası [6]. | 4 |
| Şekil 1.3. Türkiye'nin toplam güneş ışınım miktarı ve güneşlenme süreleri [6]. | 5 |
| Şekil 2.1. Deneysel çalışmanın şematik gösterimi [7]. | 9 |
| Şekil 2.2. Deneysel çalışmanın şematik gösterimi [8]. | 10 |
| Şekil 2.3. Deneysel çalışmanın şematik gösterimi [9]. | 11 |
| Şekil 2.4. Deneysel çalışmanın şematik gösterimi [1]. | 12 |
| Şekil 2.5. Çalışmanın şematik gösterimi [11]. | 14 |
| Şekil 2.6. Kurutma sistemin şematik gösterimi [12]. | 15 |
| Şekil 2.7. Deneysel çalışmanın şematik gösterimi [13]. | 16 |
| Şekil 2.8. Kurutma sistemin şematik gösterimi [2]. | 18 |
| Şekil 2.9. Kurutma sistemin şematik gösterimi [15]. | 19 |
| Şekil 2.10. Deneysel çalışmanın şematik gösterimi [16]. | 20 |
| Şekil 2.11. Deneysel çalışmanın şematik gösterimi [17]. | 21 |
| Şekil 2.12. Deneysel çalışmanın şematik gösterimi [18]. | 23 |
| Şekil 2.13. Deneysel çalışmanın şematik gösterimi [19]. | 24 |
| Şekil 2.14. Deneysel çalışmanın şematik gösterimi [20]. | 25 |
| Şekil 3.1. Kurutma türüne göre kurutucuların sınıflandırılması [24]. | 29 |
| Şekil 3.2. Güneş enerjili kurutucuların tasarımları [24]. | 32 |
| Şekil 3.3. Dolaylı tip güneş enerjili kurutucu [24]. | 33 |
| Şekil 3.4. Dolaylı tip güneş enerjili kurutucu tasarımı [24]. | 34 |
| Şekil 4.1. Fotovoltaik sistemlerin sınıflandırılması [29]. | 36 |
| Şekil 4.2. Fotovoltaik hücrelerin yapısı [30]. | 37 |
| Şekil 4.3. Fotovoltaik hücrelerin çalışma prensibi [35]. | 38 |
| Şekil 4.4. 0-75 0C sıcaklıklarındaki (a) P-V grafiği (b) I-V grafiği [36]. | 39 |
| Şekil 4.5. Isı alıcıların çeşitlerine bir örnek [39]. | 40 |
| Şekil 4.6. Faz değiştiren materyallerin sınıflandırılması [31]. | 48 |

| | |
|--|----|
| Şekil 5.1. Kurutma sistemin şematik diyagramı. | 54 |
| Şekil 5.2. Tasarlanan ve İmal edilen Sistemin Genel Görünümü. | 54 |
| Şekil 5.3. Hava soğutmalı (PV/T) ve hava-su ısıtılmalı güneş kolektörü | 56 |
| Şekil 5.4. Hava-su ısıtılmalı güneş kolektörü imalat resmi..... | 57 |
| Şekil 5.5. FDM'li ısı eşanjörü: a) Eşanjör bağlantı şeması, b) Eşanjör montaj resmi. | 59 |
| Şekil 5.6. Sistem kurutma fırını. | 61 |
| Şekil 5.7. Isı geri kazanım cihazı a) Cihaz şematiği, b) İmal edilen cihazın şekli.... | 62 |
| Şekil 5.8. Sistem hava fanı ve fırın-kanal bağlantısı..... | 63 |
| Şekil 5.9. Sirkülasyon Pompası..... | 64 |
| Şekil 5.10. Seri bağlı dirençler (14,6ohm). | 64 |
| Şekil 6.1. Deney süresince sıcaklıkların ışıınım miktarına göre değişimi. | 78 |
| Şekil 6.2. PV ve PV/T'lerin güç değerlerinin ışıınımına göre değişimi. | 79 |
| Şekil 6.3. Sistem Deney Verilerinden Elde Edilen PV ve PVT'lerin Elektriksel Verim Değerlerinin Işıınımına Göre Değişimi..... | 80 |
| Şekil 6.4. PV/T kolektör ısı kazancının ışıınımına göre değişimi..... | 81 |
| Şekil 6.5. PV/T panel veriminin zamana ve ışıınımına göre değişimi. | 82 |
| Şekil 6.6. PVT Panelde Isıl Kazancının panel giriş ve Çıkış Sıcaklığına Göre Değişimi. | 83 |
| Şekil 6.7. Hava- su ısıtılmalı kolektör gücünün ışıınımına göre değişimi. | 84 |
| Şekil 6.8. Hava- su ısıtılmalı kolektör verimi ışıınımına göre değişimi..... | 84 |
| Şekil 6.9. FDM'li eşanjörde ısı depolamasının ışıınımına göre değişimi. | 85 |
| Şekil 6.10. FDM'li eşanjörde ısı kazancı ve kurutma sıcaklığının zamana göre değişimi. | 86 |
| Şekil 6.11. Su ceketli ısıtıcının gidiş dönüş sıcaklıklarının ışıınımına göre değişimi. | 87 |
| Şekil 6.12. Isı geri kazanım cihazının ısı kazancı ışıınımına göre değişimi. | 88 |
| Şekil 6.13. Isı geri kazanım cihazı verimi ışıınımına göre değişimi. | 88 |
| Şekil 6.14. Isı geri kazanım cihazı giriş ve çıkış sıcaklıklarının zamana ve ışıınımına göre değişimi. | 89 |
| Şekil 6.15. Termal enerji ışıınımına göre değişimi. | 90 |
| Şekil 6.16. Toplam termal enerji ışıınımına göre değişimi. | 91 |
| Şekil 6.17. Kurutma sisteminin genel verimi ışıınımına göre değişimi. | 92 |
| Şekil 6.18. Ürün ağırlığının zamana bağlı olarak değişimi..... | 93 |
| Şekil 6.19. Zamana bağlı olarak MC kuru ağırlık değişimi. | 94 |
| Şekil 6.20. Zamana bağlı olarak MC değişimi..... | 95 |

Şekil 6.21. Nem oranının zamana göre değişimi. 96



ÇİZELGELER DİZİNİ

| | <u>Sayfa</u> |
|---|---------------------|
| Çizelge 5.1. Sistemde Kullanılan PV Panllerin Özellikleri | 56 |
| Çizelge 5.2. Sistemde kullanılan parafin mumun (FDM) özellikleri..... | 59 |
| Çizelge 5.3. Kurutma Sisteminde Kullanılan Ekipman ve Özellikleri. | 67 |



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER

| | |
|---------------------|--|
| Wh | : Wattaat |
| kWh | : KiloWattaat |
| kg | : Kilogram |
| CuO | : Bakır Oksit |
| CO ₂ | : Karbodioksit |
| GHI | : Global yatay ışınma |
| SMER | : Özgül nem çekme oran |
| MC _{KA} | : Kuru baz nem içeriği |
| MC _{YA} | : Yaş baz nem içeriği |
| M _i | : Başlangıç nem içeriği |
| M _s | : Son nem içeriği |
| NO | : Nem Oranı |
| a _w | : Bağlı nem |
| L | : Gizli ısı |
| C _{P,hava} | : Havanın özgül ısısı |
| K | : Isıl İletkenlik |
| m | : Kütle |
| V | : Gerilim |
| I | : Akım |
| ρ | : Yoğunluk |
| IR | : Radyasyon |
| η _{PV} | : PV verimi |
| η _{PV} | : PV/T verimi IGK |
| η _{IGK} | : Isı Geri Kazanım Cihazı verimi |
| η _{SAC} | : Havalı kolektör verimi |
| η _{Isıtcı} | : Su ceketli kolektör verimi |
| η _{sistem} | : Sistem verimi |
| Q _{FDM,eş} | : FDM'lı eşanjörün ısı Kazancı |
| Q _{pvt} | : PV/T eşanjörün ısı Kazancı |
| Q _{IGK} | : Isı Geri Kazanım Cihazının ısı Kazancı |
| Q _{SAC} | : Hava kolektörü ısı Kazancı |

| | |
|------------------|--|
| $Q_{Isıtıcı}$ | : Isıtıcı ısı Kazancı |
| $Q_{Toplam=}$ | :Toplam sistem ısı kazancı |
| T_0 | : Taze hava giriş sıcaklığı (Isı geri kazanım çıkış sıcaklığı) |
| T_1 | : PV/T hava giriş sıcaklığı (Isı geri kazanım çıkış sıcaklığı) |
| T_2 | : PV/T hava çıkış sıcaklığı (Hava-su ısıtıcı giriş sıcaklığı) |
| T_3 | : Hava-su ısıtıcı hava çıkış sıcaklığı (FDM'li eşanjör giriş sıcaklığı) |
| T_4 | : FDM'li eşanjör hava çıkış sıcaklığı (Kurutma kabini giriş sıcaklığı) |
| T_5 | : Kurutma kabini çıkış sıcaklığı |
| T_6 | : Egzoz havası sıcaklığı |
| T_7 | : Pompa Gidiş Sıcaklığı (FDM'li eşanjör su giriş sıcaklığı) |
| T_8 | : Pompa Dönüş Sıcaklığı (FDM'li eşanjör su çıkış sıcaklığı) |
| T_K | : Kurutma kabini sıcaklığı |
| \dot{m}_{su} | : Kütleli su debisi |
| \dot{m}_{hava} | : Kütleli hava debisi |
| c_{su} | : Suyun Özgül Isısı |
| c_{hava} | : Havanın Özgül Isısı |

KISALTMALAR

| | |
|-------|--|
| FV | : Fotovoltaik |
| PV | : Photovoltaik |
| PV/T | : Fotovoltaik/Termal |
| CPV/T | : Concentrated Photovoltaic Thermal (Konsantre fotovoltaik/Termal) |
| FDM | : Faz Değiştiren Malzeme |
| PCM | : Phase Change Material |
| SAC | : Güneş Hava Kolektörü |
| CSAC | : Konsantre Güneş Hava Kolektörü |
| (CSP) | : Konsantre Güneş Enerjisi Santralleri |
| CFD | : Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği |
| PTSC | : Parabolik Oluklu Güneş Kolektörü |
| TC | : Termal İletkenliği |
| NePCM | : Nanoparçacıklar |
| OSD | : Açık Güneş Kurutma Sistemi |
| DSD | : Doğrudan Güneş Kurutma Sistemi |
| ISD | : Dolaylı Güneş Kurutma Sistemi |
| MSD | : Karışık Modlu Güneş Kurutma Sistemi |
| TES | : Termal Enerji Depolama |
| NO | : Nem Oranı |
| IGK | : Isı Geri Kazanım Cihazı |

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Artan küresel enerji talebi ve geleneksel fosil yakıt tüketimi nedeniyle, enerji krizi ve sera gazı emisyonları ve küresel ısınma gibi çevre sorunlarına ilişkin endişeler giderek artmaktadır gelindiğinde dünyada tüketilen enerjinin yaklaşık %90'ının temiz ve bol bir enerji olan güneş enerjisi gibi yenilenebilir veya yeni enerji kaynaklarından sağlanması gerekmektedir. Temiz yenilenebilir enerji kaynaklarının geliştirilmesi bu sorunların çözümünde önemli bir yöntem haline gelmiş ve yaygın ilgi görmüş ve görmeye devam etmektedir. Güneş enerjisi çevreci, düşük maliyetli ve bol miktarda bulunan bir enerji kaynağıdır ve kurutma, ısıtma, soğutma, enerji üretimi, su damıtma ve tuzdan arındırma alanlarında kullanılmaktadır [1,2].

Güneş enerjisi, yenilenebilir enerji çözümleri arasında önemli bir yere sahip olup, dünya genelinde giderek artan bir şekilde kullanılmaktadır. Güneş, esas olarak hidrojen ve helyum gazlarından oluşan ve sürekli olarak enerji üreten bir yıldızdır. Bu enerji, Dünya'ya ışık ve ısı formunda ulaşarak yaşamın sürdürülmesi için temel bir gereklilik oluşturur.

Dünya'ya yıllık olarak ulaşan güneş enerjisi miktarı, insanlığın toplam enerji ihtiyacını binlerce kez karşılayabilecek kapasitededir. Bu sebeple, güneş enerjisi, pratikte tükenmez bir kaynak olarak kabul edilmektedir. Güneş panelleri ve fotovoltaik sistemler, bu enerjiyi doğrudan elektrik enerjisine dönüştürerek, çevresel açıdan temiz bir enerji kaynağı sunmaktadır

Güneş enerjisi teknolojilerinin yaygınlaştırılması, fosil yakıtların kullanımını azaltarak küresel ısınma ve iklim değişikliği ile mücadelede önemli bir rol oynamaktadır. Ayrıca, güneş enerjisi yatırımları, enerji güvenliğini artırmakta ve ekonomik büyümeye katkıda bulunmaktadır. Bu durum, sürdürülebilir kalkınma hedeflerine ulaşmada stratejik bir öneme sahiptir. Güneş enerjisi teknolojilerine yapılan yatırımlar, gelecek nesiller için daha yaşanabilir ve sürdürülebilir bir çevre sağlama çabalarının bir parçası olarak görülmektedir.

Güneş enerjisi, tarih boyunca çeşitli şekillerde kullanılmış ve teknolojik gelişmelerle birlikte farklı formlara bürünmüştür. M.Ö. 7. yüzyılda, büyüteçler kullanılarak güneş ışınlarının odaklanması gibi basit uygulamalar mevcuttu. Antik Yunan ve Roma dönemlerinde ise yapılar, güneşin ısı ve ışığından en iyi şekilde yararlanacak şekilde inşa edilmiştir.

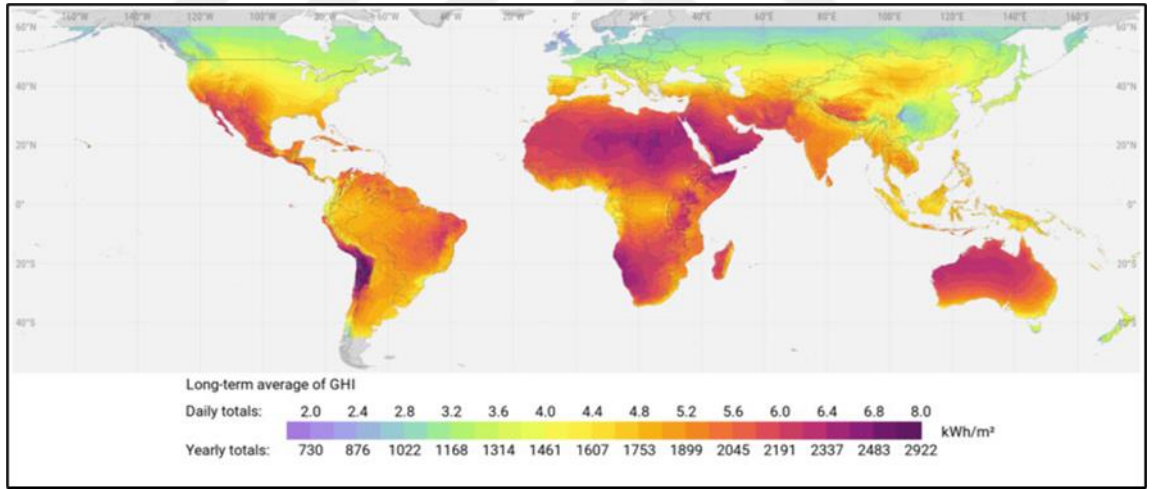
19.yüzyılın başlarında, bilim insanları güneş enerjisini elektriğe dönüştürme yöntemleri üzerine çalışmaya başladılar. 1839 yılında Edmond Becquerel, fotovoltaik etkiyi keşfederek güneş ışığını doğrudan elektriğe dönüştüren teknolojilerin temelini attı. 1954 yılında Bell Laboratuvarları, ilk pratik fotovoltaik güneş panelini geliştirdi ve bu, modern güneş enerjisi panellerinin başlangıcını işaret etti. Başlangıçta uzay uygulamaları için tasarlanan bu paneller, zamanla daha geniş kullanım alanları buldu.

1970'lerde yaşanan petrol krizi, güneş enerjisine olan ilgiyi önemli ölçüde artırdı ve yenilenebilir enerji kaynaklarına yapılan yatırımları hızlandırdı. 2000'li yılların başında, teknolojik ilerlemeler ve üretim maliyetlerindeki düşüşler, güneş panellerini daha erişilebilir hale getirdi. Günümüzde, güneş enerjisi, dünya genelinde birçok ülke tarafından sürdürülebilir ve çevre dostu bir enerji kaynağı olarak benimsenmiştir [3].

Dünya genelinde, güneş enerjisi potansiyeli ve güneşlenme süreleri coğrafi konuma göre değişiklik göstermektedir. Ekvatora yakın tropikal bölgeler yüksek oranda güneşlenme süresine ve güneş enerjisine sahipken, kutuplara yaklaştıkça bu oranlar azalmaktadır. Güneşlenme süresi ve güneş radyasyonu değerleri, atmosferik koşullar, mevsimler ve günün saatlerine göre dalgalanma gösterir. Bu dalgalanmalar, güneş enerjisi teknolojilerinin tasarımında ve yerleşiminde önemli rol oynar. Bilimsel bir

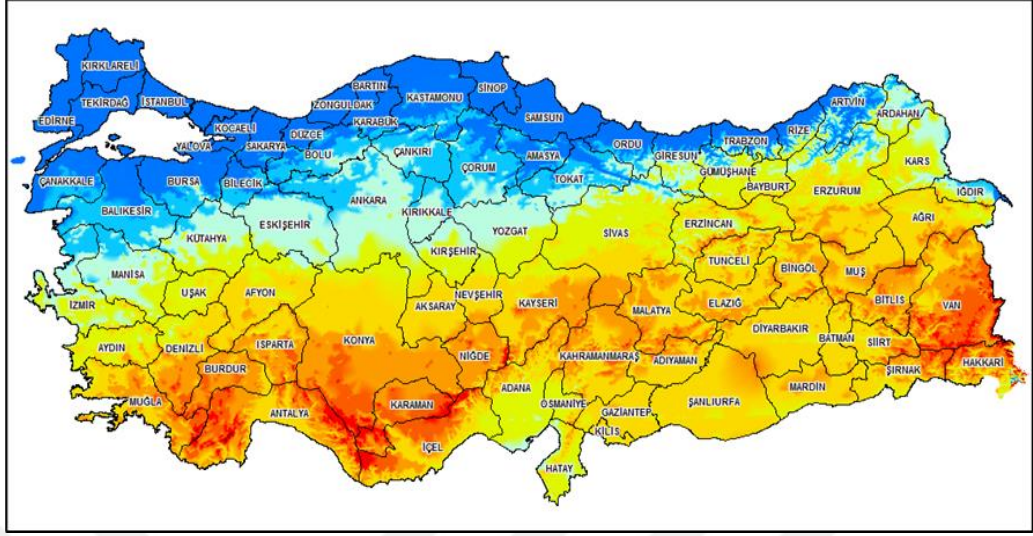
tezde bu verileri kullanırken, coğrafi özellikler, iklim tipi ve alınan güneş radyasyonu miktarları gibi faktörler dikkate alınmalıdır.

Dünya çapında güneş enerjisi ve güneşlenme süreleri bölgesel olarak büyük farklılıklar gösterir. Ekvator çevresindeki bölgeler yıllık ortalama 2,500 ila 2,900 kWh/m² arasında güneş radyasyonu alırken, güneşlenme süreleri günde yaklaşık 12 saattir. Öte yandan, ılıman bölgelerde yıllık ortalama 1,000 ila 2,000 kWh/m² arası değişen radyasyon değerleri ve güneşlenme süreleri günde ortalama 4 ila 6 saat arasındadır. Kutup bölgelerinde ise güneş radyasyonu çok daha düşük, yıllık ortalama 500 kWh/m² altında ve güneşlenme süreleri yılın büyük bir kısmında günde birkaç saat ile sınırlıdır. Bu değerler mevsimsel etkilere ve yerel hava koşullarına göre değişiklik gösterebilir. Şekil 1.1'de, Global Güneş Atlas'tan alınmış ve dünya genelindeki Güneşten Gelen Yatay Işıma (GHI) ortalamalarını kilovat saat/metrekare (kWh/m²) cinsinden renk skalasıyla gösteren bir görsel bulunmaktadır [4].



Şekil 1.1. Dünya'nın güneş enerjisi atlası [5].

Türkiye, geniş bir coğrafi konuma ve çeşitli iklim şartlarına sahip bir ülke olarak, güneş enerjisi açısından zengin bir potansiyele sahiptir. Kuzey kesimlerinde genellikle ılıman iklim hüküm sürerken, güney kesimleri daha sıcak ve güneşli bir havaya sahiptir. Bu durum güneş enerjisi toplam potansiyeli açısından bölgeler arası farklılıklara neden olmaktadır. Şekil 1.2'de, Türkiye'nin güneş enerjisi atlası gösterilmektedir.



Şekil 1.2. Türkiye'nin güneş enerjisi atlası [6].

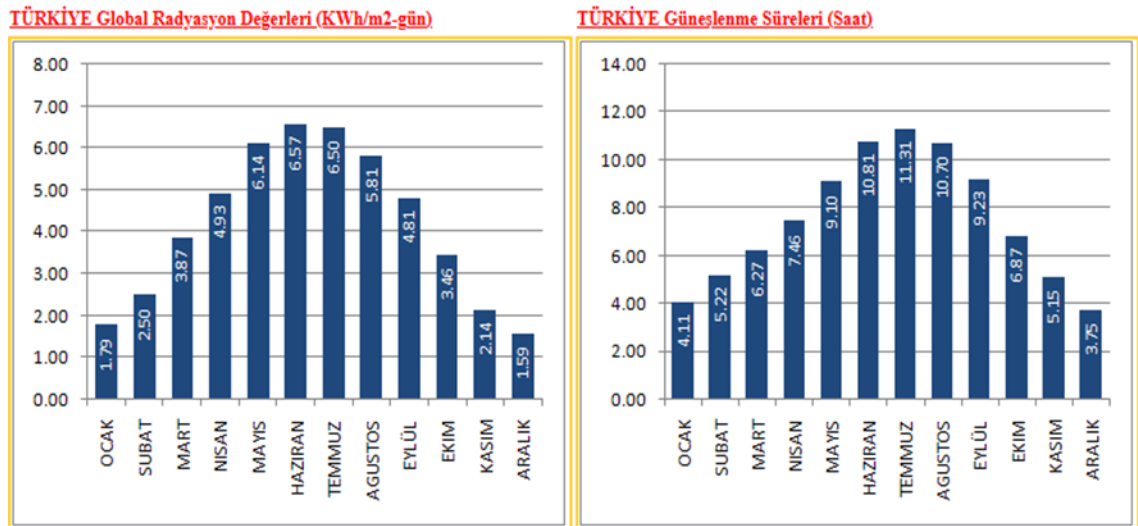
Türkiye, coğrafi konumu itibarıyla yüksek güneşlenme süreleri ve güneş radyasyonu değerleriyle dikkat çekmektedir. Güneydoğu Anadolu Bölgesi, bölgesel karşılaştırmada en yüksek güneş enerjisi potansiyeline sahip olan bölge olarak öne çıkar. Yıllık ortalama olarak 2,993 saat güneşlenme ve 1,460 kWh/m² güneş radyasyonu değerleriyle, bu bölge Türkiye'deki en elverişli güneş enerjisi kaynaklarından birini temsil etmektedir. Akdeniz Bölgesi de benzer şekilde yüksek potansiyel sunar; burada yıllık ortalama 2,956 saat güneşlenme ve 1,390 kWh/m² güneş radyasyonu gözlemlenmiştir.

Ege Bölgesi, ortalama 2,738 saat güneşlenme ve 1,304 kWh/m² radyasyon değeri ile Türkiye ortalamasının üzerinde bir potansiyele sahiptir. İç Anadolu Bölgesi, 2,628 saatlik güneşlenme ve 1,314 kWh/m² radyasyon ile orta seviyede bir güneş enerjisi kapasitesine ev sahipliği yapmaktadır. Doğu Anadolu Bölgesi'nin 2,664 saat güneşlenme ve 1,365 kWh/m² radyasyon değerleri de bu bölgenin önemli bir enerji kaynağı olabileceğini işaret etmektedir.

Buna karşın, Marmara Bölgesi 2,409 saat güneşlenme ve 1,168 kWh/m² radyasyon ile daha düşük bir potansiyel sunarken, Karadeniz Bölgesi ise 1,971 saat güneşlenme ve 1,120 kWh/m² ile en düşük güneşlenme ve radyasyon değerlerine sahiptir. Bu veriler, güneş enerjisi projelerinin planlanması ve uygulanması sırasında bölgesel potansiyellerin dikkate alınması gerektiğini vurgulamaktadır. Her bölgenin özgün güneşlenme süreleri ve radyasyon değerleri, Türkiye'nin güneş enerjisi stratejilerini şekillendirmede kritik bir öneme sahiptir.

Güneydoğu Anadolu, Akdeniz ve Ege bölgeleri, yıllık ortalama yüksek güneşlenme süresi ve yoğun güneş ışığı ile Türkiye'nin güneş enerjisinden en fazla yararlanabileceği alanlardır. Bu bölgelerde kurulacak fotovoltaik sistemler veya konsantre güneş enerjisi santralleri (CSP) yüksek verimlilik sağlayabilir.

Öte yandan, Marmara ve Karadeniz gibi kuzey bölgeleri daha az güneş ışığı alır ve bu nedenle güneş enerjisi sistemlerinin verimliliği daha düşük olabilir. Ancak bu bölgelerde bile, güneş enerjisi sistemlerinin katkısı, çatı üstü uygulamalar ve yerel enerji ihtiyaçlarını karşılamak üzere entegre edilebilir. Türkiye'nin toplam güneş ışınım miktarı ve güneşlenme süreleri şekil 1.3'te gösterilmiştir [6].



Şekil 1.3. Türkiye'nin toplam güneş ışınım miktarı ve güneşlenme süreleri [6].

Güneş enerjili kurutucular, enerji kaynağı olarak güneş enerjisinin kullanım moduna ve kurutma fırınındaki hava akışına göre çeşitli kategorilere ayrılabilir. Güneş enerjisinin doğrudan, dolaylı veya hibrit olarak kullanıldığı kurutucular, her biri farklı yöntemlerle çalışır. Doğrudan güneş enerjili kurutucularda, ürünler doğrudan güneş ışığına maruz kalırken, dolaylı güneş enerjili kurutucularda, ürünler opak bir kurutma fırınına yerleştirilir ve fırına giren hava, güneş enerjisi termal kolektörleri tarafından ısıtılır. Hibrit kurutucular ise bu iki yöntemi birleştirir. Araştırmalar, dolaylı güneş enerjili kurutucuların kurutma kalitesi açısından en etkili yöntem olduğunu göstermektedir [1].

Kurutucular ayrıca hava akış moduna göre pasif (doğal konveksiyon) ve aktif (zorlanmış konveksiyon) olarak da sınıflandırılabilir. Pasif kurutucularda, hava doğal olarak akar; bu, yüzdürme etkisi ile sağlanır. Aktif kurutucularda ise hava akışı, fan veya üfleyici gibi cihazlarla sağlanır, bu da konvektif ısı transferini artırır ve ürünlerin kuruma süresini kısaltır. Dolayısıyla, aktif ve dolaylı güneş enerjili kurutucular, kurutma süreçlerinde daha avantajlıdır.

Güneş enerjili kurutucuların tasarımında enerji tüketimi önemli bir faktördür. Dolaylı zorlamalı konveksiyonlu kurutucular, ısıtılan havayı fanlar veya üfleyiciler vasıtasıyla kurutma fırınına gönderir ve bu cihazlar genellikle elektrik tüketir. Ticari elektriğe bağımlılığı azaltmak için birçok güneş enerjili kurutma sistemi, fotovoltaik (PV) modüllerle desteklenmiştir. Ancak, PV modülleri düşük güneş radyasyonu veya yağmurlu günlerde yetersiz kalabilir ve kurutma işleminin gece durdurulması gerekliliği verimliliği olumsuz etkileyebilir.

Bu sebeple, kurutma sistemlerinde güneş enerjisi ile birlikte diğer yenilenebilir enerji kaynaklarının entegrasyonu önemlidir. Hibrit kurutma sistemleri, güneş enerjisi ve diğer yenilenebilir enerji kaynaklarını birleştirerek enerji tüketimini, kurutma maliyetlerini ve karbon emisyonlarını azaltır. Güneş PV/T kolektörleri ve faz değiştiren sistemler gibi teknolojilerle desteklenen hibrit kurutma sistemleri, gece ve yağışlı havalarda da çalışabilir ve kesintisiz kurutma sağlar [1].

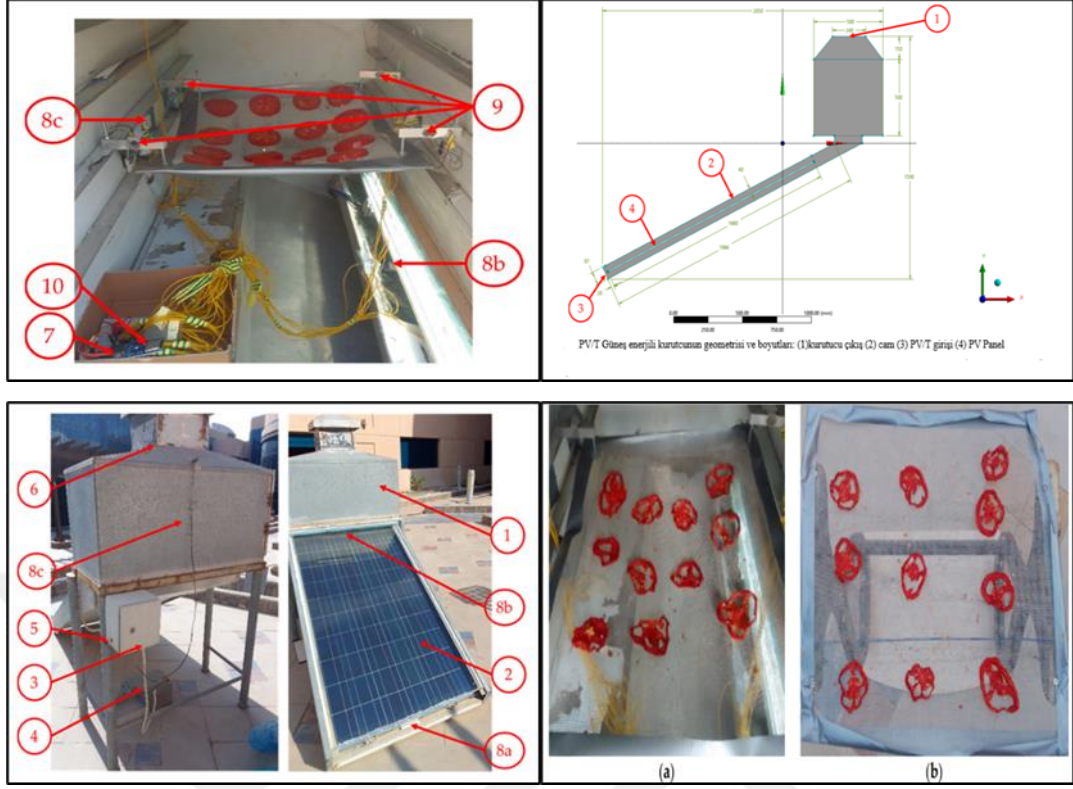
Bu çalışmada, güneş PV/T kolektörleri ve faz değiştiren sistemlerle çalışan hibrit bir kurutma sisteminin performansı incelenmiştir. Kurutma sisteminin enerji tüketimi, özgül nem alma hızı (SMER) ve kurutma verimliliği değerlendirilmiştir. Hibrit kurutma sistemlerinin, ekonomik ve çevre dostu çözümler sunarak kurutma maliyetlerini ve enerji tüketimini azaltmada etkili olduğu belirlenmiştir. Bu sistemler, yenilenebilir enerji kullanımını artırarak sürdürülebilir ve verimli kurutma süreçlerine katkıda bulunur [1].



BÖLÜM 2

LİTERATÜR TARAMASI

H. Chouikhi ve B. M. A. Amer (2023) yaptıkları çalışmada, Fotovoltaik-termal (PV/T) hava kolektörü karışık modlu zorlamalı konveksiyonlu güneş kurutucusunun performansını inceleyen çeşitli çalışmalar temel alınarak, bu sistemlerin domates kurutma işlemlerindeki etkinliği, enerji verimliliği ve sonuçları analiz etmişlerdir (Şekil 2.1). Yapılan çalışmalarda, taze domates dilimlerinin başlangıç nem içeriği %91-92 aralığında olduğunu, PV/T sistemleri ile kurutma işlemi sonucunda bu değer %10-12 aralığına düşerken, açık hava kurutma yönteminde %30 civarında olduğunu tespit etmişler. PV/T güneş kurutucusu, domates dilimlerini 16 saat içinde kuruturken, açık hava kurutma yöntemi ile bu süre daha uzundu ve nihai nem içeriği daha yüksekti. PV/T kolektörlerinin verimliliği çeşitli deneylerle doğrulanmış ve PV panel verimliliği %8,7, kolektör verimliliği %30,9 ve kurutucu verimliliği %15,2 olarak hesaplanmıştır [7].



Şekil 2.1. Deneysel çalışmanın şematik gösterimi [7].

M. R. Rouzegar vd. (2023), Bu çalışmada, ısı depolama kapasiteli hibrit bir güneş kurutucu tasarlanmış ve deneysel olarak test edilmiştir. Kurutucu, bir fotovoltaiik/termal (PV/T) ünite, V-oluklu kolektör, ısı depolama ünitesi ve kurutma odasından oluşmaktadır. Deneyler, faz değıştiren malzemesi (FDM) olmadan, sadece FDM ile ve nano takviyeli FDM ile olmak üzere üç farklı durumda gerçekleştirilmiştir. Deneylerde nane kurutulmuştur. Kurutma işlemi sırasında faz değıştiren malzemesi olarak organik parafin mum kullanılmış ve bu malzeme bakır oksit (CuO) nanopartikülleri ile takviye edilmiştir (Şekil 2.2).

Deneyler, üç farklı durumda gerçekleştirilmiştir: faz değıştiren malzemesi (FDM) olmadan, sadece FDM ile ve nano takviyeli FDM ile. Kurutma süreci boyunca, başlangıç nem içeriği %80 olan nane yaprakları kullanılmıştır. Kurutma işlemi sonucunda, kullanılarak yapılan deneyde nane yapraklarının nem içeriği %12'ye düşürülmüştür. Sonuçlar, nano takviyeli FDM kullanımının kurutma süresini önemli ölçüde kısalttığını göstermiştir. FDM olmadan yapılan kurutma süresi 435 dakika iken, sadece FDM kullanıldığında bu süre 325 dakika, nano takviyeli FDM kullanıldığında

ise 273 dakika olmuştur. FDM kullanımının kurutma süresini kısalttığını, enerji tüketimini azalttığını ve ürün kalitesini artırdığını, Özellikle, nano takviyeli FDM'nin en iyi sonuçları verdiği belirlenmiştir.

FDM kullanımı, kurutma odasındaki hava sıcaklığının zirveye ulaşmasını engelleyerek ürün üzerindeki ısı şokunu azaltmış ve daha yüksek kaliteli bir kurutma sağlamıştır. Ayrıca, FDM, belirli bir nem içeriğine ulaşmak için gereken hava debisini azaltarak elektrik tüketimini düşürmüştür. Kurutulmuş ürünün su emme kapasitesi (rehidrasyon), kalite parametresi olarak değerlendirilmiş ve nano takviyeli FDM, sadece FDM ve FDM olmadan yapılan deneylerde rehidrasyon kapasiteleri sırasıyla %74.06, %70.81 ve %68.57 olarak bulunmuştur [8].



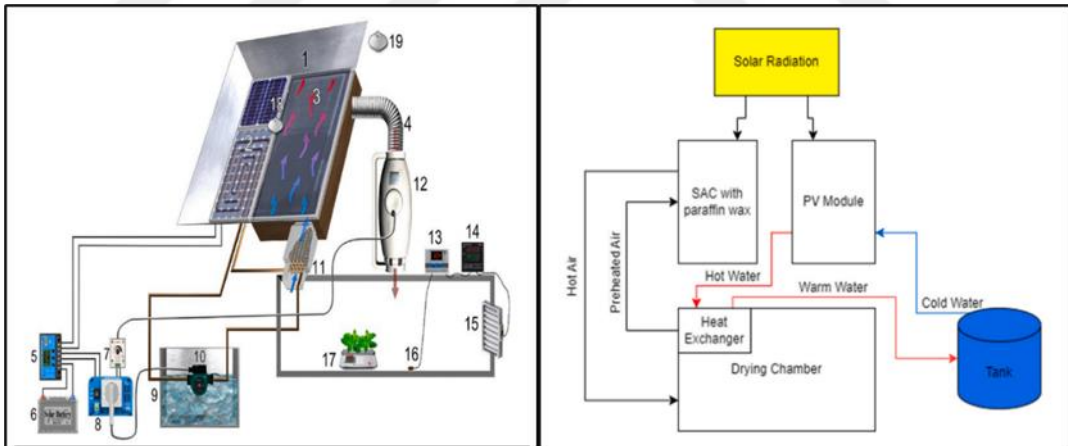
Şekil 2.2. Deneysel çalışmanın şematik gösterimi [8].

Benlioğlu ve ark (2022) yaptıkları çalışmada, yeni bir otomatik kontrollü ve termal enerji depolamalı güneş enerjisi kurutma sisteminin performansını değerlendirmektedir. Bu sistem, konsantre güneş hava ısıtıcısı (CSAC) ve konsantre fotovoltaiik/termal (CPV/T) bileşenlerini birleştirmiştir.

Çalışmada, sistemin genel verimliliği %61, PV modülü elektriksel verimliliği %10 ve kurutma verimliliği %26 olarak bulunmuştur. Ortalama sistem ekserji verimliliği %20, PV modülü ekserji verimliliği %16 ve CSAC ekserji verimliliği %21.9 olarak hesaplanmıştır.

Deneysel çalışmalar, Ekim ayında Karabük'te gerçekleştirilmiş olup, deney süresince ortalama güneş radyasyonu $4.29 \text{ kWh/m}^2\text{-gün}$ olarak ölçülmüştür. Deney süresince, sistemden ortalama 126 W enerji akışı elde edilmiştir. Bu enerjinin 71 W 'ı (%56'sı) CSAC'dan, geri kalan (%44'ü) ise PV/T modülünden sağlanmıştır. PV modülünden elde edilen 55 W enerjinin 20 W 'ı naneyi kurutmak için, geri kalan 30 W 'ı ise pompa ve fan tüketimi için kullanılmıştır. Ortalama kurutma odası sıcaklığı 30.37°C olarak ölçülmüştür.

Çalışmanın sonuçları, PV modülünün soğutulmasıyla %47'lik bir verimlilik artışı sağlandığını ve geri ödeme süresinin 15 yıldan 12 yıla düştüğünü göstermiştir. Ayrıca, geleneksel yöntemlere göre daha homojen ve hızlı bir kurutma süreci elde edilmiştir. Nanelerin başlangıç ıslak ağırlığı, başlangıç nem içeriği ve kuru ağırlık bilgileri kullanılarak hesaplanmıştır. Nanelerin başlangıç nem içeriği 3.3125 g su/g kuru madde olarak belirlenmiş, son nem içeriği ise 0.0625 g su/g kuru maddeye düşürülmüştür. Bu süreçte, nanelerin ıslak ağırlığı, kurutma işleminden önce yapılan ölçümlerle belirlenmiştir (Şekil 2.3) [9].



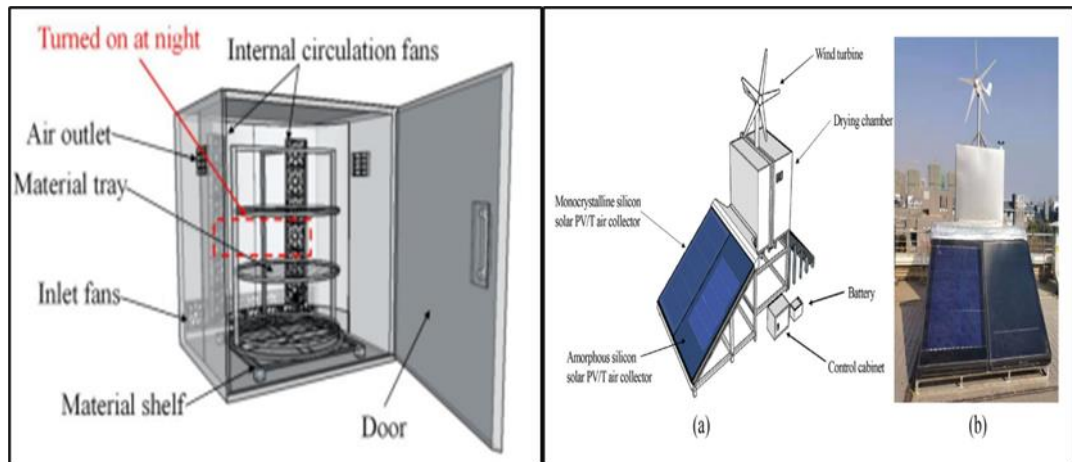
Şekil 2.3. Deneysel çalışmanın şematik gösterimi [9].

Kong vd. (2022) yaptıkları çalışmada, güneş fotovoltaik/termal (PV/T) hava kolektörü ve rüzgar türbini ile çalışan yeni bir hibrit kurutma sistemi önerilmiş ve test edilmiştir. Araştırma kapsamında şalgamlar kurutma örneği olarak seçilmiş ve hibrit kurutucu performansı detaylı bir şekilde incelenmiştir. Çalışmada, amorf silikon PV/T kolektör ve monokristal silikon PV/T kolektör ile rüzgar türbininin enerji verimlilikleri ve ekserji verimlilikleri belirlenmiştir. Amorf silikon PV/T kolektörü için iki günlük

toplam enerji verimlilikleri %61.4 ve %55.2, ekserji verimlilikleri ise %9.95 ve %9.60 olarak bulunmuştur. Monokristal silikon PV/T kolektörü için toplam enerji verimlilikleri %35.5 ve %36.0, ekserji verimlilikleri ise %10.22 ve %9.31 olarak ölçülmüştür. Rüzgar türbininin enerji verimliliği ise %21.6 olarak tespit edilmiştir.

Hibrit kurutma sistemi kullanılarak, başlangıçta 16.680 kg su içeren (kg kuru madde başına) taze şalgamlar, 28 saatlik (gece dahil) kurutma süresi sonunda 0.132 kg su (kg kuru madde başına) içerik seviyesine indirilmiştir. Gece boyunca kurutma işlemi sonrası, şalgamların nem içeriği 1.556 kg su (kg kuru madde başına) kadar azaltılmıştır. Kurutma sürecinde, hibrit kurutma sisteminin kurutma verimliliği %8.99 olarak hesaplanmış, spesifik enerji tüketimi (SEC) 7.5194 kWh\$kg⁻¹ ve spesifik nem çıkarma oranı (SMER) 0.1330 kg\$(kWh)⁻¹ olarak belirlenmiştir.

Bu hibrit kurutma sistemi (Şekil 2.4), güneş ve rüzgar enerjisi kullanarak enerji tüketimini ve karbon emisyonlarını azaltan çevre dostu bir kurutma çözümü sunmaktadır. Sistem, gece ve bulutlu havalarda bile çalışabilme kapasitesi ile yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımını artırmakta ve ekonomik verimliliği yükseltmektedir. Çalışma, geleneksel güneş kurutma sistemlerinin enerji yetersizliği problemlerini çözmek için yenilikçi bir yaklaşım sunarak, özellikle enerji tüketimi ve verimliliği konularında önemli katkılar sağlamaktadır. Yenilenebilir enerji kaynaklarının kurutma süreçlerine entegrasyonu, hem ekonomik hem de çevresel açıdan büyük faydalar sağlamaktadır [1].



Şekil 2.4. Deneysel çalışmanın şematik gösterimi [1].

Awad vd. (2022) yaptıkları bir derleme çalışmasında (Şekil 2.5), faz değiştiren malzemelerinin (FDM) fotovoltaiik termal (PV/T) kolektörlerle entegrasyonunu inceleyerek bu sistemlerin performansını artırmayı hedeflemiştir. FDM'ler, ısıyı emip serbest bırakarak sıcaklığı düzenleme, verimliliği artırma ve güneş panellerinin ömrünü uzatma kapasitesine sahiptir. FDM kullanımı, PV/T sistemlerde termal, elektriksel ve genel verimlilikte sırasıyla %26.87, %17.33 ve %40.59 oranında iyileşme sağlamıştır.

Nanomalzemelerin FDM'lere eklenmesi, özgül ısı kapasitesi ve termal iletkenliği artırarak panel sıcaklıklarını düşürmüş ve elektriksel verimliliği artırmıştır.

Çalışma, FDM'lerin kanatçıklar ve nanoakışkanlar ile kullanılmasının daha iyi termal yönetim ve enerji verimliliği sağladığını vurgulamaktadır. Nanopartiküller ve mikro kapsüllenmiş PCM'ler (MFDM), termal özellikleri artırmada ve ısı kaybını azaltmada özellikle etkili olmuştur.

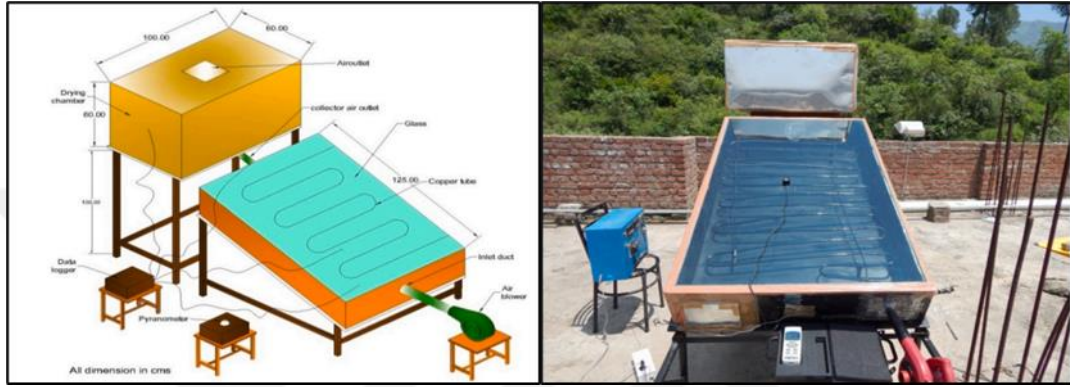
Çeşitli çalışmalar, FDM entegrasyonunun PV panellerinin sıcaklık dalgalanmalarını azaltarak verimliliklerini ve performanslarını önemli ölçüde artırdığını göstermiştir.

Çalışmada incelenen birçok çalışma, FDM entegrasyonunun faydalarını doğrulayan deneysel ve sayısal analizler göstermiştir. Farklı konfigürasyonlarda FDM kullanımı, çeşitli çevresel koşullar altında hem elektriksel hem de termal verimliliklerde iyileşmeler sağlamıştır [10].

Bhardwaj vd. (2021) Hindistan'da yapılan çalışmada, düşük maliyetli, ekonomik ve yenilikçi bir zorlamalı konveksiyonlu güneş kurutma sisteminin performansını değerlendirmektedir. Kurutma işlemi sırasında gündüz-gece termal dalgalanmalarını kontrol etmek için, güneş hava kolektörü (SAC) duyarlı ısı depolama ortamı (SHSM) ile donatılmış ve kurutma ünitesinde termal enerji depolama (TES) ortamı olarak parafin RT-42 kullanılmıştır. Deneysel çalışmada, başlangıç nem içeriği %89 olan 9.0 kg Valerian rizomları kullanılmıştır. Rizomlar, TES kullanılarak 120 saatte, TES kullanılmadan ise 216 saatte %9 nem içeriğine kadar kurutulmuştur.

Enerji ve ekserji analizlerine göre, TES'siz SAC'nin ortalama enerji verimliliği %9.8 iken, TES ile %26.10'a çıkmıştır. Benzer şekilde, ekserji verimliliği TES'siz %0.14,

TES ile %0.81 olarak bulunmuştur. Kurutma kabininin ekserji verimliliği %3.7 ile %75.15 arasında değişmiş ve ortalama %30.28 olarak hesaplanmıştır. TES kullanımı ile genel kurutma hızı 0.051 kg/saat iken, TES kullanılmadan 0.028 kg/saat olmuştur. Kurutma işlemi boyunca toplam 40.56 MJ enerji tüketilerek 7.91 kg nem buharlaştırılmış ve spesifik enerji tüketimi (SEC) 11.33 kWh/kg nem olarak hesaplanmıştır [11].



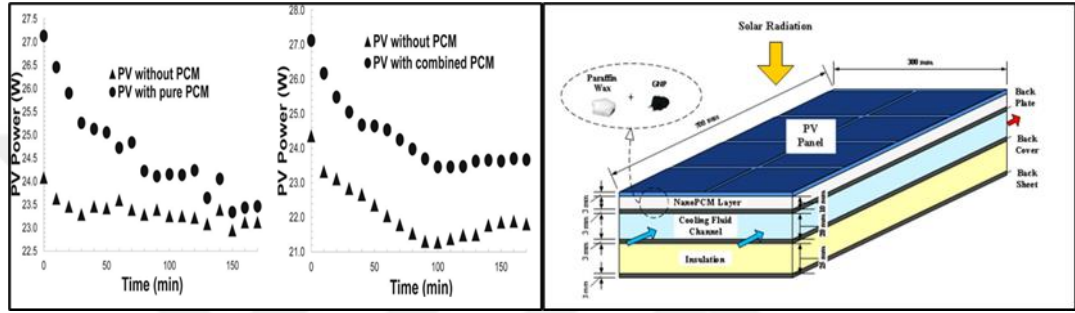
Şekil 2.5. Çalışmanın şematik gösterimi [11].

Maghrabie ve ark. (2021), yapılan çalışmada faz değiştiren malzemeleri (FDM) ve nanoparçacıklar (NeFDM) kullanarak güneş fotovoltaik (PV) panellerinin performansını artırma yöntemlerini incelemektedir. Çalışma, FDM ve NeFDM'nin PV panellerinin soğutulmasında kullanımını ve bu malzemelerin hazırlık yöntemlerini kapsamlı bir şekilde ele almaktadır. Bulgular, nanoparçacıkların faz değiştiren malzemelerine (FDM) eklenmesiyle, FDM'nin termofiziksel özelliklerinin önemli ölçüde iyileştirildiğini göstermektedir. Bu iyileştirmeler, erime sıcaklığı, süper soğutma derecesi, füzyon ısısı, viskozite gibi özelliklerde gözlemlenmiştir. Ayrıca, nanoparçacıkların kütle fraksiyonu, NePCM nanokompozitlerinin termal iletkenliğini (TC) artırmaktadır. NeFDM'ler, FDM'nin termofiziksel özelliklerini yoğunlaştırarak üstün ısı transfer özellikleri sunmaktadır.

Çalışma (Şekil 2.6), enerji ve ısı miktarını değerlendirerek, nanoparçacıkların eklenmesiyle FDM'nin termal iletkenliğinin önemli ölçüde arttığını ve bu durumun PV modüllerinin yüzey sıcaklıklarının düzenlenmesine yardımcı olduğunu ortaya koymaktadır. Bu iyileştirmeler, PV panellerinin elektriksel verimliliğini %5.8

oranında artırmıştır. Enerji depolama oranı ise saf FDM kullanımında %5.7'den %5.2'ye, kombine FDM kullanımında %5.6'dan %4.5'e düşmüştür.

Nem içeriği açısından, çeşitli nanoparçacıkların eklenmesiyle FDM'nin erime noktası, süper soğutma derecesi ve füzyon ısısı gibi termal özelliklerinin iyileştirildiği belirtilmiştir. Bu iyileştirmeler, nem içeriği açısından FDM'nin termal enerji depolama kapasitesini artırmaktadır [12].

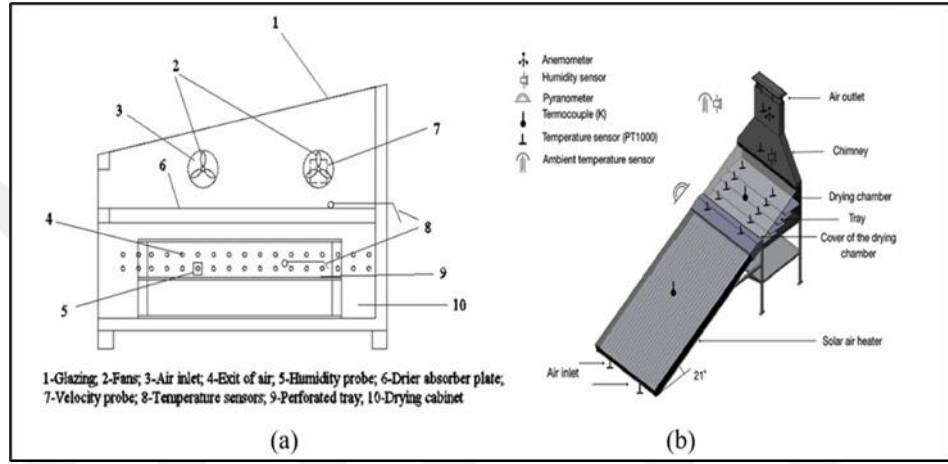


Şekil 2.6. Kurutma sistemin şematik gösterimi [12].

Jangde ve ark. (2021), dolaylı güneş kurutucularının etkinliği üzerine kapsamlı bir inceleme gerçekleştirmiştir. Bu çalışmada, dolaylı güneş kurutucularının özellikle Hindistan gibi güneş ışığının bol olduğu bölgelerde tarım ürünlerinin kurutulması için uygun olduğu vurgulanmıştır. Araştırma, bu kurutma tekniklerinin çeşitli yapılandırmalarını, kurutma süreçlerinin verimlilik açısından değerlendirilmesini ve farklı kurutucu türlerinin performans kıyaslamalarını kapsamaktadır.

Araştırmada (Şekil 2.7) kurutucuların kolektör verimliliği, kurutucu verimliliği, maksimum hava sıcaklığı ve kurutulan ürünlerin nihai nem içeriği gibi çeşitli parametreler üzerinde durulmuştur. Kolektör verimliliği, kurutucuların güneş ışığını ne kadar etkili bir şekilde enerjiye dönüştürebildiğini gösterirken, kurutucu verimliliği bu enerjinin kurutma sürecinde ne kadar verimli kullanıldığını ifade etmektedir. Dolaylı kurutucuların doğrudan kurutuculara göre daha yüksek verimlilik sağladığını ve ürün kalitesini koruyarak daha düşük nem oranlarına ulaştığını ortaya koymuştur.

Kurutma süreci sırasında ulaşılan maksimum hava sıcaklıklarının, kurutucunun tasarımına ve operasyonel parametrelere bağlı olarak değişiklik gösterdiği belirtilmiştir. Bu sıcaklıkların genellikle 50-80 °C aralığında değiştiği ve dolaylı kurutucuların kurutma işlemi sırasında ürünlerin üzerine direkt güneş ışığı düşmemesini sağlayarak ürün kalitesinin korunmasına yardımcı olduğu ifade edilmiştir. Kurutma süresi ve nihai nem içeriği ise, kurutucunun verimliliğinin yanı sıra kurutulan ürünün kalitesini de doğrudan etkilemektedir [13].



Şekil 2.7. Deneysel çalışmanın şematik gösterimi [13].

Hafız Ali tarafından yapılan araştırmada, son yıllarda faz değiştiren malzemeleri (FDM), nano akışkanlar ve bunların kombinasyonlarının kullanımıyla fotovoltaik (PV) soğutma ve verim artırma üzerine kapsamlı bir inceleme yapılmıştır. Bu incelemede, PV sistemlerinin yüksek çalışma sıcaklıklarından kaynaklanan verim düşüşlerini gidermek amacıyla geliştirilen soğutma teknikleri ele alınmıştır.

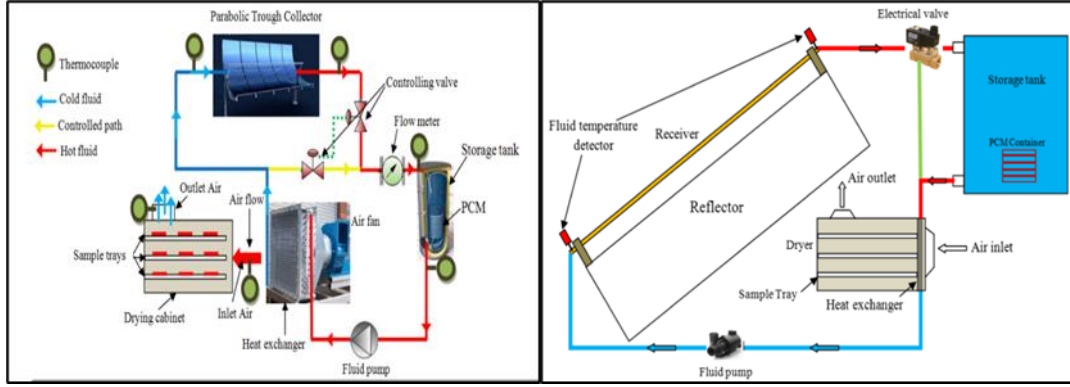
Pasif soğutma yöntemleri kullanılarak faz değiştiren malzemelerinin (FDM) PV verimliliğini %20'ye kadar artırabildiği tespit edilmiştir. PV panellerinin arkasına FDM kaplarına kanatçık eklenmesinin, ısı iletimini önemli ölçüde iyileştirdiği bulunmuştur. Kompozit FDM'lerin, artırılmış termal iletkenlikleri nedeniyle ilgi çektiği belirlenmiştir. Ayrıca, farklı erime noktalarına sahip iki FDM'in bir arada kullanılmasıyla daha iyi ısı düzenlemesi ve yüzey sıcaklığı dengesi sağlandığı saptanmıştır.

Pasif ve aktif soğutma tekniklerinin kombinasyonunun PV hücre sıcaklığını daha da düşürdüğü ve ek termal güç üretimi ile PV verimliliğini artırdığı bulunmuştur. FDM ile entegre edilmiş su bazlı hibrit PV/T sistemlerinin verimliliği %32 oranında artırabildiği tespit edilmiştir. Nano akışkan bazlı PV/T sistemlerinin PV verimliliğini %60'tan fazla artırabildiği belirlenmiştir. FDM ve nano akışkan kombinasyonunun, tek başına FDM veya nano akışkan kullanımından daha etkili olduğu sonucuna varılmıştır. Nano akışkanların ince tabaka gereksinimleri ile optik filtre olarak da kullanılabilmesi ve nanopartikül konsantrasyonu değiştirilerek ayarlanabileceği ortaya konmuştur.

Bu inceleme sonucunda, FDM ile maksimum PV verimlilik artışının %20'ye kadar olduğu, FDM ile entegre edilmiş hibrit PV/T sistemleri ile verimlilik artışının %32 olduğu, nano akışkan bazlı PV/T sistemleri ile verimlilik artışının %60'tan fazla olduğu ve FDM kullanarak elde edilen sıcaklık düşüşünün 35°C'ye kadar olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, FDM ve nano akışkan kombinasyon sistemleri ile verimlilik artışının tek başına kullanımından daha fazla olduğu görülmüştür [14].

Alimohammadi vd. (2020) tarafından gerçekleştirilen çalışma, farklı akışkan türlerinin Parabolik oluklu güneş kolektörünün (PTSC) termal performansı üzerindeki etkisini değerlendirmektedir. Çalışmada, PTSC'nin alıcı borusu ve depolama tankındaki termal değişimleri öngörmek için CFD (Hesaplama Akışkanlar Dinamiği) simülasyonu kullanılmıştır. Deneysel olarak 0.025 kg/s hava akış hızı ile çalışılmış ve performans analizi için dört farklı akışkan türü (Al₂O₃ %4 Nanoakışkan, motor yağı 10W40, gliserin ve su) kullanılmıştır. Elma dilimleri 5 mm kalınlıkta kurutulmuştur.

Çalışmanın bulguları, güneş kurutucusunun genel termal enerji girişinin Nanoakışkan, motor yağı, gliserin ve su için sırasıyla yaklaşık 17.36 MJ, 18.46 MJ, 17.76 MJ ve 16.80 MJ olduğunu göstermektedir. Nanoakışkan, motor yağı ve gliserin kullanımı, kurutucusunun genel verimliliğini sırasıyla %9.7, %20.2 ve %12.4 oranında artırmıştır. Sayısal ve tahmin edilen sonuçların karşılaştırılması, CFD yönteminin PTSC'nin farklı çalışma sıvılarıyla performansını yüksek doğrulukla öngörebildiğini ortaya koymuştur. Ayrıca, farklı çalışma sıvılarının FDM ile birlikte kullanılmasının kurutulan elma dilimlerinin kalitesi üzerinde olumsuz bir etkisi olmadığı tespit edilmiştir (Şekil 2.8) [2].



Şekil 2.8. Kurutma sistemin şematik gösterimi [2].

Mallikarjuna ve ark. (2019), tarafından geliştirilen ve güneş fotovoltaik (PV) paneller tarafından çalıştırılan giriş fanları ile desteklenen dolaylı tip bir güneş kurutucu (ITSD) kullanılmıştır. Çalışmanın amacı yeşil biber (*Capsicum Annum*) ve bamyada (*Abelmoschus Esculentus*) kurutma deneylerini gerçekleştirmek ve ITSD'nin kurutma kinetiği ile performans parametrelerini incelemektir.

Deneyleerde (Şekil 2.9), yeşil biberin, 8.3984 kg/kg su başlangıç nem içeriğinden 0.01001 kg/kg su son nem içeriğine düşerken, bamyada bu değerler 10.1234 kg/kg su başlangıç nem içeriğinden 0.12675 kg/kg su son nem içeriğine düşmüştür. Güneş hava kolektörü verimliliği yeşil biber kurutma sırasında %74.13, bamyada kurutma sırasında %78.30 olarak tespit edilmiştir. Kurutma verimliliği ise yeşil biber için %9.15, bamyada için %26.06 olarak belirlenmiştir.

Kurutma süresi yeşil biber için toplam 18 saat, bamyada için toplam 9 saat olarak belirlenmiş olup, güneş hava kolektörü (SAC) verimliliği ve kurutma verimliliği her iki ürün için de önemli ölçüde artırılmıştır. Kurutma odasındaki sıcaklık ve nem oranları, kurutma sürecinin başlangıcında yüksek olup zamanla azalmaktadır. Bu çalışma, güneş enerjisi kullanarak yeşil biber ve bamyada gibi tarımsal ürünlerin verimli bir şekilde kurutulabileceğini göstermektedir. Güneş PV panelleriyle çalıştırılan giriş fanları, doğal konveksiyon sistemlerine kıyasla kurutma sürecini ve verimliliği önemli ölçüde iyileştirmiştir [15].



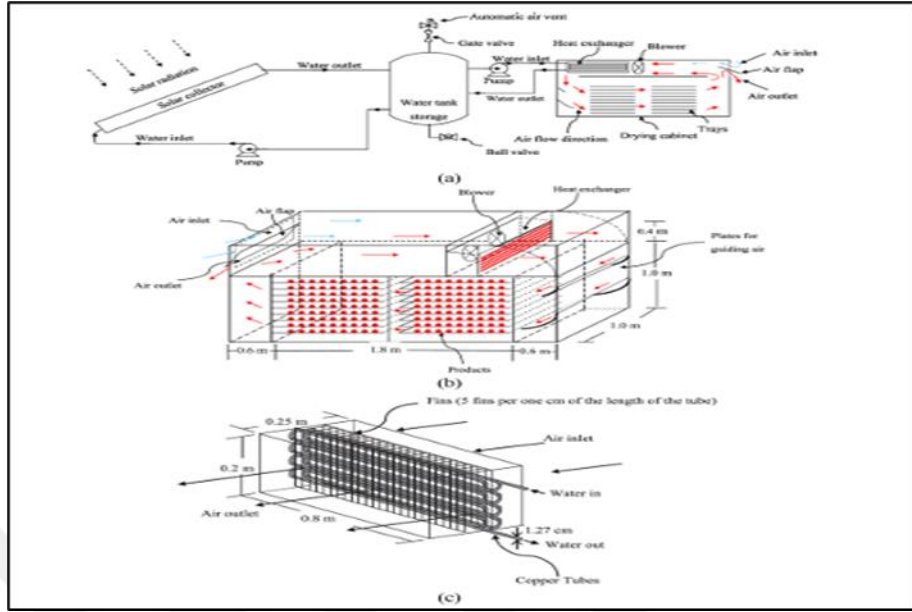
Şekil 2.9. Kurutma sistemin şematik gösterimi [15].

Lamidi ve ark. tarım ürünlerinin sürdürülebilir kurutulması konusundaki araştırmaları ve bu alandaki son gelişmeleri inceleyen bir çalışma yapmışlar. Çalışmada (Şekil 2.10), çeşitli kurutma teknikleri, hibrit sistemler, enerji tüketimi ve verimliliği, ürün nem içeriği ve kurutma süreçleri gibi konulardaki literatürü özetleyip analiz etmişlerdir.

Yazarlar, hibrit kurutma sistemlerinin, güneş enerjisi ile diğer teknolojileri (biyokütle, ısı pompaları) birleştirerek sürdürülebilir gıda kurutma için umut verici çözümler sunduğunu belirtmişlerdir. Bu sistemlerin, ek ısı kaynakları veya termal enerji depolama (TES) kullanarak güneş kurutma işleminin süreksizlik sorunlarını çözdüğünü vurgulamışlardır. Güneş-sıvı petrol gazı (LPG) hibrit kurutucuların, sadece LPG kullanıldığında %45 verimlilik sağladığını, ancak hibrit modda sistemin süreksizliği nedeniyle verimliliğin %33'e düştüğünü belirtmişlerdir. Ayrıca, diğer hibrit sistemlerin geleneksel yöntemlere kıyasla kurutma süresinde yaklaşık %24'lük bir azalma gösterdiği bulunmuştur.

Kurutma süreci, modelleme ve deneysel yaklaşımlar aracılığıyla kapsamlı bir şekilde analiz edilmiştir. Kurutma sistemlerini tasarlamak ve değerlendirmek için hesaplama modelleri ve simülasyon araçları (CFD, TRNSYS, CFX) kullanılmış ve kurutucular içinde daha iyi hava dağılımı ve sıcaklık kontrolü sağlanmıştır. Hibrit kurutucular üzerine yapılan çalışmalar, TES ve geri dönüşüm sistemlerinin verimli kullanımı sayesinde ısı girişi gereksinimlerinde önemli azalmalar göstermiştir. Bir güneş-

biyokütle hibrit kurutucunun, geliştirilmiş kurutma verimliliği ve azaltılmış yakıt tüketimi gösterdiği belirtilmiştir [16].



Şekil 2.10. Deneysel çalışmanın şematik gösterimi [16].

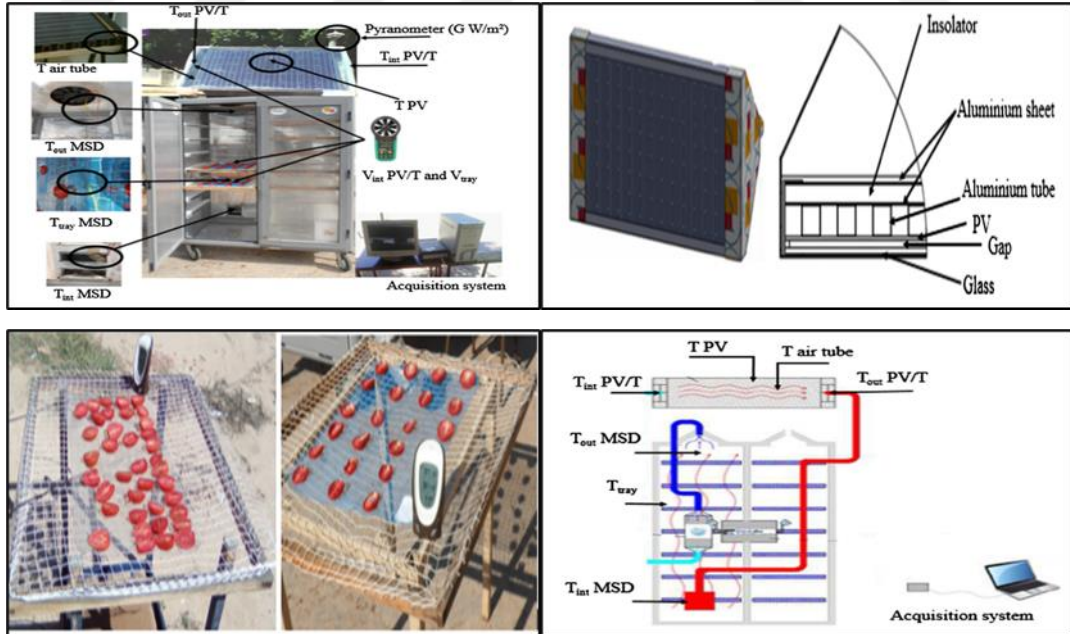
H. Chouikhi ve ark. (2018) yaptıkları çalışmayla tarafından gerçekleştirilen "Fotovoltaik-Termal Hava Kolektörü ile Donatılmış Karışık Modlu Zorlamalı Konveksiyonlu Güneş Kurutucusunun Deneysel Parametrik Çalışması" adlı araştırmayı sunmuşlar. Çalışma, Tunus'un Sfax kentinde bulunan Ulusal Mühendislik Okulu'ndaki Elektromekanik Sistemler Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiş olup, King Faisal Üniversitesi'ndeki Mekanik Mühendisliği Bölümü ile iş birliği içinde yürütülmüştür.

Bu çalışmada (Şekil 2.11), karışık modda çalışan ve zorlamalı konveksiyon ile kurutma yapan bir güneş kurutucusunun performansı incelenmiştir. Kurutucu, bir fotovoltaik-thermal (PV/T) hava kolektörü ve bir kurutma odasından oluşmaktadır. Sistem, PV panelinin altındaki alüminyum tüp kanallardan geçen hava akışını kullanarak hem PV hücrelerini soğutmakta hem de termal enerjiyi kurutma odasına taşımaktadır. Bu prototip, doğal kurutma tekniklerini kullanan çiftçilere ekonomik bir kazanç sağlamakta, kurutulmuş domateslerin daha uzun süre saklanmasına ve mahsul kayıplarının azalmasına olanak tanımaktadır.

Deneylem, 04-09-2015 ile 10-09-2015 tarihleri arasında gerçekleřtirilmiř ve taze domateslerin nem içerięi %91.94'ten tepsi 1'de %22.32'ye ve tepsi 2'de %28.9'a dūřurūlmūřtur. Buna karřılık, açık gūneř kurutucusunda nem içerięi sadece %30.15'e dūřmūřtur. Kurutma sūresi boyunca, PV/T kolektōrünün çıkıř sıcaklıęı, giriř sıcaklıęına gōre 30-40°C artıř gōstermiřtir. Bu, kurutma odasına tařınan ısınnın verimli bir Őekilde kullanıldıęını gōstermektedir.

PV/T hava kolektōrū kullanılarak enerji verimliliği artırılmış ve kurutma sūresi kısaltılmıştır. Kurutma işlemi boyunca kurutma odasındaki sıcaklık, gūnūn erken saatlerinde kademeli olarak artmış, oęle saatlerinde maksimum değerine ulaşmış ve akşam saatlerinde azalmıştır. Tepsi 1'de maksimum sıcaklık 52°C, tepsi 2'de ise 48°C olarak kaydedilmiştir. Karışık kurutucu içindeki sıcaklık, 14 :00 saatine kadar artmaya devam etmiştir.

Çalıřma, zorlamalı konveksiyonlu gūneř kurutucusunun verimlilięini artırmak için PV/T hava kolektōrünün eklenmesinin etkili olduęunu gōstermektedir [17].



Şekil 2.11. Deneysel alışmanın Şematik gōsterimi [17].

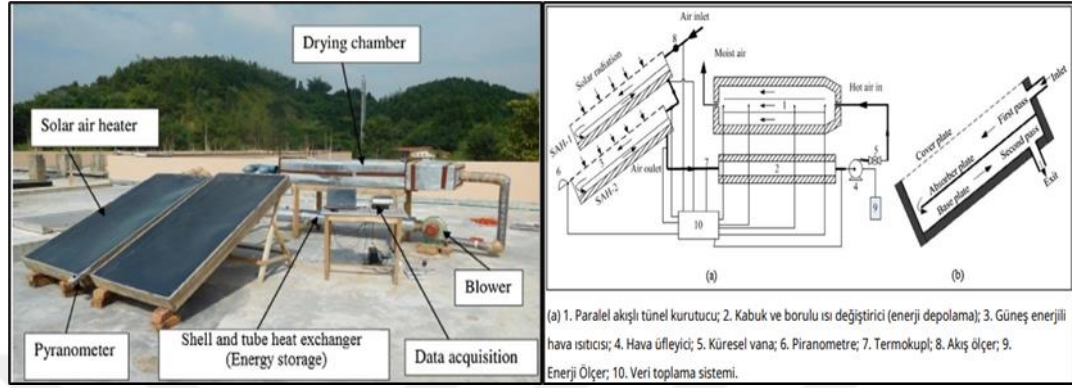
D.K. Rabha ve P. Muthukumar (2017) tarafından Hindistan Guwahati Teknoloji Enstitüsünde yaptıkları çalışmada (Şekil 2.12), parafin mum bazlı gizli ısı depolama sistemi ile entegre edilmiş zorlanmış konveksiyonlu bir güneş kurutucusunun performansı değerlendirilmiştir. Kurutma deneyi 24-27 Nisan 2016 tarihleri arasında gerçekleştirilmiş ve her gün sabah 8 :00'den akşam 18 :00'e kadar 10 saat boyunca kırmızı biberler kurutulmuştur. Kurutma işlemi, %73.5 başlangıç nem içeriğine sahip kırmızı biberlerin nem içeriğinin %9.7'ye düşürülmesiyle sonuçlanmış ve bu işlem güneş kurutucusunda toplam 35 saat sürmüştür. Bu süre, açık güneşte kurutma süresine göre %122.8 daha kısa olmuştur.

Enerji ve ekserji analizleri sonucunda, ilk güneş hava ısıtıcısının ortalama enerji ve ekserji verimlilikleri sırasıyla %32.4 ve %0.9, ikinci ısıtıcıda ise bu değerler %14.1 ve %0.8 olarak bulunmuştur. Gizli ısı depolama biriminin enerji ve ekserji verimlilikleri sırasıyla %43.6–%49.8 ve %18.3–%20.5 arasında değişmiştir. Kurutma odasının ekserji verimliliği %24.6–%98.1 arasında değişmiş ve ortalama %52.2 olarak tespit edilmiştir. Kurutma sisteminin özgül enerji tüketimi 6.8 kWh/kg nem ve toplam verimliliği %10.8 olarak belirlenmiştir. Elektrik enerjisi tüketimi ise kg başına 0.7 kWh olup, bu değer toplam enerji tüketiminin sadece %10.3'ünü oluşturmuştur.

Kurutma sisteminin bileşenleri arasında, parafin mum bazlı ısı depolama birimi, iki çift geçişli güneş hava ısıtıcısı, bir üfleyici ve bir kurutma odası yer almaktadır. Isı depolama birimi, ısıyı sabah 8 :00 ile 14 :30 arasında depolamış ve akşam 18 :00'e kadar kurutma işlemini sürdürmüştür. Enerji depolama biriminin ortalama anlık ısı girişi ve geri kazanımı sırasıyla 105–130W ve 89–116W olarak hesaplanmıştır. Depolama birimi, kurutma odasına yaklaşık 6–8°C daha yüksek sıcaklıkta hava sağlamış ve bu sayede kurutma sürecini iyileştirmiştir.

Kurutma işlemi boyunca ürünün nem içeriği %9.6'ya düşene kadar toplam 14.1 kg nem buharlaştırılmıştır. Güneş kurutucusu, toplam 356.3 MJ enerji tüketmiş ve bu enerjinin %90'ı güneş enerjisinden elde edilmiştir. Kurutma sistemi, enerji verimliliği ve hijyenik kurutma süreci ile tarımsal ürünlerin kurutulmasında daha sürdürülebilir ve ekonomik çözümler sunmaktadır. Bu bulgular, güneş enerjisi ve gizli ısı depolama

sistemlerinin entegre edilmesiyle kurutma işlemlerinin verimli bir şekilde yapılabileceğini göstermektedir [18].



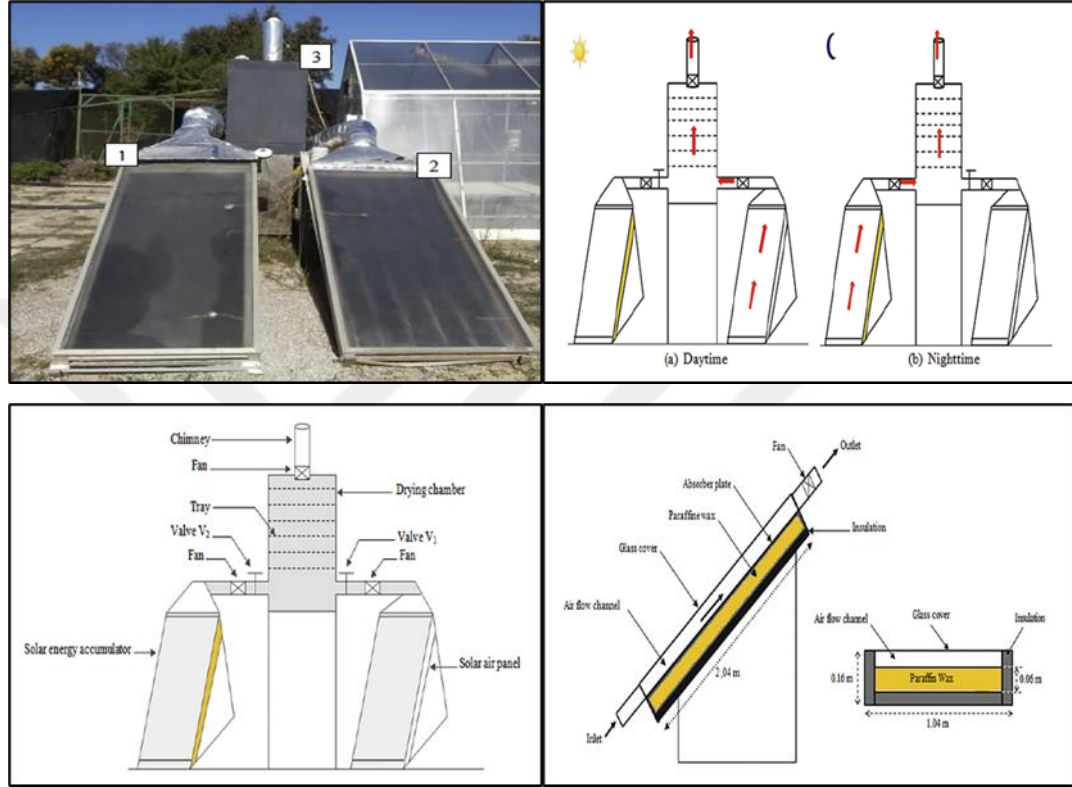
Şekil 2.12. Deneysel çalışmanın şematik gösterimi [18].

El Khadraoui ve diğerleri (2017) tarafından Tunus'ta gerçekleştirilen çalışma (dolaylı tip zorlamalı konveksiyonlu bir güneş kurutucusunun faz değıştiren malzemesi (FDM) kullanılarak tasarlanmasını ve test edilmesini ele almaktadır. Bu kurutucu, güneş hava paneli, FDM içeren güneş enerjisi akümülatörü ve bir kurutma odasından oluşmaktadır. Çalışmada (Şekil 2.13), FDM'li ve FDM'siz kurutucuların performansları karşılaştırılmıştır.

Güneş enerjisi akümülatörünün günlük enerji verimliliği %33.9, ekserji verimliliği ise %8.5 olarak hesaplanmıştır. Akümülatör kullanıldığında, kurutma odası sıcaklığının gece boyunca ortam sıcaklığından 4-16 °C daha yüksek olduğu ve bağıl nemin ortam bağıl neminden %17-34.5 daha düşük olduğu gözlemlenmiştir. Kurutma süreci gündüz (06 :00 - 16 :00) ve gece (16 :00 - 06:00) olarak ikiye ayrılmıştır; gündüz toplanan ısı, gece boyunca FDM'den serbest bırakılarak kurutma işlemi devam ettirilmiştir.

Parafin mumu kullanılan FDM, gece boyunca kurutma odasındaki nem oranını düşürmüş ve sıcaklığı artırmıştır. Bu çalışma, FDM'li güneş enerjisi akümülatörlerinin kurutma süreçlerinde enerji depolama ve serbest bırakma yoluyla etkin bir çözüm sunduğunu ve kurutma verimliliğini artırdığını göstermektedir. Bu bulgular, güneş

enerjisi ile çalışan kurutucuların tarımsal ürünlerin kurutulmasında önemli avantajlar sağladığını ortaya koymaktadır [19].



Şekil 2.13. Deneysel çalışmanın şematik gösterimi [19].

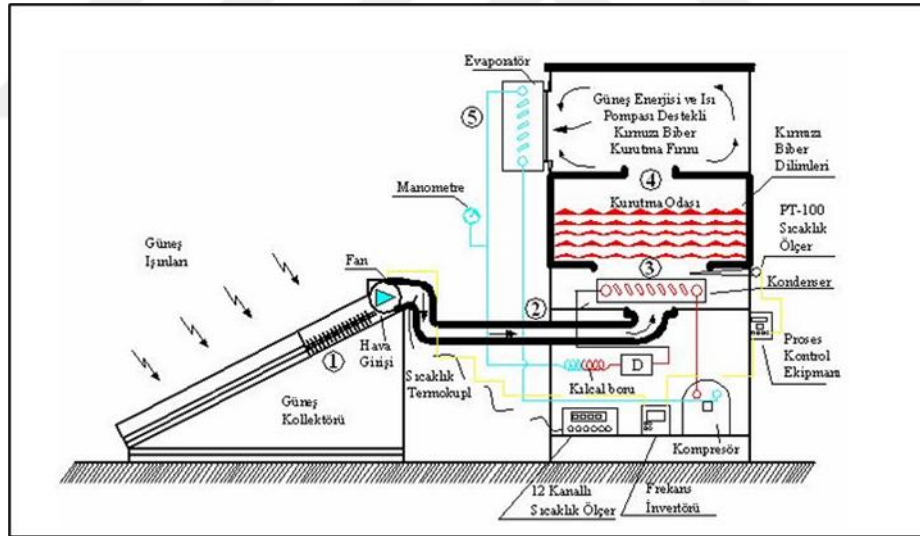
AKTAŞ vd. (2010) yaptıkları çalışmada (Şekil 2.14), kırmızıbiberlerin kurutulması için güneş enerjisi destekli ve ısı pompalı bir kurutucu tasarlanmış, üretilmiş ve performans deneyleri gerçekleştirilmiştir. Kurutma işlemi sırasında, ısı borulu güneş kolektörü ve havadan havaya ısı pompası sistemi kullanılarak kırmızıbiberler başlangıç nem miktarından (10.81 g su/g kuru madde) son nem miktarına (0.16 g su/g kuru madde) kadar kurutulmuştur. Kurutma süreci 24 saat boyunca ısı pompası desteği ile sağlanmıştır.

Kurutma işlemi, 50 °C kuru termometre sıcaklığında ve ortalama 0.4 m/s hava hızında 210 dakikada tamamlanmıştır. Kurutma sistemi, PID kontrollü olup, hava hızı proses kontrol cihazından set edilen sıcaklık değerine göre değişmiştir. Deney sonuçlarına

göre tüm sistem için ortalama ısıtma tesir katsayısı (COP_{wh}) 2.24 ve özgül nem çekme oranı (SMER_{ws}) 0.209 olarak hesaplanmıştır.

Deneysel veriler, kurutma sisteminin etkinliğini ortaya koymuştur. Kurutma sonrası kırmızıbiberlerin su aktivitesi değeri (aw) 0.35 olarak ölçülmüştür, bu değer küflerin ve mikotoksinlerin oluşmasının önlenmesi için gerekli değerlerin altında kalmaktadır. Kurutma süresince hava hızı ve sıcaklık kontrollü bir şekilde ayarlanmış ve enerji verimliliği optimize edilmiştir. Kurutma sistemi, kırmızıbiberleri yüksek kaliteli ve kontrollü bir şekilde kurutmak için tasarlanmıştır.

Sonuç olarak, güneş enerjisi destekli ve ısı pompalı kurutma sistemi, kırmızıbiber kurutma sürecini optimize ederek enerji verimliliğini artırmış ve ürün kalitesini korumuştur. Bu çalışma, kırmızıbiber kurutma sürecinde yenilikçi bir yaklaşım sunarak, enerji tasarrufu ve ürün kalitesini ön planda tutmuştur [20].



Şekil 2.14. Deneysel çalışmanın şematik gösterimi [20].

BÖLÜM 3

KURUTMA VE GÜNEŞ ENERJİLİ KURUTUCULAR

3.1 KURUTMA

Gıda kurutmada güneş enerjisi sadece günümüzde değil, geçmişte de ürünlerin kurutulması ve muhafaza edilmesinde önemli bir kaynaktır. Ayrıca artan nüfusla birlikte özellikle gıda sektöründe kurutma ihtiyacı her geçen gün artmakta ve bu nedenle kurutma işlemi için farklı yöntemler aranmaktadır. Tarım sektöründe enerji talebinin yaklaşık %20-30'u, Ayrıca aktivasyon suyunun uzaklaştırılmasıyla mikro organizmaların büyümesi ve ürünün bozulması önemli ölçüde azalmaktadır. Gıdaların ömrünü ve kalitesini artıran bu sistemlerin yaygınlaşması çevre ve enerji açısından oldukça önemlidir. Gıdaların kurutulmasının amacı meyve ve sebzelerin besin değerlerini kaybetmeden uzun süre muhafaza edilmesidir. Aynı zamanda kurutma işlemi gıdadaki su oranını azaltarak ve meyve asitleri, amino asitler gibi enzimlerin faaliyetlerini engellemektedir [2 ,22,23].

Temel kurutma sistemleri arasında yer alan güneş enerjili kurutma sistemleri, yatırım maliyetleri dışında herhangi bir maliyet getirmediğinden sıklıkla tercih edilmektedir. Güneş enerjili kurutucular farklı kurutma yöntemleri uygulama, zaman ve enerji tasarrufu sağlama gibi avantajlara sahiptir. [22,23,24]

Güneş enerjisi, yenilenebilir enerji kaynakları arasında en önemli ve yaygın olanlardan biridir. Özellikle tarımsal ürünlerin kurutulmasında güneş enerjisi önemli bir rol oynamaktadır. Güneş enerjisi ile kurutma, ürünlerin içerdikleri nemin güneş enerjisi kullanılarak buharlaştırılması işlemidir. Bu yöntem, enerji tasarrufu sağlaması ve çevre dostu olması nedeniyle tercih edilmektedir.

Güneş enerjili kurutma sistemleri, temel olarak üç ana bileşenden oluşur : güneş kolektörleri, kurutma odası ve hava sirkülasyon sistemi. Güneş kolektörleri, güneş ışınlarını toplar ve ısı enerjisine dönüştürür. Bu enerji, kurutma odasına iletilen hava aracılığıyla ürünlerin kurutulmasını sağlar. Hava sirkülasyon sistemi ise, kurutma odasındaki havanın sürekli olarak hareket etmesini ve buharlaşan nemin dışarı atılmasını sağlar. Güneş enerjili kurutma sistemleri, doğal ve zorlanmış konveksiyon olmak üzere iki ana tipte sınıflandırılabilir. Doğal konveksiyon sistemlerinde hava dolaşımı doğal yollarla sağlanırken, zorlanmış konveksiyon sistemlerinde fanlar kullanılarak hava dolaşımı hızlandırılır [22,23].

Bu kurutma yönteminin temel avantajlarından biri, düşük işletme maliyetleridir. Güneş enerjisi bedava ve bol miktarda bulunduğu için enerji maliyetleri minimum seviyede tutulur. Ayrıca, güneş enerjisi ile kurutma sistemleri çevre dostudur ve fosil yakıtların kullanımını azaltarak karbon ayak izini düşürür. Bu yöntem, özellikle gelişmekte olan ülkelerde, kırsal bölgelerde ve elektrik erişiminin sınırlı olduğu yerlerde büyük bir potansiyele sahiptir [23,25,24].

3.2. KURUTMA YÖNTEMLERİNİN ÇEŞİTLERİ

Kurutma yöntemleri, kullanılan enerji kaynağı ve kurutma prosesine göre çeşitli kategorilere ayrılır. Güneş enerjili kurutma, bu yöntemler arasında en yaygın olanıdır ve dört ana grupta sınıflandırılabilir : açık güneş kurutması, doğrudan güneş kurutması, dolaylı güneş kurutması ve karışık modlu güneş kurutması. Şekil 3.1’de güneş enerjili kurutucuların sınıfları ve çeşitleri gösterilmektedir.

3.2.1. Açık Güneş Kurutma Sistemi

Ürünler, doğrudan güneş ışığına maruz bırakılarak kurutulur. Bu yöntem, en eski ve en basit kurutma yöntemidir. Ancak, ürünler toz, yağmur ve hayvanlar gibi dış etkenlere karşı korumasızdır. Açık güneş kurutmasında ürünler, ince tabakalar halinde yayılır ve doğrudan güneş ışığına maruz bırakılır. Bu yöntem, uzun kurutma süresi gerektirir ve ürünlerin kalite ve miktarının düşmesine neden olabilir. Ayrıca, ürünlerin

doğrudan güneş ışığına maruz kalması, besin değerlerinin ve renginin bozulmasına yol açabilir [25,34].

3.2.2. Doğrudan Güneş Kurutma Sistemi

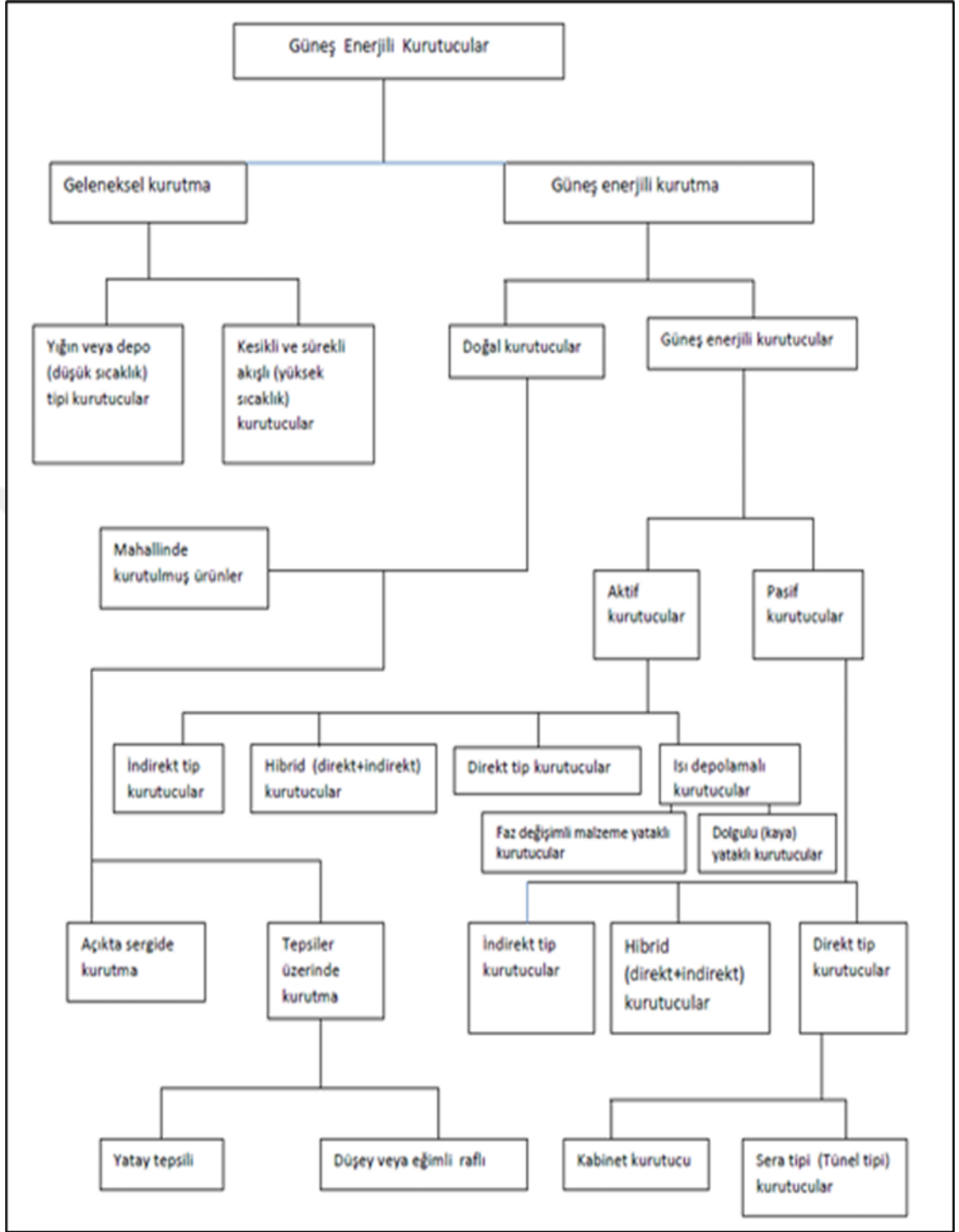
Ürünler, güneş kolektörleriyle donatılmış bir kurutma odasında kurutulur. Güneş ışınları doğrudan kurutma odasına girer ve ürünleri kurutur. Bu yöntem, açık güneş kurutmasına göre daha kontrollü bir ortam sağlar. Kurutma odası, ürünleri toz, yağmur ve diğer dış etkenlerden korur. Ancak, doğrudan güneş kurutmasının da bazı dezavantajları vardır. Kurutma odasının içindeki nem, cam kapağın üzerinde yoğunlaşarak güneş ışınlarının geçişini engelleyebilir [25,24].

3.2.3. Dolaylı Güneş Kurutma Sistemi

Güneş enerjisi ile ısıtılan hava, bir kanaldan geçerek kurutma odasına girer. Bu yöntem, ürünlerin doğrudan güneş ışığına maruz kalmasını engeller ve daha homojen bir kurutma sağlar. Dolaylı güneş kurutmasında, güneş kolektörleri tarafından ısıtılan hava, kurutma odasına yönlendirilir ve ürünlerin üzerinden geçerek nemin buharlaşmasını sağlar. Bu yöntem, ürünlerin rengini ve besin değerlerini korur. Ayrıca, dolaylı güneş kurutması, yüksek kaliteli ürünler elde edilmesini sağlar [25,24].

3.2.4. Karışık Modlu Güneş Kurutma Sistemi

Hem doğrudan güneş ışığını hem de güneş kolektörlerinden gelen sıcak havayı kullanarak kurutma yapılır. Bu yöntem, kurutma verimliliğini artırır ve kurutma süresini kısaltır. Karışık modlu güneş kurutmasında, güneş enerjisi ile ısıtılan hava ve doğrudan güneş ışığı bir arada kullanılır. Bu sayede, ürünler daha hızlı kurutulur ve enerji verimliliği artırılır. Ayrıca, bu yöntemle elde edilen ürünlerin kalitesi daha yüksektir [25,24].



Şekil 3.1. Kurutma türüne göre kurutucuların sınıflandırılması [24].

3.3. GÜNEŞ ENERJİLİ KURUTUCULAR

Yenilenebilir enerji kaynaklarından biri olan güneş enerjisinin son yıllarda pratik, çevresel ve ekonomik faydaları nedeniyle birçok alanda kullanımını artmaktadır. Ayrıca kurutma endüstrisi güneş enerjisinin uygulanabileceği uygulamalı bir alandır. Endüstride yüksek kurutma maliyetlerini azaltmak ve daha kaliteli ürün elde etmek amacıyla güneş enerjili kurutma sistemleri kullanılmaktadır [26].

Kurutucular, tarımsal yaş ürünlerin kurutulmasında kullanılabilen termal enerji üreten (güneş kolektörleri gibi) kaynaklardan en çok kullanılan sistemlerdir. Güneş enerjili kurutucu, raf ömrünü uzatmak amacıyla çeşitli tarım ürünlerinden nem çıkarmak için güneş enerjisini kullanan bir cihazdır. Elektrik veya gaz enerjisi kullanan endüstriyel kurutucularla karşılaştırıldığında güneş enerjili kurutucuların çevresel etkisi daha düşük olmaktadır. Tarım sektöründe kullanılan birçok kurutucu bulunmaktadır ve güneş enerjisinin bol miktarda kullanılması nedeniyle güneş enerjili kurutucular en popüler olanlardır. Ancak çiftçilerin bir kısmı ürünlerini kurutmak için doğrudan güneşte kurutma yöntemini kullanmaktadır. Direkt (açıkta) güneşte kurutma yöntemi, toz, rüzgâr, böcekler, gece nemlendirilmesi(rutubeti) ve hayvan saldırısı gibi faktörler olumsuz etkilenmekte ve dolayısıyla kurutulan ürünün uygun kalitede kurumamasına neden olmaktadır. Ayrıca kurutulacak gıda ve ürünler farklı kuruma ve fiziksel özelliklere sahiptir. Bu nedenle doğru kurutucu ve kurutma yöntemi seçilmelidir. [2&27].

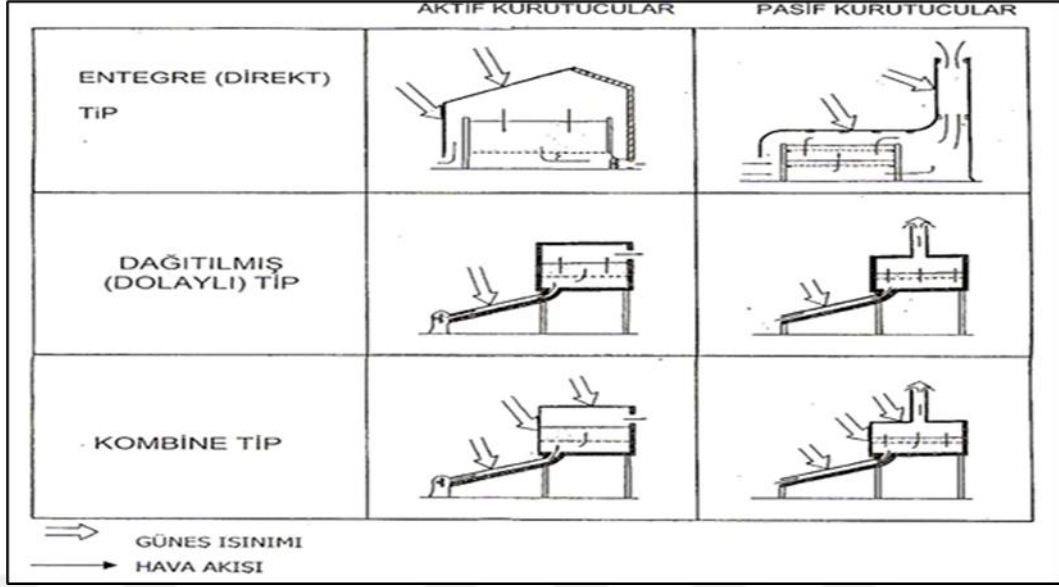
Kurutma sıcaklığı, hava hızı gibi güneş enerjisiyle kurutma parametreleri ve öğelerin kurutulmasına yönelik diğer termodinamik parametrelerin tümü, meyve ve sebzelerin kalitesi üzerinde etkiye sahiptir. Bu parametreler çeşitli modelleme ve simülasyon teknikleriyle geliştirilebilir. Güneş enerjisiyle kurutma uygulamalarında nem, kapalı bir kabin içerisinde daha yüksek sıcaklıktaki hava ile kurutulmaktadır. Güneş enerjili kurutucuların verimliliğini artırmak ve gıda kalitesini koruyan çeşitli güneş enerjili kurutucu türlerinin performansını tahmin etmek kritik öneme sahiptir [24].

Araştırmalarda kurutucuların kolektör verimliliği, kurutucu verimliliği, maksimum hava sıcaklığı ve kurutulan ürünlerin nihai nem içeriği gibi çeşitli parametreler üzerinde durulmuştur. Kolektör verimliliği, kurutucuların güneş ışığını ne kadar etkili bir şekilde enerjiye dönüştürebildiğini gösterirken, kurutucu verimliliği bu enerjinin kurutma sürecinde ne kadar verimli kullanıldığını ifade etmektedir. Dolaylı kurutucuların doğrudan kurutuculara göre daha yüksek verimlilik sağladığını ve ürün kalitesini koruyarak daha düşük nem oranlarına ulaştığını ortaya koymuştur.

Kurutma süreci sırasında ulaşılan maksimum hava sıcaklıklarının, kurutucunun tasarımına ve operasyonel parametrelere bağlı olarak değişiklik gösterdiği belirtilmiştir. Bu sıcaklıkların genellikle 50-80 °C aralığında değiştiği ve dolaylı kurutucuların kurutma işlemi sırasında ürünlerin üzerine direkt güneş ışığı düşmemesini sağlayarak ürün kalitesinin korunmasına yardımcı olduğu ifade edilmiştir. Kurutma süresi ve nihai nem içeriği ise, kurutucunun verimliliğinin yanı sıra kurutulan ürünün kalitesini de doğrudan etkilemektedir.[28]

3.4. GÜNEş ENERJİLİ KURUTUCULARIN SINIFLANDIRILMASI

Güneş enerjili kurutucular, yapıları ve işlevlerine göre farklı kategorilere ayrılabilir. Genel olarak, kurutucuların sınıflandırılması, kurutma mekanizması, tasarım özellikleri ve kullanılan teknolojiye bağlıdır. şekil 3.2’de güneş enerjili kurutucuların tasarımları gösterilmektedir.



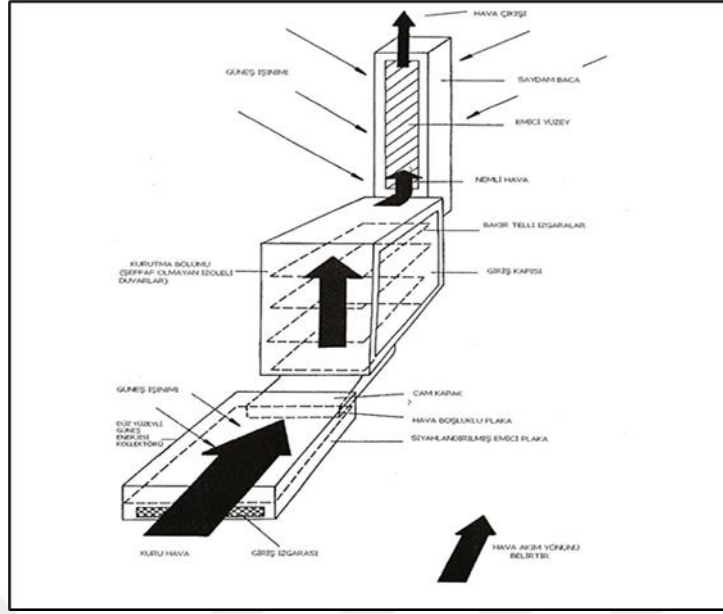
Şekil 3.2. Güneş enerjili kurutucuların tasarımları [24].

3.4.1. Doğrudan Güneş Enerjili Kurutucular

Bu tip kurutucularda, güneş ışınları doğrudan kurutulacak ürüne ulaşır. Kurutma odası, şeffaf bir kapak ile kaplanır ve içeriye giren güneş ışınları ürünlerin kurumasını sağlar. Doğrudan güneş enerjili kurutucular, basit yapıları ve düşük maliyetleri ile dikkat çeker. Ancak, bu kurutucularda ürünlerin doğrudan güneş ışığına maruz kalması, bazı ürünlerin kalitesini olumsuz etkileyebilir [25,24].

3.4.2. Dolaylı Güneş Enerjili Kurutucular

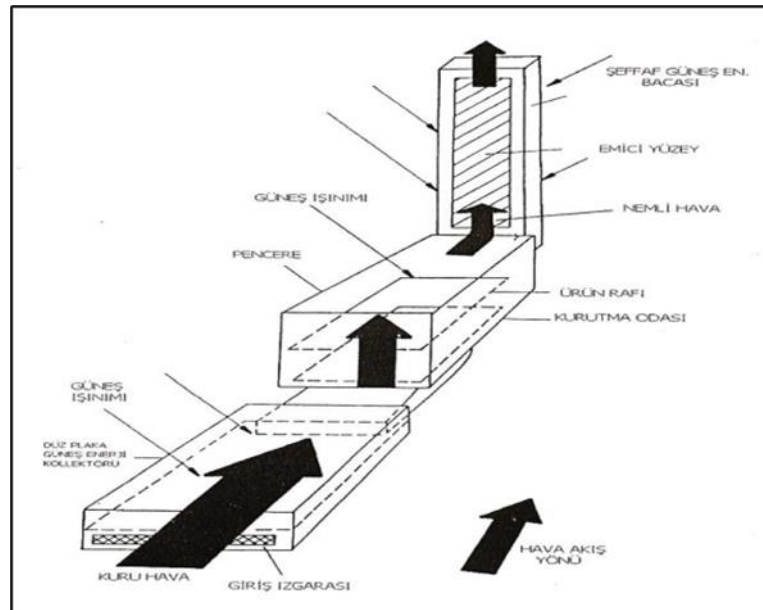
Güneş enerjisi, bir kolektör aracılığıyla toplanır ve bu kolektörde ısıtılan hava kurutma odasına yönlendirilir. Ürünler doğrudan güneş ışığına maruz kalmaz, bu da ürünlerin renginin ve besin değerlerinin korunmasını sağlar. Dolaylı güneş enerjili kurutucular, daha karmaşık yapıları ve yüksek maliyetleri nedeniyle daha az yaygındır. Ancak, bu kurutucular, yüksek kaliteli ve homojen kurutulmuş ürünler elde edilmesini sağlar [25,24]. Şekil 3.3'te dolaylı tip güneş enerjili kurutucu şekli gösterilmektedir.



Şekil 3.3. Dolaylı tip güneş enerjili kurutucu [24].

3.4.3. Karışık Modlu Güneş Enerjili Kurutucular

Bu kurutucular, hem doğrudan güneş ışığını hem de güneş kolektörlerinden gelen sıcak havayı kullanır. Bu sistemler, kurutma verimliliğini artırır ve kurutma süresini kısaltır. Karışık modlu güneş enerjili kurutucular, genellikle büyük ölçekli tarımsal uygulamalarda kullanılır. Bu kurutucular, yüksek enerji verimliliği ve kaliteli kurutma performansı ile öne çıkar (şekil 3.4) [25,24].



Şekil 3.4. Dolaylı tip güneş enerjili kurutucu tasarımı [24].

3.3.4. Zorlanmış Konveksiyonlu Güneş Kurutucular

Bu kurutucularda, fanlar yardımıyla hava sirkülasyonu sağlanır. Zorlanmış konveksiyon, kurutma süresini kısaltır ve daha homojen bir kurutma sağlar. Zorlanmış konveksiyonlu güneş kurutucular, enerji verimliliğini artırır ve kurutma süresini önemli ölçüde kısaltır. Bu kurutucular, genellikle endüstriyel uygulamalarda tercih edilir [25,24].



BÖLÜM 4

PV/T SİSTEMLER VE TERMAL ENERJİ DEPOLAMA YÖNTEMİ

4.1 PV/T SİSTEMLER

Fotovoltaik/Thermal (PV/T) sistemler, güneş enerjisinden hem elektrik hem de ısı enerjisi elde etmek için tasarlanmış hibrit sistemlerdir. Geleneksel fotovoltaik paneller, güneş ışığını doğrudan elektriğe dönüştürürken, enerjinin bir kısmı ısı olarak kaybedilir. Bu hibrit sistemler, bu ısı enerjisini kullanarak daha verimli bir enerji üretim süreci sağlar. Panellerin altına veya çevresine yerleştirilen termal kolektörler, panellerin soğutulmasını sağlayarak elektrik üretim verimliliğini artırır ve aynı zamanda kullanılabilir ısı enerjisi üretir [9].

4.1.1. Fotovoltaik Hücreler

Fotovoltaik (PV) hücreler, güneş enerjisini doğrudan elektrik enerjisine dönüştüren yarı iletken cihazlardır. Bu dönüşüm, fotonların enerjisinin yarı iletken malzemedeki elektronları harekete geçirmesiyle sağlanır. Fotovoltaik hücrelerin verimliliği ve performansı, kullanılan yarı iletken malzemelerin özelliklerine bağlıdır.

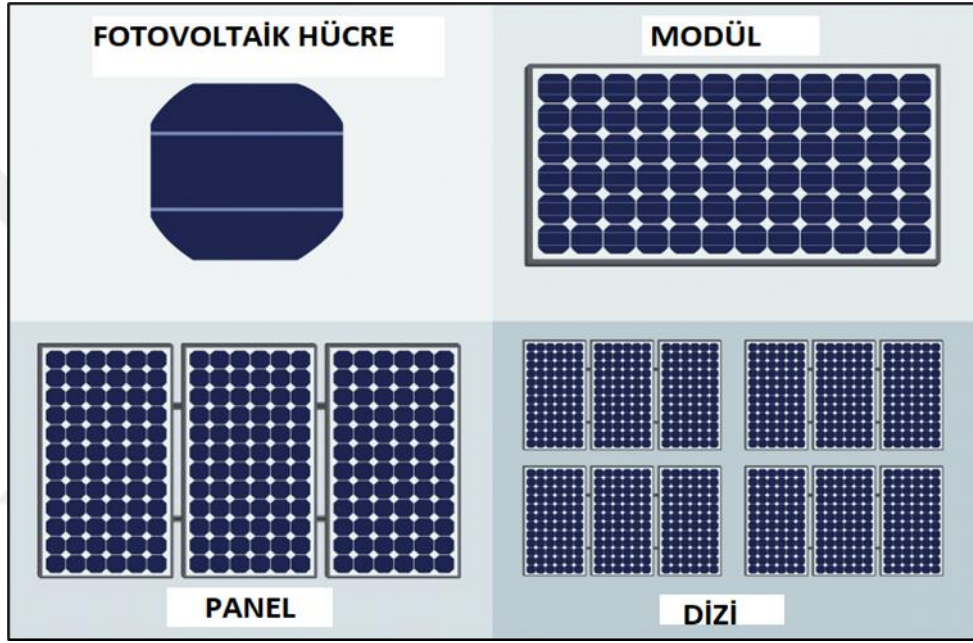
Fotovoltaik hücrelerin temel çalışma prensibi, güneş ışığından gelen fotonların yarı iletken malzeme tarafından soğurulması ve bu süreçte elektrik akımının üretilmesidir.

Fotovoltaik Hücre: Güneş ışığını doğrudan elektrik enerjisine dönüştüren yarı iletken malzemeden yapılmış küçük cihazlar.

Modül: Fotovoltaik hücrelerin birbirine paralel veya seri bağlanarak oluşturduğu daha büyük yapı. Tek bir modül genellikle birkaç hücre içerir.

Panel: Birkaç modülün bir araya gelmesiyle oluşan yapı. Güneş panelleri, genellikle enerji üretimini artırmak için modüllerin birleştirilmesiyle oluşturulur.

Dizi: Birkaç panelin bir araya getirilmesiyle oluşturulan sistem. Genellikle büyük ölçekli enerji üretiminde kullanılır [9]. Şekil 4.1’de fotovoltaik sistemlerin bileşenleri gösterilmektedir.

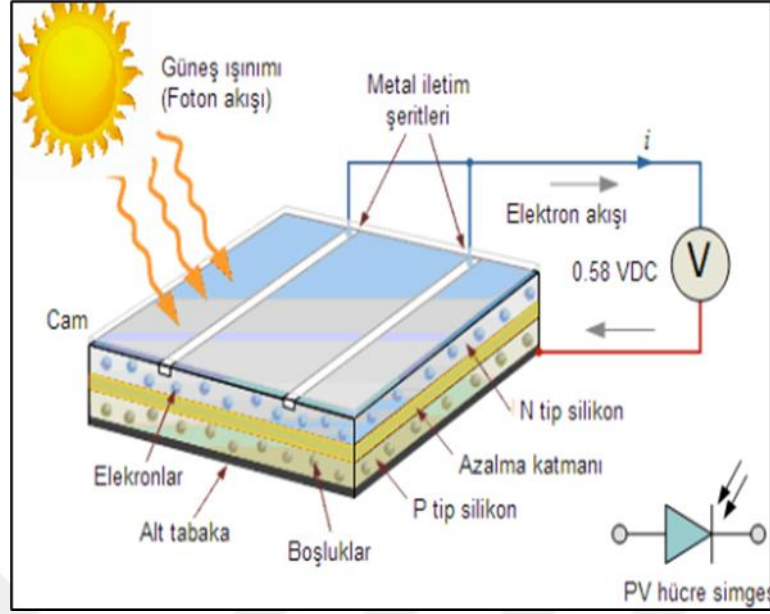


Şekil 4.1. Fotovoltaik sistemlerin sınıflandırılması [29].

4.1.1.1 Fotovoltaik Hücre Yapısı

Yarı İletken Malzeme: Fotovoltaik hücrelerin ana bileşeni yarı iletken malzemelerdir.

PN Eklem: En yaygın kullanılan malzeme, dört valans elektronuna sahip olan silikondur. PV hücreler, p-tipi (pozitif) ve n-tipi (negatif) yarı iletken malzemelerin birleşiminden oluşan bir PN eklem içerir. Bu eklem, bir elektrik alan oluşturur (Şekil 4.2) [9].



Şekil 4.2. Fotovoltaik hücrelerin yapısı [30].

4.1.1.2 Fotoelektrik Etki

Foton Soğurma: Güneşten gelen fotonlar, yarı iletken malzemeye çarptığında, fotonların enerjisi elektronlara aktarılır. Bu enerji aktarımı, elektronların enerji seviyesini yükseltir ve onları serbest bırakır.

Elektron-Hole Çifti: Bir foton bir elektronun enerjisini artırdığında, elektron valans bandından iletkenlik bandına geçer ve bir "hole" (delik) bırakır. Bu süreç, bir elektron-hole çifti oluşturur.

Elektrik Akımı: Serbest kalan elektronlar, yarı iletken malzemede oluşturulan elektrik alan nedeniyle hareket eder. Elektronlar n-tipi malzemeye, delikler ise p-tipi malzemeye doğru hareket eder. Bu hareket, bir elektrik akımı oluşturur ve dış devreye elektrik sağlar [31, 33,34].

4.1.1.3 Yarı İletkenler ve Doping Teknikleri

Yarı iletkenler, fotovoltaik hücrelerin verimliliğini ve performansını doğrudan etkileyen malzemelerdir. Silikon, en yaygın kullanılan yarı iletken malzemedir ve doping teknikleri ile özellikleri optimize edilebilir.

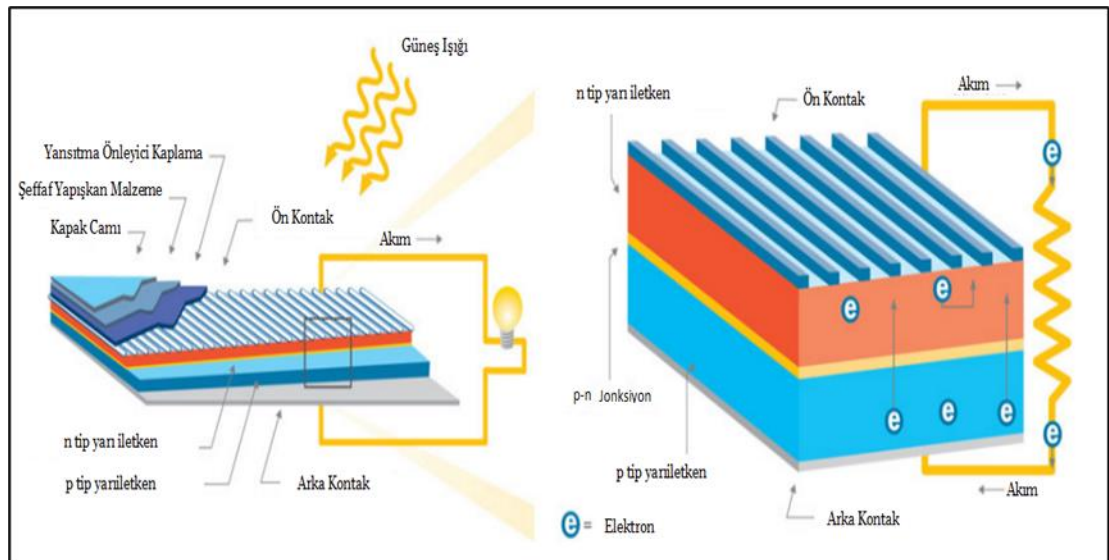
Silikon Yarı İletkenler:

Kristal Yapısı: Silikon, kristal yapıda olup dört valans elektronuna sahiptir. Bu elektronlar, komşu silikon atomları ile kovalent bağlar oluşturur.

Doping: Doping, yarı iletken malzemenin elektriksel özelliklerini değiştirmek için az miktarda yabancı atom eklenmesi işlemidir. İki ana doping türü vardır:

N-Tipi Doping: Fosfor (P) gibi beş valans elektronuna sahip bir element eklenir. Bu, serbest elektronların sayısını artırır.

P-Tipi Doping: Bor (B) gibi üç valans elektronuna sahip bir element eklenir. Bu, deliklerin (pozitif yük taşıyıcıları) sayısını artırır (Şekil 4.3) [31, 33,34].



Şekil 4.3. Fotovoltaik hücrelerin çalışma prensibi[35].

4.1.1.4 Sıcaklık ve PV Hücre Verimliliği

PV hücrelerin sıcaklıkla ilişkili verimlilik kaybı, sıcaklık katsayısı olarak bilinen bir parametre ile ifade edilir. Genel olarak, bir PV hücrenin sıcaklık katsayısı, hücrenin güç çıkışındaki her bir derece Celsius artış başına düşen yüzde kaybı belirtir.

Sıcaklık Katsayısı : PV hücrelerin sıcaklık katsayısı genellikle negatif bir değerdir ve bu değer, hücrenin türüne bağlı olarak değişir. Silikon bazlı PV hücreler için bu katsayı genellikle $-0.3\%/^{\circ}\text{C}$ ile $-0.5\%/^{\circ}\text{C}$ arasında değişir.

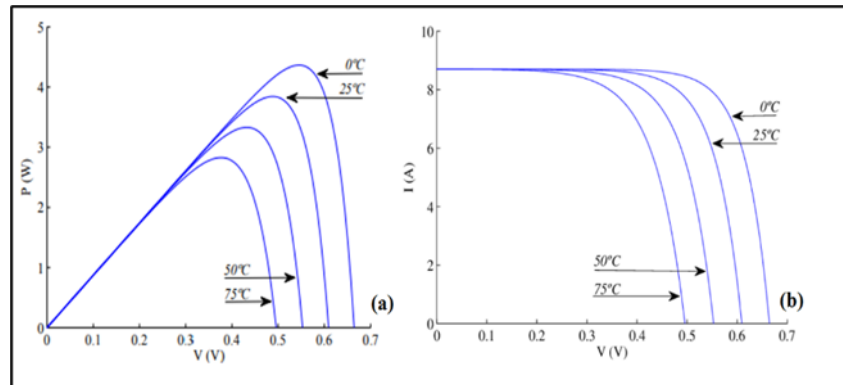
Bir PV hücrenin sıcaklık katsayısı $-0.4\%/^{\circ}\text{C}$ ise, ortam sıcaklığının 1°C artması, hücrenin güç çıkışında $\%0.4$ 'lük bir azalmaya yol açar.

Performans Parametreleri :

Açık Devre Gerilimi (V_{oc}) : Sıcaklık arttıkça, PV hücrelerin açık devre gerilimi düşer. Bu düşüş, her bir derece Celsius başına yaklaşık 2 mV kadar olabilir.

Doldurma Faktörü (FF): Sıcaklık arttıkça hücrenin doldurma faktörü de düşer, bu da maksimum güç noktasındaki verimliliğin azalmasına yol açar.

Maksimum Güç Noktası (P_{max}): Hem V_{oc} hem de FF değerlerinin düşmesi nedeniyle, hücrenin maksimum güç çıkışı azalır(Şekil 4.4).

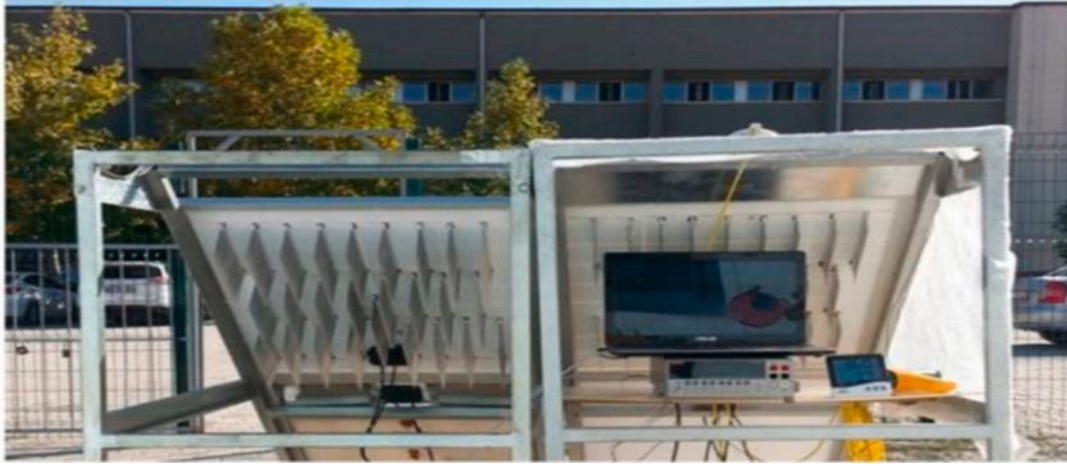


Şekil 4.4. $0-75^{\circ}\text{C}$ sıcaklıklarındaki (a) P-V grafiği (b) I-V grafiği [36].

4.1.1.5 Isı Alıcılarla PV Paneli Soğutma Teknikleri

Isı Alıcıları (Heat Sinks)

Isı alıcıları, fotovoltaik (PV) hücrelerde ve diğer elektronik cihazlarda ısıyı yönetmek ve dağıtmak için kullanılan pasif soğutma cihazlarıdır. Isı alıcıları, cihazların verimliliğini artırmak ve aşırı ısınmayı önlemek amacıyla sıcaklığı kontrol altında tutar. PV hücrelerde ısı alıcılarının kullanımı, hücrelerin performansını optimize etmek için kritik öneme sahiptir. Şekil 4.5’de ısı alıcıların örneği gösterilmiştir.



Şekil 4.5. Isı alıcıların çeşitlerine bir örnek[39].

4.1.1.6 Isı Alıcılarının Çalışma Prensibi

Isı alıcıları, sıcak yüzeylerden ısıyı emer ve bunu çevreye yayılan daha geniş bir yüzey alanı üzerinden dağıtarak soğutmayı sağlar. Bu süreç, ısı alıcılarının termal iletkenlik özelliklerine dayanır. Isı alıcılarının verimliliği, kullanılan malzemenin termal iletkenliği ve ısı alıcının tasarımına bağlıdır.

Malzeme Seçimi:

Alüminyum: Yüksek termal iletkenlik ve hafiflik nedeniyle yaygın olarak kullanılır.

Bakır: Alüminyumdan daha yüksek termal iletkenliğe sahip olsa da, daha ağır ve daha pahalıdır.

Grafit: Yüksek termal iletkenliğe sahip yeni nesil malzemeler arasında yer alır.

Tasarım Özellikleri:

Yüzey Alanı: Isı alıcılarının yüzey alanı ne kadar büyükse, ısıyı dağıtma kapasitesi o kadar yüksek olur. Bu nedenle, ısı alıcıları genellikle yüzey alanını artırmak için kanatçıklarla (fin) tasarlanır.

Kanatçıklar: Kanatçıklar, ısıyı yaymak için kullanılan ince metal levhalardır. Farklı kanatçık tasarımları, ısı dağılımını optimize eder.

Doğrusal Kanatçıklar: Basit ve etkili bir tasarımıdır. Kanatçıklar paralel sıralar halinde düzenlenir.

Pin Kanatçıklar : Dikey olarak yerleştirilmiş küçük metal pimlerdir. Yüzey alanını artırır ve hava akışını iyileştirir.

Dalgalı Kanatçıklar : Yüzey alanını ve hava akışını optimize etmek için dalgalı bir tasarıma sahiptir.

4.1.1.7 Isı Alıcılarının Fotovoltaik Hücrelerde Kullanımı

Fotovoltaik hücrelerde ısı alıcılarının kullanımı, hücrelerin performansını artırmak ve sıcaklık artışının neden olduğu verim kayıplarını azaltmak için kritik öneme sahiptir. PV hücrelerde ısı alıcılarının kullanımı ile ilgili bazı temel noktalar :

Hücre Sıcaklığının Kontrolü : PV hücrelerin verimliliği, sıcaklık arttıkça düşer. Isı alıcıları, hücre sıcaklığını düşük tutarak hücrelerin maksimum verimlilikte çalışmasını sağlar. Sıcaklık artışının neden olduğu enerji kayıplarını azaltır ve hücrelerin ömrünü uzatır.

Soğutma Etkinliği : Yüksek termal iletkenliğe sahip malzemelerden yapılan ve optimize edilmiş tasarıma sahip ısı alıcıları, PV hücrelerin etkin bir şekilde soğutulmasını sağlar.

Hücrelerin sıcaklık dağılımını homojen hale getirir, böylece sıcak nokta (hot spot) oluşumunu engeller.

4.1.2. PV/T KOLEKTÖRLER

Son zamanlarda PV/T kolektör tasarımının hem elektriksel hem de termal performans üzerindeki etkisine olan ilgi giderek artmaktadır. PV/T kolektöründe hava kanalı sayısı arttıkça sistem performansının arttığı çoğu çalışmalar bunu ispat etmektedir. PV/T Isı Depolamalı Kurutma Sistemi, sürdürülebilir enerji çözümleri arasında önemli bir yer tutmakta ve güneş enerjisinden daha fazla faydalanılmasını sağlayarak, yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımını teşvik etmektedir. Bu sistemlerin geniş çapta kullanımı, enerji verimliliğini artırmak ve karbon ayak izini azaltmak için önemli bir adım olabilmektedir.[27]

Güneş enerjisini doğrudan kullanan diğer bir sistem olan fotovoltaik modüller, yüzeylerine gelen güneş ışığını elektrik enerjisine dönüştüren yarı iletken malzemelerdir. Fotovoltaik modüller güneş ışınımının tamamını elektriğe dönüştüremezlerdir. Güneş ışınımından gelen enerjinin bir kısmı panelin yüzey sıcaklığını artırarak fotovoltaik modülün ısınmasına ve dolayısıyla verimliliğinin düşmesine neden olmaktadır. Fotovoltaik termal (PV/T) sistemler, fotovoltaik modüllerden daha fazla enerji almak ve hücre sıcaklığının artmasından kaynaklanan verim kayıplarını azaltmak amacıyla geliştirilmiştir. Güneş pillerinin çalışma ortamı sıcaklığındaki her bir derecelik artışta hücre verimliliğinin %0,45 ile %0,6 arasında azaldığı gözlemlenmiştir.[9]

Photovoltaic/Thermal (PV/T) kolektörleri, güneş enerjisinden hem elektrik hem de termal enerji üretebilen hibrit sistemlerdir. Bu kolektörler, fotovoltaik (PV) modüller ile termal (T) kolektörleri birleştirerek güneş enerjisinin daha verimli kullanımını sağlar. PV/T kolektörleri, soğutma yöntemine göre genel olarak iki ana kategoriye

ayrılır: havalı (hava soğutmalı) PV/T kolektörler ve sıvılı (sıvı soğutmalı) PV/T kolektörler.

4.1.2.1 Havalı (Hava Soğutmalı) PV/T Kolektörler

Havalı PV/T kolektörler, fotovoltaik modüllerden ısının hava aracılığıyla uzaklaştırıldığı sistemlerdir. Bu kolektörlerin temel özellikleri ve avantajları aşağıda belirtilmiştir:

Basit Tasarım ve Kurulum: Hava soğutmalı PV/T kolektörler, genellikle sıvı soğutmalı kolektörlere göre daha basit bir tasarıma sahiptir. Bu durum, kurulum ve bakım süreçlerini kolaylaştırır ve daha az karmaşık hale getirir. Hava soğutmalı kolektörlerin komponentleri genellikle daha az sayıda ve daha basittir.

Düşük Maliyetler: Hava soğutmalı sistemlerde pompalar, borular veya sıvı dolaşım elemanları gerekmediğinden, maliyetler genellikle daha düşüktür. Bu da başlangıç yatırım maliyetlerini ve operasyonel maliyetleri azaltır.

Çevresel Etki: Hava soğutması, sıvı soğutmalı sistemlerde olabilecek sızıntı veya çevresel kirlilik riskini ortadan kaldırır. Ayrıca, hava soğutmalı sistemler su kaynağı gerektirmez, bu da su tüketimini azaltır ve çevresel sürdürülebilirliği artırır.

4.1.2.2 Sıvılı (Sıvı Soğutmalı) PV/T Kolektörler

Sıvılı PV/T kolektörler, ısının fotovoltaik modüllerden sıvı aracılığıyla uzaklaştırıldığı sistemlerdir. Bu kolektörler, ısının daha etkili bir şekilde yönetilmesini sağlar ve genellikle daha yüksek verimlilik sunar. Sıvılı PV/T kolektörler kendi içinde iki ana alt kategoriye ayrılır: faz değiştiren malzeme (FDM) temelli PV/T kolektörler ve ısı borusu temelli PV/T kolektörlerdir.

4.1.2.3 Faz Değiştiren Malzeme (FDM) PV/T Kolektörler

Yüksek Isı Depolama Kapasitesi: Faz değiştiren malzemeler (FDM), belirli bir sıcaklıkta faz değiştirerek büyük miktarda ısıyı küçük hacimlerde depolayabilir. Bu özellik, kolektörlerin termal verimliliğini artırır ve sıcaklık dalgalanmalarını minimize eder. FDM'ler, enerjiyi gizil ısı şeklinde depolayarak daha sabit bir ısı transferi sağlar. Gelişmiş Isı Yönetimi: FDM kolektörler, sıcaklık kontrolünü hassas bir şekilde yaparak daha kararlı bir çalışma sağlar. Bu, PV modüllerin performansını optimize eder ve termal stresin azalmasına yardımcı olur. Ayrıca, enerji depolama kapasitesi artırılarak ısı enerjisinin günün farklı saatlerinde kullanılmasına olanak tanır.

4.1.2.4 Isı Borulu PV/T Kolektörler

Isı borusu temelli PV/T (Photovoltaic/Thermal) kolektörler, ısıyı yüksek verimlilikle taşıyan ve yayan özel borular kullanarak güneş enerjisinin daha etkili bir şekilde kullanılmasını sağlayan yenilikçi sistemlerdir. Bu kolektörler hem elektrik hem de termal enerji üretiminde üstün performans sunarak enerji verimliliğini artırır ve çevresel etkileri azaltır.

Isı borusu temelli PV/T kolektörlerin en önemli özelliklerinden biri, ısıyı yüksek verimlilikle taşıma kapasiteleridir. Isı boruları, içlerinde bulunan çalışma sıvısının buharlaşma ve yoğunlaşma döngüleri sayesinde ısıyı hızlı ve etkili bir şekilde taşır. Bu süreç şu şekilde işler:

Isı Toplama: Fotovoltaik modüller güneş ışığını emer ve elektrik üretirken, aynı zamanda önemli miktarda ısı açığa çıkar. Bu ısı, ısı borusunun buharlaşma bölümünde toplanır.

Buharlaşma: Isı borusunun içinde bulunan çalışma sıvısı, toplanan ısı ile buharlaşır ve buhar haline gelir. Buharlaşma süreci sırasında, sıvıdan buhara dönüşüm gizil ısıyı absorbe eder, bu da ısının hızlı bir şekilde taşınmasını sağlar.

Isı Taşınması: Buhar haline gelen çalışma sıvısı, ısı borusunun yoğunlaşma bölümüne doğru hareket eder. Bu hareket, ısı borusunun içerisindeki basınç farkı ve kapılar hareketler ile gerçekleşir.

Yoğunlaşma: Isı borusunun yoğunlaşma bölümünde, buhar tekrar sıvı haline dönüşür ve yoğunlaşırken gizil ısıyı serbest bırakır. Serbest bırakılan bu ısı, termal enerji olarak kullanılmak üzere sistemin dışına aktarılır.

Bu döngü, ısının bir noktadan başka bir noktaya hızla taşınmasını sağlar. Isı boruları, bu verimli ısı transfer süreci sayesinde sıcaklık farklarını dengeleyerek daha homojen bir ısı dağılımı sağlar. Bu da PV/T kolektörlerin termal verimliliğini artırır ve sistemin genel performansını optimize eder.

Isı borusu temelli PV/T kolektörler, dayanıklı malzemelerden üretilmiş ısı boruları kullanılarak uzun ömür ve dayanıklılık sağlar. Isı borularının iç yapısında kullanılan malzemeler ve teknikler, korozyona ve aşınmaya karşı yüksek direnç gösterir.

Malzeme Seçimi: Isı boruları genellikle bakır, alüminyum veya paslanmaz çelik gibi yüksek iletkenliğe ve dayanıklılığa sahip malzemelerden üretilir. Bu malzemeler, ısının etkin bir şekilde taşınmasını sağlarken, çevresel etkilere karşı da direnç gösterir.

Kaplama ve İzolasyon: Isı borularının dış yüzeyleri, korozyona karşı koruyucu kaplamalar ile kaplanabilir. Ayrıca, boruların izolasyonu da optimize edilerek ısı kaybı minimize edilir ve sistemin verimliliği artırılır.

Teknik Tasarım: Isı borularının iç yapısında kullanılan özel teknikler, sıvının hızlı bir şekilde buharlaşmasını ve yoğunlaşmasını sağlayarak döngünün etkinliğini artırır. Kapılar hareketler ve buhar basıncı gibi mekanizmalar, ısının hızla taşınmasını ve yayılmasını sağlar.

Dayanıklılık Testleri: Isı boruları, üretim aşamasında çeşitli dayanıklılık testlerine tabi tutulur. Bu testler, boruların uzun süreli kullanıma uygunluğunu ve performansını garanti altına alır.

Bu özellikler, ısı borularının uzun ömürlü ve dayanıklı olmasını sağlar. Isı borusu temelli PV/T kolektörler, bu dayanıklılık sayesinde uzun yıllar boyunca performanslarını koruyabilir ve enerji verimliliğini yüksek seviyelerde tutabilir.

4.2 TERMAL ENERJİ DEPOLAMA SİSTEMİ

Termal enerji depolama (TED) sistemini içeren güneş enerjili kurutucular, güneşin en yoğun olduğu saatlerde ısı enerjisini emerek depolamakta ve bunu düşük güneş ışınım saatlerinde veya yeterli enerjinin bulunmadığı zamanlarda kullanarak ürünlerin kurutulması için uygun bir alternatif sunabilmektedirler. Enerji çıktısını artırarak sistemlerin güvenilirliği arttırmaktadır.[10]

Isı enerjisi depolama, güneşten elde edilen enerjinin depolanarak güneş ışığının olmadığı zamanlarda kullanılmasını sağlar. Bu, genellikle termal kütleler veya faz değiştiren malzemeleri (FDM) ile gerçekleştirilir. Isı enerjisi depolama sistemleri, enerjinin kesintisiz ve verimli bir şekilde kullanılmasına yardımcı olur.

Ayrıca gündüz depolanan enerjinin gece kullanılması amacıyla güneş enerjisi sistemlerinde termal enerji depolama yöntemi de sıklıkla kullanılmaktadır. Termal enerji depolama yöntemleri gizli ısı depolama, duyulur ısı depolama ve termokimyasal depolama olarak sınıflandırılabilir. Bu yöntemler arasında en yaygın olanı, maddedeki faz değişiminden yararlanarak yüksek miktarda enerji depolayabilen gizli ısı depolama yöntemidir. Güneş enerjisi yalnızca gündüz saatlerinde kullanılabilirken, bazı ürünler sürekli kurutma işlemi gerektirmekte ve bu durum güneş enerjisi kullanımını sınırlamaktadır. Bu nedenle güneş enerjisinin depolanması ve bu depolanan enerjinin güneş ışınımı olmadığı akşam saatlerinde kullanılması gerekir.

Güneş enerjili kurutucuların performansının artırılması için birleştirilmiş sistemleri, faz değiştiren malzemelerin kullanılması, ısı pompası sisteminin uygulanması ve ısı kapasitesi daha yüksek akışkan kullanılması gibi birçok çalışma yapılmıştır. Bahsedilen yöntemler kullanılarak tüm dünyada 2012-2040 yılları arasında güneş enerjisi üretiminin yıllık yaklaşık %8,9 oranında artacağı öngörülmektedir.[9]

4.2.1 Duyulur Isı Depolama Yöntemi

TED sisteminin genel olarak en yaygın kullanılan ısı depolama yöntemlerinden birisi duyulur ısı metodudur. Duyulur ısı sisteminde malzemelerin katıdan sıvıya dönüşerek enerji biriktirme kabiliyetine sahip oldukları için, ayrıca enerji dağıtımının izotermal davranışı, daha yüksek depolama yoğunluğu ve düşük hacim/kütle oranı gibi önemli avantajlara sahip oldukları kurutma sistemlerinde daha çok ilgi görmüştür. [40]

4.2.2 Gizli Isı Depolama Yöntemi

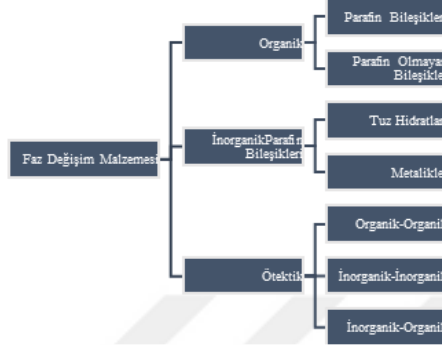
Faz değiştiren malzemeler (FDM), belirli bir sıcaklıkta faz değiştirerek yüksek miktarda ısıyı küçük hacimlerde depolayabilen malzemelerdir. Bu malzemeler, güneş enerjisini termal enerji olarak depolamak ve serbest bırakmak için kullanılır. FDM'ler, ısının bir faz değişimi sırasında gizil ısı olarak depolanmasını sağlar, bu da sıcaklık değişimlerinin minimumda tutulduğu anlamına gelir.

Bu faz değişim süreci, FDM'lerin termal verimliliğini önemli ölçüde artırır. FDM'ler güneş ışığını absorbe ederken katı halden sıvı hale geçer ve bu süreçte büyük miktarda ısı emer. Geceleri veya güneş ışığı azaldığında ise, bu malzemeler sıvı halden katı hale geçerken depoladıkları ısıyı serbest bırakır. Bu özellik, ısı dalgalanmalarını minimize ederek, PV/T kolektörlerinin daha sabit bir ısı transferi ve daha yüksek termal verimlilik sağlamasına olanak tanır.

FDM temelli PV/T kolektörler, sıcaklık kontrolünü hassas bir şekilde yaparak daha kararlı bir çalışma sağlar. Bu kolektörler, fotovoltaik modüller üzerindeki termal stresi azaltarak, PV modüllerinin performansını optimize eder. PV modüller, yüksek sıcaklıklarda verimliliklerini kaybedebilir; bu nedenle FDM'ler, sıcaklığın kontrol altında tutulmasına yardımcı olarak PV modüllerinin optimum verimde çalışmasını sağlar. Bu hem elektrik üretimini artırır hem de modüllerin ömrünü uzatır.

Enerji depolama kapasitesinin artması, PV/T sisteminin esnekliğini ve verimliliğini artırır. Faz değiştiren malzemeler, güneş ışığının yoğun olduğu zamanlarda fazla enerjiyi depolayarak, bu enerjinin günün farklı saatlerinde kullanılmasına olanak tanır.

Bu, özellikle güneş enerjisinin sınırlı olduğu veya enerji talebinin yüksek olduğu dönemlerde büyük bir avantaj sağlar. FDM'lerin sıcaklık kontrolü ve enerji depolama yetenekleri, PV/T kolektörlerinin genel performansını ve verimliliğini artırır [40]. Şelik 4.6'da faz değıştiren malzemelerin çeşitleri gösterilmektedir.



Şekil 4. 6. Faz değıştiren materyallerin sınıflandırılması [31].

Faz değıştiren materyalleri, belirli bir erime ve donma noktasına sahiptir ve bu sıcaklıklarda faz değışimini sırasında ısı alışverişi yaparlar. Bu işlem esnasında, malzeme katı fazdan sıvı faza geçerken enerji emer (absorbe eder) ve bu enerjiyi depolamaktadır. Ters durumda, yani sıvı fazdan katı faza geçerken ise depoladığı enerjiyi ortama ısı olarak verir. Bu özellik, FDM'leri güneş enerjisi gibi dönemsel enerji kaynaklarının verimli kullanımı için ideal kılmaktadır. Özellikle fotovoltaik termal (PV/T) sistemlerde FDM'ler, güneş panelleri tarafından üretilen aşırı ısının depolanması için kullanılır. Böylece, güneş ışığının bulunmadığı zamanlarda bile depolanan enerji kullanılabilir, bu da enerji verimliliğini artırır ve güneş enerjisi sistemlerinin genel performansını iyileştirir [41,23,42].

Bu materyaller, latent ısı depolama özelliği ile bilinir ve sıcaklık kontrollü enerji yönetimi sağlamak için enerjiyi depolar ve serbest bırakır. FDM'lerin enerji depolama kapasitesi, faz değışim sırasında absorbe edilen veya serbest bırakılan latent ısı miktarına bağlıdır.

Enerji depolama malzemelerinin önemi ile ilgili birçok araştırma ve çalışma mevcuttur. Çoğu çalışmalar bu malzemelerin, güneş enerjisiyle kurutma prosesi alanında çok kullanışlı olduğunu ve gizli ısıyı yakalama yeteneğine sahip olduklarını açıklamaktadır. TED sisteminin, ürün kurutma uygulamaları için uygun olan, güneş ışığının olmadığı saatlerde de kurutmaya devam edilmesini destekleyen, ısı kayıplarını azaltarak sistemin kurutma kabiliyetini arttıran, tarımsal ürünlerin kurutulması için enerji depolama ortamı olarak parafin kullanılmaktadır.

Faz değiştiren malzemeleri (FDM'ler), katıdan sıvıya (veya sıvıdan gaza) faz değiştirirken hacimsel genişleme özelliğine sahiptir. faz değişimi sırasında yaklaşık %15'lik bir hacim genişlemesi gösterdiği için FDM olarak kullanılır [43].

FDM'lerin fotovoltaik sistemlerin performansını artırma potansiyeli büyüktür. Isıyı etkili bir şekilde yöneterek ve verimliliği artırarak, FDM'ler daha sürdürülebilir ve verimli güneş enerjisi sistemlerinin geliştirilmesinde önemli bir rol oynayabilir. Özellikle nanomalzemeler ve kanatçıklarla birlikte FDM entegrasyonu, yenilenebilir enerji teknolojilerinde daha fazla araştırma ve uygulama için umut verici bir alan sunmaktadır. FDM'ler, aktif soğutma yöntemlerine ihtiyaç duymadan etkili bir pasif soğutma stratejisi sunarak enerji tüketimini en aza indirir. FDM'lerin PVT sistemlerle entegrasyonunun termal yönetim ve enerji verimliliği açısından sağladığı önemli iyileştirmeleri ortaya koymaktadır [25].

4.2.2.1 Faz Değiştiren Malzemelerin Isı Üretimi ve Yönetimi

Faz Değiştiren Malzemeleri (FDM), belirli bir sıcaklıkta faz değiştirerek (katıdan sıvıya veya sıvıdan katıya) büyük miktarda ısıyı emen veya serbest bırakan maddeler olması, ısı üretimi ve yönetimi konusunda önemli avantajlar sunmaktadırlar. Isı depolama ve serbest bırakma kapasiteleri, sıcaklık dalgalanmalarını dengeleme özellikleri ve enerji verimliliği sağlama potansiyelleri ile FDM'ler, çeşitli uygulamalarda kullanılarak ısı üretimini ve yönetimini optimize eder.

Isı Depolama ve Serbest Bırakma Kapasitesi: FDM'ler, faz değişimi sırasında büyük miktarda ısıyı emerek depolar. Bu ısı, malzemenin erime noktasında emilir ve katı halden sıvı hale geçerken depolanır. Daha sonra, sıcaklık düştüğünde malzeme tekrar katı hale geçer ve depolanan ısı serbest bırakılır.

Bu süreç, özellikle enerji depolama ve geri kazanımı açısından önemlidir. Isı üretimi gerektiren süreçlerde, FDM'ler fazla ısıyı depolayarak ihtiyaç duyulduğunda serbest FDM'ler, sıcaklık dalgalanmalarını dengeleyerek daha bırakabilir.

Sıcaklık Dalgalanmalarını Dengeleme: tutarlı bir ısı üretimi sağlar. Faz değişimi sırasında ısıyı emerek sıcaklık artışlarını dengeleyebilir ve faz değişimi sırasında ısıyı serbest bırakarak sıcaklık düşüşlerini önleyebilirler.

Bu özellik, özellikle sabit ve kontrollü bir sıcaklık gerektiren uygulamalarda faydalıdır.

Pasif ve Aktif Soğutma Kombinasyonu: FDM'lerin pasif soğutma özellikleri, PV/T sistemlerinde aktif soğutma yöntemleriyle birleştirilebilir. Su veya hava dolaşımı ile entegre edilmiş bir sistemde FDM kullanımı, PV hücrelerinin ve kurutma işleminin daha etkili bir şekilde soğutulmasını sağlar. Bu kombinasyon, sistemin genel verimliliğini artırır ve enerji tüketimini azaltır.

Enerji Verimliliği: FDM'ler, enerji verimliliğini artırmak için kullanılır. Isı depolama kapasiteleri sayesinde, fazla ısıyı depolayarak enerji kaybını en aza indirirler. Bu depolanan ısı, enerji üretimi veya ısıtma gerektiren diğer süreçlerde kullanılabilir.

Bu, genel enerji tüketimini azaltır ve enerji verimliliğini artırır.

Geri Dönüşümlü Isı Depolama: FDM'ler, geri dönüşümlü ısı depolama sistemleri olarak kullanılabilir. Bu malzemeler, birçok kez faz değişimi yaşayabilir ve her seferinde ısıyı depolayıp serbest bırakabilir. Bu, FDM'lerin uzun ömürlü ve sürdürülebilir ısı depolama çözümleri sunmasını sağlar.

Uygulama Alanları:

Binalarda Isı Depolama: FDM'ler, binaların ısıtma ve soğutma sistemlerinde kullanılabilir. Güneş enerjisi ile ısıtılan bir binada, FDM'ler gün boyunca güneşten gelen fazla ısıyı depolayabilir ve gece boyunca bu ısıyı serbest bırakarak binanın sıcaklığını dengeleyebilir.

Elektronik Cihazlar: Elektronik cihazlarda, FDM'ler aşırı ısınmayı önlemek ve cihazların verimli çalışmasını sağlamak için kullanılabilir. Bu malzemeler, cihazların çalışma sıcaklıklarını dengeleyerek performanslarını artırır.

Endüstriyel Uygulamalar: Endüstriyel ısıtma ve soğutma süreçlerinde, FDM'ler enerji verimliliğini artırmak ve ısı yönetimini optimize etmek için kullanılabilir [20].

BÖLÜM 5

MATERYAL VE METOT

5.1. FOTOVOLTAİK/TERMAL (PV/T) DESTEKLI, HAVA KOLEKTÖRLÜ KURUTMA SİSTEMİ

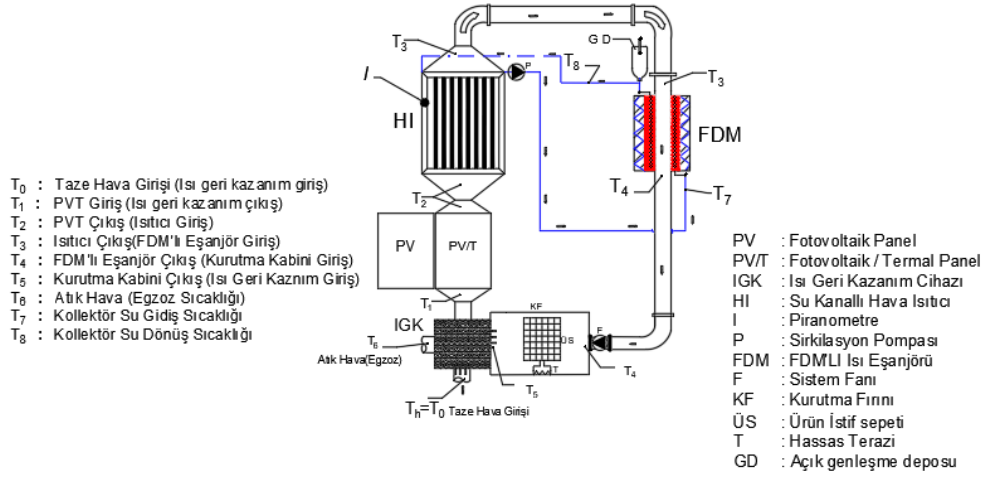
PV/T (Fotovoltaik/Termal) Isı Depolamalı Kurutma Sistemi, güneş enerjisi teknolojileri arasında yer alan yenilikçi ve bütünleşmiş bir sistemdir. Bu sistem, güneş ışığını hem elektrik enerjisi üretmek için (fotovoltaik) hem de ısı enerjisi sağlamak amacıyla (termal) kullanır. Bu iki işlevi bir arada gerçekleştirerek, güneş enerjisinden maksimum faydayı sağlar ve enerji verimliliğini artırır.

Bu çalışmada, Karabük Üniversitesi Teknoloji Fakültesi laboratuvarında gerçekleştirilen yüksek lisans tezi kapsamında tasarlanan Güneş enerjili Fotovoltaik/Termal (PV/T), Hava-su ısıtılmalı güneş kolektörü ve ısı depolamalı faz değiştiren materyali (FDM) parafin ile desteklenmiş kurutma sistemi tasarlanarak imal edilmiştir. Tasarlanan bu entegre kurutma sistemi deneysel olarak aromatik bitkilerden nane ürününün kurutulmasında kullanılmıştır şekil 5.1. Bu sistemde, fotovoltaik paneller tarafından absorbe edilen güneş ışığı iki biçimde değerlendirilir; bir yandan yarı iletkenlerdeki foton-elektron etkileşimiyle elektrik enerjisi üretilirken, diğer yandan aynı panellerin arkasına takılan soğutucu sistemlerin termal absorbe kapasitesi sayesinde ısı enerjisi elde edilir. Bu ısının bir kısmı, hava akışı yoluyla hava ısıtıcıya aktarılır ve su kanallarında dolaşan su, enerji transferi sürecini daha da verimli kılarak, kurutma fırınına yönlendirilen hava akışının sıcaklığını artırır. Hava akışını yönlendiren ve modüle eden bir fan sistemi, ısı enerjisinin kurutma odasındaki tarımsal ürünlere homojen bir dağılımını sağlar.

Fırına giren ısınmış hava, kurutulacak ürünün üzerinden geçerken nem transferini tetikler ve buharlaşma yoluyla suyun üründen ayrıştırılmasını sağlar. Nem seviyesinin kontrol altında tutulması ve kurutma sürecinin hassasiyetle yönetilmesi, hassas terazi gibi algılayıcı bileşenlerle sağlanır. Böylece optimal kurutma koşulları sürekli olarak korunur. Atık hava olarak sistemin dışına çıkan nemli hava ısısını, fırının çıkışında yer alan, ters akışlı ısı geri kazanım cihazı ile taze havaya aktarılır. Özgün tasarlanmış cihaz atık hava ile taze havayı birbirine karışmadan ısı transferi gerçekleşmesini sağlamaktadır.

FDM içeren ısı eşanjörü, sistemin termal regülasyonunda önemli bir role sahiptir. Faz değiştiren malzemesi, yüksek enerji depolama kapasitesi sayesinde, ısı enerjisini gizli ısı formunda depolar ve gereksinim halinde bu enerjiyi serbest bırakır. Bu özellik, güneş ışığının mevcut olmadığı durumlarda bile, sürekli bir kurutma işlemi sağlayarak sistemin verimliliğini artırır. Böyle bir sistem, kurutma işleminin termodinamik verimliliğini maksimize eder ve fotovoltaik hücrelerin performansını artırırken, kurutma sürecinde kullanılan enerjinin kaynaklarının yenilenebilir olmasını sağlar.

Karabük ilinin coğrafi konumundan kaynaklanan güneşlenme özellikleri ve iklim verileri dikkate alındığında, kolektör eğimi olarak 40 derecenin optimal bir açı olduğu ön görülmüştür. Tasarlanan sistemde de kolektör eğim açısı 40 derece şeklinde ayarlanarak deneye hazır hale getirilmiştir şekil 5.2.



Şekil 5.1. Kurutma sistemin şematik diyagramı.



Şekil 5.2. Tasarlanan ve İmal edilen Sistemin Genel Görünümü.

5.1.1 Hava Soğutmalı (PV/T) Güneş Kolektörü

Sistemde kullanılan hava soğutmalı (PV/T) Güneş Kolektörü, güneş enerjisini hem ısı hem de elektrik enerjisi olarak kullanmaya olanak tanıyan elemandır. Fotovoltaik-Termal güneş kolektörü 20 W fotovoltaik (PV) panelin arkasına, metal soğutucu özel kanatlar monte edilerek elde edilmiştir. Kanatlar, panellerin üzerindeki ısıyı havaya transfer ederek panel sıcaklığının yükselmesini önleyerek elektriksel verimi artırırken, aynı zamanda havaya aktarılan bu ısıyı başka yerlerde kullanıma sunar. Fotovoltaik panellerde (PV) referans sıcaklığının üstüne çıkılması bu panellerde elektriksel verimi düşürmektedir. Fotovoltaik / termal panel uygulamaları, (PV/T) güneş enerjisinden en üst düzeyde elektrik ve ısı üretimini bir arada sunan uygulamalardır.

Kurutma sisteminde, kullanılan 20 watt'lık standart polikristal yapıdaki fotovoltaik panel, PV/T (Fotovoltaik Termal) kolektöre dönüştürülmüştür. Bu dönüşüm için panelin arkasına 0.35 mm kalınlığında, 40 mm yüksekliğinde ve 360 mm uzunluğunda alüminyum saclardan yapılmış kanatçıklar eklenmiştir. Bu kanatçıklar, ısıyı daha iyi aktarabilmek için termal macun kullanılarak yerleştirilmiştir. Böylece panel, hem ısıyı verimli bir şekilde kullanabilen hem de elektrik üretebilen bir termal kolektöre çevrilmiştir. Sistemde dış ortamdan alınan taze hava, ısı geri kazanımından geçerek hazırlanan fotovoltaik/termal (PV/T) panelde ön ısıtma işleminden geçirilerek ısıtılır. Sistemde PV/T olarak kullanılan fotovoltaik panelin özellikleri çizelge 5.1 de hazırlanan PV/T ve hava ısıtıcı panel şekil 5.3. de görülmektedir.

Çizelge 5.1. Sistemde Kullanılan PV Panllerin Özellikleri

| | |
|-------------------------------------|----------------|
| Maksimum Güç (Pmax) | 20 Watt |
| Açık Devre Gerilimi (Voc) | 22,10 V |
| Kısa Devre Akımı (Isc) | 1,35 Amper |
| Maksimum Güç Voltajı (Vmp) | 18 Volt |
| Maksimum Güç Akımı (Imp) | 1,11 Amper |
| Modül Uygulaması | A sınıfı |
| Boyut (mm) | 360x435x17 |
| Ağırlık (kg) | 2,5 kilogram |
| Maksimum Sistem Gerilimi | 1000 Volt DC |
| Maksimum Seri Sigorta Sınıfı | 10 A |
| Güç Tolerans Aralığı | + 5 % |



Şekil 5.3. Hava soğutmalı (PV/T) ve hava-su ısıtıcı güneş kolektörü

5.1.2. Hava- Su Isıtmalı Güneş Kolektörü

Hava- su ısıtmalı güneş kolektörü çelik malzemeden hava ve su kanallı olarak tasarlanarak imal edilmiştir. Hava – su ısıtıcı 540 x 435 mm boyutlarında olup, entegre su kanalları ve hava kanatçıkları ile donatılmıştır. Hava akışını optimize etmek için 40 x 40 mm (U tipi) ölçülerinde hava kanatçıkları kullanılmıştır. Bu kanatçıkların saç kalınlığı 0,35 mm'dir ve yapısal bütünlüklerini artırmak için ısıtıcı alt yüzeyine elektrik dikiş kaynağı ile monte edilmiştir. Hava – su kolektörün su kanalları, 10 x 12 mm boyutlarındadır şekil 5.4. Güneş ışığını etkin bir şekilde absorbe etmek üzere mat siyah boyanmıştır. Hazırlanan bu hava-su ısıtıcı panel yalıtımlı kasa içerisine yerleştirilerek, ön ısıtmada kullanılan PV/T ile bütünleşik hale getirilmiş ve üzeri 4 mm geçirgen örtü (cam) ile kaplanmıştır. Hava soğutmalı PV/T kolektör'de ön ısıtılan hava, hava-su ısıtıcıdan geçirilerek havanın daha yüksek sıcaklıklara ısınması sağlar. Hava -su kolektörün su dolumu, pompa ve genişleme deposu bağlantıları için 10 mm çapında çelik borular kullanılmıştır. Sistemde hava fanı çalıştığında su pompası paralel olarak devrededir. Pompa, hava-su ve ısıtıcı ile FDM' li ısı eşanjörü arasında dolaşımı sağlayarak ısının (FDM) parafinde depolanmasını ve kurutma havasının sıcaklığını da yükseltilmesini sağlar.

Bu tasarım seçimleri, Kurutma sisteminin termal performansını artırmayı ve, enerji kayıplarını asgariye indirerek sistemin toplam enerji verimliliğini artırmaya yönelik olarak seçilmiştir.



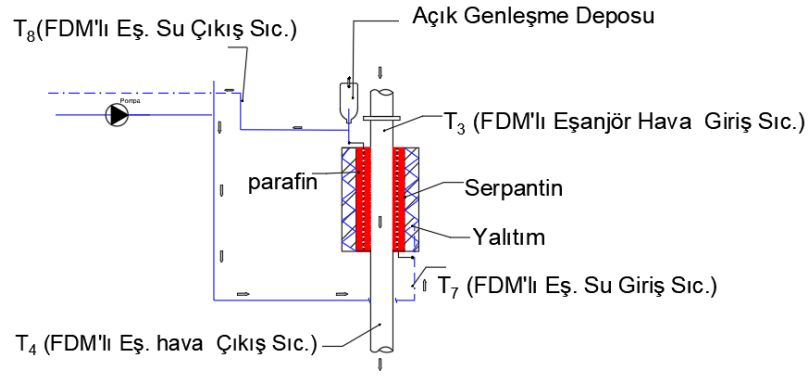
Şekil 5.4. Hava-su ısıtmalı güneş kolektörü imalat resmi

5.1.3 Faz Değiştiren Materyalleri (FDM) ile Zenginleştirilmiş Isı Eşanjörü

Faz değiştiren materyalleri ısıyı depolayabilen ve serbest bırakabilen malzemelerdir. FDM'ler, ısıyı emdiklerinde eriyip sıvı hale geçerler ve bu ısıyı serbest bırakırken tekrar katı hale dönerler. Bu özellikleri sayesinde, kurutma süreçlerinde sıcaklığı dengeleyerek daha kontrollü ve etkili bir kurutma sağlarlar. [8]

(FDM) li sistemlerde hem faz değiştiren malzeme hemde kullanılan ısı eşanjör tipleri termal enerji depolama sistemlerinde kullanılan önemli bileşenlerdir. FDM'li bir ısı eşanjörünün tasarımı, sıcaklık dalgalanmalarını minimize ederken, enerji verimliliğini maksimize etmek için stratejik olarak entegre edilmelidir. Bu entegrasyon, özellikle enerji ihtiyacı ve maliyet tasarrufu dengesini sağlamada kritik bir rol oynar. Tasarlanan kurutma sisteminde kullanılan parafin malzemesi ve su boruları veya hava kanalları, bu FDM'ler ile donatılarak, sistemden elde edilen termal enerjinin daha etkin bir şekilde kullanılmasını sağlar. Bu hedefe yönelik olarak ısının depolanması ve transferinde İç içe geçmeli bakır serpantinli ısı eşanjörü (depolayıcı) kullanılmıştır.

Sistemde kullanılan ısı değiştirici (depolayıcı), iki elik borunun iç içe geçirilmesi ve bu borulardan içteki borunun etrafına sarılmış 8 mm çaplı bakır bir serpantinden oluşmaktadır. Eşanjörde kullanılan dış borunun çapı 80 mm, iç boru 65 mm'dir. Bu iki boru arası ısıtılarak 1 kg sıvı fazında (FDM) parafin ile doldurulmuştur şekil 5.5. Parafin, faz değiştiren malzeme (FDM) olarak kullanıldığında, belirli bir sıcaklığa ulaştığında katı halden sıvı hale geçerek ısı enerjisini depolar. Bakır boruda dolaşan su, yüksek ısı iletkenliğine sahip bakır boru aracılığıyla parafini ısıtır ve bu süreçte parafin eriyerek ısıyı depolar. Su akışı durduğunda veya suyun sıcaklığı düştüğünde, parafin yeniden katılaşarak depoladığı ısıyı serbest bırakır. Bu süreç, termal enerji depolama ve geri kazanımını mümkün kılar. Parafin faz değiştirme işleminde ergime-katılaşma ısısından dolayı büyük miktarda enerji depolama ve bırakma özelliğine sahiptir. Faz değiştiren malzemeler (FDM), gizli ısı olarak depoladıkları enerji sayesinde yüksek enerji yoğunluğu sağlar ve termal yönetim süreçlerini optimize eder



(a)



(b)

Şekil 5.5. FDM'li ısı eşanjörü: a) Eşanjör bağlantı şeması, b) Eşanjör montaj resmi.

Sistemde ısı depolama ortamı olarak kullanılan faz değıştiren malzemesi (parafin mumu) özellikleri çizelge 5.2 verilmiştir [44].

Çizelge 5.2. Sistemde kullanılan parafin mumun (FDM) özellikleri

| Sistemde Kullanılan Parafin özellikleri | |
|---|----------------------------------|
| Erime Sıcaklığı (T_e), ($^{\circ}\text{C}$) | 47 |
| Gizli Isı (L), (J/kg) | 266.000 |
| Isı İletkenliği (k), (W/m K) | 0,24 (Katı ve Sıvı faz) |
| Özgül Isı (c), (J/kg K) (m), | 2950 (Katı faz), 2510 (Sıvı faz) |
| Yoğunluğu (ρ), (kg/m^3) | 818 (Katı faz), 760 (Sıvı faz) |
| Ağırlık (kg) | 1 |

5.1.4 Kurutma Fırını

Kurutma fırınları, enerji verimliliği ve ürün kalitesi üzerinde doğrudan bir etkiye sahiptir. Kurutma fırınının tasarımında; boyutu, yalıtımı, ürün istifi ve hava-ürün temas şekli vb. parametreler dikkate alınmalıdır. Tasarlanan kurutma sisteminin kurutma Fırınının temel bileşenleri arasında, ürünlerin yerleştirildiği bir kurutma odası, nemli havayı ürünler üzerine üfleyen ve buharlaşmayı hızlandıran fan, kanal ve ısı geri kazanım cihazı yer almaktadır.

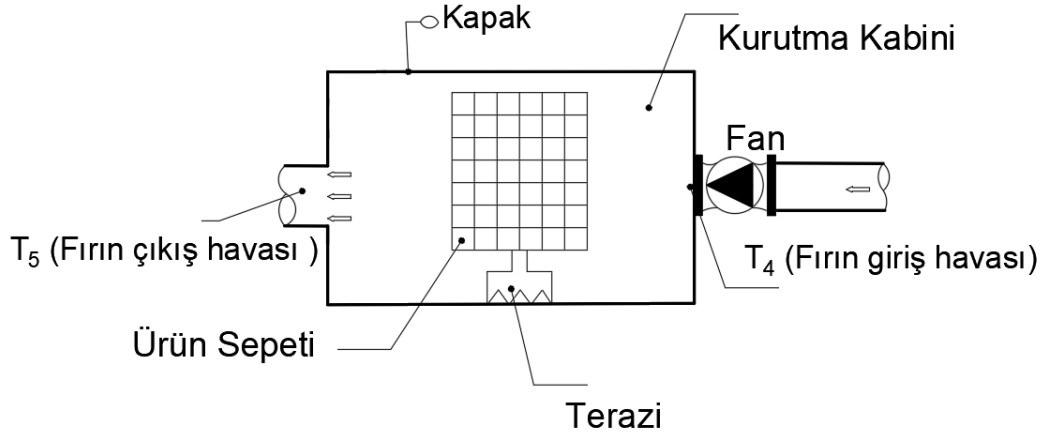
Kurutma fırınında kurutma odası, mobil ve çok amaçlı bir yapıda geliştirilmiştir. Bu ünite, 26×23×60 cm ebatlarında olup, yüksek dayanıklılığa sahip ahşaptan yapılmıştır. Kurutma odasının yalıtımı, ısı kaybını önemli ölçüde azaltan ve enerji verimliliğini destekleyen yüksek yoğunluklu seramik lifler kullanılmış ve üzeri alüminyum folyo ile kaplanarak suya neme karşı korunaklı hale getirilmiştir.

Kurutma sisteminde yer alan ve kurutma odası girişine monte edilmiş olan DC hava fanı, PV/T ve hava-su ısıtıcısında ısınan sıcak havayı emerek kurutma odasına basar. Kurutma odasında uygun itiflnmiş ürün üzerinden sabit hızda (1 m/s) geçen ve nemli sıcak hava kurutma odası çıkışına yerleştirilen ısı geri kazanım cihazından geçerek egzost havası olarak dışarı atılır. Isı geri kazanım cihazı, egzoz havasının ısınısını sisteme dışarıdan alınan taze havaya aktararak enerji verimliliğini artırır.

Ürünlerin kurutma süreci sırasında, ürün israfı en aza indirilmelidir, bu nedenle hassas bir terazi kullanılarak süreç boyunca ağırlık kaybı takip edilir. Bu, özellikle yüksek değerli ürünlerin işlenmesinde maliyet etkinliği sağlar.

Kurutma sürecinin verimliliği, hava sıcaklığı, hava hızı ve havadaki nem oranı gibi faktörlere bağlıdır. Yüksek sıcaklıklar suyun buharlaşma hızını artırırken, fazla yüksek sıcaklıklar ürünlerin dış yüzeylerinin çok hızlı kurumasına ve iç kısımlarının nemli kalmasına neden olabilir. Bu durum, kurutulan ürünün kalitesini düşürebilir. Dolayısıyla, fırın sıcaklığının ve hava akış hızının, kurutulan ürünün türüne ve su içeriğine göre dikkatlice ayarlanması gerekmektedir.

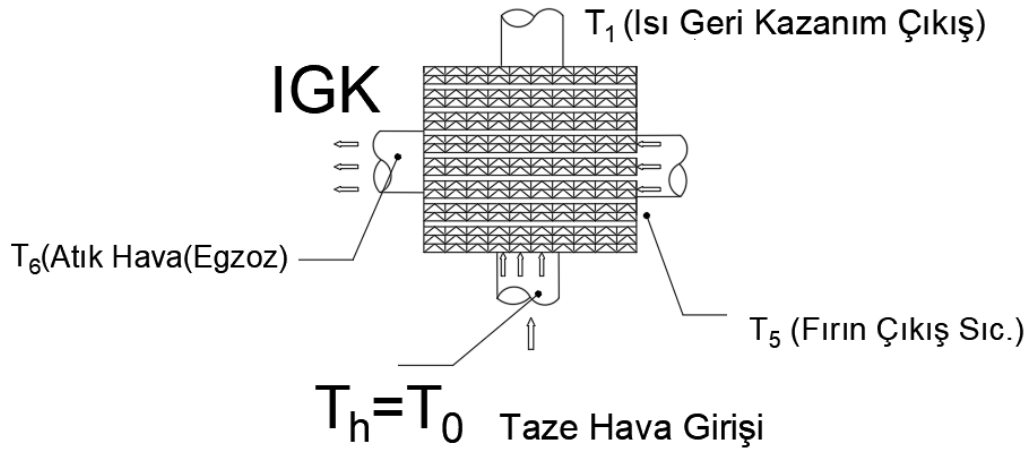
Şekil 5.6, nemli hava girişi olan ve hassas terazi ile ürün istif sepetinin bulunduğu bir kurutma fırını göstermektedir. Kurutulacak ürünler, düzenli bir şekilde istif sepetine yerleştirilir. Hava, kurutma kabini içindeki ürünler üzerinde dolaşır ve nemi alarak buharlaşmasını sağlar. Fırın içinde, hassas terazi ile ürünlerin ağırlık kaybı sürekli olarak ölçülür. Bu, kurutma sürecinin ne kadar ilerlediğini ve ne zaman tamamlandığını belirlemek için kritik öneme sahiptir. Kurutma işleminden sonra nem yüklü hava, ısı geri kazanım cihazından geçerek sistemden atık hava olarak dışarıya verilir. Isı geri kazanım cihazı, atık havadaki ısının geri kazanılmasını ve enerji verimliliğinin artırılmasını sağlar.



Şekil 5.6. Sistem kurutma fırını.

5.1.5 Isı Geri Kazanım Cihazı

Isı geri kazanım cihazı; havanın birbirine karışmadığı plakalı ve çapraz geçişli olarak tasarlanmıştır. Tasarım dı boyutu 25x25cm'dir. Isı transfer plakaları olarak 0.40 mm kalınlığında düz galvanizli metal levhaların pres makinesinde hazırlanan kalıp ile zikzak şekline getirilmesi ile oluşturulmuş 24 adet plakadan oluşmaktadır. Cihazın toplam ısı transfer yüzey alanı yaklaşık 1,5 m²'dir şekil 5.7.



(a)



(b)

Şekil 5.7. Isı geri kazanım cihazı a) Cihaz şematığı, b) İmal edilen cihazın şekli.

5.1.6 Sistem Fanı

Sistemdeki hava dolaşımında 3700 litre/dakika kapasiteli bir adet 24 V DC fan kullanılmış ve sisteme monte edilmiştir şekil.5.8. Hava fanı harici DC güç kaynağı ile beslenmiştir. Fan, kurutma odasında ısıtılmış hava akış debisini ve hızını düzenleyerek, kurutma işlemi için gerekli olan ısı transferini optimize eder. Hava fanı, kurutma kabini. Hava-su ısıtıcı, FDM li eşanjör ve ısı geri kazanım cihazı arasında hava kanalı olarak 70 mm çaplı plastik kanallar kullanılmış, kanal üzerleri yalıtılmıştır.

Hava debisini ve hızını kontrol etmek amacı ile fan, invertörde edilerek, 12 V ve 1 A değerlerinde çalıştırılmıştır. bu sayede hava akış hızı, istenen değerde sabit tutulmuştur.



Şekil 5.8. Sistem hava fanı ve fırın-kanal bağlantısı.

5.1.7 Sirkülasyon Pompası

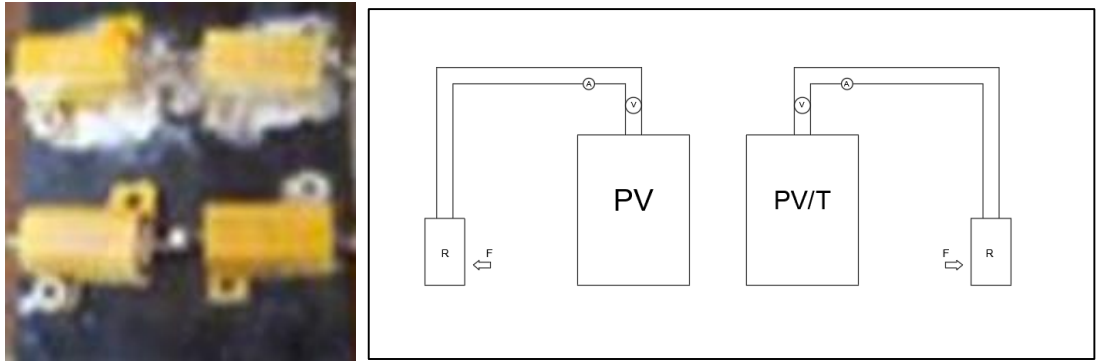
Kurutma sisteminde kullanılan pompa; DC 24V ve 22W gücündedir. Pompa hava-su ısıtıcı kolektör ile FDM li ısı eşanjörü (depolama) arasına bağlanmış olup, bu devrenin üst kısmına bir genişleme kabı konulmuştur şekil 5.9.



Şekil 5.9. Sirkülasyon Pompası.

5.1.8 Direnç Devresi

PV ve PV/T sistemlerinde eşit miktarda yük oluşturmak ve aşırı ısınma nedeniyle oluşabilecek ölçüm hatalarını önlemek için PV ve PV/T çıkışında her biri 14,6-ohm değerinde olan iki adet direnç seri olarak bağlanmıştır. Bu dirençler, hava fanları ile soğutulmuştur şekil 5.10.



Şekil 5.10. Seri bağlı dirençler (14,6ohm).

5.1.9 Nane Bitkisi

Nane, oldukça popüler bir bitkidir ve çeşitli türleri bulunmaktadır. Nananın büyük bir kısmı su olduğundan, nem içeriği oldukça yüksektir. Genellikle bir nane bitkisinin ağırlığının %80-85'i su olarak bulunur. Bu yüksek su içeriği, naneyi hem taze tüketim için hem de su kaybına neden olacak şekilde işlenmiş ürünler için ideal kılar.

Nananın kuru madde oranı, genellikle çeşidine ve yetiştirildiği koşullara bağlı olarak değişiklik gösterir. Ancak, tipik bir nane yaklaşık olarak %15 ila %20 kuru madde içerir. Kuru madde oranı, nanenin su dışında kalan kısmını ifade eder ve esansiyel yağlar, vitaminler, mineraller, lifler ve diğer katı maddeleri kapsar.

Bu oran, nanenin aroması ve su içeriği ile doğrudan ilişkilidir; yüksek kuru madde oranı genellikle daha yoğun bir aroma anlamına gelir. Ayrıca, kuru madde oranı tarım teknikleri, toprak türü, iklim ve sulama gibi faktörlerden de etkilenebilir.

Nane gibi bitkilerin güneş enerjisiyle kurutulması sırasında nem içeriği konusunda dikkat edilmesi gereken önemli noktalar vardır:

Kurutma Hızı: Nane kurutma süreci, suyun hızlı bir şekilde buharlaşmasını sağlamak için dengeli bir şekilde yapılmalıdır. Çok hızlı kurutma, bitkinin dış kısmında kabuklaşmaya ve iç kısmında nemin hapsolmesine neden olabilir.

Hava Akışı: Kurutma sırasında etkin bir hava akışı sağlanmalıdır. Bu, nemin bitki yüzeyinden eşit olarak buharlaşmasını ve küf oluşumunu önlemek için gereklidir.

Güneşe Maruz Kalma: Güneşin doğrudan maruziyeti önemlidir, ancak bitkileri çok sıcak saatlerde direkt güneş ışığına maruz bırakmak, besin değerlerinin kaybına ve renk değişimlerine yol açabilir. Güneşin yoğun olduğu saatlerde gölgelik kullanılabilir.

Nem Ölçümü: Kurutma işlemi sırasında nanein nem seviyesinin düzenli olarak kontrol edilmesi gerekir. Bu, istenen nem seviyesine ulaşıldığında kurutmanın durdurulmasını sağlar.

Sıcaklık Kontrolü: Bitkinin zarar görmemesi ve eşit şekilde kuruması için sıcaklığın kontrol altında tutulması önemlidir. Genellikle güneş kurutmalı sistemlerde 40-50°C arası sıcaklıklar uygundur.

Bu faktörler göz önünde bulundurulduğunda, nane kurutma işlemi daha verimli ve kaliteli bir şekilde gerçekleştirilebilir.

5.1.10 Kurutma Süreci

Gıdalarda toplam kuru madde miktarının belirlenmesi, gıdanın bileşimi, besin değeri ve kalitesi hakkında kapsamlı bilgi edinmemizi sağlar. Bu amaçla yapılan deneylere başlamadan önce, nanedeki kuru ve yaş madde miktarını belirlemek için doğrudan kurutma yöntemi uygulanmıştır. Ardından, kapalı çevrimli kurutma deneylerine geçilmiştir. Kapalı çevrim deneyleri, Karabük ili iklim şartlarında, sabit 1 m/s hava hızında, değişken ışınım değerlerinde, 25-29 Haziran 2024 tarihleri arasında gerçekleştirilmiştir.

Deneylerde, her gün için ayrı ayrı 80 gramlık nane bitkisi yaprakları, saplarından arındırılmış şekilde kullanılmıştır. Nane yaprakları, kurutma kabini içerisinde hassas terazi üzerine yerleştirilmiştir. Kurutma süresi boyunca her yarım saatte bir sıcaklık, ışınım, ağırlık değerleri ölçülerek kaydedilmiştir.

Bu deneyler sonucunda, nane yapraklarının kuru madde miktarı belirlenmiş ve kurutma performansı değerlendirilmiştir. Elde edilen veriler, nane kurutma süreçlerinin optimizasyonu ve verimliliğin artırılması için değerli bilgiler sunmuştur. Gıda kurutma teknolojilerinin geliştirilmesi ve daha etkin kurutma yöntemlerinin belirlenmesi açısından bu tür sonuçlar oldukça önemlidir. Bu bulgular, özellikle kişiselleştirilmiş hizmetler ve ürün kalitesi açısından önemli iyileştirmeler yapma potansiyeline sahiptir.

Deneyde kullanılan ölçüm cihazların özellikleri çizelge 5.3'te gösterilmiştir.

Çizelge 5.3. Kurutma Sisteminde Kullanılan Ekipman ve Özellikleri.

| Özellikler | 4 Kanal K Termokupl | PICO TECHNOLOGY | K-Tipi Termokupl Termometre | CEM Işınım Ölçer | Testo 435 Anemometre | Mastech MY-68 Multimetre | Bilge Blower |
|------------------|-------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|--------------------------|--|--------------|
| Model | 88598 | TC-08 | DT-3891G | DT-1307 | 435 | MY-68 | TMC-0370206 |
| Sıcaklık Aralığı | 200~1370°C (-328~2498°F) | (-270°C ~+1820°C) | K-Tipi Termokupl | - | -20~70°C | - | - |
| Çözünürlük | 0.1°C, 0.1°F | ±0.2% and ±0.5% C ±0.2% and ±10 µV | 0.1°C, 0.1°F | 1 W/m ² | 0.01 m/s, 0.1°C | 0.1mV 0.1µA 0.1Ω 400Ω ve üzeri | - |
| Doğruluk | ±(0.3% rdg + 1°C) | - | ±(0.3% rdg + 1°C) | ±10 W/m ² veya ±5% | ±(0.03 m/s + %5), ±0.5°C | - | - |
| Güç Kaynağı | 4 x AA Pil veya 9V DC Adaptör | - | 4 x AA Pil veya 9V DC Adaptör | 9V Pil | 9V Pil veya Adaptör | 1 adet 9V 6F22 pil | 24V, 2.5A |
| Ağırlık | ~300g | - | ~300g | - | - | 310g | ~1kg |

5.2. SİSTEM PERFORMANS ANALİZİ

Bu çalışmada kurutma sisteminde ısı transferi, enerji tasarrufu, verimlilik ve depolama mekanizmaları ile maksimize edilmiş güneş enerjili bir PV/T sisteminin parçası olarak modellenmiştir. Sistemin enerji ve kütle transferi dinamikleri, nane kurutma prosesinin entalpi değişimlerini ve nem azaltım hızını etkileyen kritik parametrelerdir.

Su aktivitesi, kurutma süreci boyunca nane örneklerinin kalite kontrol parametresi olarak düzenli aralıklarla ölçülmüştür. Fotovoltaik/Termal (PV/T) sistemlerin ısı dengeleri ve kurutma performansının verimlilik hesaplamaları için çeşitli termodinamik prensipler ve enerji bilançosu denklemleri kullanılır.

Kurutulacak ürünlerdeki su miktarının kuru esasa göre belirlenmesi için aşağıdaki denklem kullanılmıştır:

$$MC_{KA} = \frac{M_i - M_S}{M_S} \quad (5.1)$$

Kurutulan ürünlerdeki yağ esasa göre hesaplanan su oranı aşağıdaki formülle belirlenir:

$$MC_{YA} = \frac{M_i - M_S}{M_i} \quad (5.2)$$

Bu formüllerde, M_i kurutma öncesi ürünün ilk ağırlığını, M_S ise kurutma sonrası ürünün son ağırlığını ifade etmektedir. Bu hesaplama, kurutma sürecinin başlangıcında ve sonunda ürünlerdeki su miktarının belirlenmesine olanak tanır.

Kuru madde miktarının tayini, etüv fırınında kurutma yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Bu yöntem, ürünün tamamen kurutulmasını ve sabit bir ağırlığa ulaşmasını sağlar. Hesaplama için eşitlik (5.3) kullanılmıştır:

$$\% \text{kuru madde} = \frac{M_s}{M_t} \times 100 \quad \text{formülü kullanılır.} \quad (5.3)$$

Bu formül, üründeki kuru madde miktarının yüzdesel olarak belirlenmesini sağlar.

Kurutulan ürünlerdeki nem oranının değişimi, kurutma süresince herhangi bir zamanda ürün içerisinde kalan nem miktarının, başlangıçtaki buharlaşabilecek tüm nem miktarına oranı ile belirlenmiş ve Eşitlik (5.4)'te verilmiştir.

$$NO = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e} \quad (5.4)$$

Nane diliminin denge nem içeriği konvektif kurutma sırasında sifıra eşit kabul edilmiştir. Bu varsayım altında denklem şu şekilde basitleştirilmiştir:

$$NO = \frac{M_t}{M_0} \quad (5.5)$$

Katılarda ısı iletimi, malzemenin içindeki atom veya moleküllerin düzenli ve sıkı yapısı nedeniyle çok hızlı gerçekleşir. Isıl enerji, bu atom veya moleküller arasında hızla aktarılır. Bu nedenle, ısı iletiminin ısıl enerjinin depolama hızına oranı çok küçüktür ve ihmal edilebilir. Yani, katılarda ısıl enerji depolanmak yerine hızla iletilir [45]. Denklem son hali Eşitlik (5.5)'teki gibidir. Ürün içerisindeki herhangi bir zamanda buharlaşabilecek nem miktarının, başlangıçtaki buharlaşabilecek nem miktarına oranını ifade eder.

Kurutma sistemlerinin verimliliğinin önemli bir göstergesi olan özgül nem çekme oranı (SMER), kurutma ürünlerinden 1 gram nem uzaklaştırmak için gereken enerji miktarını ifade eder. Bu oran aşağıdaki formül kullanılarak hesaplanmıştır:

$$SMER = \frac{m_{su, \text{çıkarılan}}}{E_{\text{tüketilen}}} = SMER = \frac{m_d}{W_f + W_p} \quad (5.6)$$

m_{su} , çıkarılan ya da m_d : Çıkarılan su miktarı veya saatlik kuruma miktarı(kg).

$E_{\text{tüketilen}}$: Kurutma için harcanan enerji veya fanı ve pompayı çalıştırmak için gerekli olan gücü ifade eder(watt).

Nane Bitkisi su aktivitesinin hesaplanabilmesi için denge bağıl nemi dikkate alınmıştır. Denge bağıl nemi, gıda maddesinin bulunduğu hava ile denge halinde içerdiği nem miktarını ifade eder. Buna göre su aktivitesi şu şekilde hesaplanmıştır:

Nane bitkisi su aktivitesinin hesaplanabilmesi için denge bağıl nemi ile olan ilişki incelenmelidir. İçinde bulunduğu hava ile denge halinde bulunan gıda maddesinin içerdiği nem miktarına denge nemi denir. Denge halindeki gıda maddesini çevreleyen havanın bağıl nemine ise denge bağıl nemi denmektedir [46]. Buna bağlı olarak;

$$a_w = \frac{\text{Denge Bağıl Nemi}}{100} \quad (5.7)$$

Termodinamik verimliliklerin artırılması için öncelikle verimsizliklerin kaynaklarını belirlemek ve bu kaynakları en aza indirgeyecek çözümler geliştirmek esastır. Kapalı sistemlerin analizinde, enerji değişimleri sistem sınırlarında gerçekleşen net ısı ve iş transferlerine bağlı olarak incelenir. Sistem içerisindeki her bir bileşenin enerji giriş ve çıkışları, toplam sistem performansını belirler ve bu nedenle bileşenler arasındaki etkileşimlerin detaylı olarak anlaşılması kritik öneme sahiptir [48].

Entalpi (H), bir sistemin toplam ısı içeriğini temsil eden bir termodinamik büyüklüktür. Sistemlerin faz değişimleri sırasında, entalpi değişiklikleri ve ısı ilişkisi önemlidir[44].

Katı Fazda Entalpi (h_k): Katı fazdaki parafinin entalpisi, erime noktasına kadar olan sıcaklık değişimi boyunca hesaplanır. Eşitlik 5.8'de T_i Başlangıç sıcaklığı T_{er} Erime noktası c_k : Katı fazın özgül ısısıdır.

$$h_k = \int_{T_i}^{T_{er}} c_k dT \quad T_{er} \leq T_i \quad (5.8)$$

Sıvı Fazda Entalpi (h_s): Erime noktasından sonra sıvı fazdaki parafinin entalpisi hesaplanır. Eşitlik 5.9'da T_n Nihai sıcaklık T_{er} Erime noktası c_s Sıvı fazın özgül ısısıdır.

$$h_s = \int_{T_{er}}^{T_n} c_s dT \quad T_n > T_{er} \quad (5.9)$$

Erime noktasına ulaşıldığında, sistemin faz değiştirmesi için gerekli olan gizli ısı alınır. Eşitlik 5.10'da m Kütle (kg) L Gizli ısıdır (kJ/kg) [44].

$$L = \Delta h = m \cdot L \quad (5.10)$$

Sistemin toplam entalpisi, katı faz entalpisi, gizli ısı ve sıvı faz entalpisinin toplamıdır.

$$H_{toplam} = h_k + L_{Gizli} + h_s \quad (5.11)$$

Faz değişimi ve sıcaklık artışları sırasında alınan toplam ısı, entalpi değişimlerinin bir toplamıdır. Toplam ısı miktarı depolanan ısı olarak da ifade edilebilir. Depolanan ısı, sistemin termal enerji değişimini temsil eder ve bu enerji hem sıcaklık değişimleri hem de faz geçişleri sırasında sistem tarafından alınır veya verilir [43].

Isı geri kazanım cihazından kazanılan enerji miktarı hesabında;

$$Q_{igk} = m C_h(T_1 - T_0) \quad (5.12)$$

Eşitliği kullanılmıştır, T_0 taze hava giriş sıcaklığını, [46].

PV/T panelinden kazanılan ısı enerji miktarını hesaplamak için Eşitlik 5.13 kullanılmıştır. T_1 PV/T hava giriş sıcaklığını, T_2 PV/T hava çıkış sıcaklığını ifade eder [46].

$$Q_{pv/t} = m C_h(T_2 - T_1) \quad (5.13)$$

FDM'ler, ısıyı gizli ısı formunda depolar ve gerektiğinde bu enerjiyi serbest bırakarak sürecin istikrarını sağlar. Bu sistemde FDM'li eşanjörde ısı depolaması su ceketli kolektör vasıtası ile sağlanmıştır. Depolanan enerji miktarı eşitlik 5.14 Kullanılarak hesaplanabilir[44]. Eşitlik'te T_3 kolektör hava çıkış sıcaklığını ifade eder.

$$\Delta Q_{depolanan} = \Delta Q_{depo} = Q_{katı} + Q_{Gizli} + Q_{sıvı} \quad (5.14)$$

FDM'lerde katı veya sıvı şeklinde depolanan ısı miktarı Eşitlik (5.15) kullanılarak hesaplanabilir. m_{FDM} : Faz değiştiren malzemesinin kütlesi (kg), C_k Katı fazın özgül ısısı (kJ/kg °C), C_s Sıvı fazın özgül ısısı (kJ/kg °C) ifade etmektedir.

$$Q_{katı,sıvı} = m_{FDM} C_{k,s} (T_{K,Ort} - T_{FDM}) / t \quad (5.15)$$

$T_{K,Ort}$: Kolektör Ortalama Su Sıcaklığı ve aşağıda verilen eşitlik(5.16) ile hesaplanabilir

$$T_{K,Ort} = \frac{T_7 + T_8}{2} \quad (5.16)$$

$$Q_{Gizli} = \Delta h = m_{FDM} \cdot L = 266.000 \text{ J/kg}$$

Su ceketli ısıtıcı ürettiği sıcak su ile parafinde enerji depolarken, aynı zaman altında geçen havaya ısı transferi yapmaktadır. Hava ısıtmalı kolektörün ısı kazancı eşitlik (5.17) kullanılarak hesaplanabilir. T_7 kolektör suyu gidiş sıcaklığını ve T_8 kolektör suyu dönüş sıcaklığını ifade eder.

$$Q_{ısıtıcı} = m C_h (T_7 - T_8) \quad (5.17)$$

FDM'li eşanjörden sisteme aktarılan enerji miktarı ise eşitlik (5.18) Kullanılarak hesaplanmıştır[44]. T_3 FDM'li Eşanjörün hava giriş sıcaklığını, T_4 ise FDM'li Eşanjör hava çıkış sıcaklığını ifade eder.

$$Q_{FDM,es} = m C_h (T_4 - T_3) \quad (5.18)$$

Sistemin toplam enerji kazancı eşitlik (5.19) kullanılarak hesaplanmıştır. $C_{güç}$ güç santrali dönüşüm faktörüdür. Ve kaliteli bir kömür baz alındığında 0,35-0,40 arasındadır[44]. Fotovoltaik/termal (PV/T) panelden alınan termal enerjinin, kullanılabilir ısı enerjisine dönüşüm oranını ifade eder.

$$Q_{Toplam} = Q_{IGK} + Q_{pv/t} + Q_K + Q_{FDM,es} + Q_{depolanan} + (E_{net}) / (C_{güç}) \quad (5.19)$$

Isı geri kazanım cihazının ısı transfer alanı sabittir ve ters akışlı logaritmik sıcaklık farkı ile hesaplanır, Eşitlikte; $\Delta Q_{giriş} = T_5 - T_6$ $\Delta Q_{çıkış} = T_1 - T_0$

$$\Delta Q_m = \frac{\Delta Q_{giriş} - \Delta Q_{çıkış}}{\ln\left(\frac{\Delta Q_{giriş}}{\Delta Q_{çıkış}}\right)} \quad (5.20)$$

Güneş panelden alınan elektrik gücü hesaplamak için

$$P_{pv/pvt} = V \cdot I \quad (5.21)$$

Fotovoltaik verimlilik, güneş ışığının elektrik enerjisine dönüştürülme oranını belirler.

$$\eta_{PV} = \frac{P_{çıkış}}{I(t) \times A_{PV}} \quad \eta_{PVT} = \frac{P_{çıkış}}{I(t) \times A_{PV}} \quad (5.22)$$

Eşitliği kullanılmıştır. Burada; I: Güneş ışınımı (W/m²), A, Güneş panelinin alanını (m²) ifade eder.

Havadan havaya ısı geçişli ısı geri kazanım ünitesinin verim hesabı aşağıda verilen eşitliklerde

$$\eta_{lgk} = \frac{\Delta Q_{çıkış}}{\Delta Q_{giriş}} = \frac{T_1 - T_0}{T_5 - T_6} \quad (5.23)$$

Hava- su ısıtmalı verimliliği ve FDM'lı Isı değiştirividen geçen hava üzerindeki ısı transfer verimliliklerini ifade eder [46].

$$\eta_{kollektör} = \frac{Q_K}{I \times A} = \frac{m C_h (T_2 - T_1)}{I \times A}$$

$$\eta_{fdm} = \frac{Q_{ısıtıcı}}{Q_{fdm}} = \frac{m C_h (T_7 - T_8)}{m C_h (T_4 - T_3)} \quad (5.24)$$

PV/T sisteminin kurutma verimliliği ve sistem verimi, denklemler (5.25)ve (5.26) kullanılarak hesaplanabilir. Kurutma verimliliği, kurutma odasına aktarılan enerjinin, güneş ışınımı ve elektrik giriş gücünden elde edilen toplam enerjiye oranıdır. Bu sistemde, W_f fanın gücünü, W_p ise pompanın gücünü ifade eder. A, kolektörün alanını, A_{PV} ise kullanılan panellerin toplam alanını temsil eder [46].

$$\eta_{PV/T} = \frac{Q_{PV/T}}{I \times A_{PV}} \quad (5.25)$$

$$\eta_{genel} = \frac{Q_{toplam}}{I \times A_{topla} + W_f + W_p} \quad (5.26)$$

Toplam sistem verimliliği hem elektrik hem de ısı üretim verimliliklerinin birleşimidir [46]..

$$\eta_{genel} = \eta_m + \eta_{th} \quad (5.27)$$

Toplam ısı transfer katsayısının hesaplanması için sistem içindeki zorlanmış konveksiyon ve dışındaki doğal konveksiyon katsayılarının hesaplanması gerekir:

Sistemin enerji kayıpları toplamı aşağıdaki denklemlerle hesaplanır, denklemde Q_{egzoz} dışarı atılan nemli egzoz havasından kaynaklanan ısı kaybı, $Q_{yüzey}$ ise sistem duvarlarından veya yüzeylerinden dış ortama olan ısı kayıplarını temsil eder.

$$\Sigma Q_K = Q_{egzoz} + Q_{yüzey} \quad (5.28)$$

Nemli egzoz havasından ve sistem duvarlarından olan ısı kayıpları aşağıda verilen (5.29) ve (5.30) eşitlikleri kullanarak hesaplanmıştır [46].

$$Q_{egzoz} = m C_h (T_5 - T_0) \quad (5.29)$$

$$Q_{yüzey} = K.A.(T_5 - T_0) \quad (5.30)$$

$$K = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{L_y}{K_y} + \frac{L_y}{K_y} + \frac{1}{h_d}} \quad (5.31)$$

Fırın içerisindeki zorlanmış ısı taşınım katsayısı aşağıdaki denklemlerle hesaplanır:

$$Nu = h_i L / k_h \quad (5.32)$$

$$Nu = 0,023 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \quad (5.33)$$

Doğal ısı taşınım katsayısı hesaplamalarında kullanılan denklemler:

$$Nu = h_d L / k_h \quad (5.34)$$

$$Nu = 0,54 \cdot Ra^{0,25} \quad (5.35)$$

$$Ra = Gr \cdot Pr \quad (5.36)$$

$$Gr = \frac{g \cdot \beta \cdot (L_y - L_\infty) \cdot L^3}{\nu^2}$$
 eşitlikleri kullanılmıştır.

Isı geri kazanım ünitesinin toplam ısı transfer katsayısı:

$$Q_{igk} = m_1 \cdot C_1 \cdot \Delta T_1 = m_2 \cdot C_2 \cdot \Delta T_2 = A \cdot U \cdot \Delta Q_m \quad U = \frac{Q_{igk}}{A \cdot U \cdot \Delta Q_m} \quad (5.37)$$

Akışkanın değerleri eşit olduğu için $m_1 \cdot C_1 = m_2 \cdot C_2 = C$ ifade edilebilir [46].

BÖLÜM 6

BULGULAR VE DEĞERLENDİRME

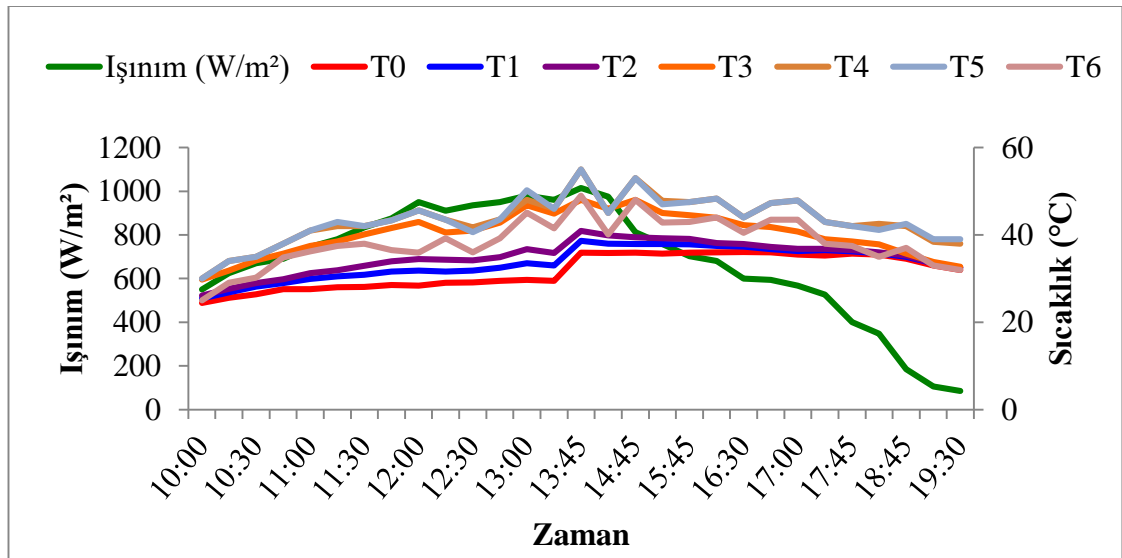
Fotovoltaik/termal (PV/T) panelli, ısı geri kazanımlı, FMD'li ısı depolamalı ve havasız ısıtılmalı hava kolektörlü bir nane kurutma sisteminin performansı, 25 Haziran 2024 ile 29 Haziran 2024 tarihleri arasında gerçekleştirilen beş günlük deneylerle incelenmiştir. Bu çalışma kapsamında, sistemin enerji verimliliği ve toplam ısı kazancı zamana ve ışınım miktarına bağlı olarak değerlendirilmiştir. Deneylerin amacı, nane kurutma sürecinde kullanılan bu sistemin farklı bileşenlerinin enerji dönüşüm süreçlerini ve performansını anlamak, bu bilgileri kullanarak enerji verimliliğini artırmaktır.

Deney süresince, çeşitli hava ve ışınım koşullarında elde edilen veriler analiz edilmiştir. Beş (5) günlük periyotta elde edilen veriler arasında, 25 Haziran günü elde edilen verilerin en stabil ve istikrarlı olduğu gözlemlenmiştir. Bu nedenle, 25 Haziran 2024 tarihine ait veriler, sistem performansının değerlendirilmesi için temel alınmıştır. Bu veriler, sistemin enerji toplama kapasitesi, toplam ısı kazancı ve genel verimliliği hakkında önemli bilgiler sunmaktadır.

Sistem performansının değerlendirilmesinde, sabah saatlerinden itibaren artan ışınım miktarının toplam ısı kazancı ve verim üzerindeki etkileri incelenmiştir. Sabah saatlerinde ışınım miktarının artışıyla birlikte, toplam ısı kazancı ve sistem verimliliğinde belirgin bir artış gözlemlenmiştir. Öğlen saatlerinde maksimum seviyelere ulaşan ışınım miktarı ve sıcaklık değerleri, sistemin en yüksek performans gösterdiği zaman dilimini işaret etmektedir. Öğleden sonraki saatlerde ise ışınım miktarının azalmasıyla birlikte, toplam ısı kazancı ve sistem veriminde düşüşler hesaplanmıştır. Sistemin zamana ve ışınımına bağlı sıcaklık değişimlerinin kurutma üzerine etkileri incelendiğinde, sistemin performansı hakkında önemli bilgiler elde edilmiştir.

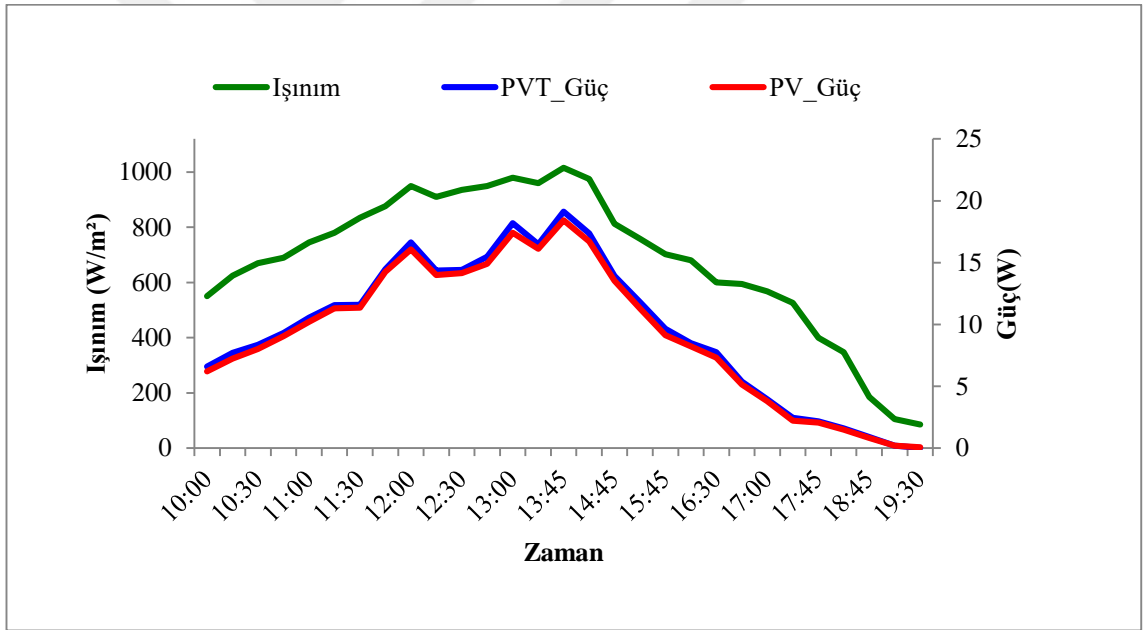
Şekil 6.1’de 25 Haziran 2024 günü gerçekleştirilen deneyden elde edilen zamana ve ışınının değerlerine bağlı sistem ünütelerinde gerçekleşen sıcaklık değerlerinin değişimleri görülmektedir.

Şekilde deney verileri incelendiğinde; sabah saatlerinde (saat 10:00) taze hava giriş sıcaklığı (T0) 24,4°C öğlen (Saat 13:45) 38,65°C ve akşam (saat 19:30) 32,0°C'olarak ölçülmüştür. Isı geri kazanım çıkış sıcaklığı (T1), ışınımına bağlı olarak sabah saat 10:00 25,45°C, öğlenden sonra (saat 13:45) 38,65°C ve öğlenden sonra 32,50°C' olarak ölçülmüştür. Isı geri kazanım cihazının çıkışı aynı zamanda PV/T panelin giriş sıcaklığıdır. PV/T'nin giriş sıcaklığı (T2) sabah 26,10°C, Öğlenden sonra saat 13:45 40,88 °C ve öğlenden sonra 32,51°C'dir. PV/T'nin çıkış sıcaklığı hava-su Isıtıcı giriş sıcaklığıdır. Hava-su çıkış sıcaklığıda (T3) sabah (saat 10:00) 29,75°C'dir. Öğlenden sonra saat 13:45 48,00°C'den ve akşam (saat 19:30) 32,70°C'ye düşmüştür. Hava-su ısıtıcısından çıkan hava FDM'li eşanjöre girer. FDM'li eşanjör hava çıkış sıcaklığı (T4), sabah saat 10:00 30,00°C, öğlenden sonra (saat 13:45) 53,00°C' ve akşam saat 19:30 ise 38,00°C'dir. Kurutma kabini giriş sıcaklığı (T5) FDM'li eşanjör hava çıkış sıcaklığıdır. Kurutma kabini hava çıkış sıcaklığı, ısı geri kazanım giriş sıcaklığı (T6)'dir. T6 sabah (saat 10:00) 25,00°C, öğlenden sonra saat 13:45 48,00 akşam (saat 19:30) 32,00°C'dir.



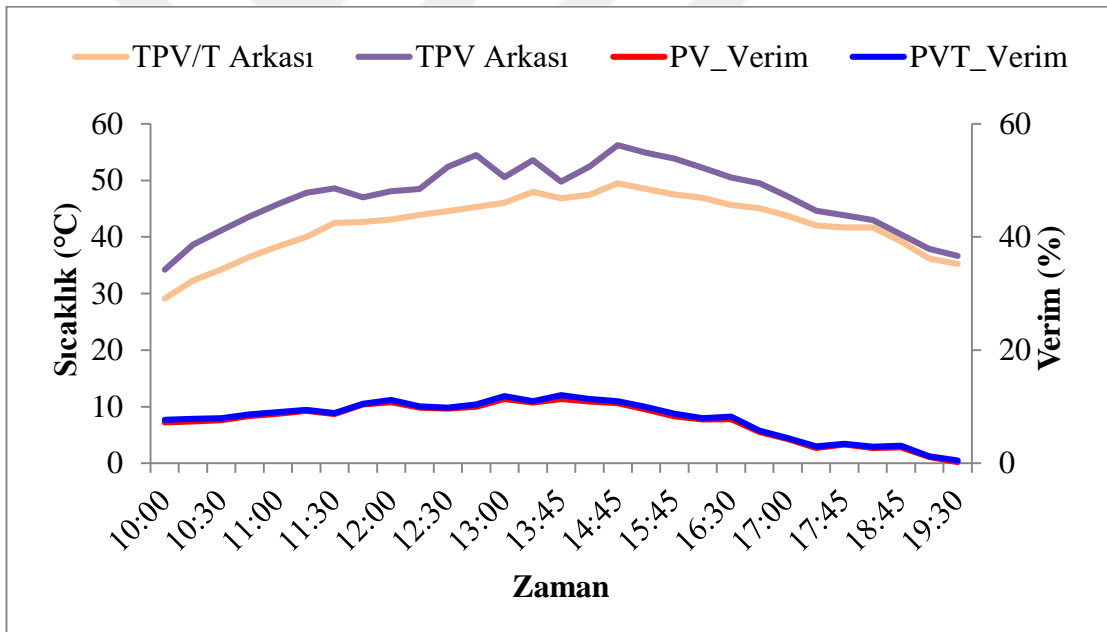
Şekil 6.1. Deney süresince sıcaklıkların ışınım miktarına göre değişimi.

Şekil 6.2’de ışınım değerine göre eşitlik 5. 21’den hesaplanan PV ve PV/T’lerin ışınıma bağlı güç değerlerinin değişimi görülmektedir. Işınım değeri sabah 10:00’den öğlen saat 13:45 kadar yükselmekte ve öğleden sonra akşam 19:30 a kadar düşen bir eğilim göstermektedir. Işınım değeri 10:00’da 550 W/m² iken, en yüksek değeri 13:45’te 1015 W/m² olarak kaydedilmiştir. PV panelin elektriksel gücü, ışınım miktarıyla birlikte artış göstermekte olup, 10:00’da 6,208 W ile başlayıp, 13:45’te maksimum değer olan 18,416 W’ a ulaşmaktadır. Gün içerisinde genel olarak ışınımın en yüksek olduğu saatlerde PV gücünün de en yüksek değerlere ulaştığı gözlemlenmiştir. PV/T gücü de benzer bir eğilim göstererek, ışınım miktarına paralel olarak artış göstermektedir. PV/T gücü, 10:00’da 6,598 W iken, 13:45’te maksimum değeri olan 19.12 W’ a ulaşmıştır. PV/T’ nin soğuma etkisinden dolayı PV’ yegöre daha yüksek elektriksel güç ürettiği görülmektedir.



Şekil 6.2. PV ve PV/T’lerin güç değerlerinin ışınıma göre değişimi.

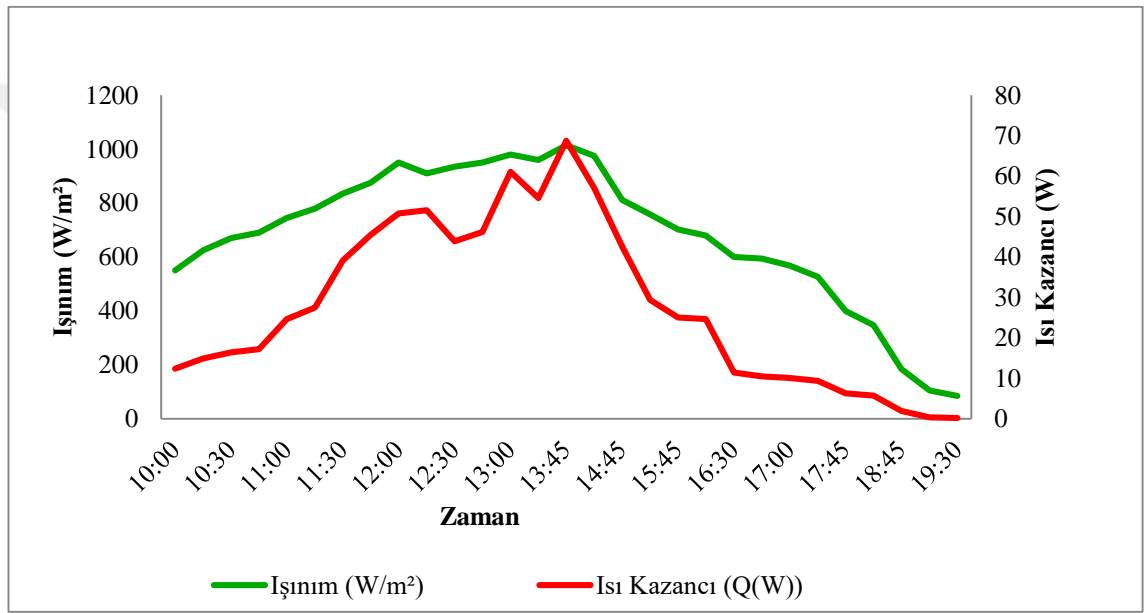
Şekil 6.3'te PV ve PV/T panellerden elde edilen verimlerin ışınımına göre değişimleri görülmektedir. Şekil incelendiğinde zamana bağlı olarak dış ortam sıcaklığı ve her iki panelinde (PV, PV/T) ortalama arka yüzey sıcaklıkları paralel olarak sabah saatlerinden itibaren artmakta ve maksimum değerlere saat 13:45 çıkmaktadır. Yüksek ışınım değerlerinin gerçekleştiği zaman dilimlerinde hep PV'nin sıcaklığı PV/T'nin sıcaklığının üstünde gerçekleşmiştir. Sabah ve akşam saatlerinde bazı noktalarda PV/T sıcaklığı PV sıcaklığının üstündedir. Bunun nedeni bu saatlerde dış ortam sıcaklığının düşük olması ve akşam saatlerinde ışınımın düşmesine rağmen FDM nin etkisini ve kurutma sürecini incelemek için kurutma sisteminin çalışmaya devam etmesi ile açıklanabilir. Saat 13:45'te Işınım en yüksek olduğu zamanda PV'nin verimi %11,38, PV/T nin ise, verimi % 12,03 olarak belirlenmiştir. Verim hesabında eşitlik 5.22 kullanılarak hesaplanmıştır.



Şekil 6.3. Sistem Deney Verilerinden Elde Edilen PV ve PVT'lerin Elektriksel Verim Değerlerinin Işınımına Göre Değişimi.

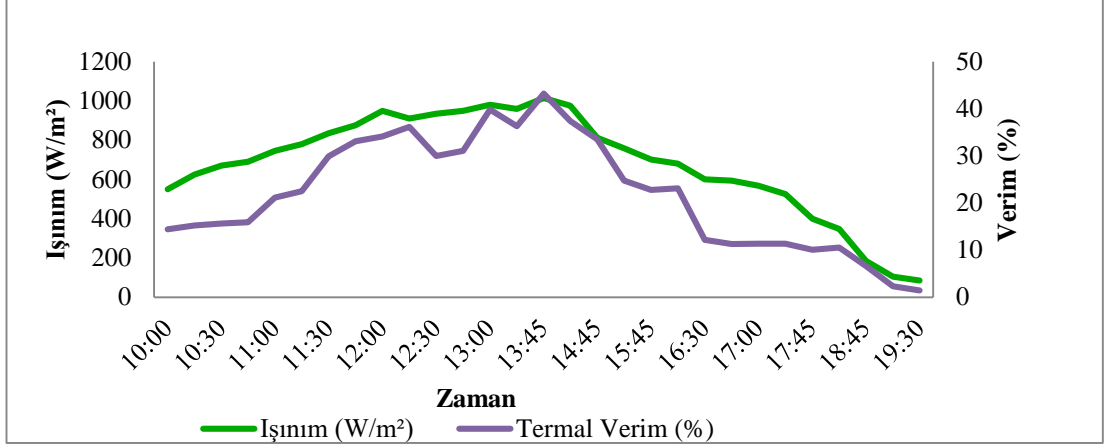
PV/T sistemlerinde ısı kazanç, eşitlik 5,13 kullanarak hesaplanmıştır. PV/T sistemlerinin amacı, paneli soğutarak arka yüzeydeki sıcaklık artışından elde edilen ıslığı başka bir yerde, bu durumda bir kurutma fırınında kullanmaktır. Bu bağlamda, T1 giriş sıcaklığı ve T2 çıkış sıcaklığı olarak dikkate alınarak hesaplama yapılmıştır.

Deney sonuçlarına göre, ışınım miktarının PV/T sistemlerinin ısı kazancı üzerinde önemli bir etkisi vardır. Gün boyunca ışınım miktarı arttıkça, ısı kazanç da paralel olarak artmıştır. Özellikle saat 13:45'te ışınım miktarının 1015 W/m^2 ile en yüksek seviyeye ulaştığı ve bu saat diliminde ısı kazancının $68,74 \text{ W}$ olduğu belirlenmiştir. En düşük ışınım değeri ise saat 19:30'da 85 W/m^2 olarak ölçülmüş ve bu saatte ısı kazanç $0,19 \text{ W}$ olarak hesaplanmıştır. Ortalama ışınım değeri 660 W/m^2 olup, ortalama ısı kazanç $27,76 \text{ W}$ olarak hesaplanmıştır. Işınım miktarının PV/T sistemlerinin ısı kazancı üzerinde önemli bir etkisi Şekil 6.4'te gösterilmiştir.



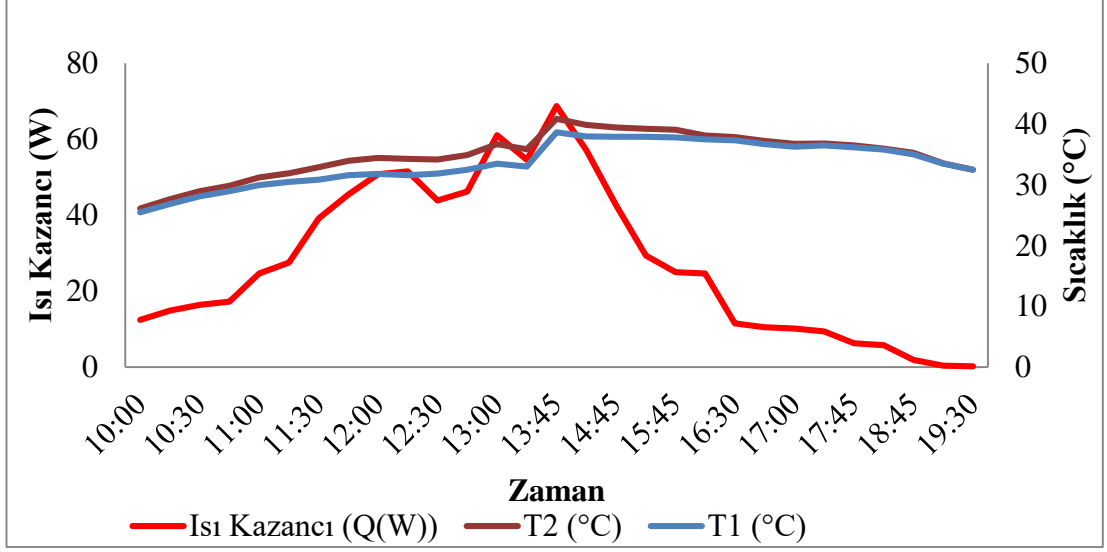
Şekil 6.4. PV/T kolektör ısı kazancının ışınımına göre değişimi.

PV/T panelin verimi, ışınım ve ısı kazanç arasındaki oran olarak değerlendirilmiştir. Saat 13:45'te verim en yüksek değeri olan %43,25'e ulaşmış, en düşük verim ise saat 19:30'da %1,43 olarak belirlenmiştir. Ortalama verim %30 olarak hesaplanmıştır. Verim eğrisi, genel olarak ışınım ve ısı kazanç eğrileriyle paralel bir seyir izlemiştir. Bu durum, sistem veriminin optimize edilmesi için sıcaklık kontrolünün kritik olduğunu göstermektedir. Gün boyunca değişen ışınım miktarı ve sıcaklıklara bağlı olarak PV/T panelin verim değerleri eşitlik 5.25 ile hesaplanmış, zamana ve ışınımına bağlı verim değerleri Şekil 6.5'te gösterilmiştir.



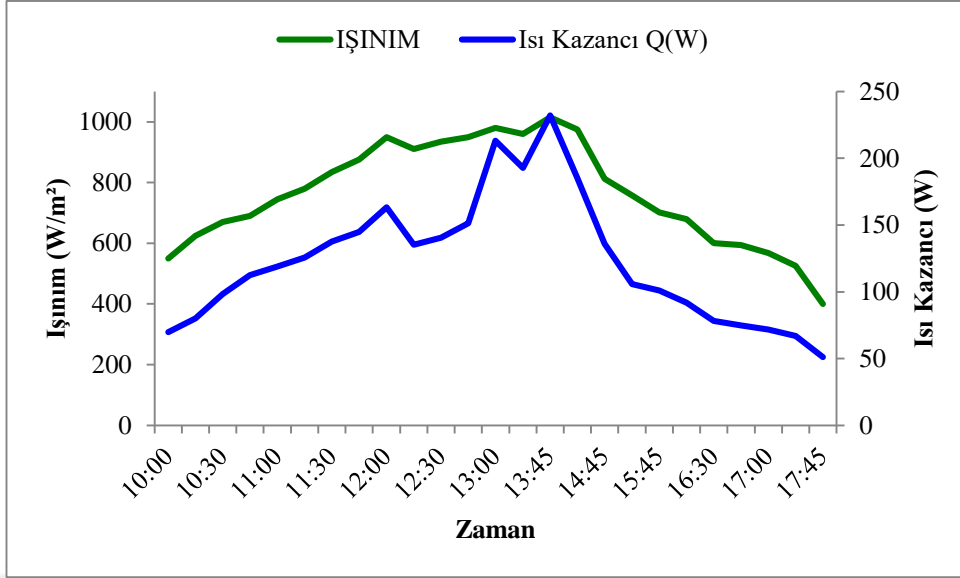
Şekil 6.5. PV/T panel veriminin zamana ve ışınıma göre değişimi.

PV/T panel, gün boyunca değişen ışınım miktarı ve sıcaklıklarla Şekil 6.6'da gösterilmiştir. Isıl kazancın belirlenmesinde, giriş sıcaklığı (T1) ile çıkış sıcaklığı (T2) arasındaki fark önemlidir. Şekil 6.6'da, T1 sıcaklığı saat 13 :45'te en yüksek değeri olan 38,65 °C'ye, T2 sıcaklığı ise saat 13:45'te 36,3 °C'ye ulaşmıştır. Bu saat dilimlerinde, T1 ve T2 arasındaki sıcaklık farkı maksimum seviyeye çıkmıştır ve bu durum, ısıl kazancın artmasına katkı sağlamıştır. Ortalama sıcaklıklar T1 için 32,88 °C, T2 için ise 33,88 °C olarak belirlenmiştir. En yüksek sıcaklık farkı, saat 13:45'te 3,6 °C olarak kaydedilmiştir. Bu fark, sistemin yüksek ısıl kazanç elde etmesine yardımcı olmuştur.



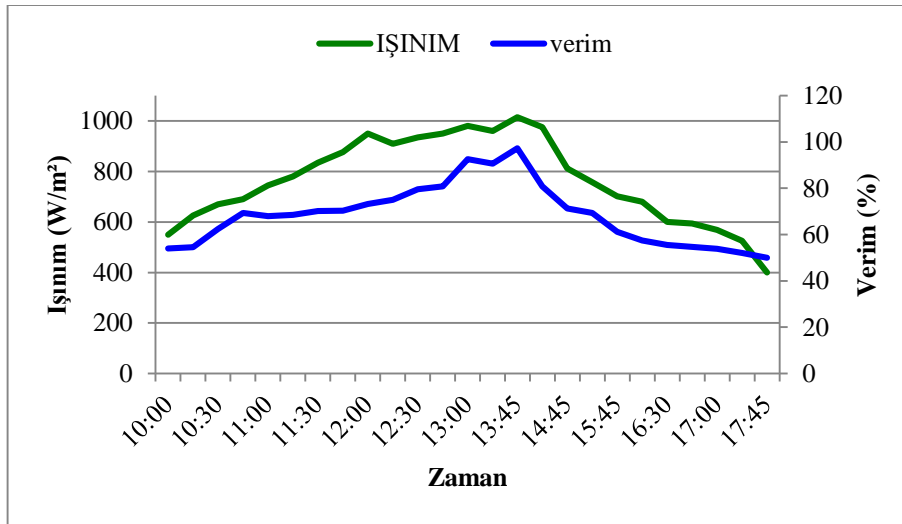
Şekil 6.6. PVT Panelde Isıl Kazancının panel giriş ve Çıkış Sıcaklığına Göre Değişimi.

Şekil 6.7’de, havalı kolektör sisteminin performansı ışınım miktarı, sıcaklıklar ve verim parametreleri açısından incelenmiştir. Grafiklerde elde edilen veriler, sistemin gün boyunca nasıl değişim gösterdiğini ve en verimli çalışma koşullarını ortaya koymuştur. Isı kazancı, ışınım miktarının yüksek olduğu zaman dilimlerinde maksimum seviyelere ulaşmıştır. Özellikle 13:45’te 1015 W/m^2 ışınım ile 232 W ısı kazancı sağlanmıştır. Bu saat diliminde sistem, en yüksek verimliliği göstermiştir. Deney süresince ortalama ısı kazancı yaklaşık 105 W olup, bu değerler eşitlik 5,15 kullanılarak hesaplanmıştır.



Şekil 6.7. Hava- su ısıtılmalı kolektör gücünün ışınımına göre değişimi.

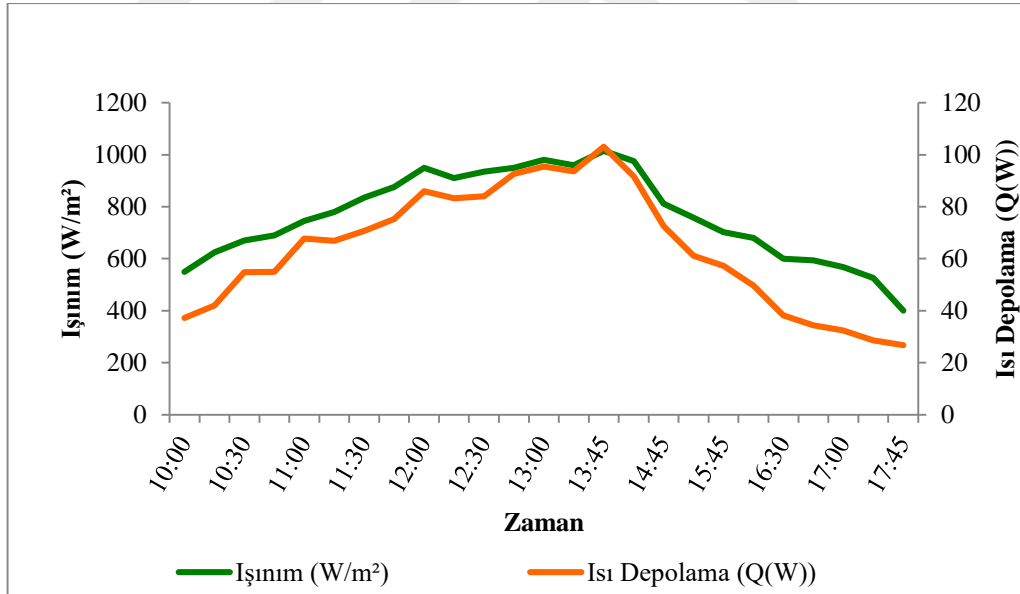
Şekil 6.8’de, havalı kolektör sisteminin performansı ışınım miktarı, sıcaklıklar ve verim parametreleri açısından incelenmiştir. Ortalama ışınım miktarı 683,03 ve ortalama verim %57,80’dir. En yüksek ışınım miktarı 13:45’te 1015 ile %97.31 verim elde edilmiştir. Hava- su ısıtılmalı kolektörde suyu dolaştıran pompa akşam saat 17:45’te durdurulmaktadır.



Şekil 6.8. Hava- su ısıtılmalı kolektör verimi ışınımına göre değişimi.

25 Haziran 2024 tarihinde, deney sisteminde bulunan su soğutmalı (su ceketli) ısıtıcı ile 1 kg parafinle zenginleştirilmiş ısı değiştirici depolanması analiz edilmiştir. Işınım miktarı, ısı kazancı değerlerinin saatlik değişimleri incelenmiş ve Şekil 6.9'da elde edilen sonuçları gösterilmiştir. Isı depolama sisteminin performansının ışınım miktarına bağlı olarak önemli ölçüde değiştiğini göstermektedir. Özellikle öğle saatlerinde ışınımın zirveye ulaştığı zaman diliminde, kolektör sisteminin ısı kazancı ve verimliliği de en yüksek seviyelere çıkmaktadır. Işınım değerlerinin düşmesiyle birlikte, ısı kazancı ve verimlilikte de belirgin bir azalma gözlemlenmiştir.

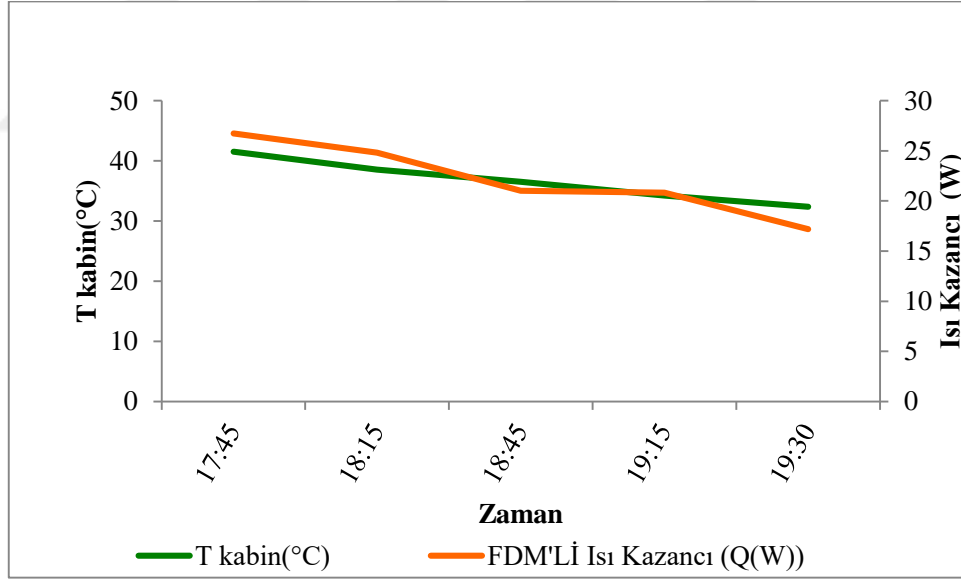
Deney sonuçlarına göre, ışınımın maksimum olduğu saat 13:45'te, 1015 W/m^2 ışınım miktarı ile $103,11 \text{ W}$ ısı depolanmıştır. Bu, su soğutmalı kolektörlerin en verimli çalıştığı zamanı işaret etmektedir. Aynı şekilde, en düşük ışınım değerinin görüldüğü saat 17:45'te, 400 W/m^2 ışınım miktarı ile $26,73 \text{ W}$ ısı kazancı hesaplanmıştır. Depolanan ısı kazancının hesaplamasında eşitlik 5.14 kullanılmıştır.



Şekil 6.9. FDM'lı eşanjörde ısı depolamasının ışınımına göre değişimi.

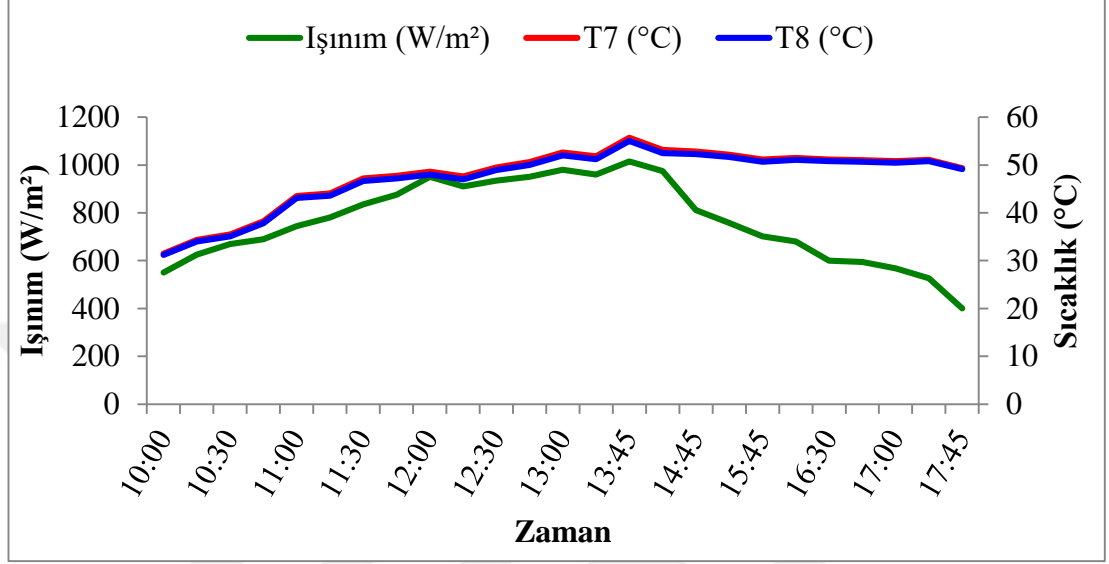
Şekil 6.10'da kurutma sistemi sıcaklığı (T kabin) ile FDM'li ısı kazanımının (Q) zaman nasil değiştiği gösterilmiştir. Zaman ilerledikçe (17:45 -19:30) arasında sisteme düşen ısınım miktarı da azalmış ve FDM'li eşanjörün depoladığı enerjiyi kullanılarak, kabin sıcaklığının ortalama 36°C'de tutmaya başarmıştır.

FDM'li eşanjör sisteminin ısı kazancı ve verimi eşitlik 5.18 kullanarak hesaplanmıştır. Sistem, parafinle doldurulmuş bir ısı değiştirici olarak tasarlanmıştır ve güneş olduğu zamanlarda enerjiyi depolayarak, güneşin olmadığı zamanlarda enerji sağlamaktadır. Saat 17:45 civarlarında, ısınım miktarının düştüğü zamanlarda, pompayı durdurarak FDM'li eşanjörün devreye girmesi sağlanmıştır. Bu sayede, deney bitiş saatine kadar FDM'li eşanjör içindeki parafin, ısınısını havaya aktararak ısıtma sistemine enerji sağlamaya devam etmiştir. FDM'li eşanjör içindeki parafin, güneşli saatlerde enerji depolayarak, güneşin olmadığı akşam saatlerinde veya bulutlu günlerde bu enerjiyi serbest bırakarak sistemin sürekli enerji sağlamasına olanak tanımaktadır.



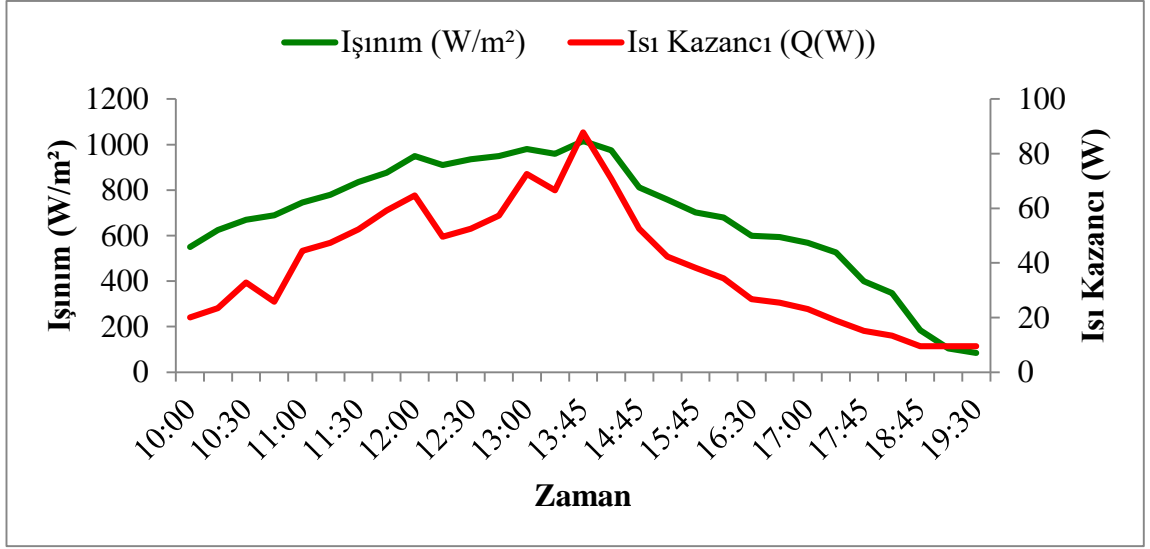
Şekil 6.10. FDM'li eşanjörde ısı kazancı ve kurutma sıcaklığının zamana göre değişimi.

Şekil 6.11’de gösterilen Kolektörden FDM’lı Eşanjörden çıkış sıcaklığı (T8) en yüksek 55°C (saat 13:45) ve en düşük 31.5°C (saat 10:00) olarak ölçülmüştür. Eşanjöre giriş sıcaklığı (T7) ise en yüksek 55,667°C (saat 13:45) ve en düşük 31.2°C (saat 10:00) olarak ölçülmüştür.



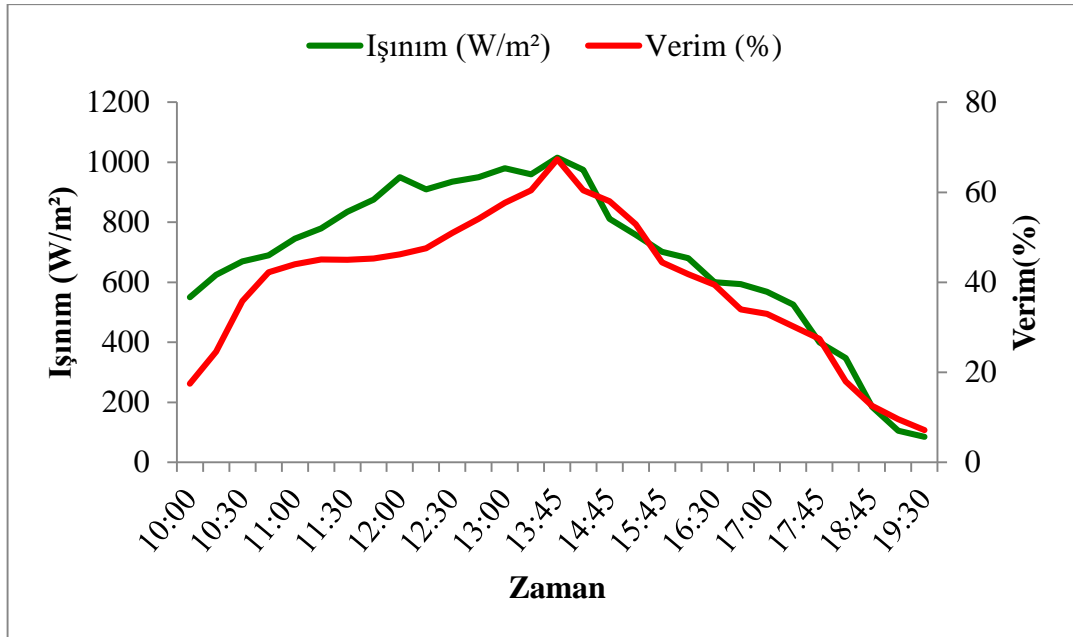
Şekil 6.11. Su ceketli ısıtıcının gidiş dönüş sıcaklarının ışıma göre değişimi.

Şekil 6.12’de sistemde kullanılan çapraz akışlı bir ısı geri kazanım cihazında, deney süresince elde edilen ve eşitlik 5.12 den hesaplanan ısı kazancıların, zamana ve ışıma bağlı değişimi görülmektedir. Şekilde; ışıma (W/m²) ve ısı kazancı (Q(W)) arasındaki ilişkiyi incelediğimizde, maksimum ışıma değerinin 1015 W/m² ile saat 13:45’te elde edildiği ve bu saatte ısı kazancının 87,84 W ile en yüksek seviyeye ulaştığı gözlemlenmiştir. En düşük ışıma ve ısı kazancı değerleri ise sırasıyla 85 W/m² ve 9,55 W olarak saat 19:30’da kaydedilmiştir. Ortalama ışıma değeri 663,8 W/m², ortalama ısı kazancı ise 38,73 W olarak hesaplanmıştır. Bu bulgular, ışıma miktarının sabah saatlerinde artarak öğle saatlerinde zirveye ulaştığını ve akşam saatlerine doğru azaldığını göstermektedir.



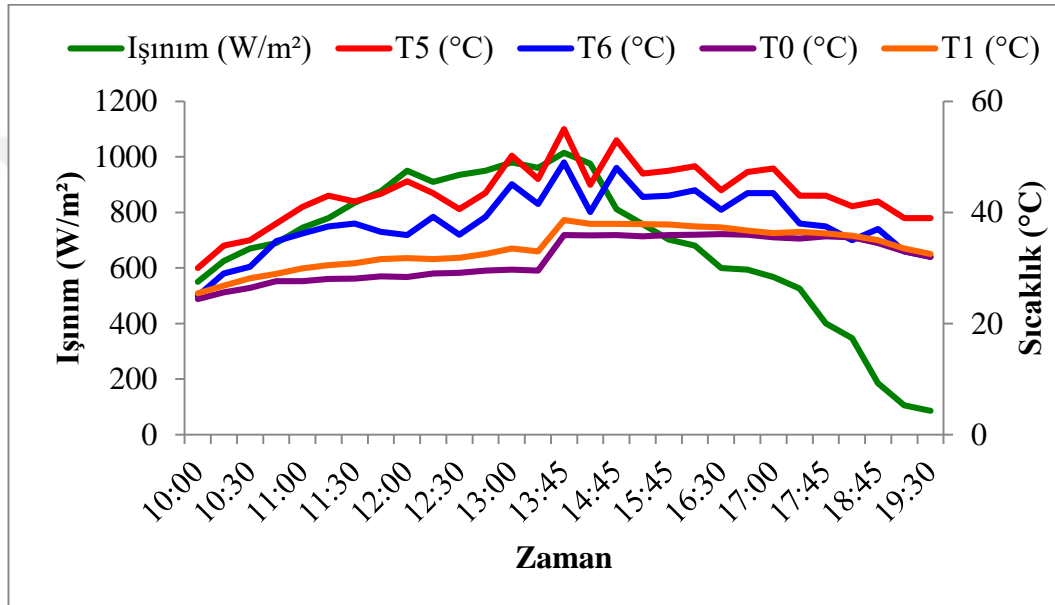
Şekil 6.12. Isı geri kazanım cihazının ısı kazancı ışınımına göre değişimi.

Şekil 6.13'te ısıtım ve verim (%) değerleri arasındaki ilişki incelenmiştir. En yüksek verim % 67,31 ile saat 13:15'te elde edilmiştir. En düşük verim ise %7,14 ile saat 19:30'da gözlemlenmiştir. Ortalama verim %42,89 olarak hesaplanmıştır. Verim değerleri, ısıtımın yüksek olduğu saatlerde artış göstermiş, ısıtımın azaldığı saatlerde ise düşmüştür. Cihaz verimi hesaplanmasında eşitlik 5.23 kullanılmıştır.



Şekil 6.13. Isı geri kazanım cihazı verimi ısıtımına göre değişimi.

Şekil 6.14'te ısı geri kazanım sisteminin farklı noktalarındaki sıcaklıklar (T0, T1, T5, T6) incelendiğinde, sistemin etkinliğini anlamak adına önemli bilgiler elde edilmiştir. Deney süresince taze hava girişi (T0) sıcaklığı sabah (saat 10:00), öğlen (13:45) ve akşam (19:30) sırasıyla, 24,4°C, 29,7°C ve 32,0°C arasında değişirken, PV/T hava girişi sıcaklığı (T1) 25,45°C, 38,65°C ve 32,50°C arasında değişmiştir. Kurutma kabini çıkış sıcaklığı (T5) sırasıyla 30,00°C, 53,00°C ve 39,00°C arasında değişirken, egzoz havası sıcaklığı (T6) ise 25,00°C, 48,00 ve 32,00°C arasında değişiklik göstermiştir.



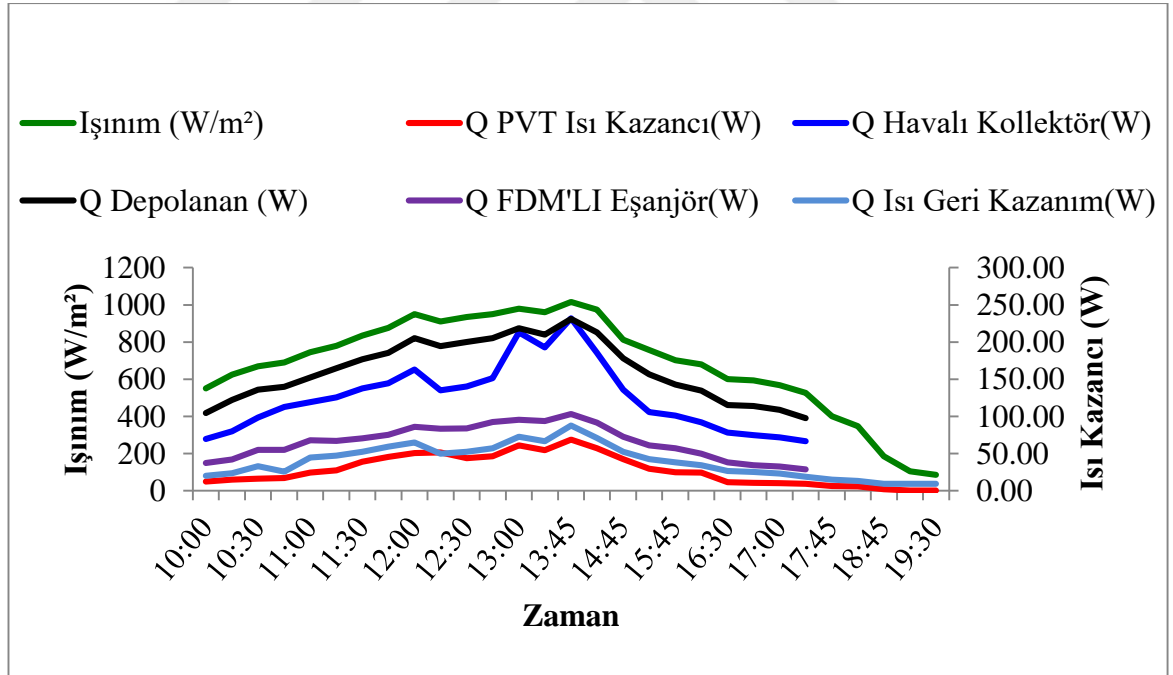
Şekil 6.14. Isı geri kazanım cihazı giriş ve çıkış sıcaklıklarının zamana ve ışıyıma göre değişimi.

Şekil 6.15'te PV/T ısı geri kazanımlı, FDM'li ısı depolamalı, Hava-su ısıtılmalı kolektörlü kurutma sisteminde; sistemden elde edilen ısı kazanımlarının zamana ve ışıyıım değerlerine göre değişimleri görülmektedir. Gün boyunca ortalama ışıyıım değeri yaklaşık 692 W/m²'dir. En yüksek ışıyıım değeri 13:45'te 1015 W/m² olarak kaydedilmiştir. En düşük ışıyıım değeri ise 19:30'da 85 W/m² olarak ölçülmüştür. ışıyıımın en yüksek olduğu saatlerde (13:00 - 14:00 arası), tüm tüm system bileşenleri en yüksek termal enerji kazançlarına ulaşmıştır.

PV/T Isı Kazancı, ortalama 24,67 W olarak hesaplanmıştır. En yüksek değeri 68,74 W ile 13:45'te, en düşük değeri ise 0,19 W ile 19:30'da hesaplanmıştır.

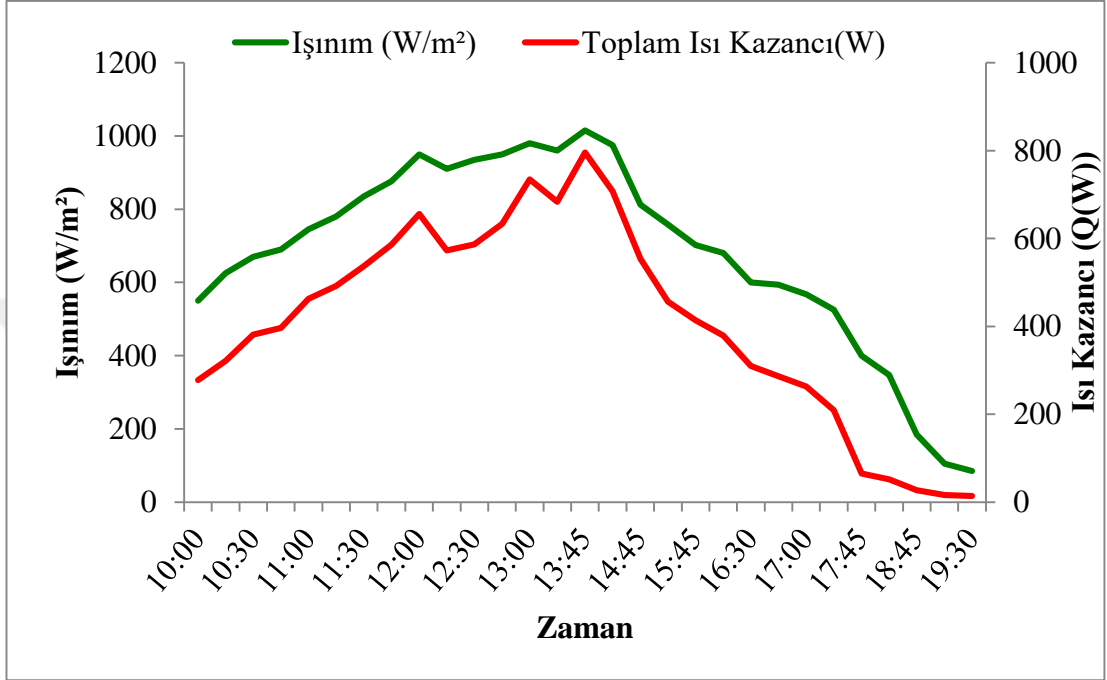
Hava- su ısıtmalı kolektör, ortalama 95,23 W değerindedir. En yüksek kazancı 206,23 W ile 13:45'te, en düşük kazancı ise 3,63 W ile 19:30'da hesaplanmıştır. Havalı kolektörlerin gün boyunca sabit bir performans gösterdiği gözlemlenmiştir.

FDM'li Eşanjörde depolanan enerji miktarı, ortalama 65,46 W olarak hesaplanmıştır. En yüksek değeri 113,11 W ile 13 :45'te, en düşük değeri ise 28,64 W ile 17 :45'te elde edilmiştir. Saat 17 :45'ten 19 :30'a kadar sistemin sirkülasyon pompası durdurulmuş ve bu süre boyunca, yaklaşık 2 saat boyunca, FDM'li eşanjörde depolanan enerji sisteme aktarılmıştır. Bu sayede, kabin sıcaklığı ortalama 36°C'de sabit tutulmuştur. Isı geri kazanım cihazından, diğer sistem elemanlarında elde edilen enerji kazanımlarına göre daha düşük kazançlar sağlamıştır ve ortalama 32,55 W değerindedir. En yüksek kazancı 87,84 W ile 13 :45'te, en düşük kazancı ise 0,18 W ile 19 :30'da gerçekleşmiştir. Isı geri kazanım sistemleri, enerji verimliliğini artırmada önemli bir rol oynamaktadır.



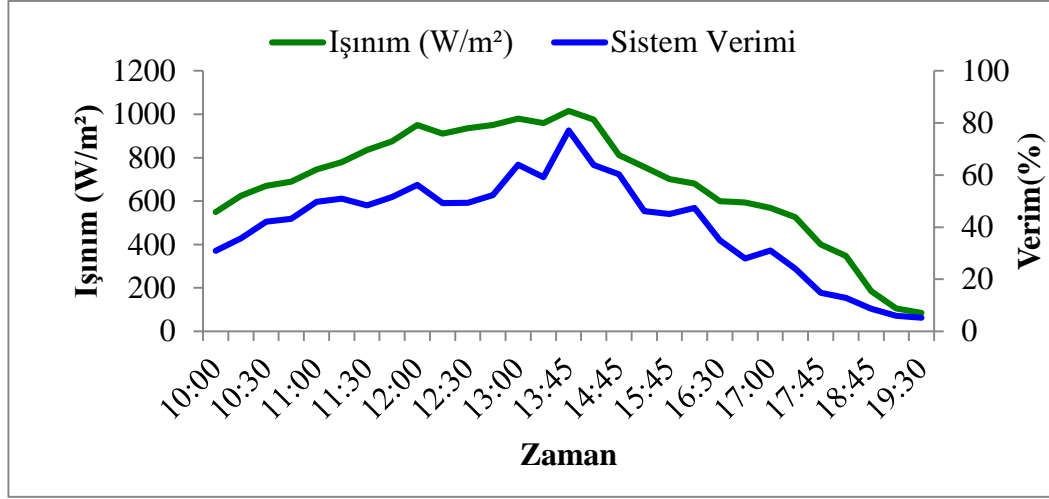
Şekil 6.15. Termal enerji ışıma göre değişimi.

Kurutma sisteminin Toplam Isı kazancın zamana ve ışınım miktarına göre değişimi Şekil 6.16'da gösterilmiştir. Şekilde; ışınımın en yüksek olduğu zaman dilimlerinde, toplam ısı kazancı 795,56 W (0,795 kW), ortalama 409,31 W (0,409 kW) olarak hesaplanmıştır.



Şekil 6.16. Toplam termal enerji ışınımına göre değişimi.

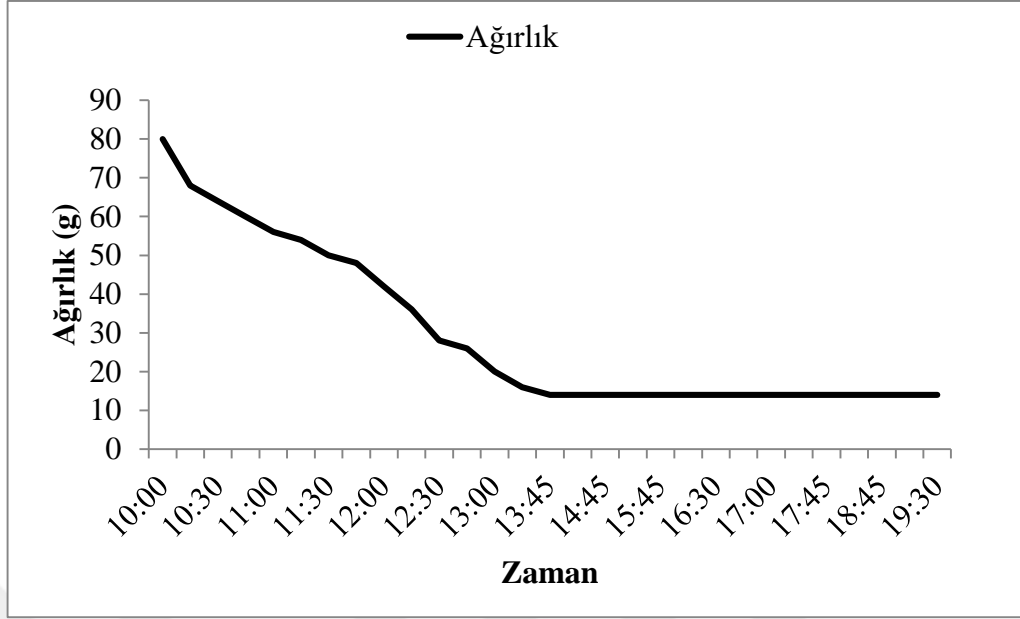
Kurutma sisteminin genel verimi ve ışınım miktarına göre değişimi Şekil 6.17'de gösterilmiştir. Deney boyunca sistemin ortalama verimi, %59,95 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 6.17. Kurutma sisteminin genel verimi ışınımına göre değişimi.

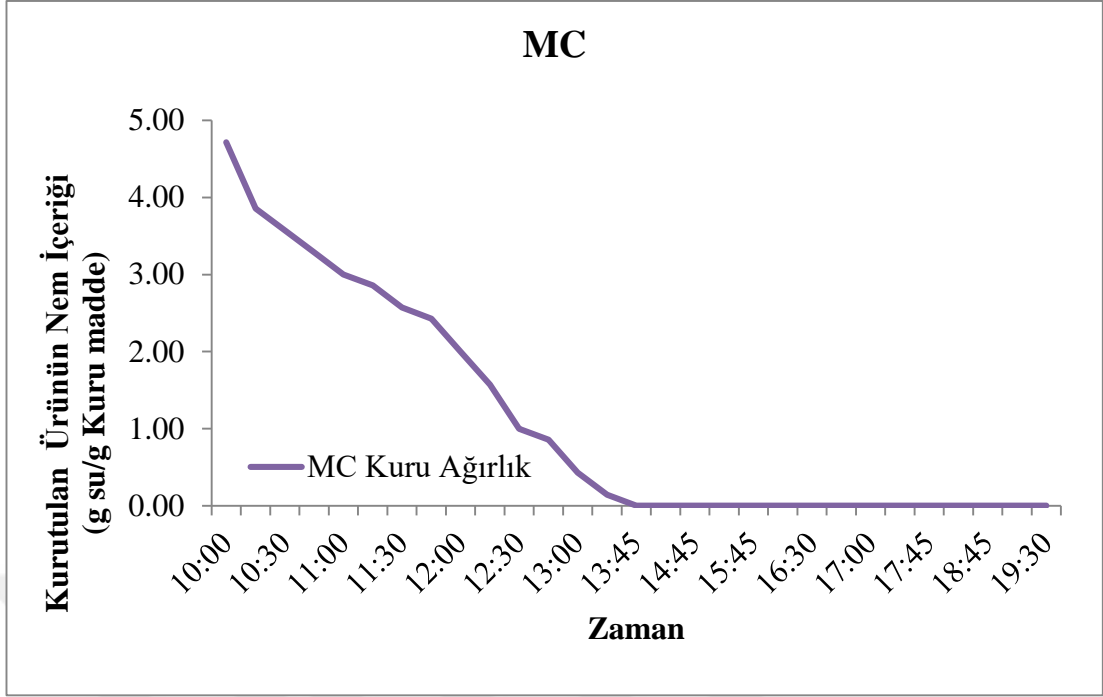
Kurutma sisteminde, kurutma materyali ürün aromatik bitki olan nanenin kuruma süreci deneysel olarak incelenmiştir. kurutma sisteminin performansı incelenmiştir. 25 Haziran 2024 ile 29 Haziran 2024 tarihleri arasında gerçekleştirilen beş günlük deneyler sırasında nane örneklerinin ağırlığı, MC kuru ağırlık, MC yaş ağırlık ve nem oranı belirli aralıklarla ölçülmüş ve kaydedilmiştir. Kurutma süresi boyunca, ışınım miktarı ve kurutma sıcaklığı da takip edilmiştir

Başlangıçta 80-gram olan ürün ağırlığı, kurutma süresi boyunca sürekli azalarak 13:45 itibarıyla 14 gramda sabitlenmiştir. Ürün ağırlığının zamana göre değişimi Şekil 6.18'de gösterilmiştir. Bu grafikte, ağırlığın zamana bağlı olarak nasıl hızlı bir şekilde düştüğü ve sonrasında sabit bir değere ulaştığı açıkça görülmektedir. Kurutma işleminin başlangıç aşamalarında hızlı bir su kaybı yaşandığı ve ardından kurutma hızının azaldığı anlaşılmaktadır. Bu durum, nane kurutma sisteminin etkin bir şekilde çalıştığını ve su kaybının büyük oranda tamamlandığını göstermektedir.



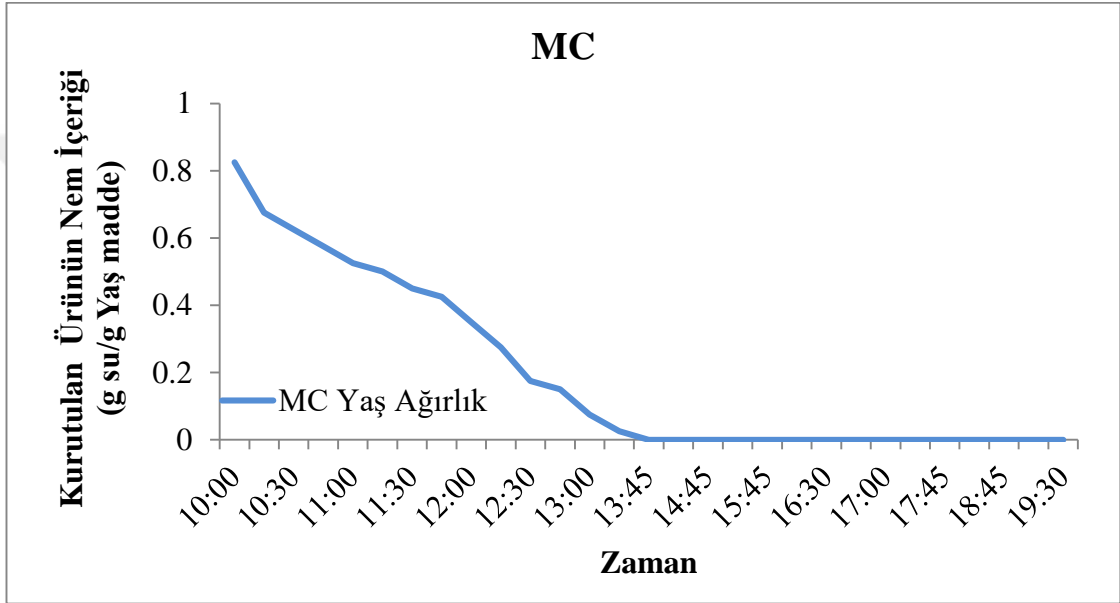
Şekil 6.18. Ürün ağırlığının zamana bağlı olarak değişimi.

MC kuru ağırlık, kurutulan ürünün nem içeriğinin kuru madde üzerinden zamana göre değişimini göstermektedir. Başlangıçta 4,714 g su/g kuru madde olan nem içeriği, zamanla azalarak 13:15'te 0,143 g su/g kuru madde seviyesine düşmüş ve sonrasında sabit kalmıştır. Bu değişim, Şekil 6.19'da detaylı olarak gösterilmiştir. Grafik, kurutma süresi boyunca nem içeriğinin hızla azaldığını ve kurutma süresinin ilerleyen aşamalarında nem kaybının minimal düzeyde olduğunu ortaya koymaktadır. Bu sonuçlar, kurutma işleminin ürünün su içeriğini başarılı bir şekilde azalttığını ve nane örneklerinin mikrobiyal stabiliteye ulaştığını göstermektedir.



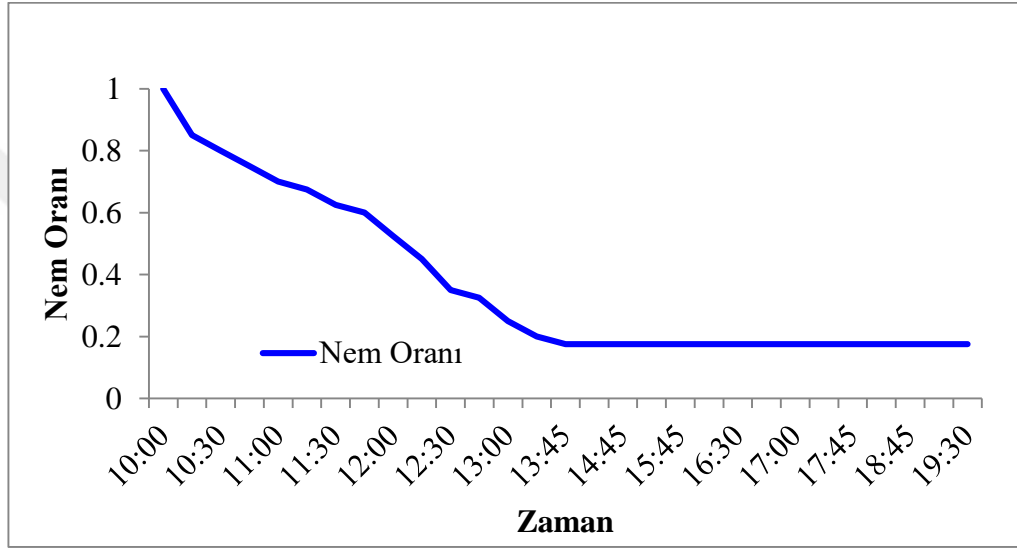
Şekil 6.19. Zamana bağlı olarak MC kuru ağırlık değişimi.

MC yaş ağırlık, kurutulmuş ürünün nem içeriğinin yaş madde üzerinden zamana göre değişimini göstermektedir. Başlangıçta 0,825 g su/g yaş madde olan MC yaş ağırlık, zamanla azalarak 13:15'te 0,025 g su/g yaş madde seviyesine düşmüş ve sonrasında sabit kalmıştır. Bu değişim, Şekil 6.20'de detaylı olarak gösterilmiştir. Grafik, yaş madde üzerinden nem kaybının zamanla nasıl azaldığını ve belirli bir süreden sonra sabit bir değere ulaştığını göstermektedir. Bu durum, kurutma işleminin etkinliğini ve verimliliğini doğrulamaktadır.



Şekil 6.20. Zamana bağlı olarak MC değişimi.

Nem oranı grafiği, ürünün nem oranının zamana göre nasıl değiştiğini göstermektedir. Başlangıçta 1 olan nem oranı, zamanla azalarak 13:45'te 0,175 seviyesine düşmüş ve sonrasında sabit kalmıştır. Nem oranının zamana göre değişimi şekil 6.21'de gösterilmiştir. Grafik, ürünün nem oranının zamanla hızlı bir şekilde azaldığını ve kurutma işleminin ilerleyen aşamalarında sabit bir değere ulaştığını ortaya koymaktadır. Bu sonuçlar, kurutma işleminin etkinliğini ve su kaybının büyük oranda tamamlandığını göstermektedir.



şekil 6.21. Nem oranının zamana göre değişimi.

BÖLÜM 7

SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışma, enerji verimliliğini artırırken çevresel ve ekonomik açıdan da avantaj sağlayan yenilikçi kurutma sistemlerinin tasarım ve uygulamasında önemli bir adım olarak değerlendirilebilir. Geliştirilen sistem, güneş enerjisinin etkin kullanımını sağlayarak kurutma maliyetlerini düşürmektedir.

Deneyler, kolektör eğiminin ve Karabük ili iklim koşullarının, PV/T sistemlerin performansı üzerinde önemli etkilere sahip olduğunu göstermiştir. Bu deneyler, PV/T panelinin soğutma etkisi sayesinde elektriksel verimliliğinin arttığını ve termal verimliliğin güneş ışınımının azalmasıyla birlikte arttığını göstermektedir. PV/T paneller, hem elektrik üretiminde hem de termal enerji sağlamada daha verimli olmuştur. Bu deneyler, PV/T sistemlerinin enerji verimliliği açısından geleneksel PV panellere göre üstün olduğunu ortaya koymuştur.

PV/T ısı geri kazanımlı FMD'li ısı depolamalı ve Hava- su ısıtmalı kolektörlü nane kurutma sistemi, 25 Haziran 2024 tarihinde yapılan deneylerde yüksek enerji verimliliği ve toplam ısı kazancı göstermiştir. Deneyler sırasında, ışınım miktarının sabah saatlerinde artmasıyla birlikte toplam ısı kazancı ve sistem verimliliğinde belirgin bir artış gözlemlenmiştir. Özellikle 13:00 - 14:00 arası ışınımın maksimum seviyelere ulaşması (1015 W/m^2) ile sistem en yüksek performansını göstermiştir.

1. PV/T sistemlerinin toplam ısı kazancı, ışıınım miktarının en yüksek olduğu saat 13:45'te 795,56 W olarak kaydedilmiştir. Ortalama ısı kazancı ise 401,38 W olarak hesaplanmıştır. Bu, gün boyunca sistemin sürekli ve verimli bir şekilde çalıştığını göstermektedir.
2. Sistem genel verimliliği, ortalama verim %61,26 olarak hesaplanmıştır.
3. Sistemde PV/T panel, PV panele göre yüksek elektrikel güç üretimi ve verim değerleri sağlamıştır. PV/T panelden elde edilen ortalama verim % 12,03 olurken PV panelin ortalama elektriksel verimi %11,58 olmuştur.
4. Hava-su ısıtmalı kolektör sistemde hem kurutma havasını doğruan ısıtmakta hemde parafinin bulunduğu ısı eğiştiricide su ile parafinde ısı depolamakta ve havanın ikincil olarak bu ısı değiştiricide ilave ısınmasını sağlamaktadır. Bu işlemdede ısı artırımını ile sistem performansı, ışıınım miktarına bağlı olarak önemli ölçüde değişmiştir. Özellikle öğle saatlerinde ışıınımın zirveye ulaştığı zaman diliminde (13:45), hava-su ısıtmalı kolektörün ısı kazancı 230.85 W ve verimliliği % 96.82 ile en yüksek seviyelere ulaşmıştır. En düşük ışıınım değerinin görüldüğü saat 17:45'te ise 74.17 W ısı kazancı ve %78.93 verimlilik elde edilmiştir.
5. FDM'li eşanjör, enerji depolama kapasitesi ve ısı kazancı açısından önemli bir bileşendir. En yüksek ısı kazancı, saat 13:45'te 103,11 W olarak hesaplanmıştır. Bu sonuç, FDM'li eşanjörün yüksek ışıınım koşullarında verimli çalışarak enerji depolama kapasitesini maksimum seviyeye çıkardığını göstermektedir
6. Nane kurutma sürecinde, başlangıçta 80 gram olan ürün ağırlığı 13:45 itibarıyla 14 gramda sabitlenmiştir. Başlangıçta yaş ağırlık bazında 0.82 g su/g, kuru bazda ise 4.94 g su/g kuru madde olarak nem içeriği hesaplanmıştır.
7. SMER özgül nem çekme oranı olarak tanımlanmaktadır. Ürünlerden bir 1 g nemi uzaklaştırmak için harcanan enerji miktarı 0,38 g/wh olarak bulunmuştur.

8. Kurutma sürecince başlangıçta 1.00 olan nem oranı, 0.175 seviyesine inmiştir.
9. Isı kazanımının zamanla azalmasına rağmen kabin sıcaklığının stabil kalması, FDM'li eşanjörün etkin bir enerji yönetim sistemi sağladığını kanıtlamaktadır.

FDM'li eşanjörlerin enerji depolama kapasitesinin artırılması, düşük ışıyım koşullarında da yüksek verimlilik sağlanmasına yardımcı olabilir. Bu, enerji depolama ve serbest bırakma süreçlerinin optimize edilmesi ile mümkün olacaktır.

PV/T panelleri, PV panelleri kıyasla daha yüksek elektriksel güç üretimi sağladığı ve bu farkın verimli soğutma sistemleri ile daha da artırılabilceği görülmüştür. Mevcut sac levhalar yerine aliminyum termal kanatlı soğutucular, ısı boruları veya sıvı soğutma sistemleri kullanılarak PV/T sistemlerinin verimi önemli ölçüde artırılabilir. Bu iyileştirmeler, PV/T panelleri hem elektriksel hem de ısı verimliliğini artırarak genel performansını optimize eder.

Kurutma kabininde hava akış yönlerinin, ürün istif şeklinin ve sıcaklığa bağlı hava hızının inverte edilmesi, kurutma sürecini hızlandırmada ve enerji verimliliğini artırmada etkili olabilir. Sistemde su aktivitesinin sürekli izlenmesinde mikrobiyal stabilitenin sağlanmasında kritik öneme sahiptir

KAYNAKLAR

1. D.Kong Y. Wang, M.Li ,Liang “Experimental investigation of a novel hybrid drying system powered by a solar photovoltaic/thermal air collector and wind turbine” (2022).
2. Z. Alimohammadi, H. Akhijahani , P. Salami “Thermal analysis of a solar dryer equipped with PTSC and PCM using experimental and numerical methods”(2020).
3. Kazmerski, L. L. "Photovoltaics: A review of the state of the art, with details on the photovoltaic technology and industry from 2018 to 2019." Renewable and Sustainable Energy Reviews” (2019).
4. Kun Lan, Lingyu Wang, Yong Zhou, Zehao Zhang, Songlin onglin Fang, Pangong Cao
5. “The applicability of sunshine-based global solar radiation models modified with meteorological factors for different climate zones of China” (2021).
6. Kazmerski, L. L. "Photovoltaics: A review of the state of the art, with details on the photovoltaic technology and industry from 2018 to 2019." Renewable and Sustainable Energy Reviews” (2019).
7. “Güneş - T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı” Enerji Atlası, erişim 2024.
8. Houssam Chouikhi , Baher M. A. Amer “Performance Evaluation of an Indirect-Mode Forced Convection Solar Dryer Equipped with a PV/T Air Collector for Drying Tomato Slices”
9. Mohammad Reza Rouzegar, Mohammad Hossein Abbaspour-Fard , Mahdi Hedayatzadeh “Design, thermal simulation and experimental study of a hybrid solar dryer with heat storage capability”(2023)
10. M.M. Benlioglu , M. Karaagaç, A. Ergün , I. Ceylan , I. Guma Ali “A detailed analysis of a novel auto-controlled solar drying system combined with thermal energy storage concentrated solar air heater (CSAC) and concentrated photovoltaic/thermal (CPV/T)
11. Awad, M. M., Ahmed, O. K., Ali, O. M., Alwan, N. T., Yaqoob, S. J., Nayyar, A., Abouhawwash, M., & Alrasheedi, A. F. Study on Photovoltaic Thermal Collectors Integrated with Phase Change Materials. Renewable Energy Journal, 158, 125-140. (2023)
12. A.K. Bhardwaj , R.Kumar, S. Kumar, B. Goel , R. Chauhan “Energy and exergy analyses of drying medicinal herb in a novel forced convection solar dryer integrated with SHSM and PCM”
13. Maghrabie, H. M., Elsaid, K., Sayed, E. T., Radwan, A., Abo-Khalil, A. G., Rezk, H., Abdelkareem, M. A., & Olabi, A. G. (2023). Increasing the

Performance of Solar Photovoltaic Panels Using Phase Change Materials and Nanoparticles. *Renewable Energy Journal*, 165, 100-115. (2023)

14. M. Gouda, M. Vishnu V. Reddy, C. V.P.a,* , Suresh S. “A novel indirect solar dryer with inlet fans powered by solar PV panels: Drying kinetics of Capsicum Annum and Abelmoschus esculentus with dryer performance”
15. Jangde, P. K. & Singh A. & Thottipalayam V. A. “Efficient solar drying techniques: a review” (2022)
16. M. Gouda , M. Vishnu V. Reddy , C. V.P.a,* , Suresh S. “A novel indirect solar dryer with inlet fans powered by solar PV panels: Drying kinetics of Capsicum Annum and Abelmoschus esculentus with dryer performance”
17. Lamidi, R. O., Jiang, L., Pathare, P. B., Wang, Y. D., & Roskilly, A. P. “Recent advances in sustainable drying of agricultural produce: A review.” *Applied Energy*, 233-234, 367-385. (2019).
18. M. Ftericha, H. Chouikhia,b , H. Bentahera , A. Maaleja “Experimental parametric study of a mixed-mode forced convection solar dryer equipped with a PV/T air collector” (2018)
19. D.K. Rabha, P. Muthukumar “Performance studies on a forced convection solar dryer integrated with a paraffin wax–based latent heat storage system”
 - A. El Khadraoui, S. Bouadila, S. Kooli, A. Farhat, A. Guizani “Thermal behavior of indirect solar dryer: Nocturnal usage of solar air collector with PCM” (2017)
20. Aktaş, M. , Ceylan, İ. ,Doğan, H. , Aktekeli, Z. “Güneş Enerjisi Destekli, Isı Pompalı Kırmızıbiber Kurutucusunun Tasarımı, İmalatı Ve Performans Deneylemleri”, *Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi*, (2010)
21. M.M. Benlioglu , M. Karaagaç, A. Ergün , I. Ceylan , I. Guma Ali “A detailed analysis of a novel auto-controlled solar drying system combined with thermal energy storage concentrated solar air heater (CSAC) and concentrated photovoltaic/thermal (CPV/T)”
22. Kavak Akpınar, E.. *Solar drying techniques and solar energy utilization. Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects.* (2010)
23. Sharma, A., & Tiwari, G. N. ”Thermal performance of open sun drying. “*Renewable Energy.* (2009)
24. Çay, V. V., Koçyiğit, F., Akyüz, M. K., & Koçyiğit, Ş. “Güneş Enerjisi Destekli Kurutma Sistemleri ve Tarımda Kullanımı.” *International Engineering Conference (IEC2017)*, (2017).

25. Navale, P. M., et al. "Solar drying systems and their applications in agriculture." Energy Reports. (2015).
26. M.M. Benlioglu , M. Karaagaç, A. Ergün , I. Ceylan , I. Guma Ali "A detailed analysis of a novel auto-controlled solar drying system combined with thermal energy storage concentrated solar air heater (CSAC) and concentrated photovoltaic/thermal (CPV/T)"
27. Houssam Chouikhi , Baher M. A. Amer "Performance Evaluation of an Indirect-Mode Forced Convection Solar Dryer Equipped with a PV/T Air Collector for Drying Tomato Slices"
28. Saretta, E., Berardi, U., & Brunoro, S. (2020). "Review of phase change materials-based photovoltaic-thermal systems performance." Renewable and Sustainable Energy
29. Sharma, Atul, V.V. Tyagi, C.R. Chen, and D. Buddhi. "Review on thermal energy storage with phase change materials and applications." Renewable and Sustainable Energy Reviews 13, no. 2 (2007): 318-345.
30. Öztürk, H. H. (tarih). Güneş Enerjisinden Fotovoltaik Yöntemle Elektrik Üretiminde Güç Dönüşüm Verimi ve Etkili Etmenler." (2017)
31. Bahaidarah, H., Baloch, A., Gandhidasan, P. "Uniform cooling of photovoltaic panels: a review." Renewable and Sustainable Energy Reviews, 57, 1520-1544. DOI: 10.1016/j.rser.2015.12.189. (2016).
32. Saidan, M. N., et al. "The impact of dust accumulation on the performance of photovoltaic modules in Baghdad, Iraq." Renewable Energy, 92, 499-507. DOI: 10.1016/j.renene.2016.02.006. (2016).
33. Fathi, M., Abderrezek, M. "Experimental study of the dust effect on photovoltaic panels' energy yield. Solar Energy, 142, 308-320. DOI: 10.1016/j.solener.2016.12.036." (2017).
34. Buerhop, C., et al. "Unmanned aerial vehicles in photovoltaic systems monitoring applications." Proceedings of the 29th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition. 2734-2739. DOI: 10.4229/29thEUPVSEC2014-4DO.7.2. (2012).
35. <https://elektrotesisat.blogspot.com/2016/10/gunes-pillerinin-yaps-fotovoltaik-eyleman.html> erişim 2020
36. Aktaş, M. , Ceylan, İ. ,Doğan, H. , Aktekeli, Z. "Güneş Enerjisi Destekli, Isı Pompalı Kırmızıbiber Kurutucusunun Tasarımı, İmalatı Ve Performans Deneyleri", Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi, (2010)
37. Bahaidarah, H., Baloch, A., Gandhidasan, P. "Uniform cooling of photovoltaic panels: a review." Renewable and Sustainable Energy Reviews, 57, 1520-1544. DOI: 10.1016/j.rser.2015.12.189. (2016).

38. Saidan, M. N., et al. "The impact of dust accumulation on the performance of photovoltaic modules in Baghdad, Iraq." *Renewable Energy*, 92, 499-507. DOI: 10.1016/j.renene.2016.02.006. (2016).
39. Öztürk, H. H. (tarih). Güneş Enerjisinden Fotovoltaik Yöntemle Elektrik Üretiminde Güç Dönüşüm Verimi ve Etkili Etmenler." (2017)
40. A.K. Bhardwaj , R.Kumar, S. Kumar, B. Goel , R. Chauhan "Energy and exergy analyses of drying medicinal herb in a novel forced convection solar dryer integrated with SHSM and PCM"
41. Zalba, B., Marin, J.M., Cabeza, L.F., & Mehling, H. "Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications. *Applied Thermal Engineering*" 23(3), 251-283(2003).
42. Agyenim, F., Hewitt, N., Eames, P., & Smyth, M. "A review of materials, heat transfer and phase change problem formulation for latent heat thermal energy storage systems (LHTESS). *Renewable and Sustainable Energy Reviews*" (2010).
43. Jun Su Lee, Stepan Lucyszyn "Thermal analysis for bulk-micromachined electrothermal hydraulic microactuators using a phase change material" (2007)
44. Gürel, A. E., "Güneş Enerjili, Isi Borulu , Nem Kontrollü Krutucuda Aromatik Ürünlerin (Nane, Maydanoz, Biberiye) Kurutulmasi" Yüksek Lisans Tezi, (2010).
45. Ceylan, I.; Aktas , M. "Modeling of a hazelnut dryer assisted heat pump by using artificial neural networks". *Applied Energy*, 85, 841–854, (2008).
46. Evranuz, Ö., " Gıda Maddelerinin Kurutulmasi Sirasinda Kuruma Kinetiğini Kontrol Eden Faktörler Ve Kalite Üzerine Etkileri" (1988).
47. Çengel, Yunus A., ve Michael A. Boles. *Thermodynamics: An Engineering Approach*. McGraw-Hill Education, 2015

ÖZGEÇMİŞ

Abdoulaye Mahamat AZALO , eğitim hayatına İbn Rüşd Ortaokulu'nda başladı. Bu dönemde fen bilimlerine olan ilgisini keşfetti ve bu alanda derinlemesine bilgi edinme arzusunu geliştirdi. Ortaokul eğitimi boyunca temel fen bilimlerinde sağlam bir altyapı oluşturdu.

Daha sonra Lycee Roi Fayçal Fen Lisesi'nde eğitimine devam etti. 2016-2017 yılları arasında bu lisede aldığı fen ve matematik ağırlıklı eğitim, onun analitik düşünme yeteneklerini geliştirmesine ve mühendislik alanında kariyer yapma hedefini netleştirmesine yardımcı oldu.

Lise eğitiminden sonra, 2018-2022 yılları arasında Karabük Üniversitesi'nde Enerji Sistemleri Mühendisliği bölümünde lisans eğitimini tamamladı. Üniversite eğitimi süresince enerji sistemlerinin tasarımı, analizi ve optimizasyonu konularında kapsamlı bilgi edindi. Bu süreçte çeşitli projelerde yer alarak ve staj deneyimleriyle teorik bilgilerini pratikle birleştirerek kendini geliştirdi.

Lisans eğitiminden sonra, yine Karabük Üniversitesi'nde Enerji Sistemleri Mühendisliği alanında yüksek lisans yapmaya başladı. 2022 yılında başladığı yüksek lisans programında, enerji verimliliği ve yenilenebilir enerji kaynakları üzerine yoğunlaştı.