



**FOTOVOLTAİK TERMAL (PV/T) SİSTEM
DESTEKLİ ISI POMPASININ KULLANIMI
İLE SÜTÜN PASTÖRİZE EDİLMESİ**

Sedat AKMEŞE

**Prof. Dr. Ömer ÇOMAKLI
Doç. Dr. Gökhan ÖMEROĞLU**

Doktora Tezi

Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı

2021

(Her hakkı saklıdır.)

T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**FOTOVOLTAİK TERMAL (PV/T) SİSTEM DESTEKLİ ISI POMPASININ
KULLANIMI İLE SÜTÜN PASTÖRİZE EDİLMESİ**

(Pasteurization of Milk by Using Photovoltaic Thermal (PV/T) System Assisted Heat Pump)

DOKTORA TEZİ

Sedat AKMEŞE

Danışman: Prof. Dr. Ömer ÇOMAKLI
İkinci Tez Danışmanı: Doç. Dr. Gökhan ÖMEROĞLU

Erzurum
Mart, 2021

KABUL VE ONAY TUTANAĞI

Sedat AKMEŞE tarafından hazırlanan “Fotovoltaik Termal (PV/T) Sistem Destekli Isı Pompasının Kullanımı İle Sütün Pastörize Edilmesi” başlıklı çalışması 08/ 03 / 2021 tarihinde yapılan tez savunma sınavı sonucunda başarılı bulunarak jürimiz tarafından Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Termodinamik Bilim Dalında Doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Başkanı:	Prof. Dr. Erdem KOCADAĞISTAN <i>Atatürk Üniversitesi</i>	Aslı ıslak imzalıdır
Danışman:	Prof. Dr. Ömer ÇOMAKLI <i>Atatürk Üniversitesi</i>	Aslı ıslak imzalıdır
Jüri Üyesi:	Doç. Dr. Şendoğan KARAGÖZ <i>Atatürk Üniversitesi</i>	Aslı ıslak imzalıdır
Jüri Üyesi:	Doç. Dr. Eyüphan MANAY <i>Erzurum Teknik Üniversitesi</i>	Aslı ıslak imzalıdır
Jüri Üyesi:	Doç. Dr. Faraz AFŞARİ <i>Erzurum Teknik Üniversitesi</i>	Aslı ıslak imzalıdır
Jüri Üyesi:	Dr. Öğr. Üyesi Nesrin ADIGÜZEL <i>Atatürk Üniversitesi</i>	Aslı ıslak imzalıdır
İkinci Tez Danışmanı	Doç. Dr. Gökhan ÖMEOĞLU <i>Üniversite Adı</i>	Aslı ıslak imzalıdır
		Enstitü Yönetim Kurulunun/....../.... tarih ve sayılı kararı.

Bu tezin Atatürk Üniversitesi Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği'nin ilgili maddelerinde belirtilen şartları yerine getirdiğini onaylarım.

Prof. Dr. Mehmet KARAKAN

Enstitü Müdürü

Bu çalışma BAP projesi kapsamında desteklenmiştir.
Proje No: 2019/7087

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaklardan yapılan bildiriş, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak olarak kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU

Doktora Tezi olarak Prof. Dr. Ömer ÇOMAKLI danışmanlığında sunulan “Fotovoltaik Termal (PV/T) Sistem Destekli Isı Pompasının Kullanımı İle Sütün Pastörize Edilmesi” başlıklı çalışmanın tarafımızdan bilimsel etik ilkelere uyularak yazıldığını, yararlanılan eserlerin kaynakçada gösterildiğini, Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından belirlenmiş olan Turnitin Programı benzerlik oranlarının aşılmadığını ve aşağıdaki oranlarda olduğunu beyan ederiz.

Tez Bölümleri	Tezin Benzerlik Oranı (%)	Maksimum Oran (%)
Giriş	5	30
Kuramsal Temeller	8	30
Materyal ve Yöntem	5	35
Araştırma Bulguları ve Tartışma	0	20
Sonuç	0	20
Tezin Geneli	11	25

Not: Yedi kelimeye kadar benzerlikler ile Başlık, Kaynakça, İçindekiler, Teşekkür, Dizin ve Ekler kısımları tarama dışı bırakılabilir. Yukarıdaki azami benzerlik oranları yanında tek bir kaynaktan olan benzerlik oranlarının %5’den büyük olmaması gerekir.

Beyan edilen bilgilerin doğru olduğunu, aksi halde doğacak hukuki sorumlulukları kabul ve beyan ederiz.

Tez Yazarı (Öğrenci)	Tez Danışmanı
Sedat AKMEŞE	Prof. Dr. Ömer ÇOMAKLI
8.3.2021	8.3.2021
Aslı ıslak imzalıdır	Aslı ıslak imzalıdır

* Tez ile ilgili YÖKTEZ’de yayınlamasına ilişkin bir engelleme var ise aşağıdaki alanı doldurunuz.

☐ Tezle ilgili patent başvurusu yapılması / patent alma sürecinin devam etmesi sebebiyle Enstitü Yönetim Kurulunun/.../.... tarih ve sayılı kararı ile teze erişim 2 (iki) yıl süreyle engellenmiştir.

☐ Enstitü Yönetim Kurulunun/.../.... tarih ve sayılı kararı ile teze erişim 6 (altı) ay süreyle engellenmiştir.

TEŞEKKÜR

Doktora tezi olarak sunduğum bu çalışma Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü'nde hazırlanmıştır. Bu çalışmanın planlanmasında ve yürütülmesinde benden ilgisini, desteğini ve kıymetli vaktini esirgemeyen, engin bilgi ve tecrübelerinden her konuda yararlandığım hayatım boyunca da yararlanacağım, yönlendirme ve bilgilendirmeleriyle çalışmamı bilimsel temellerle oluşmasına büyük katkı sağlayan hocam Sayın Prof. Dr. Ömer ÇOMAKLI'ya teşekkürlerimi ve saygılarımı sunarım.

Çalışmalarım boyunca kıymetli vaktini bana ayıran, her türlü soru ve sorunumla sabırla ilgilenen ortak danışman hocam Sayın Doç. Dr. Gökhan ÖMEROĞLU'na ve Sayın Doç. Dr. Şendoğan KARAGÖZ'e en içten teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca bu çalışmada bana yardımcı olan değerli arkadaşlarım Dr. Öğr. Üyesi Numan ÖZAKIN ve Yiğit Boğaç NAKİPOĞLU'na teşekkür ederim.

Çalışmamda ve hayatın her evresinde bana destek olan, tüm zorlukları benimle göğüsleyen, bu hayattaki en büyük şansım, sevgili eşim Başak, çocuklarım Talha Yiğit ve Ömer Çağan'a sonsuz teşekkür ederim.

Bu çalışma Atatürk Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi'nce desteklenmiştir (Proje No:2019/7087). Atatürk Üniversitesi BAP birimine teşekkürlerimi sunarım.

Sedat AKMEŞE

ÖZET

DOKTORA TEZİ

FOTOVOLTAİK TERMAL (PV/T) SİSTEM DESTEKLİ ISI POMPASININ KULLANIMI İLE SÜTÜN PASTÖRİZE EDİLMESİ

Sedat AKMEŞE

Danışman: Prof. Dr. Ömer ÇOMAKLI

İkinci Tez Danışmanı: Doç. Dr. Gökhan ÖMEROĞLU

Amaç: Bu çalışmada, monokristal fotovoltaik panelin güneş ışınım değeriyle artan yüzey sıcaklığı, arkasına yerleştirilen bakır borular içerisinden geçen suya ısısını aktarmak suretiyle düşürülmüştür. Çalışmanın amacı, panelin soğuması sağlanarak, elektrik üretimini artırmaya çalışmak, bunu yaparken de ısı enerjisini sütün pastörizasyonu için faydalanabilir hale getirerek gerekli enerjinin bir kısmını PV/T sistemden karşılamak, pastörizasyon süresini kısaltarak birim süt başına pastörizasyon için harcanan enerji miktarını azaltmak, sistem verimliliğini artırmak ve verimlilik performansları üzerine odaklanmaktır.

Yöntem: Peynire işlenecek sütü pastörize etmek amacıyla mekanik buhar çevrimi prensibine göre çalışan, dört geçişli ekonomizör ve PV/T panel ile desteklenen bir ısı pompası sistemi kurulmuştur. PV/T destekli ısı pompasında pastörize edilen sütün enerji gereksinimleri belirlenmiş, 20 °C, 25 °C, 30 °C süt giriş sıcaklığı ve 120 lt/h, 150 lt/h süt debisi gibi farklı parametrelerinin sistem üzerine etkileri incelenmiştir. 800 W/m², 1000 W/m², 1200 W/m² ışınım değerleri, 700 lt/h ve 600 lt/h panel su debisi parametrelerine göre PV/T sistem analizleri yapılmıştır. Fotovoltaik-termal ısı pompası sistemi klasik yöntemlerle karşılaştırılmıştır.

Bulgular: Yapılan çalışmada, PV/T desteğinin ve çiğ süt debisinin 120 lt/h değerinden 150lt/h değerine çıkarılmasının toplam pastörizasyon süresini azalttığı, panel su debisinin artırılması ile termal verimin arttığı belirlenmiştir.

Sonuç: Deneyler sonucunda, PV/T destekli ısı pompası sisteminin daha önce kurulan çift cidarlı kazan sisteminden %73,3, plakalı pastörizer sisteminden %60,7, ısı pompası sisteminden ise %25,5 daha az enerji harcadığı belirlenmiştir. Sütün pastörizasyonu için kurulan ısı pompası sisteminin, PV/T sistem ile desteklenmesinin kg süt başına harcanan enerji miktarında %8,8 düşüş sağladığı belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Yenilenebilir enerji, Güneş enerjisi, Isı pompası, Fotovoltaik termal, Pastörizasyon.

Mart 2021, 129 sayfa

ABSTRACT

DOCTORAL DISSERTATION

PASTEURIZATION OF MILK BY USING PHOTOVOLTAIC THERMAL (PV/T) SYSTEM ASSISTED HEAT PUMP

Sedat AKMEŞE

Supervisor: Prof. Dr. Ömer ÇOMAKLI

Co-supervisor: Assoc. Prof. Dr. Gökhan ÖMEROĞLU

Purpose: In this study, the surface temperature increased with the solar irradiance value of the monocrystalline photovoltaic panel was decreased by transferring its heat to the water passing through the copper pipes placed behind it. The aim of the study is to try to increase the electricity generation by ensuring the cooling of the panel, and while doing this, to make the thermal energy available for the pasteurization of milk, to meet some of the required energy from the PV/T system, to reduce the amount of energy consumed for pasteurization per unit of milk by shortening the pasteurization period, to increase system efficiency and to focus on efficiency performances.

Method: A heat pump system assisted by a four-pass economizer and a PV/T panel was installed in order to pasteurize milk to be processed into cheese. Energy requirements of the pasteurized milk in the PV/T supported heat pump were determined, and the effects of different parameters such as 20 °C, 25 °C, 30 °C milk inlet temperature and 120 lt/h, 150 lt/h milk flow rate in the system were investigated. PV/T system analyzes were performed according to the parameters of 800 W/m², 1000 W/m², 1200 W/m² radiation, 700 lt/h and 600 lt/h panel water flow rate. The photovoltaic-thermal assisted heat pump system has been compared with conventional methods.

Findings: In the study, it has been determined that the PV/T support and increasing raw milk flow rate from 120 lt/h to 150lt/h decrease the total pasteurization time, the thermal efficiency rises by increasing the panel water flow.

Results: As a result of the experiments, it has been found out that the PV/T assisted heat pump system consumes 73,3% less energy than the previously installed double-walled boiler system, 60,7% less than the plate pasteurizer system and 25,5% less than the heat pump system. It has been determined that supporting the heat pump system established for pasteurization of milk with PV/T system provides 8,8% reduction in the amount of energy consumed per kg milk.

Keywords: Renewable energy, Solar energy, Heat pump, Fotovoltaic thermal, Pasteurization.

March 2021, 129 pages

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY TUTANAĞI.....	i
ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU	ii
TEŞEKKÜR	iii
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
İÇİNDEKİLER.....	vi
TABLolar DİZİNİ.....	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ	ix
KISALTMALAR ve SİMGELER DİZİNİ	xv
GİRİŞ.....	1
Motivasyon.....	1
Tezin Amacı.....	10
KURAMSAL TEMELLER.....	12
Isı pompası/Pastörizasyon Literatür Taraması	12
PV/T Sistemleri Literatür Taraması	16
Fotovoltaik Sistemler	21
Fotovoltaik hücre	22
P tipi yarı iletken madde	26
N tipi yarı iletken madde.....	27
P-n eklemi	28
PV elektrik devre eşitliği.....	30
PV/T Sistemleri.....	31
Isı Pompası Sistemleri.....	34
Pastörizasyon	39
Düşük sıcaklıkta uzun süreli pastörizasyon (LTLT).....	40
Yüksek sıcaklıkta kısa süreli pastörizasyon (HTST)	41
MATERYAL ve YÖNTEM	43
Deney Düzenegi	43
Gaz devresi.....	46
Süt devresi.....	53

Su devresi	60
Isı pompası deneysel verilerin değeriendirilmesi.....	65
Belirsizlik Analizi	67
ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA	68
Deneysel Ölçümler.....	68
SONUÇ ve ÖNERİLER	103
Sonuçlar.....	103
Öneriler	104
KAYNAKLAR.....	106
ÖZGEÇMİŞ.....	110



TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 1. 2017-2019 Yılları Dünya Süt Üretimi ve Ticareti.....	1
Tablo 2. 2017-2018 Süt Üretiminde Öne Çıkan Ülkeler	1
Tablo 3. Temel Güneş Hücreleri ve Verimlilikleri Tablosu	24
Tablo 4. Sütün Fiziksel Özellikleri	40
Tablo 5. Bazı Soğutucu Akışkanlar ve Bu Akışkanlara Ait Karakteristik Özellikler	47
Tablo 6. R-134a Gazının Fiziksel Özellikleri	47
Tablo 7. Kompresöre Ait Teknik Veriler.....	49
Tablo 8. Kondenser ve Evaporatöre Ait Teknik Veriler.....	52
Tablo 9. Plakalı Eşanjör Özellikleri.....	56
Tablo 10. Süt Pompası Özellikleri.....	56
Tablo 11. PT-100 Sıcaklık Sensörü Teknik Özellikleri.....	59
Tablo 12. Monokristal Fotovoltaik Panel Teknik Özellikleri.....	61
Tablo 13. Boyler Teknik Özellikleri.....	63
Tablo 14. Data Logger Teknik Özellikleri.....	64
Tablo 15. Piranometre Teknik Özellikleri	65
Tablo 16. Konvansiyonel Sistemlerde Kullanılan Motorların Cosφ Güç Katsayı Değerleri ..	65
Tablo 17. Değişken Ölçüm Belirsizlikleri	67

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. 2017 yılı Global birincil enerji tüketimi	3
Şekil 2. Türkiye'nin 2018 yılı enerji üretim miktarlarının kaynak bazında dağılımları	4
Şekil 3. Türkiye'nin 2018 yılı ithal enerji miktarlarının kaynak bazında dağılımları.....	5
Şekil 4. Dünya'da fosil yakıt rezervlerinin kalan ömürleri	5
Şekil 5. Yenilenebilir enerji kaynaklarının bölgelere göre toplam kapasite içindeki oranları 2019-2040	6
Şekil 6. Ülkelerin 2020 yılı yenilenebilir enerji hedefleri (%).....	7
Şekil 7. 2017 yılı yenilenebilir enerji kaynaklarının tüketimdeki payları ve sektörel kullanımı	7
Şekil 8. 2018 Global PV kapasitesi	8
Şekil 9. 2015 yılı iklim bölgelerine göre cihaz seçimi.	10
Şekil 10. 2007-2017 yılları arasında dünyada güneş enerjisi yatırım miktarlarındaki değişim grafiği	22
Şekil 11. Silisyum bazlı güneş pil üretim dağılımı	23
Şekil 12. Tipik monokristal silikon – polikristal silikon hücre resimleri	23
Şekil 13. Monokristal polikristal silikon hücre oluşumu	25
Şekil 14. Hücre – Modül- Panel- Yüzey oluşumu.....	26
Şekil 15. Fotovoltaik modül seri ve paralel bağlantı çizimi.....	26
Şekil 16. P tipi yarı iletken madde oluşumu.....	27
Şekil 17. N tipi yarı iletken madde oluşumu	28
Şekil 18. PN yapısının oluşumu	29
Şekil 19. PN birleşiminin denge iletimi	29
Şekil 20. Fotovoltaik etki şematik gösterim.....	30
Şekil 21. PV elektrik devre çizimi	30
Şekil 22. I-V-P (Akım-Voltaj- Güç) Eğrisi	31
Şekil 23. PV/T panel üç boyutlu çizimi ve kesiti	32
Şekil 24. PV/T Sistemi ile termal enerji üretim şematik çizimi.....	33
Şekil 25. Isı pompası ve ısı makinası çevrimi	35
Şekil 26. Carnot ısı pompası çevrimi P-v, T-s diyagramı).....	36
Şekil 27. Mekanik buhar çevrimine göre çalışan ısı pompası çevrimin şematik resmi	36
Şekil 28. İdeal buhar sıkıştırırmalı ısı pompasına ait T-s diyagramı	37

Şekil 29. İdeal buhar sıkıştırırmalı ısı pompasına ait P-h diyagramı.....	38
Şekil 30. Gerçek buhar sıkıştırma çevrimi P-h diyagramı).....	39
Şekil 31. Düşük sıcaklıkta uzun süreli pastörizasyon (LTLT) sistem üç boyutlu çizimi.....	40
Şekil 32. Yüksek sıcaklıkta kısa süreli pastörizasyon (HTST) çizimi	41
Şekil 33. Sütün pastörizasyonunda kullanılan PV/T sistem resmi.....	43
Şekil 34. Sütün pastörizasyonunda kullanılan PV/T sistem iki boyutlu çizimi	44
Şekil 35. PV/T destekli ısı pompası sistemi genel görünüm fotoğrafı.....	44
Şekil 36. PV/T destekli ısı pompası sistemi iki boyutlu çizimi	45
Şekil 37. Gaz devresi akış şeması iki boyutlu çizimi.....	48
Şekil 38. Sistemde kullanılan kompresör fotoğrafı.....	49
Şekil 39. Kondenser ve evaporatör akış şeması üç boyutlu çizimi	50
Şekil 40. Sistemde kullanılan genleşme vanası.....	50
Şekil 41. Genleşme vanasının yapısı.....	51
Şekil 42. Kondenser ve evaporatör teknik data iki boyutlu çizimi	51
Şekil 43. Sıvı tankı çalışma prensibi	52
Şekil 44. Isı pompası sisteminde kullanılan filtre dryer (kurutucu) fotoğrafları.....	53
Şekil 45. Süt devresi genel görünüm fotoğrafı.....	54
Şekil 46. Dört geçişli plakalı eşanjör fotoğrafı	55
Şekil 47. Dört geçişli plakalı eşanjör üç boyutlu çizimi ve akış şeması	55
Şekil 48. Paslanmaz çelik süt pompası fotoğrafı.....	57
Şekil 49. Servomotorlu üç yollu vana fotoğrafı	58
Şekil 50. Balans (Çiğ Süt) ve pastörize süt tankı fotoğrafları	58
Şekil 51. PT-100 sıcaklık sensör fotoğrafları.....	59
Şekil 52. Manyetik indüktif akış sensör fotoğrafı	60
Şekil 53. Sistemde kullanılan sirkülasyon pompa fotoğrafları.....	61
Şekil 54. Monokristal fotovoltaiik panel resmi	62
Şekil 55. Monokristal fotovoltaiik panel borulama düzeni ve kesiti.....	62
Şekil 56. Boyler üç boyutlu çizimi ve bağlantı şeması resmi	63
Şekil 57. Data logger katalog resmi ve fotoğrafı	64
Şekil 58. Piranometreye ait katalog fotoğrafı.....	64
Şekil 59. 800/1000/1200 W/m ² ışıınım altında PV panel voltaj-hücre sıcaklığı değişim grafığı	69
Şekil 60. 800/1000/1200 W/m ² ışıınım altında PV/T sistem voltaj-hücre sıcaklığı değişim grafığı	69
Şekil 61. 800/1000/1200 W/m ² ışıınım altında PV panel voltaj-süre değişim grafığı	70

Şekil 62. 800/1000/1200 W/m ² ışıınım altında PV/T sistem voltaj-süre değişim grafiği	71
Şekil 63. 800/1000/1200 W/m ² ışıınım altında PV/T termal kapasite-süre değişim grafiği	71
Şekil 64. 800/1000/1200 W/m ² ışıınım altında PV/T termal verim-süre değişim grafiği	72
Şekil 65. 1200 W/m ² ışıınım altında 700 lt/h-600 lt/h debi parametrelerine göre boyler su sıcaklığı-süre değişim grafiği	73
Şekil 66. 1200 W/m ² ışıınım altında 700 lt/h-600 lt/h debi parametrelerine göre termal kapasite-süre değişim grafiği	73
Şekil 67. 1200 W/m ² ışıınım altında 700 lt/h-600 lt/h debi parametrelerine göre termal verim-süre değişim grafiği	74
Şekil 68. 800/1000/1200 W/m ² ışıınım altında fotovoltaiik panel elektriksel verim-hücre sıcaklığı değişim grafiği	75
Şekil 69. 20 °C iğ süt sıcaklığı parametresine göre yapılan deneyde, ölçülen süt sıcaklığları-süre değişim grafiği	76
Şekil 70. 25 °C iğ süt sıcaklığı parametresine göre yapılan deneyde, ölçülen süt sıcaklığları-süre değişim grafiği	76
Şekil 71. 30°C iğ süt sıcaklığı parametresine göre yapılan deneyde, ölçülen süt sıcaklığları-süre değişim grafiği	77
Şekil 72. 20 °C, 25 °C, 30 °C iğ süt sıcaklığı parametrelerine göre yapılan deneylerde, ölçülen süt sıcaklığlarının değişim grafiği	77
Şekil 73. 20 °C iğ süt sıcaklığı parametresine göre yapılan deneyde, ölçülen ısı pompası su devresi sıcaklığları-süre değişim grafiği	78
Şekil 74. 25 °C iğ süt sıcaklığı parametresine göre yapılan deneyde, ölçülen ısı pompası su devresi sıcaklığları-süre değişim grafiği	79
Şekil 75. 30 °C iğ süt sıcaklığı parametresine göre yapılan deneyde, ölçülen ısı pompası su devresi sıcaklığları-süre değişim grafiği	79
Şekil 76. 20 °C, 25 °C, 30 °C iğ süt sıcaklığı parametrelerine göre yapılan deneylerde, ölçülen ısı pompası su devresi sıcaklığlarının değişim grafiği	80
Şekil 77. 20 °C iğ süt sıcaklığı parametresine göre yapılan deneyde, ölçülen ısı pompası gaz devresi sıcaklığları-süre değişim grafiği	81
Şekil 78. 25 °C iğ süt sıcaklığı parametresine göre yapılan deneyde, ölçülen ısı pompası gaz devresi sıcaklığları-süre değişim grafiği	81
Şekil 79. 30 °C iğ süt sıcaklığı parametresine göre yapılan deneyde, ölçülen ısı pompası gaz devresi sıcaklığları-süre değişim grafiği	82
Şekil 80. 20 °C, 25 °C, 30 °C iğ süt sıcaklığı parametrelerine göre yapılan deneylerde, ölçülen ısı pompası gaz devresi sıcaklığları değişim grafiği	82

Şekil 81. 20 °C çiğ süt sıcaklığı parametresine göre yapılan deneyde, ölçülen ısı pompası gaz devresi basınç değerleri-süre değişim grafiği.....	83
Şekil 82. 25 °C çiğ süt sıcaklığı parametresine göre yapılan deneyde ölçülen ısı pompası gaz devresi basınç değerleri-süre değişim grafiği.....	84
Şekil 83. 30 °C çiğ süt sıcaklığı parametresine göre yapılan deneyde, ölçülen ısı pompası gaz devresi basınç değerleri-süre değişim grafiği.....	84
Şekil 84. 20 °C, 25 °C, 30 °C çiğ süt sıcaklığı parametrelerine göre yapılan deneylerde, ölçülen ısı pompası gaz devresi basınç değerleri değişim grafiği.....	85
Şekil 85. 20 °C çiğ süt sıcaklığı parametresine göre yapılan deneyde, hesaplanan kondenser, evaporatör ve plakalı eşanjörde sağlanan enerji miktarları-süre değişim grafiği ...	86
Şekil 86. 25 °C çiğ süt sıcaklığı parametresine göre yapılan deneyde, hesaplanan kondenser, evaporatör ve plakalı eşanjörde sağlanan enerji miktarları-süre değişim grafiği ...	86
Şekil 87. 30 °C çiğ süt sıcaklığı parametresine göre yapılan deneyde, hesaplanan kondenser, evaporatör ve plakalı eşanjörde sağlanan enerji miktarları-süre değişim grafiği ...	87
Şekil 88. 20 °C, 25 °C, 30 °C çiğ süt sıcaklığı parametrelerine göre yapılan deneylerde, hesaplanan kondenser, evaporatör ve plakalı eşanjörde sağlanan enerji miktarları değişim grafiği	87
Şekil 89. 20 °C çiğ süt sıcaklığı, 120-150 lt/h süt debileri parametrelerine göre PV/T destekli yapılan deneylerde, ölçülen mayalanma ve pastörizasyon sıcaklıkları-süre değişim grafiği.....	88
Şekil 90. 20 °C çiğ süt sıcaklığı, 120-150 lt/h süt debileri parametrelerine göre PV/T destekli yapılan deneylerde, ölçülen mayalanma ve pastörizasyon sıcaklıklarının değişim grafiği	88
Şekil 91. 20 °C çiğ süt sıcaklığı, 120-150 lt/h süt debileri parametrelerine göre PV/T destekli yapılan deneylerde, ölçülen ısı pompası su devresi sıcaklıkları-süre değişim grafiği	89
Şekil 92. 20 °C çiğ süt sıcaklığı, 120-150 lt/h süt debileri parametrelerine göre PV/T destekli yapılan deneylerde, ölçülen ısı pompası su devresi sıcaklıklarının değişim grafiği	90
Şekil 93. 20 °C çiğ süt sıcaklığı, 120-150 lt/h süt debileri parametrelerine göre PV/T destekli yapılan deneylerde, ölçülen ısı pompası gaz devresi sıcaklıkları-süre değişim grafiği	91
Şekil 94. 20 °C çiğ süt sıcaklığı, 120-150 lt/h süt debileri parametrelerine göre PV/T destekli yapılan deneylerde, ölçülen ısı pompası gaz devresi sıcaklıklarının değişim grafiği	91

Şekil 95. 20 °C çiğ süt sıcaklığı 120-150 lt/h süt debileri parametrelerine göre PV/T destekli yapılan deneylerde, ölçülen ısı pompası gaz devresi basınç değerleri-süre değişim grafiği.....	92
Şekil 96. 20 °C çiğ süt sıcaklığı 120-150 lt/h süt debileri parametrelerine göre PV/T destekli yapılan deneylerde, ölçülen ısı pompası gaz devresi basınç değerlerinin değişim grafiği.....	93
Şekil 97. 20 °C çiğ süt sıcaklığı, 150 lt/h süt debisi parametrelerine göre yapılan deneyde, hesaplanan kondenser, evaporatör ve plakalı eşanjörde sağlanan enerji miktarları-süre değişim grafiği.....	94
Şekil 98. 20 °C çiğ süt sıcaklığı, 120-150 lt/h süt debileri parametrelerine göre yapılan deneylerde, hesaplanan kondenser, evaporatör ve plakalı eşanjörde sağlanan enerji miktarlarının değişim grafiği	94
Şekil 99. 20 °C çiğ süt giriş sıcaklığı, 120 lt/h-150 lt/h süt debisi parametrelerine göre yapılan deneylerde, hesaplanan PV/T destekli ısı pompası ısıtma tesir (performans) katsayısı değerleri-süre değişim grafiği	95
Şekil 100. 120 lt/h süt debisi, 20 °C çiğ süt giriş sıcaklığı parametrelerine göre PV/T destekli-PV/T desteksiz yapılan deneylerde, hesaplanan ısı pompası ısıtma tesir (performans) katsayısı değerleri-süre değişim grafiği	96
Şekil 101. 120 lt/h süt debisi, 20 °C ve 30 °C çiğ süt giriş sıcaklıkları parametrelerine göre yapılan deneylerde, hesaplanan ısı pompası ısıtma tesir (performans) katsayısı değerleri-süre değişim grafiği	97
Şekil 102. 20 °C çiğ süt giriş sıcaklığı, 120 lt/h-150 lt/h süt debisi parametrelerine göre yapılan deneylerde, hesaplanan PV/T destekli ısı pompası sistem performans katsayısı değerleri-süre değişim grafiği	98
Şekil 103. 120 lt/h süt debisi, 20 °C çiğ süt giriş sıcaklığı parametrelerine göre PV/T destekli-PV/T desteksiz yapılan deneylerde hesaplanan ısı pompası sistem performans katsayısı değerleri-süre değişim grafiği	98
Şekil 104. 120 lt/h süt debisi, 20 °C ve 30 °C çiğ süt giriş sıcaklıkları parametrelerine göre yapılan deneylerde, hesaplanan ısı pompası sistem performans katsayısı değerleri-süre değişim grafiği	99
Şekil 105. 20 °C çiğ süt giriş sıcaklığı, 120 lt/h-150 lt/h süt debisi parametrelerine göre yapılan deneylerde, hesaplanan PV/T destekli sistem toplam performans katsayısı değerleri-süre değişim grafiği	100

Şekil 106. 120 lt/h süt debisi, 20 °C çiğ süt giriş sıcaklığı parametrelerine göre PV/T destekli-PV/T desteksiz yapılan deneylerde, hesaplanan sistem toplam performans katsayısı değerleri-süre değişim grafiği.....	101
Şekil 107. 120 lt/h süt debisi, 20 °C ve 30 °C çiğ süt giriş sıcaklıkları parametrelerine göre yapılan deneylerde, hesaplanan sistem toplam performans katsayısı değerleri-süre değişim grafiği	101
Şekil 108. 1 kg sütün pastörizasyonu için harcanan enerji miktarlarının konvansiyonel sistemler ile karşılaştırması	102



KISALTMALAR ve SİMGELER DİZİNİ

A	: Alan (m^2)
AC	: Alternatif akım
Ah	: Amper saat
AISI	: Amerikan Demir ve Çelik Enstitüsü
a-Si	: Amorf silikon
c_p	: Özgül ısı ($kJ/kg\ K$)
CAD	: Bilgisayar destekli tasarım
CFC	: Kloroflorokarbon
COP	: Isıtma tesir (performans) katsayısı
Cz-Si	: Monokristalin silikon
DC	: Doğru akım
E_f	: Foton Enerjisi
EİGM	: Enerji İşleri Genel Müdürlüğü
EPDM	: Etilen propilen (dien) terpolimer
ETKB	: Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı
FAO	: Birleşmiş Milletler Gıda ve Tarım Örgütü
G	: Işınım miktarı (W/m^2)
h	: Özgül entalpi (kJ/kg)
HCFC	: Hidrokloroflorokarbon
HTST	: Yüksek sıcaklıkta kısa süreli pastörizasyon
I	: Akım (amper)
IEA	: Uluslararası Enerji Ajansı
IDF	: Uluslararası Sütçülük Federasyonu
IRENA	: Uluslararası Yenilenebilir Enerji Ajansı
LTLT	: Düşük sıcaklıkta uzun süreli pastörizasyon
M	: Pastörize edilen süt miktarı (kg)
$\dot{m}$	: Kütleli debi (kg/s)
mc-Si	: Polikristal silikon
MTOE	: Milyon ton eşdeğer petrol
$\dot{N}$	: Çekilen elektriksel güç (Kw)
P	: Güç (Watt)

p	: Basınç (bar)
pH	: Asitlik derecesi
PV	: Fotovoltaik
PV/T	: Fotovoltaik/Termal
q	: Birim kütle için harcanan enerji (kJ/kg)
Q	: Isı kapasitesi (Kw)
R	: Direnç
rpm	: Dakikada devir sayısı
s	: Özgül entropi (kJ/kg K)
SHC	: Güneş Enerjisi ile Isıtma ve Soğutma Teknolojisi İşbirliği Programı
SPTK	: Sistem toplam performans katsayısı
t	: Süre (dk.)
T	: Sıcaklık (°C)
TSEK	: Türk Standardları Enstitüsü
v	: Hacim
V	: Gerilim (volt)
W	: Harcanan Elektrik Enerjisi (kW)
WEO	: Dünya Enerji Görünümü
λ	: Kompresör emme oranı
η	: Verim
ν	: Özgül hacim (m ³ /kg)
ρ	: Yoğunluk (kg/m ³)
Cos ϕ	: Motor güç katsayısı
ε	: Etkinlik katsayısı

İndisler

car	: Carnot
col	: Kollektör
ç	: Çiğ süt
çk	: Çıkış
dep	: Deplasman
E	: Eşanjör
el	: Elektriksel
evap	: Evaporatör
g	: Giriş

H	: Yüksek
HX	: Isı değiştiricisi
ıp	: Isı pompası
komp	: Kompresör
kond	: Kondenser
L	: Düşük
max	: Maksimum
mp	: Nominal
pomp	: Sirkülasyon pompası
s	: Güneş
S	: Seri
sc	: Kısa devre
Sh	: Paralel
sis	: Sistem
st	: Süt
su	: Su
th	: Termal
T	: Toplam

GİRİŞ

Motivasyon

Süt, insanın doğumdan itibaren aldığı ve hayat boyunca sürekli tükettiği en önemli besin kaynaklarından biridir. Çiğ süt çeşitli makro besin bileşenleri (karbonhidratlar, yağ ve proteinler), mikro bileşenleri (vitaminler, aminoasitler ve mineraller), yüksek su aktivitesi ve nötre yakın pH'ı (6,4-6,8) sebebi ile mikrobiyal kontaminasyona açık bir üründür (Quigley *et al.* 2013). Çiğ sütün direk tüketilmesi, tehlikeli mikroorganizmaları barındırabileceğinden uygun değildir. Süte ısıt işlemler uygulanarak patojenlerden arınmış, tüketim açısından güvenilir ve belirli süre depolanabilir bir ürün elde edilirken, duyu nitelikleri ve besin bileşenlerinin de maksimum seviyede korunması önemlidir. 2018 yılında dünyada tahmini 843,2 milyon ton olan süt üretiminin 2019 yılında %1,9 artarak 859 milyon ton olması tahmin edilmiştir (FAO 2019b). Tablo 1'de 2017-2019 yılları arasında Dünya süt üretimi ve ticareti gösterilmiştir.

Tablo 1. 2017-2019 Yılları Dünya Süt Üretimi ve Ticareti (FAO 2019b)

	Dünyada Süt Üretimi ve Ticareti (Milyon ton)			
	2017	2018	2019	2018/2019
Dünya Toplam Süt Üretimi	824,8	843,2	859	%1,9 Değişim
Toplam Ticaret	72,7	74,7	76,1	%1,8 Değişim

2018 yılındaki küresel süt üretiminin 2017 yılına göre %2 artışının en önemli nedenleri Hindistan ve Pakistan süt toplama süreçlerindeki iyileştirme ve Türkiye'deki entegre süt üretim tesislerinde verimlilik artışı olmuştur. Türkiye 2018 yılında 22,79 milyon ton süt üretimi ile Avrupa'nın üçüncü, dünyanın ise sekizinci büyük süt üreticisi olmuştur. (FAO 2019a). 2017-2018 yılları arasında dünyada süt üretiminde öne çıkan ülkeler Tablo 2'de gösterilmiştir.

Tablo 2. 2017-2018 Süt Üretiminde Öne Çıkan Ülkeler (FAO 2019a)

	Dünya Süt Üretimi (Milyon ton)			
	2017	2018	2017/2018	
Dünya Toplam Süt Üretimi	824 801	842 989	%2,2	Değişim
Hindistan	176 272	186 143	%5,6	Değişim
Avrupa Birliği	165 600	167 256	%1	Değişim
Amerika Birleşik Devletleri	97 735	98 646	%0,9	Değişim
Pakistan	44 294	45 623	%3	Değişim

Tablo 2. (devamı)

Brezilya	35 257	35 539	%0,8	Değişim
Çin	31 958	31 592	%-1,1	Değişim
Rusya	31 184	31 527	%1,1	Değişim
Türkiye	20 700	22 791	%10,1	Değişim
Yeni Zelenda	21 341	21 372	%0,1	Değişim

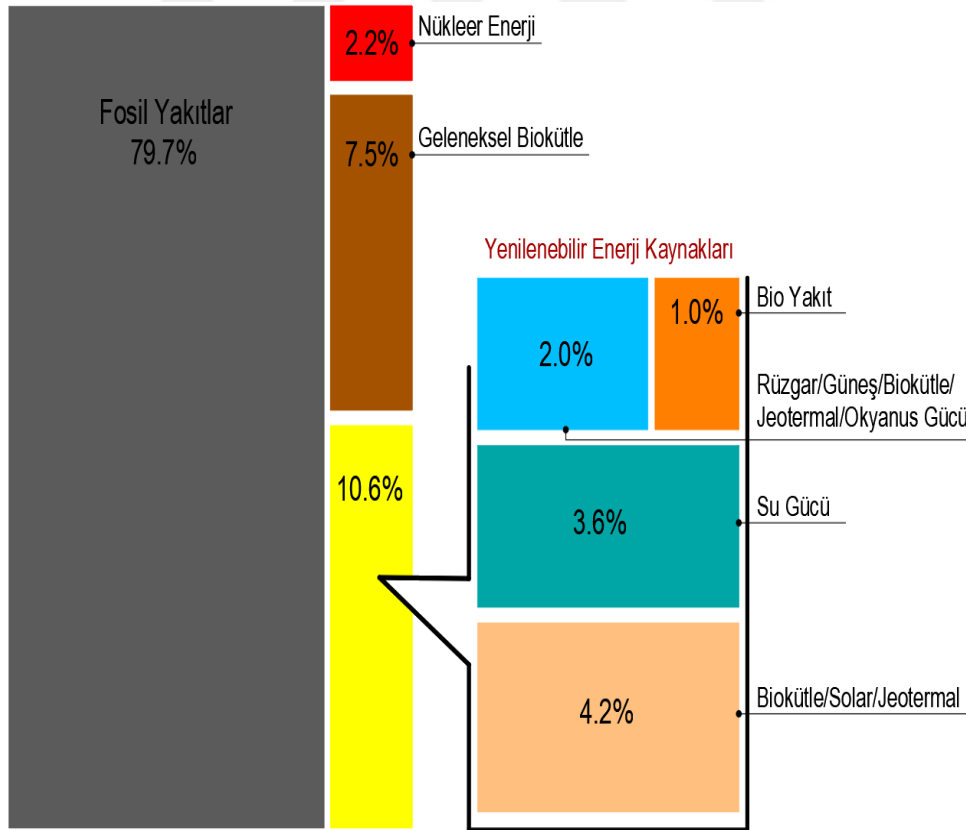
Sütün sağımdan sonra direk tüketilmesi mümkün değildir. Çeşitli nedenlerle sütte bulunması muhtemel bozucu ve hastalık yapıcı mikroorganizmaların uzaklaştırılması gerekir. Süte belli sıcaklık ve süre normlarında ısıtılma işlemi uygulanması hem halk sağlığı hem de ürünün bozulmadan depolanabilmesi açısından şarttır ve bu işlem için bir enerji sarfıyatı söz konusudur. Tüketim potansiyeli yüksek ve değerli bu gıdanın daha etkili ve verimli sistemlerle işlenip, tüketiciye sunulması hem enerji maliyetlerini düşürme hem de çevreye asgari zarar vermesi açısından önemlidir. Pastörize süt direk tüketilen bir besin olması yanı sıra peynir, yoğurt gibi süt ürünlerinin hammaddesi olmakla birlikte, gıda sanayinin diğer alanları için de önemli bir yardımcı bileşendir. Süt pastörizasyonu çiğ sütün, 100 °C'nin altındaki sıcaklıklarda patojenlerin tamamının yok edilmesi işlemidir (Robinson 2002).

Pastörizasyon; çok çeşitli gıda ürünlerinde kullanılan bir ısıtılma işlemidir. Pastörizasyon, ürün (süt) ile ilişkili patojenik mikroorganizmalardan kaynaklanan olası sağlık tehlikelerini en aza indirmek amacıyla bir ürüne uygulanan, uygulanırken üründeki minimum kimyasal, fiziksel ve organoleptik değişiklikler amaçlanan bir işlemdir (International Dairy Federation IDF 1986). Pastörizasyonun iki temel amacı, patojenik bakterileri gıdalardan uzaklaştırmak, böylece hastalığı önlemek ve kalitesini korumak için bozulmaya (ekşime) neden olan bakterileri uzaklaştırmaktır. 1857 yılında Louis Pasteur tarafından yapılan keşif ile sütün 50 °C-61 °C sıcaklıklarında ısıtılarak sütteki bozulma süresi ertelenmesine rağmen, o yüzyılın sonuna kadar bozulmalara neden olan etken maddeler kesin olarak tespit edilememiştir. 1895 yılına kadar belirli bir miktarda sütün, belirli bir sıcaklıkta, belirli bir süre ısıtıldığı durumlarda güvence altına alınabileceği kabul edilmiştir. 1927 yılında North ve Park, tüberkü basili inaktive etmek için, 60 dakika boyunca 54 °C, 10 saniye boyunca 100 °C arasında değişen çok çeşitli zaman-sıcaklık koşulları oluşturmuşlardır. Isıl işlemlerin etkinliği, aşılama yöntemiyle tüberkü organizmaları enfekte edilmiş süt numuneleri üzerinde farklı zaman-sıcaklık kombinasyonlarına tabi tutularak belirlenmiştir (Brennan *et al.* 2006). Pastörizasyon prosesinde süt, pastörizasyon sıcaklığına kadar ısıtılıp, ürün işleme sıcaklığına kadar soğutulmaktadır. Pastörizasyon işleminde, ısıtma ve soğutma işlemine ihtiyaç duyulmaktadır. Pastörizasyon prosesinde, ısıtma ve soğutma işlemleri aynı süreçte yapılmaktadır (Bergmans 1981). Pastörizasyon uygulamalarında, soğutma, ısıtma ve pastörize süt ile çiğ süt arasındaki ısı geçişinin sağlandığı rejenerasyon (ısı değiştiricisi) bölümleri vardır. Plakalı ısı eşanjörleri,

1923 yılında süt pastörizasyon uygulamaları için piyasada kullanılmaya başlanmıştır (Shah and Sekulic 2003).

Enerji, insan yaşamının temelini oluşturur. Enerji, tüm canlıların büyüme ve hayatta kalma süreçlerinde hayati önem taşımakla birlikte, bir ülkenin sosyo-ekonomik kalkınmasında ve insan refahında temel bir rol oynar. İlk çağlarda insan önce kas gücünü, sonra ateş ve hayvan gücünü kullanmıştır. Daha sonra, insan enerjiden yararlanmayı, faydalı forma dönüştürmeyi ve çeşitli kullanımlara uygulamayı öğrenmiştir. Gelişimine bu şekilde başlayan enerji son on yıllarda teknolojinin ve ekonomik kalkınmanın belkemiği haline gelmiştir. Sanayi devrimini izleyen yıllarda enerji ihtiyacı artmıştır.

Günümüzde ise artan talebi karşılamak ve gelecek nesiller için sınırlı doğal kaynaklarımızı korumak için yenilenebilir enerji kaynaklarına yoğunlaşmak günümüz dünyasının en önemli sorumluluğu haline gelmiştir. Günümüzde, dünya mevcut enerji ihtiyacının %80'ine yakını kömür, petrol ve doğal gaz olmak üzere fosil yakıtlar ile karşılamaktadır (Sumathi *et al.* 2015). Dünya'da kaynak bazında birincil enerji tüketimi Şekil 1'de gösterilmiştir.

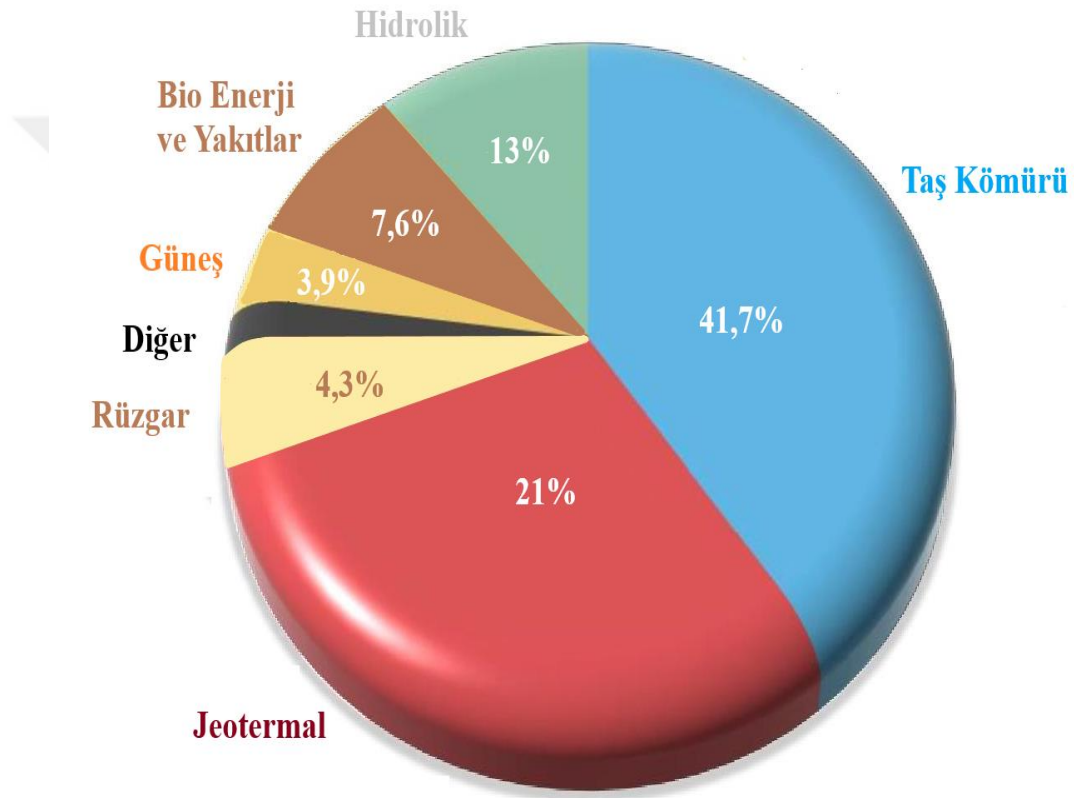


Şekil 1. 2017 yılı Global birincil enerji tüketimi (IEA 2019).

Günümüzde faydalanılan ve kullanım alanları artan teknoloji ve ihtiyaca göre genişleyen yenilenebilir enerji kaynakları güneş enerjisi, rüzgâr enerjisi, jeotermal enerji, hidrolik enerji, biyokütle enerjisi ve hidrojen enerjisi olarak sıralanmaktadır. Yenilenebilir

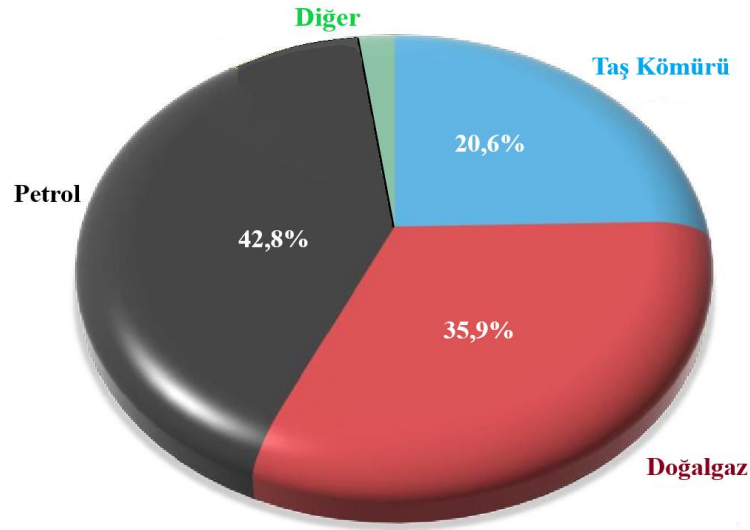
enerji kaynaklarının daha az karbon salınımına sahip olması, kolay ulaşılabilir olması, giderek düşen yatırım maliyetleri ile birlikte kullanımı çok hızlı şekilde yaygınlaşmaktadır.

Ülkemiz için önemli olan cari açığın nedenlerinden enerji ithalatı bağımlılığını azaltmak, doğada bol ve ucuz olan yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımının artırılması ile mümkün olacaktır. Enerji İşleri Genel Müdürlüğü (EİGM)’nin 2018 yılı Ulusal Enerji Denge Tablosuna göre Türkiye’nin toplam enerji üretimi kaynak bazında incelendiğinde ilk sırayı %41,7’lik pay ile taş kömür kaynaklarının aldığı, yenilebilir enerji kaynaklarının %49,8’lik paya sahip olduğu görülmektedir (Anonim 2019a). Türkiye’nin 2018 yılı enerji üretimi miktarlarının kaynak bazında payları Şekil 2’de gösterilmiştir.



Şekil 2. Türkiye’nin 2018 yılı enerji üretim miktarlarının kaynak bazında dağılımları (Anonim 2019a).

Türkiye’nin toplam ithal ettiği enerji miktarı kaynak bazında incelendiğinde ise ilk sırayı %42,8’lik pay ile petrolün aldığı, petrolü %35,9’lık pay ile doğalgazın ve %20,6’lik pay ile taş kömürünün takip ettiği görülmektedir. Türkiye’nin 2018 yılı ithal ettiği enerji miktarlarının kaynak bazında payları Şekil 3’de gösterilmiştir.



Şekil 3. Türkiye'nin 2018 yılı ithal enerji miktarlarının kaynak bazında dağılımları (Anonim 2019a).

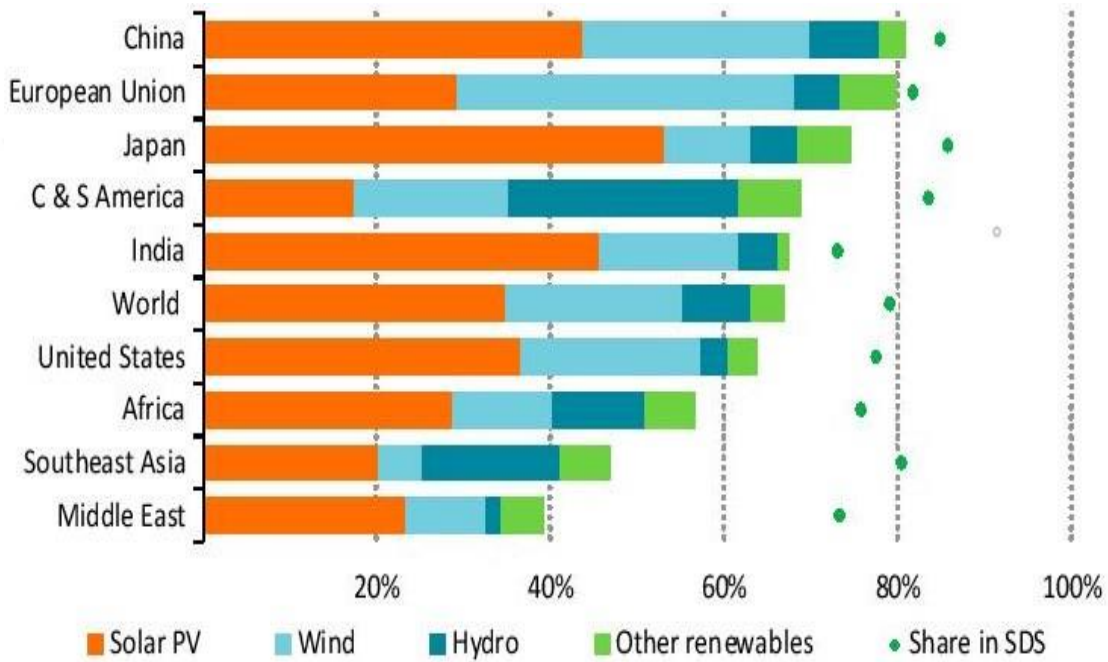
Yenilenebilir enerji doğadan temin edilen, yenilenme hızı tüketim hızından çok daha fazla olan ve kullanımı sonucu tükenmesi mümkün olmayan enerji kaynağıdır. Fosil yakıt rezervlerinin zamanla azalması global ölçekte enerji bilincinin hızla artmasına neden olmaktadır. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı verilerine göre Dünya kömür, doğalgaz, petrol rezervlerinin sırasıyla 892 milyar ton, 186,9 trilyon m³, 239 milyar ton olduğu, kalan ömürlerinin ise yine sırasıyla 114 yıl, 53 yıl, 51 yıl olduğu belirtilmektedir (Anonim 2018). Dünya'nın başlıca fosil yakıt rezervleri, kalan ömür ve yıllık üretim miktarları Şekil 4'de gösterilmiştir.



Şekil 4. Dünya'da fosil yakıt rezervlerinin kalan ömürleri (Anonim 2018).

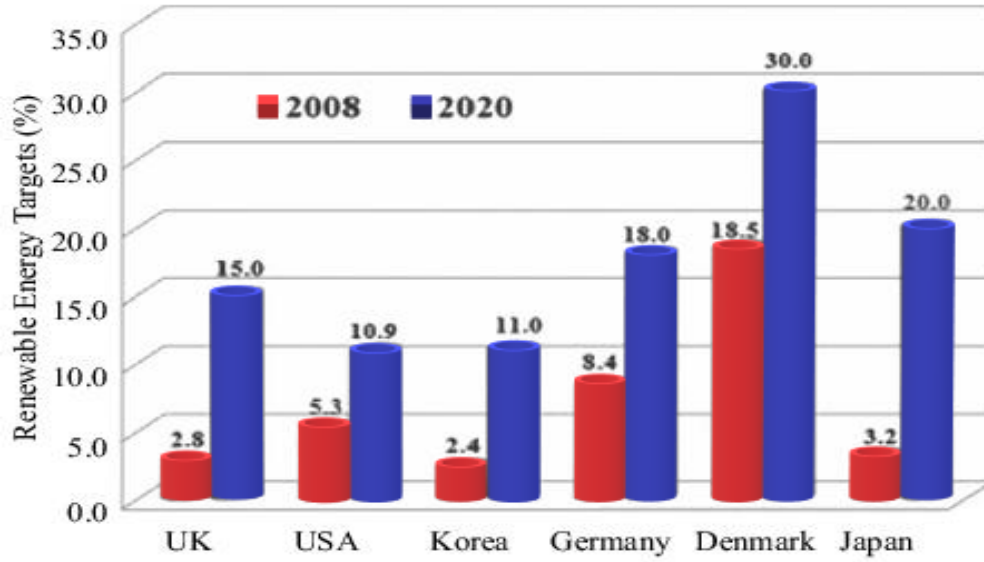
2018 yılında küresel enerji talebi, kömürden güneş enerjisine kadar tüm yakıt ve teknolojilerinin tüketimi %2,3 artmıştır, Yenilenebilir enerji kaynakları bu teknolojilerin arasında yüksek üretim artış hızına ulaşmıştır. Üretimindeki bu artış, küresel elektrik talebindeki artışın yaklaşık yarısını karşılamıştır. Ancak yine de enerji kaynaklı karbondioksit (CO₂) emisyonları 2018'de bir başka tarihi zirveye ulaşarak, %1,9'luk bir artış ile 2013'ten bu

yana en yüksek yıllık artışı göstermiştir. Sürdürülebilir Politikalar Senaryosuna göre 2017–2018 yıllarında %30 olan düşük karbonlu kaynak kullanımı artarak, 2040 yılında küresel enerji talebinin yarısından fazlasını karşılıyor olacaktır. Bu durumun yenilenebilir enerji yatırımları ve kapasite artışları gerektiren güç sektörünün liderliğinde ve kömür hariç tüm enerji kaynaklarına talebin artmasıyla gerçekleşeceği öngörülmektedir. Sürdürülebilir Politikalar Senaryosuna göre, yenilenebilir enerji kaynakları, özellikle de solar fotovoltaik sistemler, küresel güç üretim kapasitesindeki artışa egemen olacaktır (IEA-WEO 2019). Şekil 5’de yenilenebilir enerji kaynaklarının bölgelere göre toplam kapasite içindeki oranları gösterilmiştir.



Şekil 5. Yenilenebilir enerji kaynaklarının bölgelere göre toplam kapasite içindeki oranları 2019-2040 (IEA-WEO 2019).

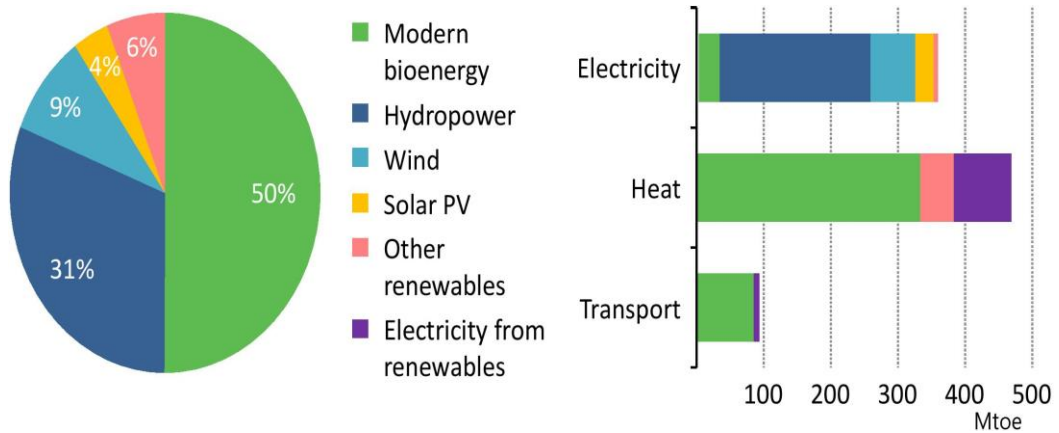
Dünya enerji politikasında artan yenilenebilir enerji hedef eğilimlerini Şekil 6’da gösteren grafikte belirtildiği gibi, 2008 yılına kıyasla 2020 yılında hedeflenen yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımının oldukça artması beklenmektedir (Kim 2019).



Şekil 6. Ülkelerin 2020 yılı yenilenebilir enerji hedefleri (%) (Kim 2019).

Yenilenebilir enerji kaynakları içerisinde güneş enerjisi, sınırsız temiz enerji özelliği bakımından önemli bir yer tutmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynakları, özellikle de fotovoltaik sistemlerin kullanımı, gelişen teknoloji ile birlikte son yıllarda hızla artmıştır. Güneş ışınımının elektriğe dönüşümü alternatif bir kaynak olarak çok önemlidir.

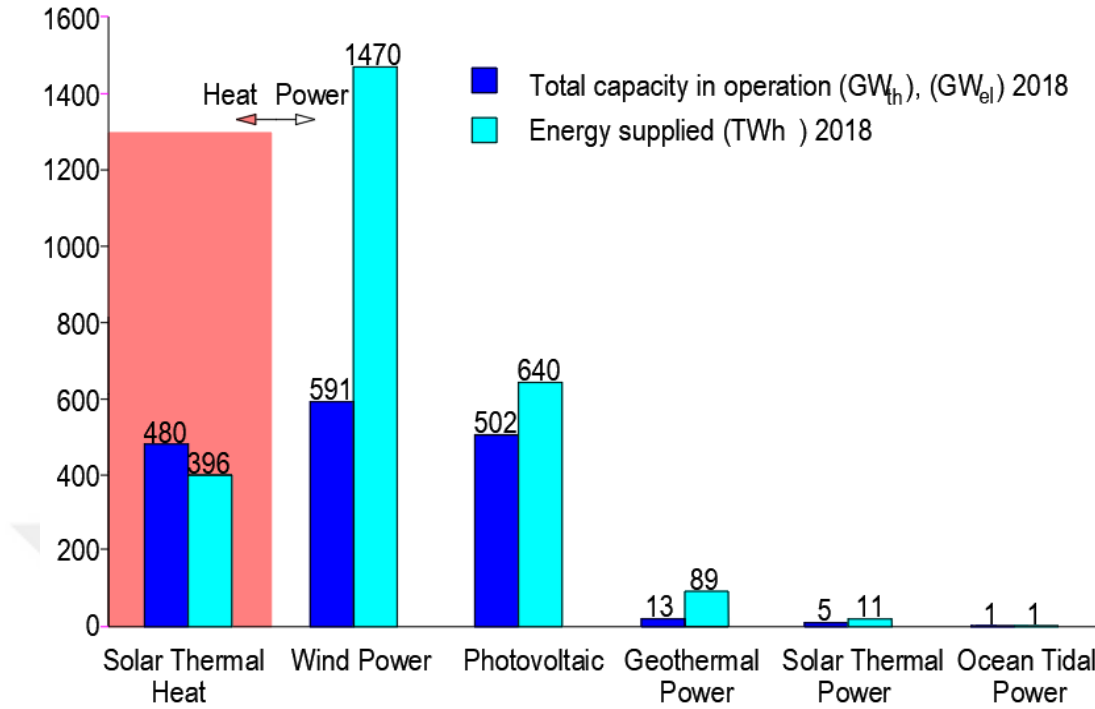
Güneş radyasyonu farklı enerji formlarına dönüştürülerek kullanılmakta ve çevreyi kirletmemektedir. Elektrik sektörü, son yıllarda katlanarak artan fotovoltaik sistemlerin kullanımının artmasıyla, yenilenebilir enerji kaynakları için en yoğun kullanım alanı olmuştur. Ancak elektrik, küresel enerji tüketiminin yalnızca beşte birini oluşturmaktadır. Ayrıca yenilenebilir enerji kaynaklarının ulaştırma sektöründeki kullanımı düşük seviyede devam etmektedir. Yenilenebilir enerji kaynaklarının sektörel kullanımı gösteren grafik Şekil 7’de gösterilmiştir.



Şekil 7. 2017 yılı yenilenebilir enerji kaynaklarının tüketimdeki payları ve sektörel kullanımı (IEA 2018).

Fotovoltaik (PV) sistemler, dönüşüm verimliliği açısından yenilenebilir enerji kaynaklarından faydalanma yöntemleri içerisinde kendisine ikinci sırada yer edinmiştir (SHC

2019). Şekil 8’de 2018 yılında dünyada yenilenebilir enerji kaynaklarının kapasite grafiği gösterilmiştir.



Şekil 8. 2018 Global PV kapasitesi (SHC 2019).

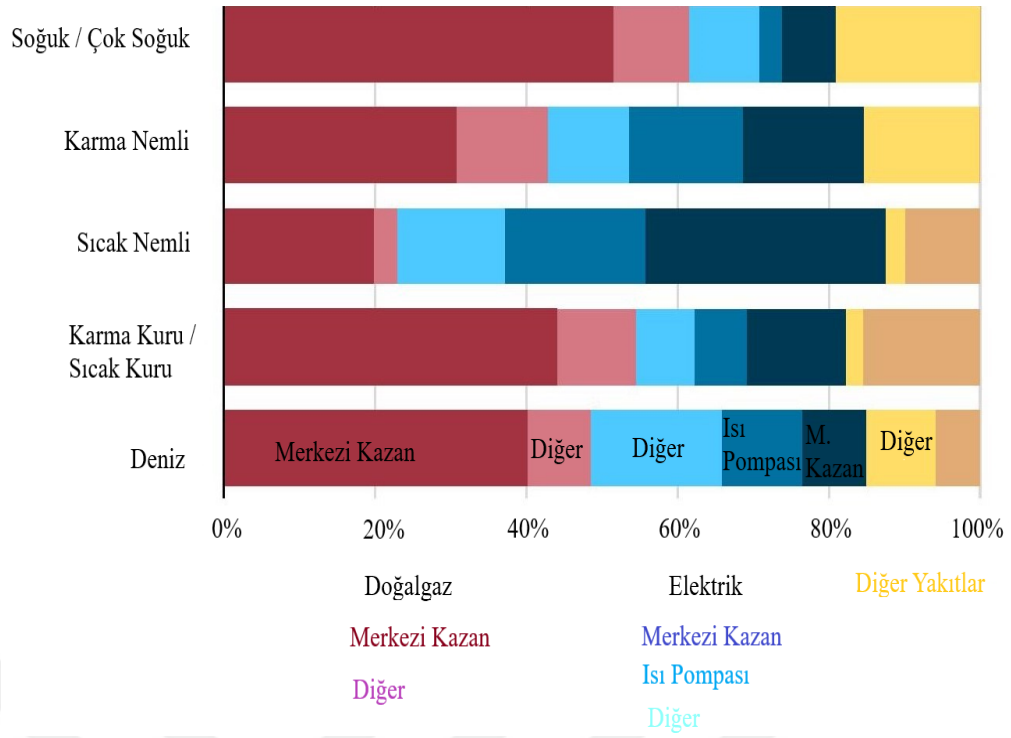
Bir güneş pilinin güç dönüşüm verimliliği, güneş pili tarafından üretilen elektrik gücü ile birim alan başına gelen güneş ışığı enerjisi arasındaki oran olarak tanımlanmaktadır. Bu dönüşüm sırasında güneş enerjisinin bir kısmı elektrik enerjisine, diğer kısmı ise ısıya dönüşür. Isıya dönüşen güneş enerjisi PV hücrelerinin ısınmasına ve elektriksel verimin düşmesine neden olur. Bu sorunu minimize etmek amacıyla fotovoltaiik termal (PV/T) sistemler kullanılmaktadır. Amaç PV hücrelerinin sıcaklığını azaltarak elektriksel verim düşüşün önüne geçmek ayrıca destekleyici ikinci bir sistem için termal enerji kaynağı olmaktır. Chow *et al.* (2003) yaptıkları araştırmada, PV hücre sıcaklığındaki her 10 °C artışın kristal silikon PV hücre elektrik gücünde yaklaşık %5 düşüşe neden olduğunu ortaya koymuşlardır.

Günümüzde, hava, su veya her ikisini soğutucu olarak kullanan fotovoltaiik ve güneş termal sistemlerini bir birimde birleştiren, PV/T adı verilen hibrit sistemler ticari olarak kullanılmaktadır (Al-Waeli *et al.* 2017). PV hücrelerini hava, su kullanarak soğutmak mümkündür. Hava ile soğutma işlemi güneş panellerinin altındaki kanallardan hava sirkülasyonu sağlanarak gerçekleştirildiğinden diğer yöntemlere göre daha az maliyetli ve daha pratiktir. Su ile soğutma işleminde ise suyun havadan daha yüksek bir ısı kapasitesine sahip olmasına bağlı olarak, PV modülünden daha fazla ısıyı çekebilme kabiliyetine sahip

olduğundan daha iyi sonuçlar almak mümkündür. Su ile soğutulan PV/T sisteminin ekonomik uygulanabilirliği hava ile soğutulan sistemden çok daha yüksektir (Kalogirou 2001).

Güneş enerjisinden ısı ve fotovoltaiik olarak faydalanabilmek mümkündür. Isıl sistemler güneş ışınlımından elde edilen enerjiyi bir akışkana aktarırlar. Bu sistemlere örnek olarak güneş kolektörlerini göstermek mümkündür. Fotovoltaiik sistemler ise güneş ışınlımının belirli bir aralığını elektrik enerjisine dönüştürürler (Ömeroğlu ve Öner 2018). PV/T sistemleri, güneş termal kolektörleri ve fotovoltaiik güneş sistemlerinin özelliklerinden yararlanarak aynı anda hem elektrik ve hem de ısı üretebilir olması nedeniyle, ayrı ayrı kullanıldıklarında PV hücrelerinden veya güneş ısıtıcılarından daha yüksek güneş radyasyonunun kullanım oranına sahiptirler.

Ateşin keşfinden ve kullanımından sonra ısıtma ihtiyacını karşılamak, insanlık için zor olmasa da yapay soğutma sorunu daha karmaşık hale gelmiştir. Bu sorun aynı zamanda ısıtma içinde kullanılabilen soğutma makinelerinin icat edildiği 1850 yılına kadar devam etmiştir. Isı pompası adı verilen bu cihazlar günümüzde, dünya çapında soğutma ve ısıtma amacıyla 130 milyondan fazla kullanım sayısına ulaşmıştır. 1973 yılında başlayan petrol krizi, ekonomiler üzerinde olumsuz bir etki oluşturarak, gelişmiş ülkelerin fosil yakıtlara bağımlılıklarını yeniden düşünmesine neden olmuştur. Dünya çapında yeni enerji stratejileri içerisinde, güneş, rüzgâr, biokütle ve jeotermal enerjinin kullanımının yanı sıra ısı pompaları ile ortam ısısının kullanımı da girmiştir. Artan çevresel endişeler ve birincil enerji ve tasarruf tedbirleri neticesinde 1990'lı yıllardan sonra daha verimli ve güvenilir ısı pompaları kullanımı artış göstermiştir. Günümüzde ise ısı pompası teknolojileri önemli araştırma ve geliştirme çabaları ile desteklenmektedir (Kiss and Ferreira 2016). Isı pompalarının hem ısıtma hem de soğutma için kullanılabilir olması, iklim bölgelerine göre kullanım oranlarına direkt etki etmektedir. 2015 yılı iklim bölgelerine göre ısıtma ihtiyacının karşılanması için cihaz seçimi Şekil 9'da verilmiştir.



Şekil 9. 2015 yılı iklim bölgelerine göre cihaz seçimi (U.S. Energy Information Administration 2017).

Enerji tasarrufu çalışmaları; atık ısı, jeotermal enerji, güneş vb. gibi düşük dereceli enerji kaynaklarının, ısı pompası sistemlerini kullanarak istenen proses ısısını üretmek için etkin bir şekilde kullanılmasını sağlamıştır. Isı pompaları, enerjiyi bir ısı kaynağından, bir ısı alıcıya aktaran ve enerjiyi daha yüksek bir sıcaklık seviyesine yükselten cihazlardır. Isı pompaları, ısıyı daha soğuk bir alandan alıp daha sıcak olana serbest bırakarak, ısıyı normal ısı akışının ters yönünde hareket ettirmek için tasarlanmıştır.

Isı pompaları hava, toprak ve su kaynaklı yenilenebilir enerji kaynaklarını kullanılabilir ısıya dönüştürmenin en verimli yöntemlerinden biridir. Isı pompaları teknolojisi yenilenebilir enerji kaynaklarının verimli bir şekilde kullanılmasına olanak sağlar. Isı pompası, harici bir enerji kaynağı ve iş yapan (soğutucu) akışkan vasıtasıyla ısıyı düşük sıcaklık seviyesinden daha yüksek sıcaklık seviyesine taşır. Çevrimin yönünün değiştirilebilir olması aynı sistemin hem ısıtmada hem de soğutmada kullanılabilirliğini ortaya koymaktadır. Isı pompaları ısıl işlem gerektiren mandıra, bira üretim tesisleri, şeker rafineleri tahıl kurutma ve konserve sektörleri gibi birçok gıda üretim alanında kullanıldığı gibi kâğıt üretimi, kimyasal endüstri alanlarında da kullanılmaktadır (Sarkar *et al.* 2004).

Tezin Amacı

Bu çalışmada, peynire işlenecek sütü pastörize etmek amacıyla mekanik buhar çevrimi prensibine göre çalışan, dört geçişli ekonomizör ve fotovoltaiik termal (PV/T) sistem ile desteklenen bir ısı pompası sistemi kurulmuştur. Polikristal panele göre daha yüksek verime

sahip özelliği ile öne çıkan monokristal fotovoltaiik panelin güneş ışıının değeriyle artan yüzey sıcaklığı, arkasına yerleştirilen bakır borular içerisinden geçen suya ısınıııı aktarmak suretiyle düşürölmüştür. Çalışmanın amacı, panelin soğuması sağlanarak, elektrik üretimini artırmaya çalışmak, bunu yaparken de ısııı enerjisini sütün pastörizasyonu için faydalanabilir hale getirerek gerekli enerjinin bir kısmını PV/T sistemden karşılamak, pastörizasyon süresini kısaltarak birim süt başına pastörizasyon için harcanan enerji miktarını azaltmak, sistem verimliliğini artırmak ve verimlilik performansları üzerine odaklanmaktır. Deney düzeneğinin önce CAD ortamında tasarımı yapılmış daha sonra ölçüm yapılacak noktalar belirlenmiş ve bunlara uygun sensörler düzeneğe ilave edilerek deneyler yapılmış, gerçek zamanlı olarak kararlı hal deney sonuçları kaydedilmiş, çıkan sonuçlar irdelenmiştir.



KURAMSAL TEMELLER

Isı pompası/Pastörizasyon Literatür Taraması

Pastörizasyon işleminde süt, pastörizasyon sıcaklığına kadar ısıtılıp ürün işleme sıcaklığına kadar soğutulmaktadır. Aynı proses içerisinde ısıtma ve soğutma işlemleri yapılması sütün pastörizasyonunda ısı pompasının kullanılabilirliğini ortaya çıkarmıştır. Kara (1993) peynire işlenecek sütü mekanik buhar çevrimiyle çalışan ısı pompası ile pastörize ederek, klasik çift cidarlı kazan pastörizasyon sistemi ile her iki sistemin enerji gereksinimlerini belirleyerek karşılaştırma yapmıştır. İki sistemin tükettiği toplam enerji kıyaslandığında, klasik sistemin ısı pompası sistemine göre 4-5,5 kat daha fazla enerji harcadığı belirlenmiştir. Isı pompası sisteminde, plakalı tip ekonomizör kullanarak çiğ süte herhangi bir enerji harcamadan 14 °C ön ısıtma sağlanmış, kondenserden çıkan sıcak sütün sıcaklığı ise yaklaşık 10 °C düşürülmüştür. Bu da sistemin performans katsayısını yaklaşık 5 değerine yükseltmiştir. Yapılan deneysel araştırmalar sonucu elde edilen veriler doğrultusunda ısı pompası ile yapılan pastörizasyon işleminin klasik yöntemlere göre daha verimli olduğunu belirlemişlerdir. Plakalı ekonomizör ve boru-zarf tipi ekonomizörlü ısı pompası arasında yapılan karşılaştırmada ise plakalı ekonomizör kullanılması durumunda harcanan toplam enerji 79 kJ/kg-süt olurken, boru-zarf tipi ekonomizörde bu değer 103 kJ/kg-süt olarak hesaplanmıştır. Bu sonuç ile birlikte plakalı ekonomizöre sahip ısı pompası performans katsayısı 5, boru-zarf tipi ekonomizöre sahip ısı pompası performans katsayısı 3,6 olarak elde edilmiştir. Ayrıca tüm pastörizasyon işlemleri için yapılan süt analizlerinde, kazan sisteminde ve plakalı ısı pompasında pastörize edilen sütlerin ortalama mikroorganizma değerlerinin ve koliform bakteri sayılarının Ülkemiz Gıda Maddeleri Tüzüğü'nde ve pastörize süt standardında (TS-1019) belirlenen hükümlere uygunluk gösterdiği, boru-zarf tipi ekonomizörlü ısı pompasında pastörize edilen sütün söz konusu hükümlere uygun olmadığı belirlenmiştir. Dolayısıyla boru-zarf tipi ekonomizörlü ısı pompasında etkili bir pastörizasyon yapılamadığı ortaya konmuştur.

Çomaklı *et al.* (1994) sütün sıcaklığını pastörizasyon sıcaklığına (69 °C) çıkarıp, ürün işleme mayalanma sıcaklığına (32 °C) soğutmak için sıvı-sıvı prensibine dayanan bir ısı pompası sistemi tasarlanmıştır. Pastörizasyon için gerekli enerji miktarları belirlenmiş, enerji tüketim miktarları açısından deneysel olarak klasik pastörizasyon yöntemleriyle kıyaslanmıştır. Ayrıca yapılan çalışma ile pastörizasyon sırasında sütün mikrobiyolojik ve kimyasal özelliklerinin nasıl değiştiği deneysel olarak belirlenmiştir. Yapılan süt

analizlerinde, ısı pompası ile pastörize edilen sütlerin standartlarda belirtilen hükümlere uygunluk gösterdiği belirtilmiştir. Isı pompası sisteminde, plakalı tip eşanjör kullanarak çiğ süte ısıtma sağlanmış, kondenserden çıkan sıcak sütün sıcaklığı ise düşürülmüştür. Bu da sistemin performans katsayısını yükseltmiştir. Yapılan deneysel araştırmalar sonucu elde edilen veriler doğrultusunda, ısı pompası ile yapılan pastörizasyon işleminin klasik yöntemlere göre daha verimli olduğunu belirtmişlerdir.

Özyurt (2002) yaptığı çalışmada, ısı pompasının sütün pastörizasyonunda kullanılmasının getireceği avantajları belirlemek için teorik ve deneysel çalışma yapmıştır. Çalışma sütün pastörizasyonu için tasarlanan, sıvı-sıvı prensibine göre çalışan, mekanik buhar sıkıştırma çevrimine sahip, plakalı tip ısı değiştiricili ısı pompasının kararlı hal durumundaki simülasyon sonuçlarını içermektedir. Simülasyon sonuçları ile hesaplanan deneysel sonuçlar arasında mukayese yapılmıştır. Deney sonuçları ile ısı pompası sisteminin enerji tüketimi ile çift cidarlı kazan ve plakalı pastörizatör sistemlerinin enerji tüketimleri arasında karşılaştırma yapılmıştır. Ayrıca alternatif soğutucu akışkan kullanımının sistem üzerine etkileri araştırılmıştır. Yapılan çalışma ile ısı pompası sisteminin plakalı pastörizer sisteminden iki kat, çift cidarlı kazan sisteminden ise üç kat daha az enerji tükettiği ortaya konmuştur. Elde edilen deneysel verilerin ve hesaplamaların simülasyon sonuçları ile uyumlu olduğu ortaya konmuştur. Isı pompasının ve sistemin ısıtma tesir katsayısının süt debisinin artmasına bağlı olarak arttığı, süt giriş sıcaklığının artmasıyla toplam tersinmezlik değerinin azaldığı, süt debisinin artmasının ise sistem tersinmezlik değerlerini artırdığı belirtilmiştir. Ayrıca aynı süt giriş sıcaklığı için yoğuşma ve buharlaşma sıcaklığının arttığı, kompresör çıkış sıcaklığında ise önemli bir değişiklik olmadığı belirtilmiştir. R-114 gazına alternatif olarak kurulan modelde R-134a kullanılmış, yapılan analiz sonucu R-134a soğutucu akışkanın yüksek basınç gerektirdiği, kompresör çıkış sıcaklığının ise çok yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Söz konusu yüksek basıncı sağlayacak kompresör değişimi önerilmiştir. Yapılan çalışma ile süt ürünlerinin ısı pompası kullanılarak işlenmesinin ekonomiye katkı sağlayacağı vurgulanmıştır.

Özyurt *et al.* (2004) yaptıkları araştırmada, peynire işlenecek sütü pastörize etmek amacıyla sıvı-sıvı prensibine göre çalışan buhar sıkıştırmalı ısı pompasının kullanılabilirliğini, süttten süte ısı geçişini sağlayan plakalı eşanjörü ekonomizör olarak kullanarak ortaya koymuşlardır. Sistemin klasik pastörizasyon yöntemleri ile kıyaslamasını yapmak amacıyla çift cidarlı kazan ve plakalı pastörizasyon yöntemleri ile de deneysel olarak çalışılmıştır. Isı pompası kullanımının diğer sistemlere göre avantaj ve dezavantajları, üç ayrı sistem için elde edilen sonuçlar karşılaştırılarak ortaya konmuştur. Deneysel yapılan araştırmada 1 kg sütün

pastörizasyonu için harcanan enerji miktarı, hem ısı pompası hem de klasik yöntemlerle hesaplanarak kıyaslaması yapılmıştır. Elde edilen veriler doğrultusunda, yapılan hesaplamalar sonucunda 1 kg sütün pastörizasyonu için harcanan enerji miktarları; ısı pompası için 182,8 kJ/kg, plakalı eşanjör sistemi için 346,86 kJ/kg, çift cidarlı kazan sistemi için 509,87 kJ/kg olarak hesaplanmıştır. Sonuçlar plakalı eşanjör sisteminin ısı pompası sistemine göre 1,9 kat, çift cidarlı kazan sisteminin ısı pompası sistemine göre 2,8 kat daha fazla enerji sarfıyatı gerektirdiğini ortaya koymuştur. Ayrıca yapılan hesaplar sonucunda klasik pastörizasyon uygulamaları yerine ısı pompası sisteminin kullanılması birincil enerjinin %66'sının korunmasını sağladığını göstermiştir. Isı pompasından elde edilen enerji miktarının birincil enerji girişinden %107 daha fazla olduğu ortaya konmuştur.

Söylemez (2006) çalışmasında, süt pastörizasyon işlemi için kullanılacak ısı pompasının termo ekonomik optimizasyon analizini yapmıştır. Optimum operasyon sıcaklıkları ve sistem bileşenlerinin optimum kapasiteleri, optimum yatırım maliyeti çerçevesinde hesaplanmıştır. Yapılan araştırmalarda, ortaya konulan optimizasyonun geçerliliği formüllerle kontrol edilmiştir. Yapılan optimizasyon ile ortaya konulan formüllerin süt pastörizasyon prosesinde ısı pompası kullanan tasarımcılar için yararlı olması hedeflenmiştir. Hesaplamalar sonucunda optimum kondenser süt çıkış sıcaklığı 64,44 °C, optimum evaporatör süt giriş sıcaklığı 20,33 °C olarak belirlenmiştir. Sistem bileşenlerinin, sırasıyla ısı değiştiricisi, evaporatör, kondenserin optimum operasyon sıcaklığında optimum alanları $A_{HX}=170,13 \text{ m}^2$, $A_{evap}=19,06 \text{ m}^2$, $A_{kond}=3,69 \text{ m}^2$ olarak hesaplanmıştır. Yapılan optimizasyonda ısı iyileştirmesi için daha önemli bileşen olan ısı değiştiricisinin etkinlik katsayısı $\epsilon_{HX}= 0,9065$, kondenser etkinlik katsayısı $\epsilon_{kond}= 0,2312$, evaporatör etkinlik katsayısı $\epsilon_{evap}= 0,2285$ olarak belirlenmiştir.

Çağlar (2006) çalışmasında, domestik sıcak su üretimi amacıyla tasarlanan, güneş enerjisi destekli ısı pompası sistemi üzerine farklı parametrelerin etkilerini araştırmıştır. Bunun için matematiksel modele dayalı bir bilgisayar simülasyon programı yapılarak elde edilen sonuçlar deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Yapılan deneyler sonucu elde edilen veriler doğrultusunda, ısı pompası ve sistem COP değerleri, evaporatör, kondenser kapasiteleri, kollektör verimi, güneş destekli ısı pompasının ekserji verimi hesaplanmıştır. Yapılan hesaplamalar sonucu güneş destekli ısı pompasının COP değerinin 4,85, termodinamik ikinci yasa veriminin ise %4,8 ile %27,4 arasında değiştiği tespit edilmiştir.

Solar pastörizasyon sistemleri, fosil yakıtlar veya elektrik şebekesi bağlantısı kullanmadan yalnızca güneş enerjisi kullanarak suyu termal dezenfekte edebildikleri için dünyada milyonlarca insanın su kirliliği ile ilgili hastalıklardan ölmemesi konusunda umut verici bir işlem olmuştur. Rossi *et al.* (2019) yaptıkları çalışmada, doğal taşınım ve termostatik vana sistemli iki ayrı

pastörizasyon işleminin eko–profillerini hesaplayarak karşılaştırma yapmışlardır. Ortaya çıkan sonuçlarla, yüksek artırılmış su verimi ile doğal taşınım sisteminin çevresel olarak daha sürdürülebilir olduğunu ortaya koymuşlardır.

Atia (2010) çalışmasında, güneş ışığından yararlanarak, sütü 63 °C ve 72 °C sıcaklıklarında, güneş radyasyon miktarına bağlı olarak 3 ila 19 dakika süre içerisinde pastörizasyon etmek için 1,2 m² yüzey alanlı güneş panelini kullanmıştır. Pastörizasyon sıcaklığına, kullanılan güneş paneli ile ulaşılmış, soğutma işlemi bir ısı değiştiricisi vasıtasıyla sütün ısısının buza verilmesi ile sağlanmıştır. Yapılan çalışmada, solar radyasyonun üretilen süt miktarına etkisi araştırılmıştır. 63 °C pastörizasyon sıcaklığında günlük 73,9 litre, 72 °C pastörizasyon sıcaklığında günlük 37,3 litre pastörize süt elde edilmiştir.

Enerji tasarrufu çalışmaları; atık ısı, jeotermal enerji, güneş vb. gibi düşük dereceli enerji kaynaklarının, ısı pompası sistemlerini kullanarak istenen proses ısısını üretmek için etkin bir şekilde kullanılmasını sağlamıştır. Isı pompaları hava, toprak ve su kaynaklı yenilenebilir enerji kaynaklarını kullanılabilir ısıya dönüştürmenin en verimli yöntemlerinden biridir. Isı pompaları teknolojisi yenilenebilir enerji kaynaklarının verimli bir şekilde kullanılmasına olanak sağlar.

Afshari (2016) çalışmasında buhar sıkıştırmalı, hava kaynaklı ısı pompası sisteminin ekserji ve enerji analizlerini yapmıştır. Saf R134a, saf R404a, saf R407c ve R134a/R404a, R134a/R407c ve R404a/R407c soğutkan çiftlerinin değişik karışım oranlarının, kaynak giriş sıcaklığı ve soğutma suyu debilerinin ısı pompası sisteminin performansı (COP) ve verimi üzerine etkilerini incelemiştir. Ayrıca yapılan çalışma ile saf soğutkan gazının optimum miktarı, farklı kompresör yağlarının kullanılmasının etkileri, türbülator kullanarak kondenser performansı ve veriminin artırılması ANSYS Fluent programı ile analiz edilmiştir. Çalışma neticesinde gaz karışım oranının ısı pompası performans katsayısı üzerine büyük bir etkisi olduğu ortaya konmuş, R404a/R134a gaz karışımı için en yüksek performans katsayısı %60 R404a oranında, R404a/R407c için %100 R407c oranında ve R134a/407c karışımı için en yüksek COP değeri %100 R407c oranı ile elde edilmiştir.

Yıldırım and Genç (2017) çalışmalarında, jeotermal su enerji kaynağını kullanarak pastörizasyon, buharlaştırma ve kurutma işlemlerini gerektiren süt tozu üretim sisteminin ekserji analizini incelemişlerdir. Çalışmada farklı parametreler kullanılarak kapsamlı bir ekserji analizi yapılmıştır. Yapılan çalışma sonucunda sistem bileşenlerinin ekserji verimlerinin %9-18 arasında olduğu belirlenmiştir. Sistem genel veriminin %85,4, ekserji veriminin ise %57,4 olduğu tespit edilmiştir.

Dong *et al.* (2017) R407c iş yapan akışkan kullanan, hava kaynaklı, güneş destekli ısı pompasının ısıtma performansını incelemişlerdir. Prototip olarak tasarlanan sistem geleneksel hava kaynaklı ısı pompası ile mukayese edilmiştir. Deneylerde Tayvan'daki bir ortam ısıtması

için dış ortam sıcaklık ve nem değeri, giriş suyu sıcaklığı, yoğuşma sıcaklıkları ve güneş radyasyon parametrelerine göre sistemin ısıtma performansı belirlenmiştir. Güneş destekli ısı pompasının ısıtma performans değerinin, geleneksel konvansiyonel ısı pompası ısıtma performansı değerinden daha fazla olduğu ortaya konulmuştur. Ancak yapılan prototipin uygulanabilir olduğu belirtilmesine rağmen ısıtma performans değerini yükseltecek iyileştirme işlemlerinin uygulanması gerektiği savunulmuştur.

Özyurt and Çomaklı (2018) yaptıkları çalışmada, ısı pompasının kararlı hal performansını belirlemek için bir simülasyon modeli oluşturmuşlardır. Plakalı eşanjörlü ısı pompası sisteminin her bir bileşeni için basit matematiksel modeller kullanılmıştır. Oluşturulan simülasyon programını termodinamik çevrimin matematiksel bir modeline ve deneysel verilere dayandırmışlardır. R-114 soğutucu akışkanın kullanıldığı sistemde elde edilen deneysel sonuçlar, simülasyon programı ile öngörülen performans ile karşılaştırılarak, iyi bir uyum gösterdiği belirlenmiştir. Ayrıca süt pastörizasyonu için R-114 ve R-134a olmak üzere farklı iki soğutucu kullanarak ısı pompasının termodinamik performansı üzerinde karşılaştırmalı bir analiz yapılmıştır. Aynı süt pastörizasyon sıcaklığı için ısı pompası kompresörünün deşarj basınç oranı, R-134a için çok yüksek olmasına rağmen R-134a ile öngörülen modelin sütün pastörizasyonu işleminde ısı pompası kullanan sistemlerde uygulanabilir olduğu gösterilmiştir. Isı pompası sisteminin performans katsayısının sütün debisi artışına bağlı olarak arttığı, aynı şekilde kompresör işinin de artış gösterdiği belirlenmiştir.

PV/T Sistemleri Literatür Taraması

PV hücrelerinin ısınması elektriksel verimin düşmesine neden olur. Bu sorunu minimize etmek amacıyla fotovoltaiik termal (PV/T) sistemler kullanılmaktadır. Bu sayede hem PV hücrelerinin sıcaklığı azaltılarak elektriksel verim düşüşün önüne geçilir hem de destekleyici ikinci bir sistem için termal enerji kaynağı elde edilir.

Hendrie (1980) yaptığı çalışmada, hava ve su ile soğutulduğunda termal ve elektriksel performansını test etmek amacıyla PV/T sistem için matematiksel bir model geliştirmiştir. Yapılan çalışma neticesinde fotovoltaiik hücreler çalışmadığında sistemin termal verimliliğinin hava ve sıvı için sırasıyla %42,5 ve %40, fotovoltaiik hücreler çalıştığında ise hava ve sıvı için sırasıyla %40,4 ve %32,9 olarak tespit edilmiştir. Yapılan araştırmada ayrıca PV hücre elektrik verimi %6,8 olarak ölçülmüştür.

PV/T sistemleri, pasif veya aktif şekilde ya da tıpkı güneş enerjisi sistemleri gibi tasarlanabilir. Pasif sistemlerde suyun dolaşımı herhangi bir sirkülasyon pompası olmaksızın doğal taşınım ile gerçekleşirken, aktif sistemlerde dolaşımı sağlamak amacıyla sirkülasyon

pompası ve elektrik bileşenleri kullanılır. Pasif soğutma metotları kullanılan sistemlerde PV modül sıcaklığı düşürülür, PV modülde üniform sıcaklığı dağılımı elde edilir, PV modül güç dönüşüm verimi artırılır.

Sarhaddi *et al.* (2010) hava bazlı bir PV/T sistemin elektriksel ve termal performansını matematiksel modeller geliştirerek araştırmışlardır. Yapılan çalışmada hücre sıcaklığı, çıkış hava sıcaklığı, arka yüzey sıcaklığı, maksimum güç noktası akımı ve voltajı, kısa devre akımı ve voltaj parametreleri kullanılmıştır. Modellemeler bilgisayar simülasyon programı kullanılarak yapılmıştır. Yapılan deneyler sonucu elde edilen verilerin simülasyon ile uyum gösterdiği ortaya konmuştur. Sonuçlar PV/T sistem toplam verimin %45, elektriksel verimin %10,01, termal verimin ise %17,18 olduğunu göstermiştir. Yapılan çalışmada ışıınım miktarının artışı ile birlikte sistem toplam verimin %37'den %48,4'e, elektriksel verimin ise %6,5'ten %11'e yükseldiği bu değerlerin 160 W/m² ışıınım değerinin üzerinde toplam verimin %42,7'ye, elektriksel verimin ise %9,3'e düştüğü belirtilmiştir. ışıınım değerinin artışının termal verime etkisinin %18 olduğu belirtilmiştir. Ayrıca yapılan çalışmada hava giriş sıcaklık değerinin 15 °C artırımının termal enerjide %46,5, sistem toplam enerjisinde ise %19 düşüşe sebep olduğu ortaya konmuştur. Sonuçlar hava giriş sıcaklık değişiminin elektriksel verim üzerine kayda değer bir etki yapmadığını göstermiştir.

Cüce *et al.* (2011) pasif soğutma metotlarının PV elektrik performansına etkisini araştırmak için iki farklı polikristal hücre pili kullanarak, alüminyum kanatçıklı ve kanatçıksız olarak ayrı ayrı iç ortam deneyleri yapmıştır. Farklı radyasyon değerleri (400 W/m²–800 W/m²), farklı çevre sıcaklıkları (15 °C–35 °C) gibi parametrelere göre deneyler gerçekleştirilmiştir. Kanatçık kullanımının sistem üzerine etkisi ortaya konmuştur. Elde edilen veriler doğrultusunda yapılan hesaplamalar sonucu, kanatçık kullanımı ile PV pilinden 50,18 mW güç ve %3,47 verim elde edilirken, kanatçık kullanmadan 42,01 mW güç, %3,31 verim elde edilmiştir. Çalışmada ayrıca 800 W/m² ışıınım değerinde pasif soğutma kullanarak, PV pili çıkış gücünde %20 artış sağlandığı belirtilmiştir. Maksimum soğutmanın 800 W/m² ışıınım değerinde yakalandığı belirtilmiştir. Çalışmada çevre sıcaklık değerinin 15 °C'den 35 °C'ye çıkarılması kanatçıklı PV de verimin %7,11'den %5,15'e, kanatçıksız PV de %7,7'den %4,99'a düşmesine neden olduğu ortaya konmuştur.

Hava ve su entegrasyonu alternatiflerinin yanı sıra, monokristalin/polikristalin/amorf silikon (c-Si/pc-Si/a-Si) veya ince-film gibi farklı güneş hücreleri, düz plaka veya yoğunlaştırıcı plaka tipleri, doğal veya zorlanmış akışkan kullanımı ve bağımsız veya PV entegre ısı pompası ile sıcak su tedarikine kadar farklı alternatif fotovoltaiik sistem çözümleri günümüzde uygulanmaktadır.

Jarimi *et al.* (2013) çalışma sıvısı olarak hava ve su kullanılan yeni bir PV/T kollektörün iki boyutlu kararlı durum termal modellemesini gerçekleştirmişlerdir. Kollektör, temelde kanatlı bir hava toplayıcı ile su bazlı boruların bir kombinasyonu olarak borular suyu iletirken, borular (üst alan) ve kanatçıklar (alt alan) arasında hava akacak şekilde tasarlanmıştır. Çalışma sıvısı olmayan termal model, üretici tarafından sağlanan normal çalışma koşulu kullanılarak doğrulanmıştır. Bununla birlikte, soğutulmuş model için bulgular önceki araştırmaların sonuçlarıyla doğrulanarak toplayıcı modeli simüle edilmiştir. Sadece su, sadece hava ayrıca su ve havanın aynı anda çalışma şartları altında, 500 W/m^2 ile 800 W/m^2 ısıtım seviyelerinde PV hücrelerinin ortalama sıcaklıkları tahmin edilmiştir. Bulguların teori ve literatürle uyumlu olduğu yani havanın en düşük soğutma etkisi sergilediği, ardından sadece su ile çalışma şartlarının geldiği, tüm durumlar için PV hücrelerinin düşük sıcaklıkta tutulduğu göz önüne alındığında, etkinliklerinin arttığı belirtilmiştir. Yapılan çalışmanın, balık yetiştiriciliğinde ön ısıtma sıcaklığı elde etmek için sıcak hava ve su üretiminde ayrıca çamaşır kurutma ve sıcak su temini gibi diğer uygulamalar için kullanılmasında yararlı olacağı belirtilmiştir.

Izquierdo *et al.* (2014) PV destekli ısı pompasını yerden ısıtma sistemli konut ısı ihtiyacını karşılamak için kullanmışlardır. Çalışmada hava-su kaynaklı ısı pompası 6 KW kapasiteli, mikro ızgaralı solar fotovoltaik (PV) ile desteklenmiştir. Sistem laboratuvar ortamında prototip olarak kurulmuştur. 21 m^2 toplam, $18,7 \text{ m}^2$ kullanılabilir alanlı, her biri $0,02434 \text{ m}^2$ alana sahip 48 polikristal silikon hücreli, nominal verimi %14 olan, 180 Watt kapasiteli 16 modüle sahip PV panel kullanılmıştır. PV sistemi ile ısı pompasını besleyen elektrik akımını, 3 KW bir invertör vasıtasıyla DC akımdan AC akıma dönüştürerek 250 Ah aküye toplamışlardır. $35\text{-}45 \text{ }^\circ\text{C}$ 'de 840 l/h sıcak suyun 24 m^2 alana sahip yerden ısıtma sistemi içerisinde dolaşımı sağlanmıştır. Deneysel çalışmada güneş radyasyonu, sıcaklık parametrelerine göre ısı pompasında üretilen ve döşemeden ortama transfer edilen ısı miktarları, ısı pompasının COP değeri hesaplanmıştır. Elde edilen veriler doğrultusunda, standart test koşulları altında %14 olan modül veriminin %62 düşüşle %8,6, ısı pompası COP değerinin ise 2,84 olarak hesaplandığı belirtilmiştir.

Khelifa *et al.* (2014) levha ve boru tip PV/T sistemi üzerinde teorik ve deneysel çalışma yapmışlardır. PV/T sistem kullanımının PV hücre sıcaklığının düşüşüne neden olduğu dolayısıyla verim artışını sağladığı ortaya konulmuştur. Yaptıkları çalışmada en yüksek hücre sıcaklığı $53 \text{ }^\circ\text{C}$ 'de, toplam PV/T sistem veriminin %69 olduğu hesaplanmıştır. Toplamda %69 olan PV/T sistem verimi için %55 termal verim, %14 elektriksel verim hesaplanmıştır. Deneyler Cezayir'de, ısıtım miktarı, giriş suyu sıcaklıkları, PV/T sistem kollektör geometrisi

parametrelerine göre yapılmıştır. Çalışmalarında ışıınım değerlerine bağılı olarak üretilen elektrik gücü hesaplanmış, bu değer 740 W/m^2 ışıınım değeri için maksimum 40 Watt olarak hesaplanmıştır. Üretilen elektrik enerjisinin emici tabaka sıcaklığının bir fonksiyonu olduğunu ve bu sıcaklık düşümünün sağlanmasının PV/T sistem enerji üretimini artırdığını ortaya koymuşlardır. Ayrıca ışıınım miktarının artışına bağılı olarak termal enerjinin arttığı, maksimum 350 Watt termal enerji üretildiğı belirtilmiştir. Termal verimin, giriş suyu sıcaklığı ve ortam sıcaklığı arasındaki farkın artışına bağılı olarak düştüğü saptanmıştır.

Alzaabi *et al.* (2014) PV modüllerin UAE iklim koşullarında elektrik performansını artırmak amacıyla su bazlı hibrit bir PV/T sistem tasarlamıştır. Çalışmalarında, PV/T performansı üzerine deneysel ve sayısal analizler yapmışlardır. Farklı parametreler soğutmalı ve soğutmasız PV modül üzerine uygulanmıştır. Uygulanan soğutma yöntemi ile PV panel sıcaklığında %15-20 arasında düşüş sağlandığı ortaya konmuştur. Böylece elektriksel verim artışına %15–20 katkı sağlandığı, termal verimin %60–70 hesaplandığı belirtilmiştir.

Öner *et al.* (2016) yaptıkları çalışmada, güneş enerjisi sistemleri ve PV/T sistemlerinin çalışma prensipleri, avantajları, dezavantajları, son gelişmeler ve teknolojiler hakkında genel bir bilgi verilmesi amaçlanmıştır. PV/T sistemlerinin, hacim ısıtma, evsel ve endüstriyel su ısıtma, su damıtma, kurutma ve elektrik üretimi gibi çeşitli alanlarda kullanılabilir olduğu belirtilmiştir. Termal kolektör entegrasyonun, elektrik üretimi sırasında PV sistemin eşzamanlı soğutulmasını sağlaması nedeniyle, geleneksel yöntemlerle karşılaştırıldığında sistemin verimliliğini arttırdığı vurgulanmıştır.

Nardi *et al.* (2017) PV/T panelin termal ve elektriksel verimliliğini, hem soğutma hem de soğutma olmayan modlar için çalışma sırasında kızılötesi termografik tanı ile değerlendirmişlerdir. Testler, çevresel koşulların sistem verimliliğı üzerine etkisi nedeniyle yaz aylarında yapılmıştır. Çalışma kapsamında, farklı koşullar altında yedi test yapılmıştır. Ölçümler elektrik enerjisi üretimi ile eşzamanlı elektrik ve termal enerji üretimi için alınmıştır. Ayrıca genel verimliliğı arttırmak için bir güneş yoğunlaştırıcısı kullanılmıştır. Yapılan deneyler neticesinde PV/T elektriksel verimliliğinin geleneksel polikristalin PV elektriksel verimliliğinden daha üstün olduğu sonucuna varmışlardır. Araştırmada hızlı güneş ışıınım değişiminin PV/T enerji verimliliğini nasıl etkilediğini gösteren testlere yer verilmiştir. Çalışmada basit bir reflektörün kullanılması ile elektrik verimliliğinde %28 artış sağlandığı ortaya konmuştur.

Wang *et al.* (2017) solar fotovoltaik termal (PV/T) destekli ısı pompasını konut enerji ihtiyacını karşılamak amacıyla kullanmışlardır. Farklı modlarda, değişik fonksiyonlara sahip sistem ile kışın ısıtma, yazın soğutma, tüm yıl boyunca kullanma suyu ısıtması ve gündelik

elektrik ihtiyacının bir kısmını karşılamışlardır. Sistem performansı deneysel incelenmiştir. Sonuçlar su ısıtma modunda, elverişli güneş ışınımı ile PV/T kollektör ortalama veriminin %55,4'e kadar çıkabildiğini göstermiştir. Deneysel şartlar altında ısıtma modunda PV/T destekli su kaynaklı ısı pompası COP değeri 3,18, PV/T destekli su&hava kaynaklı ısı pompası COP değeri ise 2,53 olarak hesaplanmıştır. Hesaplanan bu değer, hava kaynaklı ısı pompasının ısıtma modunda 2,23 olarak hesaplanan COP değerinin çok üzerine çıktığını göstermiştir.

Ömeroğlu (2018) çalışmasında, cebri sirkülasyonlu, hava bazlı PV/T paneli tasarlayıp deneysel olarak test etmiş ve performansını analiz etmiştir. 1100 W/m^2 sabit güneş ışınması ve değişken hava hızları altında dört dizi konfigürasyonu düşünülmüştür. Çalışma, hava akışına ek olarak kanatçık düzenlemesi, kanatçık sayısı ile ilişkili ısı transfer alanı ve hız gibi parametreler için kritik eşiği belirlemeyi amaçlamıştır. Isı transfer yüzey alanının ve cebri hava sirkülasyonunun toplam ısı transferini olumlu etkileyeceği bilindiğinden, kanatçıkların ve daha yüksek hava hızlarının panel elektrik verimliliğinin daha yüksek seviyelerde tutulmasına yardımcı olacağı öngörülmüştür. Çoklu dizi konfigürasyonlarının test edilmesi, kanatçıklar ve hava hızı ile ilişkili parametrelerin etkilerini ortaya koymanın yanı sıra hava bazlı PV/T için en uygun tasarımı bulmayı sağlamıştır. Elektrik verimliliği açısından, en yüksek değer %12,02 civarında olan 108 adet çift kaydırmalı, tip-1 düzenleme ile elde edilmiştir. Farklı kanatçık düzenlemelerinin uygulanmasının nedeni, hava akışı içinde türbülans oluşturmak olmuştur. Tüm durumlar için 50 dakika test süresi uygulanmış, başlangıçtan 15 dakika sonra geleneksel PV ile önerilen PV/T toplayıcıları arasındaki verimlilik farkının son derece arttığı açıkça gözlemlenmiştir. Yapılan deneyler sonucu geleneksel PV elektrik verimliliği yaklaşık %7 olarak hesaplanırken, ortaya konulan konfigürasyonların elektrik verimliliği minimum %11,2 olarak hesaplanmıştır. Deney bulgularını doğrulamak için malzeme özellikleri ve model geometrisinin tanımlanması adımlarını içeren CFD yazılımı ile doğrulama yapılmıştır. Simülasyonlar geçerlilik ve doğrulama standartlarına göre yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre; akış hızının %50 artmasının, tüm durumlarda termal verimliliğin önemli ölçüde artmasına neden olduğu ortaya konmuştur.

Su bazlı PV/T sistemlerinde su, sirkülasyon sıvısı veya çalışma sıvısı olarak kullanılmaktadır. Su bazlı PV/T sistemlerin kullanımının en önemli avantajı sıcak su ihtiyacını karşılamaktır.

Sultan and Tso (2018) gelişmiş paralel akış ve geleneksel doğrudan akış kollektör arasında karşılaştırma yapmak için deneyler yapmışlardır. Yapılan çalışmanın değerlendirme

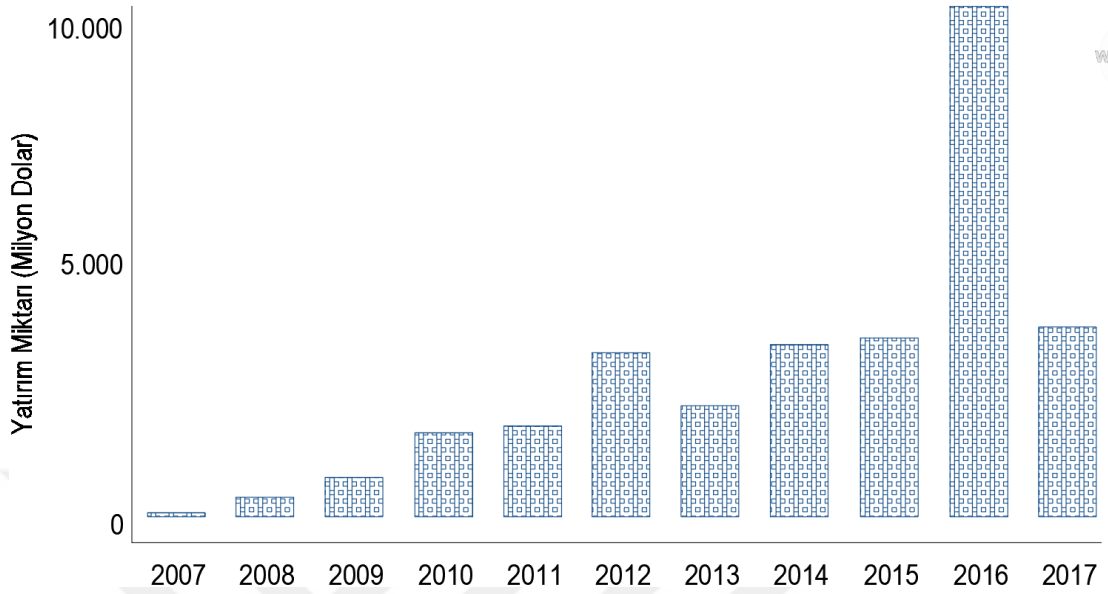
parametresi olarak kollektör termal verimi alınmıştır. Debi aralıkları 0,03 kg/s ile 0,06 kg/s arasında değişirken, güneş ışınlam aralığı 400 W/m² ile 850 W/m² arasında uygulanmıştır. Sonuçlar, aynı çalışma koşulları için geliştirilmiş, paralel akış kollektör tasarımı ile daha iyi performans elde edildiğini göstermiştir. Paralel akışta en yüksek termal verimlilik %57,27 olarak hesaplanırken, doğrudan akış için bu değer %54,26 hesaplanmıştır. Ayrıca aynı ışınlam değeri altında, debi değerinin 0,03 kg/s'den 0,057 kg/s'ye yükseltilmesi, kollektör ısı verimliliğinin paralel akış için %5,07, direk akış için ise %4,79 oranında artmasına neden olduğu ortaya konmuştur.

Bu çalışmada, pastörizasyon için gerekli süre ve enerji maliyetini düşürmek için fotovoltaiik termal sistem destekli ısı pompası kullanılmıştır. Peynire işlenecek sütü pastörize etmek amacıyla, fotovoltaiik termal (PV/T) sistem ve dört geçişli ekonomizör ile desteklenen, mekanik buhar çevrimi prensibine göre çalışan bir ısı pompası sistemi kurulmuştur. Literatürde farklı soğutucu kaynaklı PV/T sistemler kullanılarak PV panel verimliliğini artırmaya yönelik birçok çalışma yapılmıştır. Yine aynı şekilde sütün pastörizasyonu için farklı ısı pompası sistemleri kullanılmıştır. Çalışmamızda bu iki sistem birleştirilerek, polikristal panele göre daha yüksek verime sahip monokristal fotovoltaiik panelin güneş ışınlam değeriyle artan sıcaklığını, arkasına yerleştirilen bakır borular içerisindeki suya aktararak, panelin soğumasını sağlamak ve panel verimini artırmak amaçlanmıştır. Panel verimi artarken ısı enerjisi sütün pastörizasyonu için faydalanabilir hale getirilmiştir. R-134a soğutucu akışkanına göre daha önce tasarlanmış hali hazırdaki sistemin verimini artırmaya yönelik değişiklikler yapılmıştır.

Fotovoltaiik Sistemler

1954 yılında Pearson, Fuller ve Haplin adında Amerikalı üç bilim adamı bugünkü anlamda ilk modern güneş hücresini icat etmiştir. İlk güneş hücrelerinin verimleri %3-%4 arasında bir verime sahipken, yapılan çalışmalar ile bu değer kısa sürede %6'lara ulaşmıştır. 1960'lı yıllarda Hoffman Elektronik şirketi güneş hücrelerinin verimini %14 değerine kadar çıkarmayı başarmıştır. Yapılan çalışmalar güneş hücrelerinin verimini artırmış ancak maliyet açısından yükseklik konusunda çokça ilerleme sağlanamamıştır. Gelişmiş ülkeler 1973 yılındaki petrol krizinden sonra fosil yakıtlara olan bağımlılıktan kurtulmak amacıyla yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelmiş ve bu alandaki araştırmalarda ciddi bir artış olmuştur. Bu çalışmalar neticesinde 1976 yılında ilk amorf silikon hücre düşük maliyetle yapılmıştır (Karagöl ve Kavaz 2017). 2016 yılında dünyada güneş teknolojilerine yatırım miktarı yaklaşık 10.819 milyon dolar seviyelerine kadar çıkmıştır. Türkiye, fotovoltaiik panellerle elektrik üretiminde %1 olan dünya ortalamasının üzerindedir. IRENA (Uluslararası

Yenilenebilir Enerji Ajansı) raporuna göre 2017 yılı itibariyle ülkeler sıralamasında 13 üncü sırada yer almaktadır (Anonymous 2018). 2007-2017 yılları arasında dünyada güneş enerjisi yatırım miktarlarını içeren grafik Şekil 10'da gösterilmiştir.



Şekil 10. 2007-2017 yılları arasında dünyada güneş enerjisi yatırım miktarlarındaki değişim grafiği (Anonymous 2018).

Fotovoltaik hücre

Sınırsız enerji kaynağı güneşin elektromanyetik radyasyon enerjisinden doğrudan elektrik enerjisi üretmek için kullanılan dönüştürücüler, güneş hücreleri olarak tanımlanmaktadır. Yarı iletken levhalardan oluşan fotovoltaik sistemler güneş ışığındaki elektromanyetik dalgaları, elektronları yarı iletken plakanın bir katmanından bir diğer katmanına hareket ettirerek güneş enerjisinden doğrudan elektrik enerjisi üretirler. Fotovoltaik paneller istenilen güç ve kapasiteye bağlı olarak fotovoltaik hücrelerin seri ve paralel bağlanmasıyla farklı kapasite ve gerilimde imal edilebilmektedir. Fotovoltaik hücre üretiminde silisyum, galyum arsenit, kadmiyum tellür gibi yarı iletken maddeler farklı kaplama yöntemleri ile birlikte kullanılmaktadır (Yanıktepe vd 2011).

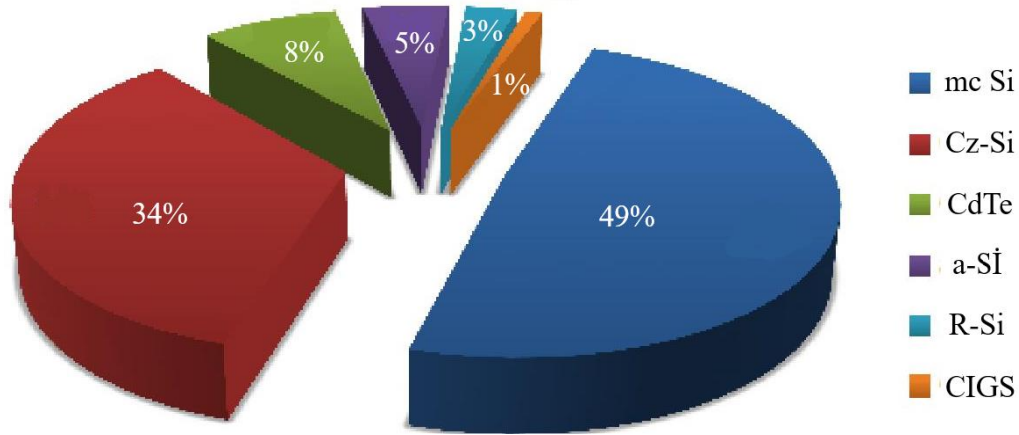
Güneş fotovoltaik hücreleri, fotoelektrik etkisinin yarı iletken malzemeler üzerindeki etkisine dayanır. Bu, bazı durumlarda bir malzeme üzerindeki bir elektronun bir fotonu absorbe edebileceğini belirler. Elektronun fotonla ilişkili kazanacağı enerji, Planck sabiti (h) ve fotonun frekansı (ν) olmak üzere;

$$E_f = h \cdot \nu [J] \quad (1)$$

denklemleri ile elde edilmektedir. Yarı iletken malzeme, bağlı elektronların ve serbest (iletken) elektronların sadece bazı enerji değerlerinde, her ikisi arasında enerji boşluğu adı verilen yasaklı bir enerji bandına sahip olduğu bir kristal katıdır. İdeal bir kristal yarı iletken,

mükemmel bir şekilde sıralanmış, yalnızca kendi ağındaki atomlardan yapılmıştır. Bu atomlar, Silisyum (Si) veya Germanyum (Ge) 'de olduğu gibi yalnızca bir tür olabileceği gibi Galyum Arsenit (GaAs) veya Kadmiyum Tellür (CdTe) gibi iki tipten veya İndiyum-Galyum-Arsenit (InGaA) gibi daha karmaşık formüle sahip türden de olabilmektedir (Callejo *et al.* 2019). Günümüzde malzeme bilimindeki ilerlemeyle birlikte birçok PV malzemesi üretilmiştir. Örneğin, kristal (c-Si) veya amorf (a-Si), heterojeksiyon yapılar CIS (Bakır İndiyum Selenyum), CIGS (Bakır İndiyum Galyum Selenyum), CdTe (Kadmiyum Tellür) esaslı güneş pilleri üretilmektedir (Doshi and Souza 2011).

Son yıllarda yapılan çalışmalar neticesinde, çeşitli PV üretim teknolojileri oluşsa da kristal Si güneş pilleri pazardaki hâkimiyetini korumaktadır. Piyasada bulunan çok kristalli silikon güneş pilleri % 14–19 civarında bir verime sahiptir (Parida *et al.* 2011). Şekil 11’de silisyum esaslı güneş pil üretim dağılım payları gösterilmektedir.



Şekil 11. Silisyum bazlı güneş pil üretim dağılımı (Drabczyk and Panek 2012).

Şekil 11’de gösterildiği gibi üretilen güneş hücrelerinin büyük bir bölümünü %49 pay oranı ile mc-Si (polikristal), %34 pay oranı ile de Cz-Si (monokristal) güneş hücreleri oluşturmaktadır. Şekil 12’de mc-Si (polikristal) ve Cz-Si (monokristal) güneş hücrelerine ait resimler gösterilmiştir.



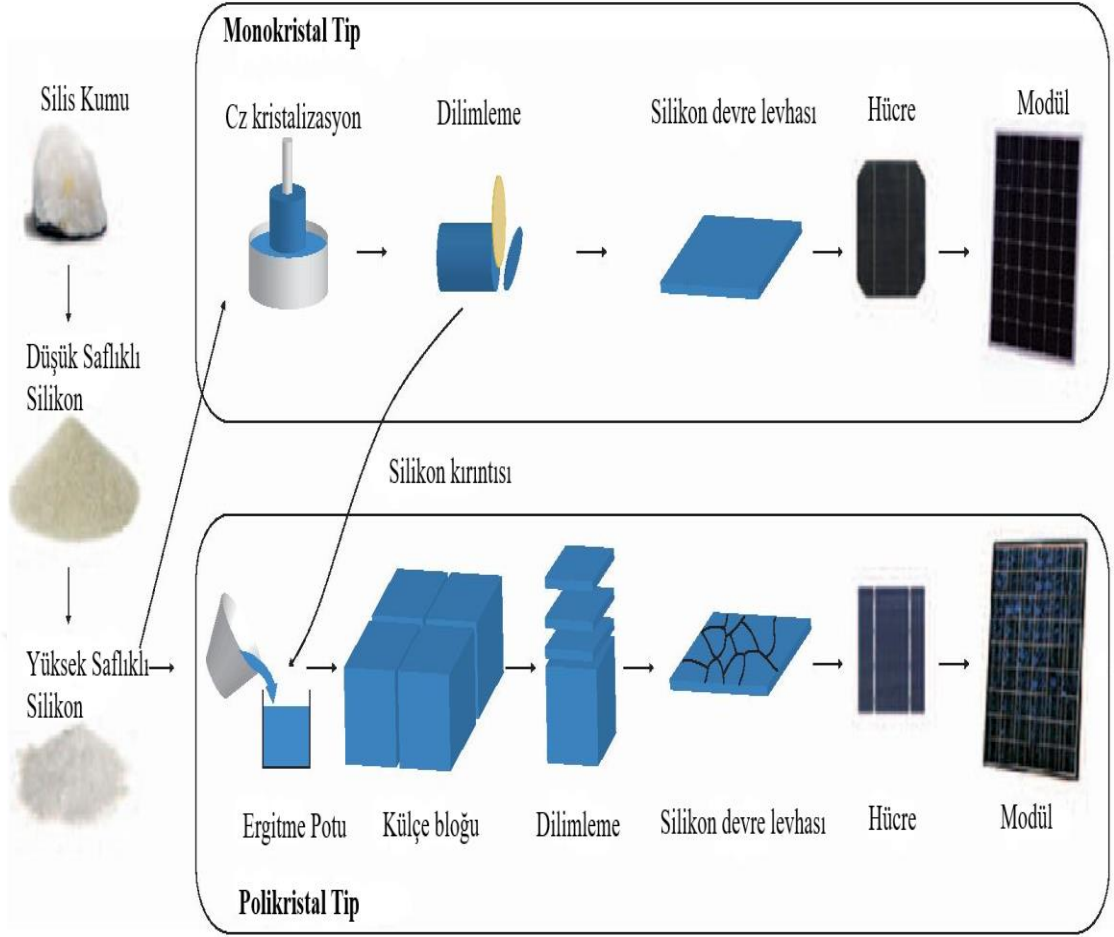
Şekil 12. Tipik monokristal silikon – polikristal silikon hücre resimleri (Saga 2010).

PV hücreleri birçok malzeme çeşitliliği ve farklı yapılar ile imal edildiklerinden, yeni malzeme teknolojileriyle karşılaştırmak amacıyla sınıflandırma gerektirmektedir. Tablo 3’de ise malzeme, yapı, verimlilik ve üreticilerine göre oluşturulan tablo sunulmaktadır.

Tablo 3. Temel Güneş Hücreleri ve Verimlilikleri Tablosu (Drabczyk and Panek 2012)

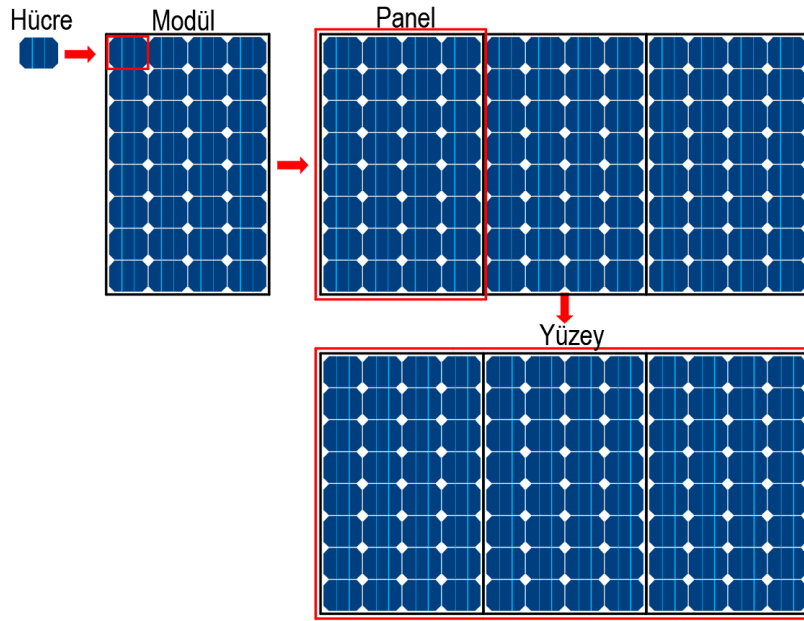
	Hücre Tipi	Hücre Verimi	Modül Verimi	Modül Üreticisi
	Monokristal (Cz-Si)	24,7	22,7	SunPower-USA
	Polikristal (mc-Si)	20,3	18,6	Mitsubishi-JAPONYA
Kristal Si	Mikrokristal (η c-Si)	11,7	10,9	Sanyo-JAPONYA
	Ribon (R-Si)	-	13,4	Evergreen-USA
	HIT	21,8	17,3	Sanyo-JAPONYA
Yüksek Performans	GaAs	25,8	-	-
	InP	21,9	-	-
	GaInP ₂ /GaAs	39,3	-	-
İnce Film	CIGS	19,5	12,2	Solibro-ALMANYA
	CdTe	16,5	10,1	First Solar-USA
	Amorf Si (a-Si)	10,1	7,5	NES-ÇİN
Organic	Polimer	5,1	1,8	Konarka-JAPONYA
Fotokimyasal	Dye-Gratzel	11,4	11,1	Sharp-JAPONYA

Yüzeylerine gelen güneş ışığını doğrudan elektriğe çeviren fotovoltaik hücreler genellikle 125 mm veya 156 mm ölçülerinde kare imal edilmektedirler. Monokristal güneş pilleri Czochralski (CZ) adı verilen kare silikon levhaların külçelerden kesilme işlem ile imal edilmektedir. Polikristal güneş pilleri ise ergitme kaplarında elde edilen polikristal levha küplerinden kesilen kare silikon levhalardan imal edilmektedir. Şekil 13’de monokristal ve polikristal güneş pillerinin imal aşamaları gösterilmektedir.



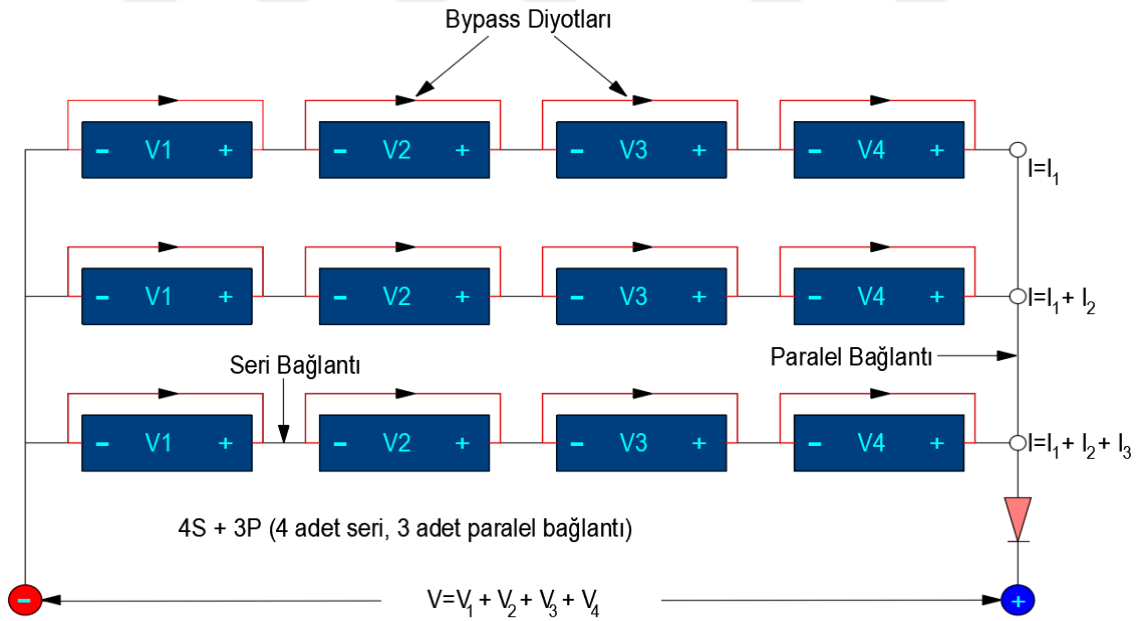
Şekil 13. Monokristal polikristal silikon hücre oluşumu (Saga 2010).

Şekil 13’de de görüldüğü gibi monokristal güneş panelleri yüksek saflıkta silikondan yapılmıştır. Bu sebeple monokristal güneş panelleri polikristal güneş panellerine kıyasla daha yüksek verimliliğe sahiptir. Güneş hücreleri birleşerek modülleri, modüller birleşerek panelleri, paneller ise birleşerek yüzeyleri oluşturur. Şekil 14’de hücre, modül, panel, yüzey oluşumunu gösteren çizim sunulmuştur.



Şekil 14. Hücre – Modül- Panel- Yüzey oluşumu (Al-Waeli *et al.* 2019).

Fotovoltaik modüller birbirlerine seri bağlanarak yüksek çıkış voltajları elde edilmektedir. Fotovoltaik modüller birbirlerine paralel bağlanarak yüksek akım elde edilmektedir. Paralel bağlı modüllerin voltajları tek bir modülün voltajı ile aynı değerde olup, çıkış akımı ise her bir modülün akım toplamına eşittir. Fotovoltaik modüllerin seri ve paralel bağlantı çizimi Şekil 15’de gösterilmiştir.

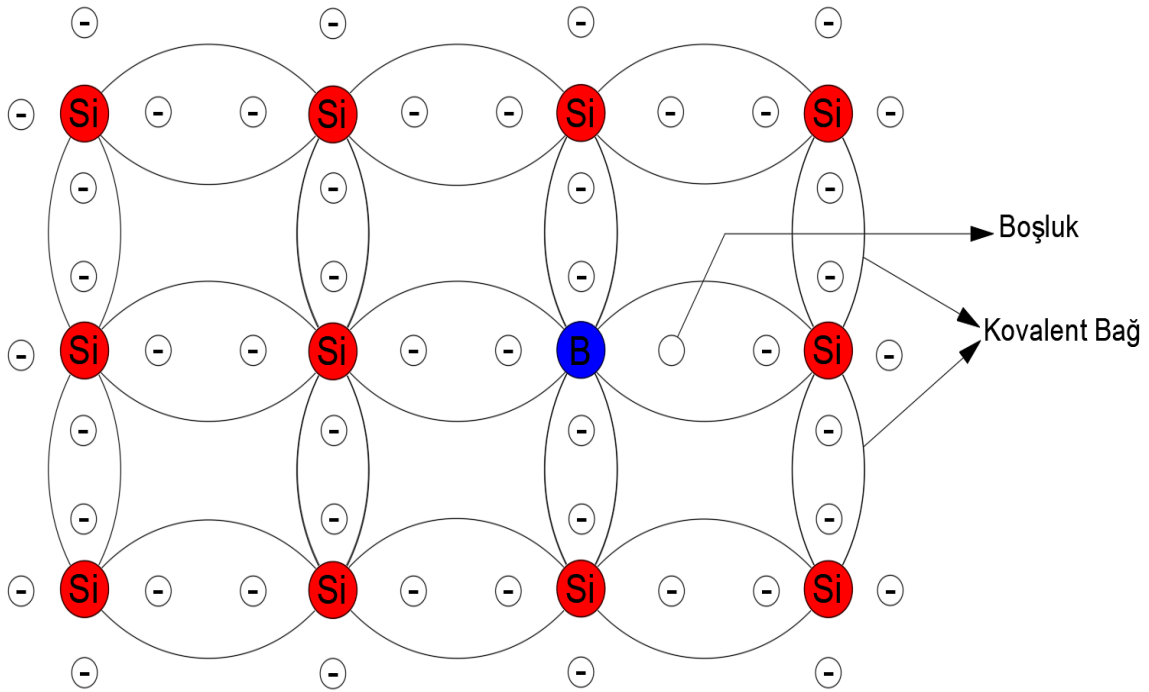


Şekil 15. Fotovoltaik modül seri ve paralel bağlantı çizimi (Foster *et al.* 2010).

P tipi yarı iletken madde

Yarı iletken silisyum atomunun en dıştaki yörüngesinde 4 valans elektronu vardır. Bu elektronlar, diğer dört silikon atomu ile kovalent bir bağ oluşturmasına izin vererek paylaşılır. Söz konusu paylaşım en dışta 3 valans elektrona sahip Alüminyum (Al), Bor (B), Galyum

(Ga) elementleri ile gerçekleştirilebilir. Saf silisyum içerisinde belli bir oranda bor katılırsa; bor elementinin 3 valans elektronu, silisyumun 4 valans elektronu ile ortak kovalent bağ oluşturur. Fakat silisyumun 1 valans elektronu ortak valans bağı oluşturamaz. Bu durumda 1 elektron noksanlığı meydana gelir. Buna boşluk veya delik denir. Bu durum valans bandındaki elektronların serbestçe hareket etmesini sağlamaktadır. Bu hareketlenme delikleri doldurma, yerlerinden ayrılma veya yerlerine boşluk bırakma şeklinde olmaktadır. Boşluk hareketi elektron eksikliğinden kaynaklandığından katkılı kristal pozitif kutup haline gelmektedir. Boşluklar pozitif yüklü olduğundan bu yöntemle elde edilen yeni malzemeye P tipi yarıiletken malzeme denir. P tipi malzemede çoğunluk akım taşıyıcıları boşluklar, azınlık akım taşıyıcıları ise elektronlardır (Al-Waeli *et al.* 2019). Şekil 16'da P tipi yarı iletken madde oluşumu gösterilmiştir.

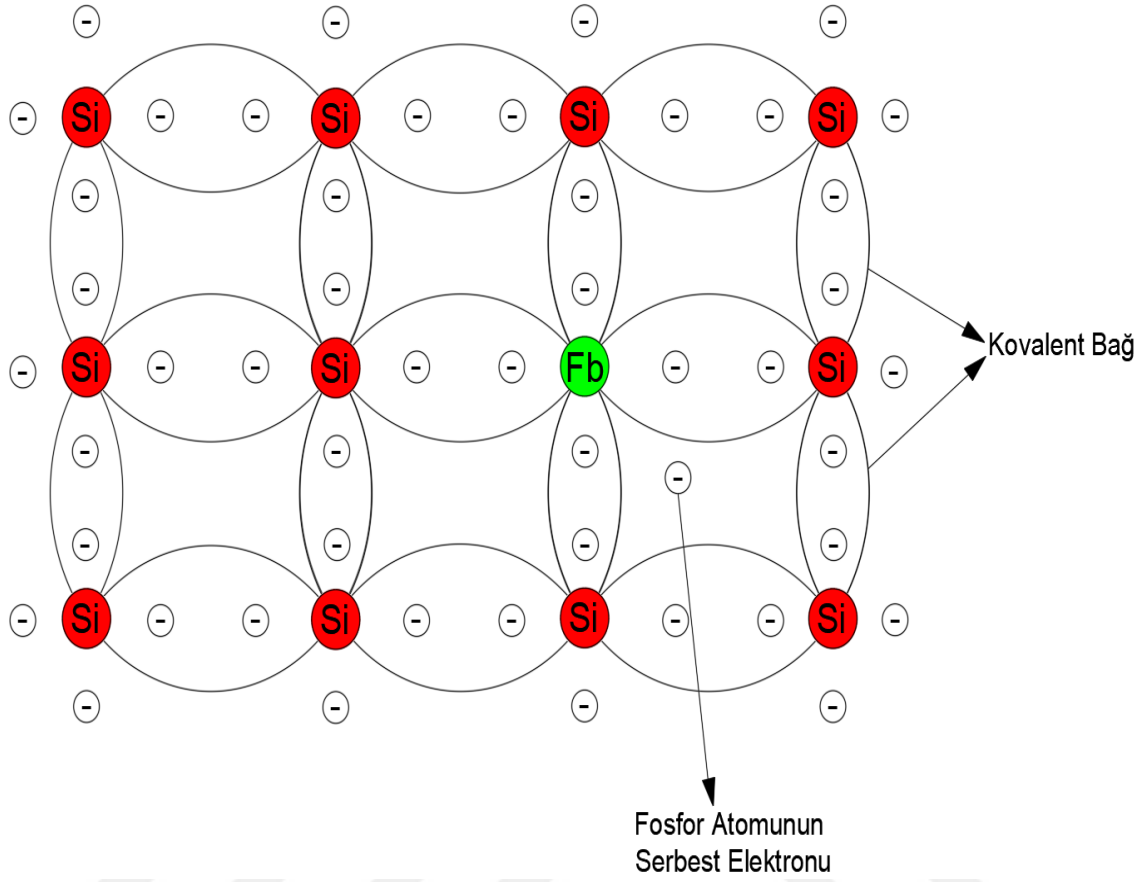


Şekil 16. P tipi yarı iletken madde oluşumu.

N tipi yarı iletken madde

Silisyum beş dış yörünge elektronuna sahip fosfor ile de katkılanabilmektedir. Silisyuma katkı maddesi olarak beş valans elektrona sahip fosfor belli bir oranda eklendiğinde, diğer silisyum atomları ile oluşturduğu kovalent bağ oluşturur. Fosfor atomunun dört valans elektronu, silisyumun dört valans elektronu ile kovalent bağ oluşturur. Fosforun bir valans elektronu açıkta kalır ve ayrılır. Beşinci elektron hareket etmekte serbesttir ve yük taşıyıcısıdır. Bu elektron, değerlik bandından iletim bandına geçmek için diğer elektronlardan daha az enerjiye ihtiyaç duyar. Bu açıkta kalan elektron iletkenliği artırır. Çünkü herhangi bir atoma bağlı değildir. Böylelikle taşıyıcı elektronları, çoğunlukla negatif

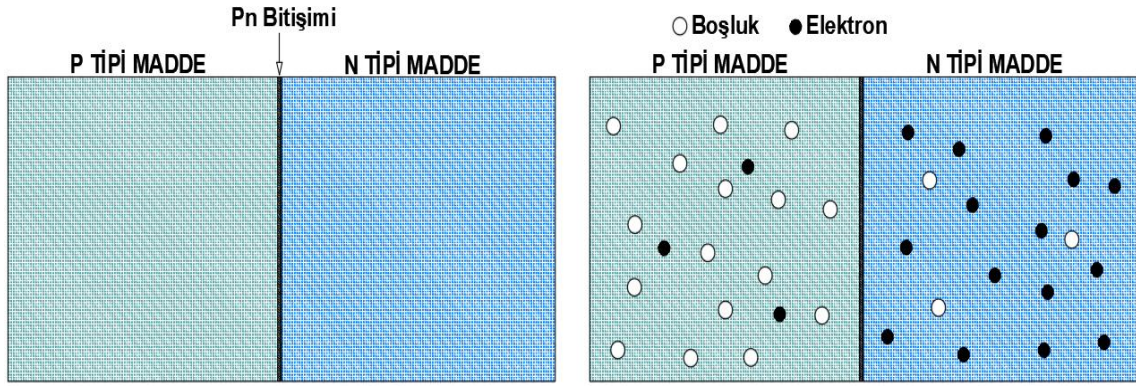
yüklü olduğu için silisyum atomları artık N tipi yarı iletken olurken fosfor pozitif yüklü hale gelir (Al-Waeli *et al.* 2019). Şekil 17’de N tipi yarı iletken madde oluşumu gösterilmiştir.



Şekil 17. N tipi yarı iletken madde oluşumu.

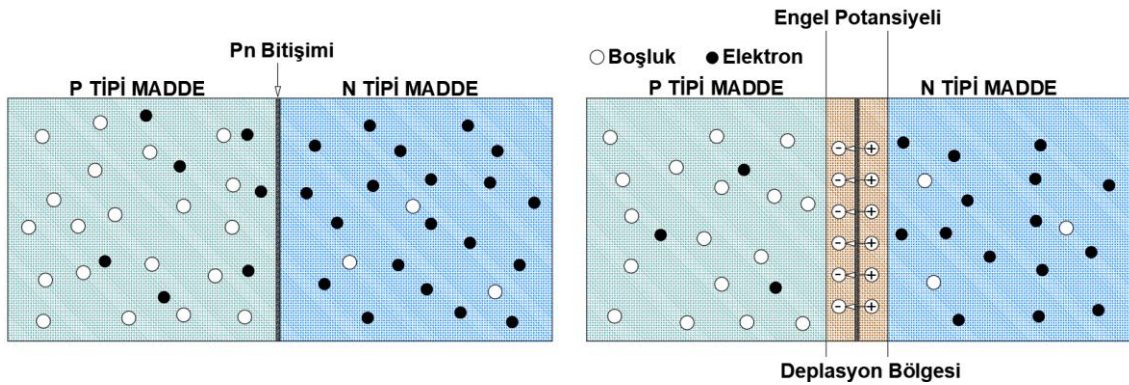
P-n eklemi

Farklı katkılı P tabaka ve N tabakaları elektriksel olarak nötrdür. N bölgesinde daha çok serbest elektron bulunur. Bunlar akım taşıyıcısı olarak görev yaparlar ve “çoğunluk akım taşıyıcısı” olarak adlandırılırlar. Bu bölgede ayrıca ısı etkisi ile oluşturulan birkaç boşluk bulunur. Bunlara ise “azınlık akım taşıyıcıları” adı verilir. P bölgesi ise çok sayıda boşluklar içerir. Bunlara “çoğunluk akım taşıyıcıları” denir. Bu bölgede ısı etkisi ile oluşan birkaç serbest elektron da bulunur. Bunlara ise “azınlık akım taşıyıcıları” denir. Şekil 18’de PN yapısının oluşumu gösterilmiştir.



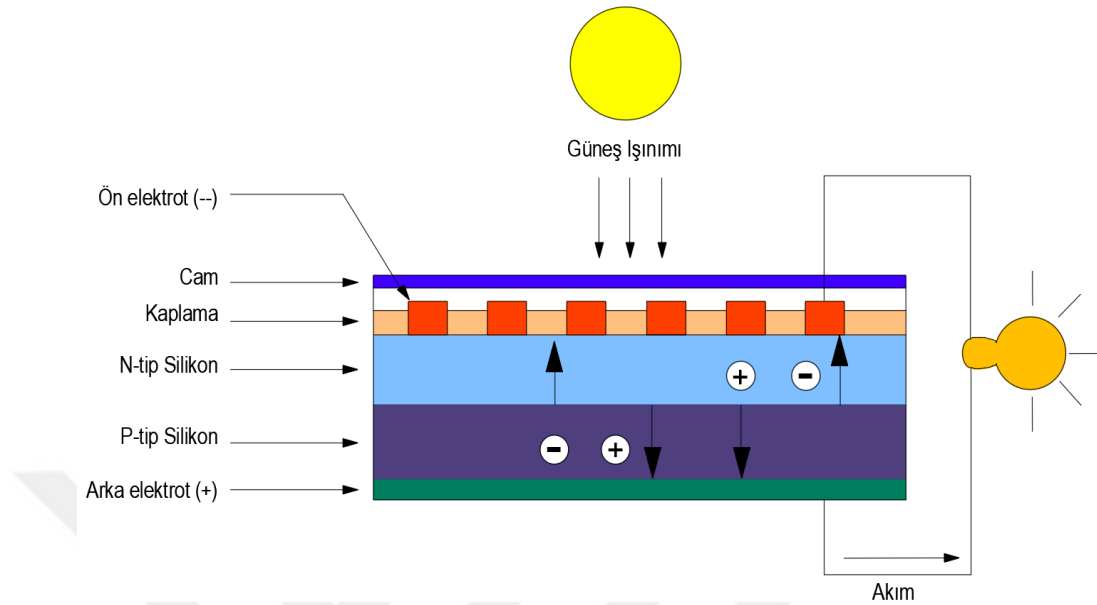
Şekil 18. PN yapısının oluşumu.

P ve N tabakaları birbirine temas ettirildiğinde elektronlar, elektron yönünden zengin olan N bölgesinden fakir olan P bölgesine doğru bir hareketlenme eğilimine girerler. Birleşim olduğu anda N maddesindeki serbest elektronlar, P maddesinde fazla olan boşluklarla birleşirler. P maddesindeki fazla boşlukların bir kısmı ise N maddesine gelip elektronlarla birleşirler. Bu durumda P maddesi net bir negatif yük, N maddesi ise pozitif yük kazanmış olur. Elektron hareketliliği geçiş bandından daha fazla taşıyıcının geçmesini önlemek amacıyla elektronların yeteri kadar elektrik yüküne sahip oluncaya kadar devam eder. Denge durumuna ulaşıldığında, bağlantı noktalarında potansiyel bir bariyer üretilecektir. Potansiyel bariyer, hem elektronların hem de deliklerin bağlantıyı geçmesine karşı çıkacaktır. Verici boşlukları, alıcı ise elektronları itecektir ve tabaka oluşturacaktır. Güneş ışığından fotonlar silikon hücre tarafından emildiğinde, elektronlar bu tabaka boyunca serbestçe hareket edebilecektir. Elektronlar P tabaksına geçecek ve geriye dönmeyecektir. Böylelikle N tabakası fazla elektrona sahip olacağından negatif, P tabakası ise pozitif taraf olur. Bu pozitif ve negatif tabakalara bir elektrik devresi oluşturacak şekilde elektrik iletkenleri yerleştirilerek devrede akım oluşturulabilir. Bu akım DC akım şeklindedir (Al-Waeli *et al.* 2019). PN birleşiminin denge iletimi Şekil 19’da gösterilmiştir.



Şekil 19. PN birleşiminin denge iletimi.

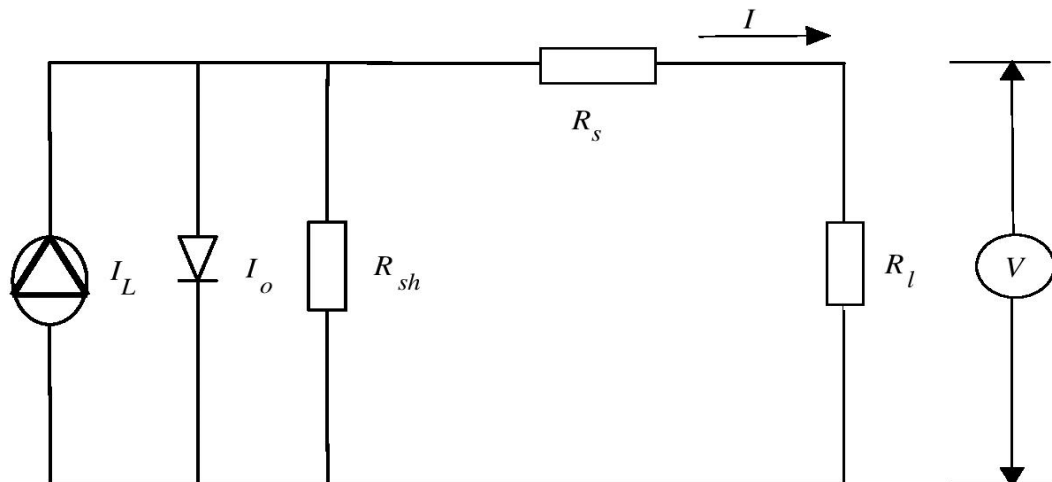
Bu pozitif ve negatif tabakalara bir elektrik devresi oluşturacak şekilde elektrik iletkenleri yerleştirilerek devrede akım oluşturulabilir. Bu akım DC akım şeklindedir. Fotovoltaik etki şematik gösterimi Şekil 20’de gösterilmiştir.



Şekil 20. Fotovoltaik etki şematik gösterim (Öztürk 2007).

PV elektrik devre eşitliği

Güneş pili elektrik devresi Şekil 21’de gösterilmektedir. Devre bir akım kaynağı, diyot, paralel direnç, seri direnç ve elektrik yükünden oluşmaktadır. Paralel direnç R_{Sh} , seri direnç ise R_s olarak tanımlanmaktadır. İdeal devre, akım kaynağı ve diyot ile temsil edilir. Devredeki voltaj Şekil 21’de gösterilmiştir. Bu voltaj, güneş ışınımı ve hücre sıcaklığı gibi diğer faktörlere bağlıdır. Güneş pilinin maksimum voltajına sadece sıfır akımda ulaşılabilir, açık devre gerilimi olarak tanımlanır. Güneş pili üzerindeki voltaj sıfıra eşitse (örneğin, güneş pili kısa devre yapar), akım en yüksek seviyededir. Bu akım “kısa devre akımı” veya I_{SC} olarak bilinir.

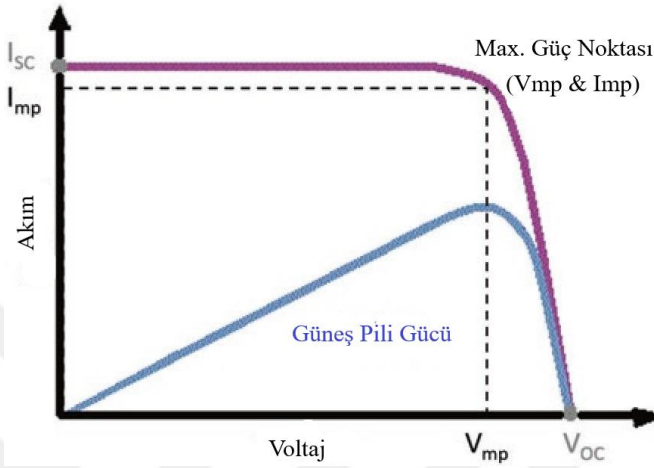


Şekil 21. PV elektrik devre çizimi (Çelik and Açıkgöz 2007).

Güneş pilinin gücü;

$$P_{\max} = I_{\text{mp}} \times V_{\text{mp}} \quad (2)$$

eşitliliği ile elde edilir. I_{mp} ; Güneş pili tarafından üretilen en yüksek akım maksimum güç akımı olarak, V_{mp} ; Güneş pili tarafından üretilen en yüksek gerilime maksimum güç gerilimi, $P_{\max}$; Güneş pili tarafından üretilen en yüksek güç olarak tanımlanmaktadır. Şekil 22’de Akım-Voltaj-Güç eğrisi gösterilmektedir.

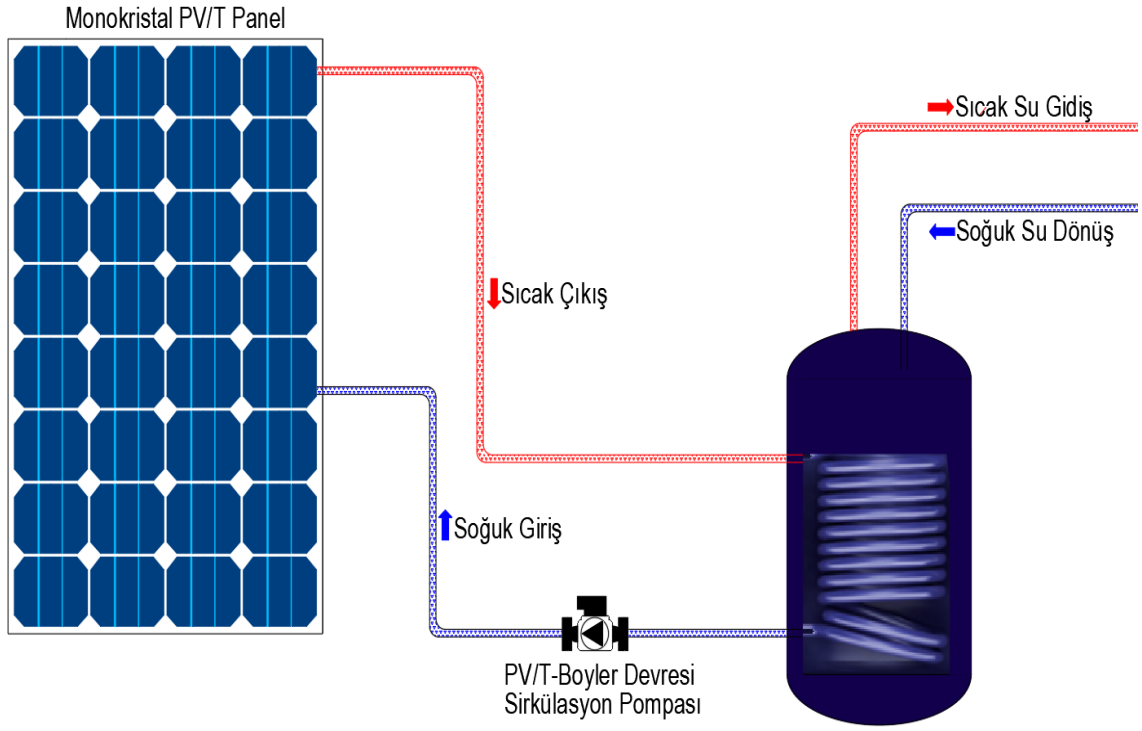


Şekil 22. I-V-P (Akım-Voltaj- Güç) Eğrisi (Callejo *et al.* 2019).

Şekil 22’de görüldüğü gibi gerilimin değişimi sırasında akımın belli bir noktaya kadar sabit kaldığı, bu noktadan sonra düştüğü görülmektedir. Voltaj değerinin güneş pili çıkış gücünü önemli ölçüde etkilediği görülmektedir. Voltaj düşümü ile birlikte güneş pili çıkış gücü de düşer. Bir PV sistemi tarafından üretilen güç, sistem tasarımı yapılırken üzerinde çalışılması gereken güneş ışıınımı, test koşullarındaki modül gücü, sıcaklık, güneş ışıınımına bağlı maksimum güç noktası voltaj değeri, kirlilik, güneş spektrumu değişimi, optik kayıplar gibi bir dizi faktöre bağlıdır (Cuevas and Sinton 2003).

PV/T Sistemleri

Yapılan birçok araştırmada, PV hücre sıcaklığının artışının PV modül voltajının düşüşüne, sonuç olarak da modül elektrik veriminin düşüşüne neden olduğu ortaya konmuştur. Bu verim düşüşünün önüne geçmek amacıyla soğutma metotları açısından çalışmalar yapılmıştır. Bu kapsamda, kullanım amacına göre farklı PV/T sistemleri kullanılarak PV modül elektrik verimini artırmanın yanında güneşin termal enerjisinden de faydalanmasına yönelik çalışmalar gittikçe artmaktadır. Bu amaçla PV panelinin arkasına yerleştirilen borular içerisinden su, kanallar içerisinden ise hava geçirilerek panelin ısısının suya veya havaya aktararak termal enerji elde etmek en yaygın yöntemlerdir. PV/T fotovoltaik modüller ve güneş enerjisi kollektöründen oluşan hibrit bir sistemdir. Şekil 23’de tipik bir PV/T panel çizimi ve kesiti gösterilmektedir.



Şekil 24. PV/T Sistemi ile termal enerji üretim şematik çizimi.

PV modül elektrik verimi;

$$\mu_{el} = \frac{P_{max}}{G_s A_{col}} \quad (3)$$

eşitliği ile elde edilir. P_{max} maksimum PV elektrik gücünü (W), G_s güneş enerjisi ışınlamını (W/m^2), A_{col} kollektör yüzey alanını temsil etmektedir.

PV modül termal verimi;

$$\mu_{th} = \frac{Q_{th}}{G_s A_{col}} \quad (4)$$

eşitliği ile elde edilir. Q_{th} fotovoltaiik modülden soğutucu akışkana transfer edilen ısı miktarını (W), G_s güneş enerjisi ışınlamını (W/m^2), A_{col} kollektör yüzey alanını temsil etmektedir.

PV/T sisteminin toplam verimi ise elektrik ve termal veriminin toplamı olup;

$$\mu_{el} + \mu_{th} = \frac{P_{max} + Q_{th}}{G_s A_T} \quad (5)$$

eşitliği ile elde edilir. A_T kollektör toplam yüzey alanı olup A_{col} ile aynıdır.

PV/T sistemleri güneş pillerinin sıcaklık artışına bağlı olarak, fotovoltaiik modül performans düşümünün çözümüne yönelik çalışmaları içermektedir. Chow *et al.* (2003) yaptıkları çalışmada, güneş kristal silisyum yapıli güneş pili hücre sıcaklığının her 10 °C artışının %5 elektrik güç düşümüne neden olduğunu ortaya koymuşlardır. Ayrıca PV/T sistem

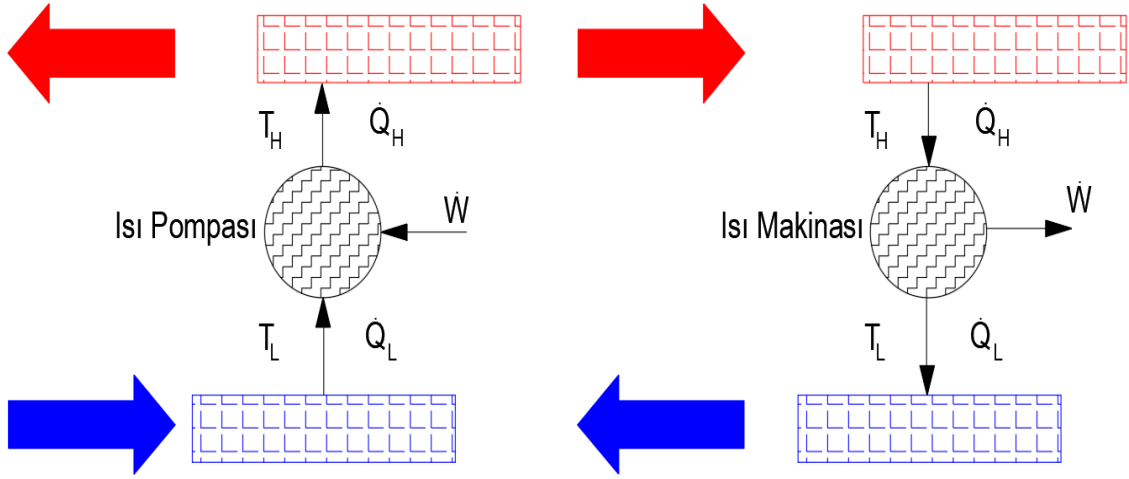
kullanımı ile birlikte, fotovoltaik modüller sadece görünür spektrumdan yararlanırken, termal toplayıcılar kızılötesi dalgaları da emebildiğinden her iki güneş teknolojisinin de birlikte kullanılması, ışıının daha etkin kullanılması sağlanmış olur. İki ayrı sistemin hibrit ünite şeklinde birleştirildiğinden iki ayrı sistemin kurulum maliyetinden daha düşük maliyetle imal edilebilmekte ayrıca daha az kurulum alanına ihtiyaç duyulmaktadır (Al-Waeli *et al.* 2019).

Isı Pompası Sistemleri

Isı pompaları, düşük sıcaklıktaki bir ısı kaynağından daha yüksek sıcaklıktaki bir ısı kaynağına ısı geçişinin gerçekleştirildiği termodinamik sistemlerdir. 1824 yılında Nicolas Leonard Sadi Carnot, buharlı güç çevriminin ters çalıştırılması ile ısının çevreden alınıp yüksek sıcaklık bölgesine transfer edilebileceğini fark ederek, ısı pompalarının temel teorisini ortaya atmıştır. Bu teori Lord Kelvin'in soğutma cihazlarının kullanılarak ısıtma yapılması düşüncesi ile gelişerek 1850 yılında pratikte uygulanabilirliği ortaya konmuştur. II. Dünya Savaşından önce ısı pompasının geliştirilmesi ve kullanılır hale getirilebilmesi için birçok mühendis ve bilim adamı bu alanda araştırmalar ve çalışmalar yapmıştır. Isı pompası endüstrisinin 1950'lerde sahip olduğu potansiyel, yüksek kurulu maliyeti, doğalgaz ve petrole dayanan enerjinin ucuzlaması nedeniyle 1960'lı yıllarda azalmıştır. Isı pompalarının bu duraklamadan sonra önem kazanması 1973'teki enerji krizinden sonra olmuş ve bu tarihten sonra birçok çalışma yapılmıştır. Avrupa ve Amerika'da özellikle 1990'lı yıllardan itibaren kullanımı yaygınlaşmaya başlamış ve her geçen gün kullanıcı sayısı artmıştır (Kiss and Ferreira 2016). Ancak ülkemiz bu teknolojiyle tanışma konusunda geç kalmış ve ısı pompasının sunduğu bütün avantajlara rağmen hala ciddi sayıda kullanıcı sayısına ulaşamamıştır. Türkiye'de ısı pompası uygulamaları ilk olarak 1990'ların ortalarında gerçekleşmiştir.

Isı pompaları bir ısı makinası olarak düşünülebilir. Isı makinası, sıcaklığı yüksek olan bir ortamdan çektiği ısıyı sıcaklığı düşük olan bir ortama transfer ederken iş üretir. Isı pompasında ise ısının düşük sıcaklıktaki bir ortamdan yüksek sıcaklıktaki bir ortama transferi için sisteme iş verilmesi gerekir. Bunun nedeni entropinin her zaman sıfır veya sıfırdan fazla olması, sistemdeki düzensizliğin kendiliğinden artması veya aynı kalması (tersinir süreç) anlamına gelir (Haddad *et al.*2005).

Şekil 25'de de görüldüğü gibi ısı pompaları ve ısı makinaları birbirinin tersi çevrime sahip sistemlerdir. Her iki sistem için de süreçler tersinir olarak kabul edilirse, ısı makinaları için ısı verim $\dot{W}/\dot{Q}_L$, ısı pompası performans katsayısı ise $\dot{Q}_H/\dot{W}$ oranı ile elde edilebilmektedir. Aynı oran soğutma makinaları için soğutma performans katsayısı olarak tanımlanmaktadır.



Şekil 25. Isı pompası ve ısı makinası çevrimi (Özyurt 2002).

Isı makinası ısı verimi;

$$\eta_{th} = \frac{\dot{W}}{\dot{Q}_L} \quad (6)$$

Isı pompası performans katsayısı;

$$COP_{ip} = \frac{\dot{Q}_H}{\dot{W}} \quad (7)$$

Soğutma cihazının performans katsayısı;

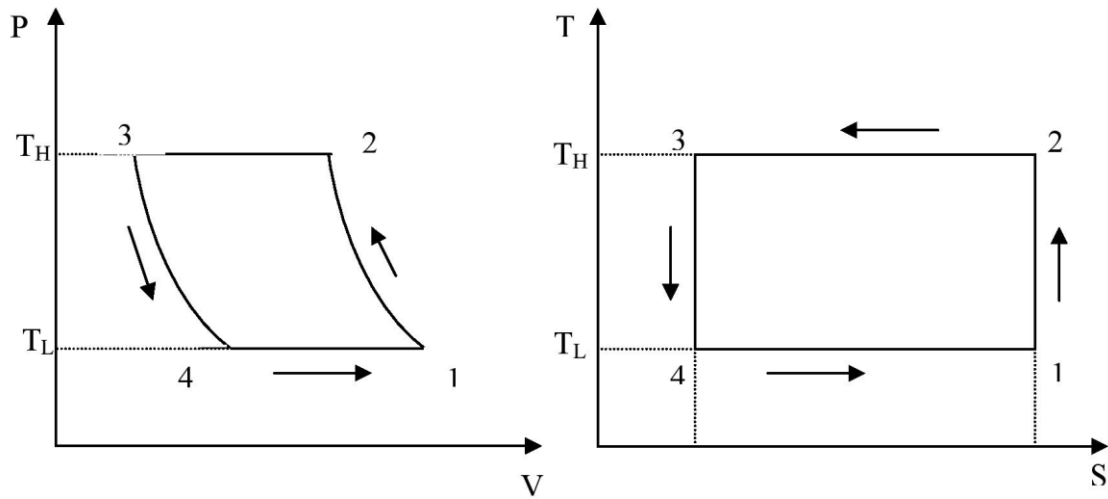
$$COP_{soğ} = \frac{\dot{Q}_L}{\dot{W}} \quad (8)$$

eşitlikleri ile tespit edilmektedir.

Isı pompalarının performans analizlerini yapmak için termodinamik çevrimlerinin bilinmesi gerekmektedir. Şekil 26'da ısı pompasına ait ideal (ters Carnot) çevrim P-v ve T-s diyagramları gösterilmektedir. Isı pompası uygulamalarında kullanılan bu çevrimde, ısı çevreye sabit T_H sıcaklığında atılırken, çevreden T_L sabit sıcaklığında çekilir. Genişleme ve sıkıştırma işlemleri izentropik olarak gerçekleşir. Bu açıklamalar doğrultusunda Carnot performans katsayısı;

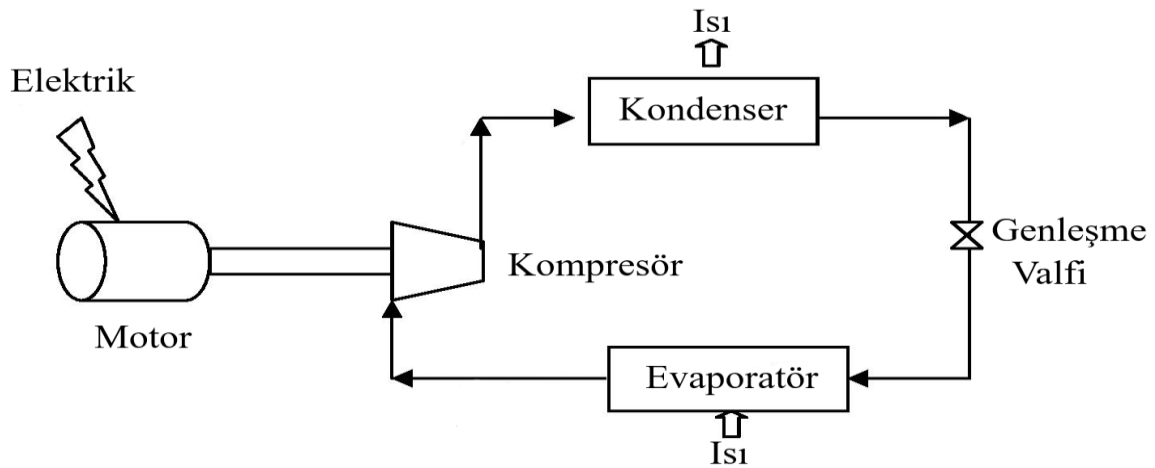
$$COP_{car} = \frac{T_L}{T_H - T_L} \quad (9)$$

eşitliği ile elde edilmektedir (Gürü ve Yalçın 2012).



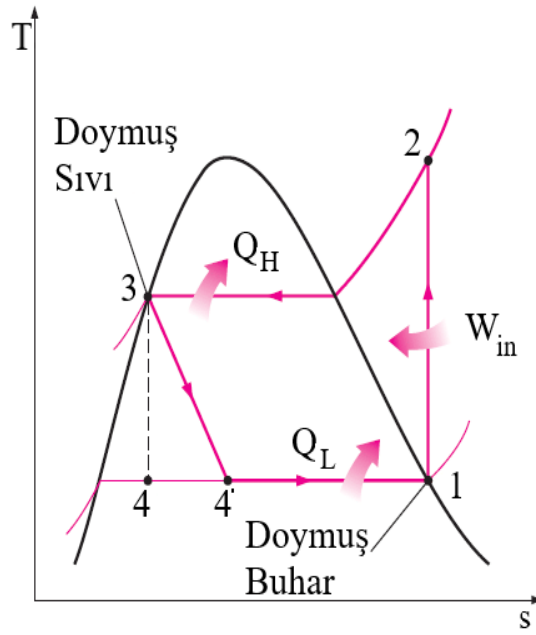
Şekil 26. Carnot ısı pompası çevrimi P-v, T-s diyagramı (Gürü ve Yalçın 2012).

Isı pompaları sahip oldukları termodinamik çevrime göre çeşitlilik göstermektedir. Buhar sıkıştırmalı ısı pompaları ise kompresöre dışarıdan verilen güç girişinin çeşidine göre elektrik ısı pompaları, gaz ısı pompaları, dizel ısı pompaları olarak sınıflandırılmaktadır. Ayrıca ısı pompaları kullandıkları ısı kaynağına göre hava kaynaklı, toprak kaynaklı, yerüstü su kaynaklı, yeraltı su kaynaklı, güneş enerjisi ısı kaynaklı, jeotermal enerji kaynaklı, atık ısı kaynaklı ısı pompaları olarak sınıflandırılabilir (Aktaş 2008). Deneysel çalışmamızda mekanik buhar sıkıştırma çevrimiyle çalışan PV/T destekli ısı pompası kullanılmıştır. Şekil 27’de Mekanik buhar çevrimine göre çalışan ısı pompası çevrimin şematik resmi çizilmiştir.



Şekil 27. Mekanik buhar çevrimine göre çalışan ısı pompası çevrimin şematik resmi (Demir vd 2005).

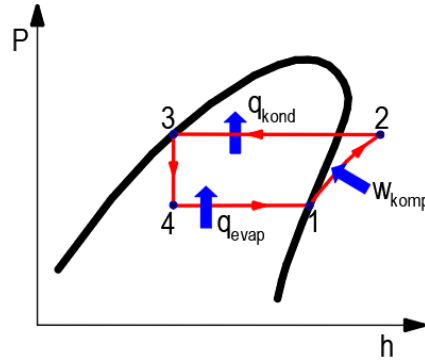
Prensip olarak tüm ısı pompaları kompresör, kondenser (yoğuşturucu), evaporatör (buharlaştırıcı) ve genleşme vanası olmak üzere dört ana elemandan oluşurlar. Çevrimde uygun sıcaklık ve basınçlarda faz değiştirebilen iş yapan akışkan (çalışma akışkanı) kullanılmaktadır. Deneysel çalışmamızda iş yapan akışkan olarak R134-a Freon gazı kullanılmıştır. Şekil 28’de ideal buhar sıkıştırmalı ısı pompasına ait T-s diyagramı gösterilmektedir.



Şekil 28. İdeal buhar sıkıştırma ısı pompasına ait T-s diyagramı (Çengel ve Boles 2008).

Isı pompası sisteminde sıkıştırma işlemi elektrikle tahrik edilen bir kompresör vasıtasıyla gerçekleştirilir. Çevrimde iş yapan (soğutucu) akışkan 1-2 arasında izentropik olarak sıkıştırılır. Soğutucu akışkan 1 noktasına doymuş buhar olarak girer. 2 noktasında, kompresörden kızgın buhar fazında çıkan soğutucu akışkan önce sabit basınçta soğur daha sonra 3 noktasına gelinceye kadar sabit sıcaklıkta yoğunlaşır. Bu proseste kondenserden çevreye ısı geçişi gerçekleşir. 3-4 arasında bir kısılma valfi vasıtasıyla adyabatik genişler. Genişleme prosesi tersinmezdir. Bu proseste soğutucu akışkan yüksek basınçtan alçak basınca geçerken ısı alışverişi olmadığından proses adyabatik olarak kabul edilmektedir. 4 noktasında soğutucu akışkanın bir kısmı sıvı bir kısmı da buhar fazındadır. 4 noktasına sıcaklık ve basıncı düşmüş olarak gelen soğutucu akışkan 4-1 arasına evaporatör içerisinde çevreden ısı çekerek sabit basınçta buharlaşır.

Mekanik buhar sıkıştırma çevrimini basınç–entalpi diyagramında analiz etmek T-s diyagramına göre daha kullanışlı olarak kabul edilmektedir. Soğutucu akışkanın kompresör giriş ve çıkışındaki özellikleri P-h diyagramından kolaylıkla tespit edilebilmektedir. Ayrıca yatay eksen entalpi olduğundan yoğunlaşma esnasında çevreye atılan ısıyı, buharlaşma esnasında çevreden çekilen ısıyı ve kompresör işini bu eksenle ölçmek mümkün olabilmektedir. Şekil 29’da ideal buhar sıkıştırma ısı pompasına ait P-h diyagramı gösterilmektedir.



Şekil 29. İdeal buhar sıkıştırırmalı ısı pompasına ait P-h diyagramı (Çengel ve Boles 2008).

Şekil 29'daki Log P-h diyagramını kullanarak çevrim analizi yapılırsa; sistemde kondenserden çevreye atılan ısı miktarı;

$$\dot{Q}_{kond} = \dot{m}_{R134-a}(h_2 - h_3), \quad (10)$$

Sistemde evaporatörde çevreden çekilen ısı miktarı;

$$\dot{Q}_{evap} = \dot{m}_{R134-a}(h_1 - h_4), \quad (11)$$

Kompresörün çektiği enerji ise;

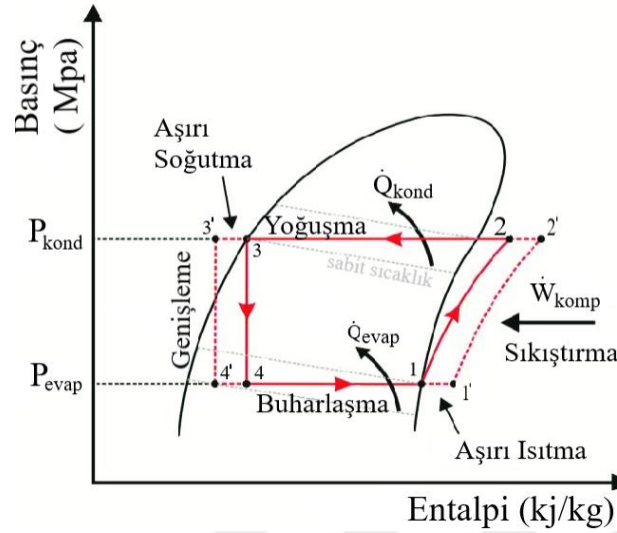
$$\dot{W}_{komp} = \dot{m}_{R134-a} (h_2 - h_1), \quad (12)$$

eşitlikleri ile hesaplanabilir (Çengel ve Boles 2008).

Gerçek buhar sıkıştırma çevrimi ideal buhar çevriminden farklılık göstermektedir. Kompresörde silindir içerisine sıvı halde soğutucu akışkan girmesi kompresörün zarar görmesini kaçınılmaz hale getireceğinden, soğutucu akışkana kompresöre girmeden önce aşırı kızdırma uygulanmaktadır. Şekil 30'da görüldüğü gibi gerçek çevrimde soğutucu akışkan kompresöre 1 noktası yerine 1' noktasında girmektedir. Böylece kompresöre sıvı partiküllerin girmesinin önüne geçilmiş olunur. Aşırı kızdırma yaparak kompresörün zarar görmesi engellenir ancak bu işlem sistem üzerinde olumsuzluklara da neden olmaktadır. Gerçek çevrimde 1' noktasında soğutucu akışkan aynı kütleli debi için daha büyük özgül hacme sahip olduğundan kompresör kapasitesini artırmak gerekmektedir. Ayrıca gerçek çevrimde kompresör çıkış sıcaklığı ideal çevrime göre daha yüksek olacağından kompresör valfleri için olumsuz bir durum oluşturmaktadır.

Gerçek buhar sıkıştırma çevriminin ideal çevrimden farklılık gösterdiği diğer proses ise aşırı soğutma işlemidir. Şekil 30'da görüldüğü gibi ideal buhar sıkıştırma çevriminde kısma işlemi 3 noktasında (doymuş sıvı) başlamaktadır. Kondenser ve kısılma vana arasında, soğutucu akışkan devresi hattında oluşan basınç kaybı soğutucu akışkan içerisinde buhar fazı oluşumuna neden olmaktadır. Bu da kısılma valfinin performansına olumsuz etki eder. Bu

olumsuz durumu ortadan kaldırmak için aşırı soğutma işlemi yapılmaktadır. Şekil 30'da gerçek buhar sıkıştırma çevrimi Log P-h diyagramı gösterilmektedir.



Şekil 30. Gerçek buhar sıkıştırma çevrimi P-h diyagramı (Çengel ve Boles 2008).

Gerçek ısı pompası çevriminin ideal buhar sıkıştırma çevriminden farklılık göstermektedir. Bu farklılıklar kompresörde yapılan sıkıştırma işleminin gerçek çevrimde izentropik olmaması yani entropinin artması, yoğuşma ve buharlaşma süresinde basınç değişiminin olması, genişleme prosesinin adyabatik olmaması olarak sıralanabilmektedir.

Pastörizasyon

Pastörizasyon, sütün doğal ve biyolojik özelliklerine fazla zarar vermeden, içinde bulunan ve hastalık yapan patojen bakterileri tamamen yok etmek, sütün dayanma süresini azaltan saprofit bakterilerin ise tamamına yakını ortadan kaldırmak için uygulanan kontrollü ısı işlemi olarak tanımlanmaktadır. Fransız bilgini Pasteur 1860-1864 yılları arasında ilk olarak bu uygulamayı şarabı daha dayanıklı hale getirmek için uygulamış, 1873 yılında Jaccoy, 1886 yılında Soxhlet tarafından süt için uygulanmış başarılı sonuç elde edilince endüstriye sokulmuştur (TSEK 1981).

Süt pastörizasyonu ile amaçlanan, Metin (1998) tarafından; süt içerisindeki patojen (hastalık yapıcı) mikroorganizmaları yok etmek, süt içerisinde bulunan, patojen olmayan, süt mamullerinin bozulmasına neden olan mikroorganizmaların büyük bir kısmını öldürerek sütü daha dayanıklı hale getirmek, sütü hızla soğutarak içerisinde ısıya dayanıklı mikroorganizmaların inaktif hale gelmesini sağlamak, söz konusu ısı işlemleri sırasında sütün doğal ve biyolojik özelliklerine fazla zarar vermemek şeklinde ifade edilmiştir (Özyurt 2002). Sütün fiziksel özellikleri Tablo 4'de verilmiştir.

Tablo 4. Sütün Fiziksel Özellikleri (Aktaş 2008)

Özellikler	Değerler
Özgül ağırlık (g/cm ³)	1,032
Vizkozite (cp)	2,5
Donma noktası (°C)	0,54
Kırılma indisi	1,3478
Isı kapasitesi (cal/g/grd)	0,92

Pastörizasyon işlemi, süte uygulanan sıcaklığın derecesi ve prosesin süresine göre düşük sıcaklıkta uzun süreli pastörizasyon (LTLT), yüksek sıcaklıkta kısa süreli pastörizasyon (HTST) 2 ayrı yöntem ile yapılmaktadır.

Düşük sıcaklıkta uzun süreli pastörizasyon (LTLT)

Kesikli pastörizasyon olarak adlandırılan düşük sıcaklıkta pastörizasyon temelde gıda güvenliği ile ilgilidir ve tüm patojenik mikroorganizmaların öldürülmesini, gıda numunesinde bozulma tiplerinin azaltılmasını amaçlamaktadır. Düşük sıcaklıkta pastörizasyon geçirmiş olan süt, peynir sentezini teşvik ettiği için peynir yapımı için uygundur. Düşük sıcaklıkta pastörizasyon, 63 °C/30 dakika sıcaklık/zaman kombinasyonunda uygulanabilmektedir (Anonymous 2017).

Düşük sıcaklıkta uzun süreli pastörizasyon işleminde, sütün ısıtılmasında kullanılan kazanlar paslanmaz çelik malzemeden, çift cidarlı ve genellikle silindirik olarak imal edilmektedir. Bu proseste süt, kazan cidarlarında dolaştırılan su veya buhar vasıtasıyla ısıtılmaktadır. Bu işlemde sütün homojen bir şekilde ısınmasını sağlamak amacıyla karıştırıcı kullanılmaktadır. Isınma işleminden sonra süt yine kazan sisteminin içerisinden soğuk su geçirmek suretiyle soğutulmaktadır. Şekil 31’de düşük sıcaklıkta uzun süreli pastörizasyon (LTLT) sistem üç boyutlu çizimi gösterilmektedir.

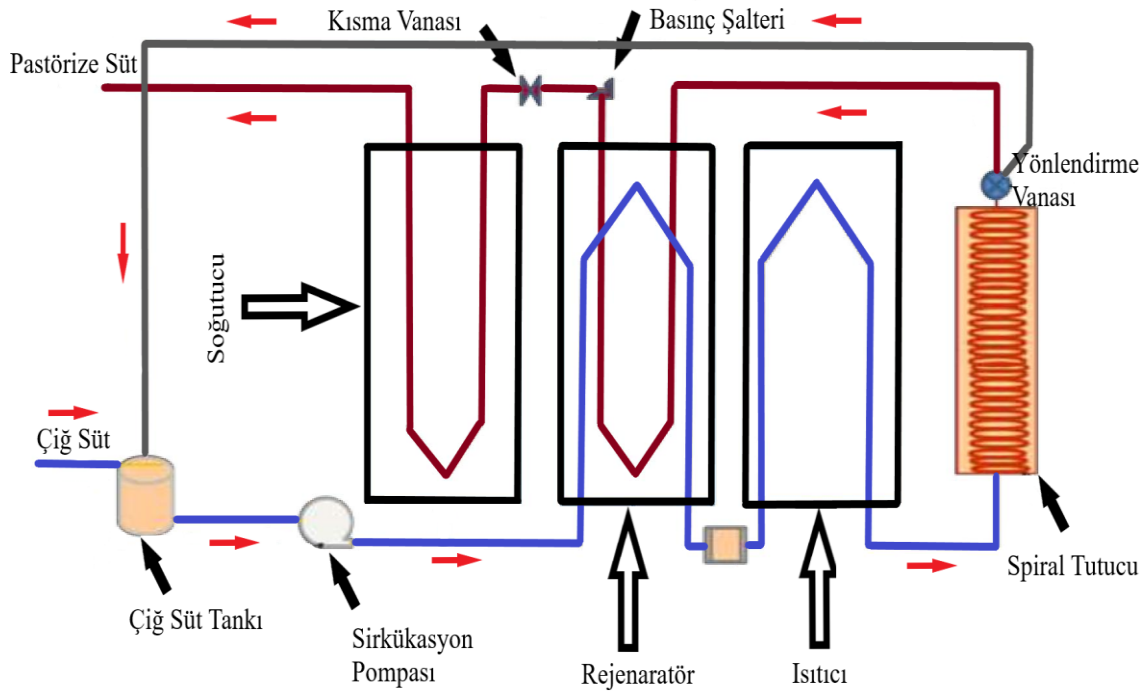


Şekil 31. Düşük sıcaklıkta uzun süreli pastörizasyon (LTLT) sistem üç boyutlu çizimi.

Düşük sıcaklıkta uzun süreli pastörizasyon işleminin avantajları; küçük tesisler için uygun olması, düşük hacimli ürünlerin işlenmesi, şişe sütü ekşi krema gibi kültürlü ürünler için uygun olması, kontrolünün basit kurulum maliyetinin düşük olması, dezavantajları ise prosesin yavaş olması, kontrolün manuel olması nedeniyle dikkat gerektirmesi, rejenerasyon olmaması nedeniyle ısıtma ve soğutma işlemlerinin daha maliyetli olması olarak sıralanabilmektedir (Dash 2000).

Yüksek sıcaklıkta kısa süreli pastörizasyon (HTST)

Sütün pastörizasyonunda uygulanan sıcaklık ve süreye bağlı olarak sürekli pastörizasyon normu (71-74 °C’de 15-30 saniye), ultra pastörizasyon normu (85-90 °C’de 8-15) olarak adlandırılmaktadır. Sürekli akış sistemleri olarak da adlandırılan bu sistemler kapalı devre olduklarından hijyeniktirler. Sistem ile üniform ısı iyileştirme sağlanması, ısıtma ve soğutma proseslerinin az zaman alması, işletme maliyetleri düşük olması, az yer kaplaması en büyük avantajlarıdır. Büyük kapasiteli işletmeler için uygun olan sistemin şematik çizimi Şekil 32’de verilmiştir.



Şekil 32. Yüksek sıcaklıkta kısa süreli pastörizasyon (HTST) çizimi (Dash 2000).

Şekil 32’de görüldüğü gibi çiğ süt bir pompa vasıtasıyla sabit seviyeli paslanmaz çelik tanktan, pastörize edilecek süte ön ısıtma uygulamak maksadıyla paslanmaz çelik malzemeden imal plakalı ısı değiştiricisine gönderilir. Isı değiştiricisinde pastörize edilecek süte ön ısıtma uygulanmaktadır. Rejeneratör pastörizasyon olarak tanımlanan bu sistemle pastörizasyon için gerekli ısı ihtiyacının azaltılması amaçlanmaktadır. Daha sonra süt ısıtıcıya girerek burada pastörizasyon sıcaklığına yükseltilir. Pastörizasyon sıcaklığında bir süre

bekleyen süt yönlendirici bir vana vasıtasıyla ısı değiştiricisine girerek burada çiğ süte ısısını aktararak soğuması sağlanmaktadır. Böylelikle hem çiğ süte ön ısıtma sağlanmış olur hem de sütün soğutma gereksinimi azaltılmış olur. Daha sonra süt soğutucuya girerek ürün işleme sıcaklığına düşürülür.



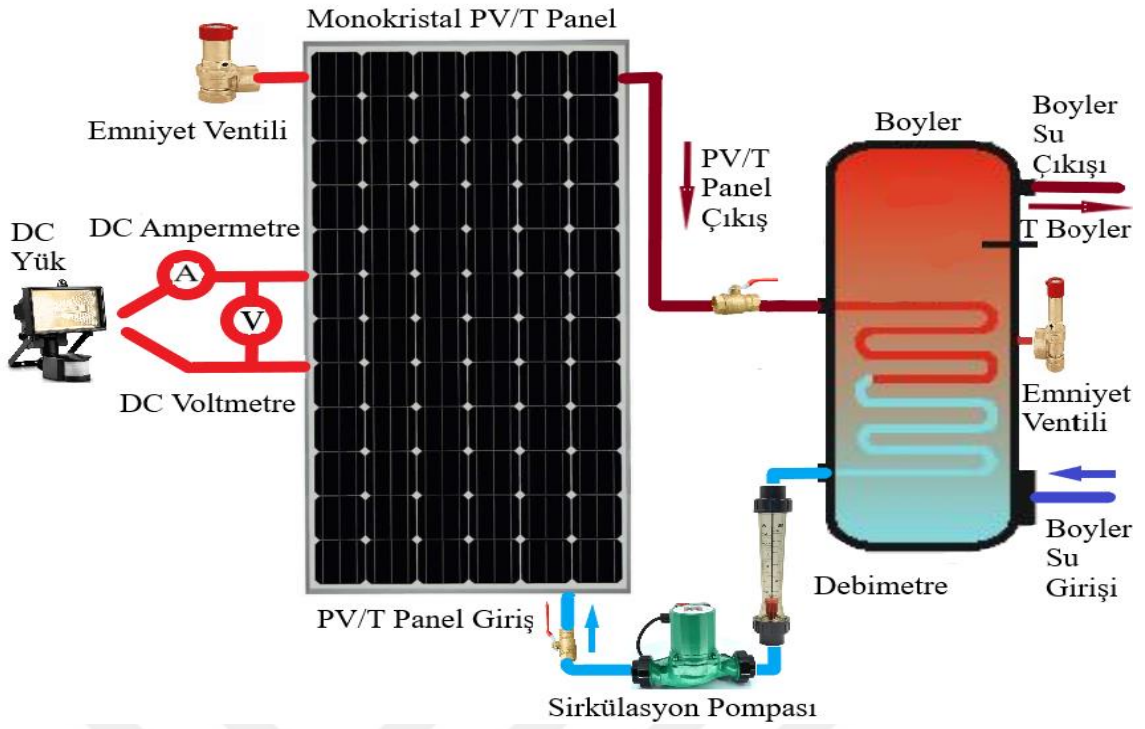
MATERYAL ve YÖNTEM

Deney Düzeneği

Fotovoltaik sistemlerle elektrik üretimi sağlanırken, PV hücre sıcaklık artışının fotovoltaik modülün voltajında azalmaya yol açtığı ve bunun da toplam elektrik verimliliğinde düşüşe neden olduğu bilinmektedir. Voltajın ve dolayısıyla elektrik verimliliğinin azalmasının önüne geçmek amacıyla soğutma yöntemleri kullanılmaktadır. Soğutma için PV/T kolektörlerinin kullanılması ile PV modüllerinin elektrik verimini korumanın yanı sıra bir güneş enerjisi emicisi olarak termal enerji de elde edilir. Üretilen ısıyı, sütün pastörizasyon işlemi için kullanarak fotovoltaik panel verimini artırmak ve daha önce sütün pastörizasyonu için kurulan ısı pompası sistemi üzerine etkilerini görmek amacıyla konu ile ilgili literatür araştırması yapılmış, ülkemizde ve dünyada yapılan çalışmalar incelenmiştir. PV/T panel vasıtasıyla 80 litre hacmindeki kapalı sistem boyler suyu, PV panel arkasına yerleştirilen bakır borular içerisinden geçirilerek, ısı pompası ile pastörize edilmek istenen çiğ süte ön ısıtma yapmak amaçlanmıştır. Bu amacı gerçekleştirirken hem fotovoltaik panel sıcaklığını düşürerek elektriksel verimini artırmak hem de panel üzerinde oluşan ısı enerjisinin süte aktarılması hedeflenmiştir. Şekil 33’de sütün pastörizasyonunda ön ısıtma işlemi için kullanılan PV/T sistem resmi gösterilmektedir. Şekil 34’de ise PV/T sistemin iki boyutlu çizimi gösterilmektedir.



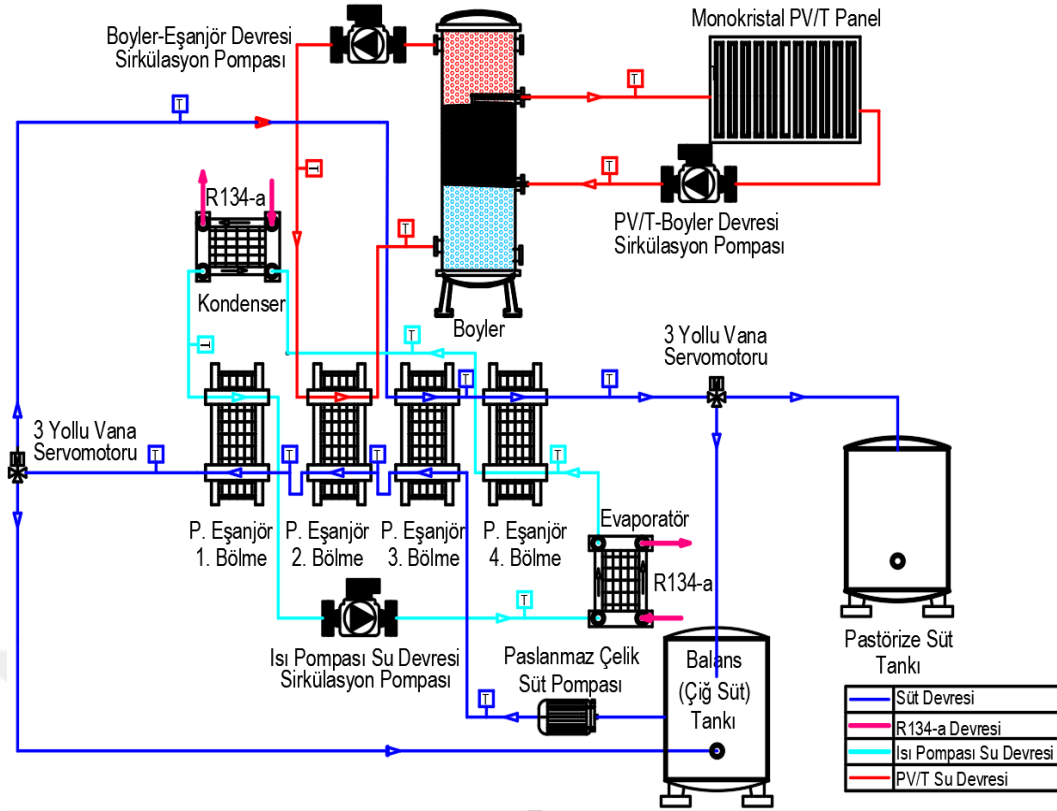
Şekil 33. Sütün pastörizasyonunda kullanılan PV/T sistem resmi.



Şekil 34. Sütün pastörizasyonunda kullanılan PV/T sistem iki boyutlu çizimi.



Şekil 35. PV/T destekli ısı pompası sistemi genel görünüm fotoğrafı.



Şekil 36. PV/T destekli ısı pompası sistemi iki boyutlu çizimi.

Şekil 35’de sütün pastörizasyonu için tasarlanan ve kurulumu Atatürk Üniversitesi yenilenebilir enerji laboratuvarına yapılan sistemin genel görünüm fotoğrafı, Şekil 36’da ise sistemin akış şeması gösterilmektedir. Şekil 36’da görüleceği üzere sistemde PV/T panel-boyler, boyler-plakalı eşanjör (ikinci bölme), süt tankları-plakalı eşanjör, ısı pompası su devresi-plakalı eşanjör (birinci ve dördüncü bölme) ve ısı pompası gaz devresi olmak üzere beş ayrı kapalı devre bulunmaktadır. Pastörizasyon işlemi süresince, süt 100 lt kapasiteli, paslanmaz çelik malzemeden imal çiğ süt (balans) tankı ve plakalı eşanjör devresi arasında dolaşımına devam etmektedir. Pastörize edilen süt yine 100 lt kapasiteli, paslanmaz çelik malzemeden imal pastörize süt tankında toplanmıştır. Sistemde sütün dolaşımı paslanmaz çelik süt pompası ile gerçekleştirilmiştir. Pastörizasyon işleminden önce 80 litre, 60 °C boyler suyu PV/T sistem ile elde edilerek depolanmıştır. Şekilde de görüldüğü gibi süt pompası vasıtasıyla eşanjörün ikinci bölmesine gönderilen çiğ süte, eşanjörde boyler suyu ile çarpıştırılarak ön ısıtma yapılmıştır. Eşanjörün ikinci bölmesinden ön ısıtılmış olarak çıkan sütün, ısı pompasının kondenslerinde ısıtılan suyla eşanjörün birinci bölmesinde çarpıştırılarak pastörizasyon sıcaklığına getirilmesi amaçlanmıştır. Sıcaklığı iyice artan süt, eşanjörün üçüncü bölmesinde, balans tankından gelen çiğ sütle çarpıştırılarak çiğ süte ön ısıtma uygulanmıştır. Isısının bir bölümünü çiğ süte aktararak, sıcaklığı bir miktar düşen süt, eşanjörün dördüncü bölmesinde, ısı pompasının evaporatöründe soğuyan suyla çarpıştırılarak ürün sıcaklığına düşürülmesi hedeflenmiştir. Çevrim, sütün plakalı eşanjör birinci bölmesi

çıkışında, pastörizasyon sıcaklığına gelinceye kadar devam ettirilmiştir. Pastörize olan süt, pastörize süt tankına gönderilmiştir.

Çiğ süt giriş sıcaklıkları ve debilerine ayrıca PV/T sistem suyun giriş sıcaklıklarına göre deneyler yapılmıştır. Termostat daha önce 72 °C'ye ayarlanmıştır. Süt bu sıcaklığa ulaştığında termostatin kumanda ettiği servomotor, üç yollu vanayı açarak balans (çiğ süt) tankına süt gidişini kapatarak, pastörize süt çıkışının açılması sağlanmıştır. Sistemin rejime girmesiyle birlikte aşağıda belirtilen ölçümler yapılmıştır.

- 1- Çiğ süt miktarı ve giriş sıcaklığı (kg/s, °C)
- 2- PV/T sistem su sıcaklığı (°C)
- 3- Kompresör, süt pompası ve PV/T sistem sirkülasyon pompasının çektiği akım (I)
- 4- Kompresör, süt pompası ve PV/T sistem sirkülasyon pompasının çalışma süreleri (dakika)
- 5- Kompresör giriş ve çıkış sıcaklığı (R-134a) (°C)
- 6- Kondenser giriş ve çıkış sıcaklığı (R-134a) (°C)
- 7- Evaporatör giriş ve çıkış sıcaklığı (R-134a) (°C)
- 8- Suyun kondenserdan ekonomizöre girişi ve çıkışı (°C)
- 9- Suyun evaporatörden ekonomizöre girişi ve çıkışı (°C)
- 10- Çiğ sütün ekonomizöre girişi ve çıkışı (°C)
- 11- Pastörize çıkışında sütün sıcaklığı (°C)
- 12- Alçak ve yüksek basınçlar (kg/cm²)

Deney düzeneği; gaz devresi, süt devresi ve su devresi olmak üzere üç ana kısımdan oluşmaktadır.

Gaz devresi

Soğutucu akışkan

Molekülünde CFC (kloroflorokarbon) içeren soğutkanların üretimi, yüksek küresel ısınmaya neden olma potansiyeli ve ozon tabakası tahribatı özellikleri taşıdığından uluslararası anlaşmalarla 1960 yılında durdurulmuştur. CFC içeren soğutkanların yerine kullanılan, daha az ozon tabakası tahribatına neden olan ancak yine de küresel ısınma potansiyeline sahip HCFC (hidrokloroflorokarbon) soğutkanların üretimleri ise 2030 olarak sınırlandırılmıştır (Toledo 2018).

Buhar sıkıştırılmalı ısı pompası çevriminde ısının bir ortamdan diğer bir ortama transferinde iş yapan akışkan olarak tanımlanan soğutucu akışkanlar kullanılmaktadır. İş yapan akışkanlar söz konusu ısı transferini ısı pompası çevriminde yoğunlaşma prosesinde

(kondenser devresinde) buhar fazından sıvı fazına, buharlaşma prosesinde (evaporatör devresinde) sıvı fazından buhar fazına dönüşüm sürecinde gerçekleştirmektedir. Tablo 5’de bazı soğutucu akışkanlar ve bu akışkanlara ait karakteristik özellikleri sunulmuştur.

Tablo 5. Bazı Soğutucu Akışkanlar ve Bu Akışkanlara Ait Karakteristik Özellikler (Özyurt 2002)

Soğutkan	Kimyasal Formülü	Donma Noktası °C	Kaynama Noktası °C	Kritik Sıcaklık °C	Kritik Basınç bar
R12	CF ₂ Cl ₂	-157,78	-29,78	112,0	41,17
R22	CHF ₂ Cl	-160,00	-40,80	96,0	49,70
R114	C ₂ F ₄ Cl ₂	-93,80	3,8	145,7	32,6
R-134a	C ₂ F ₃ CH ₂	-96,6	-26,16	101,1	40,67
R-152a	C ₂ H ₃ CH	-117,00	-25,00	113,5	44,92
R717	NH ₃	-77,80	-33,30	133,0	114,30
R718	H ₂ O	0	100	374,2	221,1

Soğutucu akışkan seçiminde emniyet ve güvenilirlik ile birlikte dikkat edilen en önemli husus yoğuşma ve buharlaşma sıcaklıklarıdır. Pastörize edilecek süt 72 °C sıcaklığa çıkarıldıktan sonra ürün işleme sıcaklığı olan 32-40 °C sıcaklığına kadar soğutulacaktır. Bu nedenle iş yapan akışkan seçiminde yoğuşma sıcaklığının 72 °C ten büyük, buharlaşma sıcaklığının ise 32 °C den küçük olmasına dikkat edilmiştir. Soğutucu akışkan olarak, Bileşik Oksijen Sanayi (2006) tarafından çevreye zararı düşük, yanıcı ve toksik olmayan, halokarbon grubunda bulunan, kimyasal formülü C₂F₃CH₂ (tetrafloraetan) olarak tanımlanan R-134a gazı kullanılmıştır (Aktaş 2008). Tablo 6’da R-134a gazının fiziksel özellikleri sunulmuştur.

Tablo 6. R-134a Gazının Fiziksel Özellikleri (Aktaş 2008)

Fiziksel Özellikler	R-134A
Moleküler Ağırlık (kg/mol)	102
Kaynama Noktası 1 atm (°C)	-26,5
Yoğunluk, likit su 1 atm (kg/l)	1,21
Erime Noktası (°C)	-101
Buhar Basıncı 25 °C (bar)	6,65
Yoğunluk, gaz (kg/m ³)	3,5
Spesifik Ağırlık 25 °C	1,208
Kritik Sıcaklık (°C)	101
Kritik Basınç (bar)	40,7

Soğutucu akışkan olarak R-134a gazının kullanıldığı ısı pompası sistemi gaz devresi; kompresör, kondenser, evaporatör, sıvı deposu, genleşme vanası, evaporatör, filtre drayer, selenoid valf, filtre, gözetleme camları ve by-pass hatlarından oluşmaktadır. Şekil 37’de ısı pompası gaz devresi akış şeması iki boyutlu çizimi sunulmuştur.



Şekil 38. Sistemde kullanılan kompresör fotoğrafı.

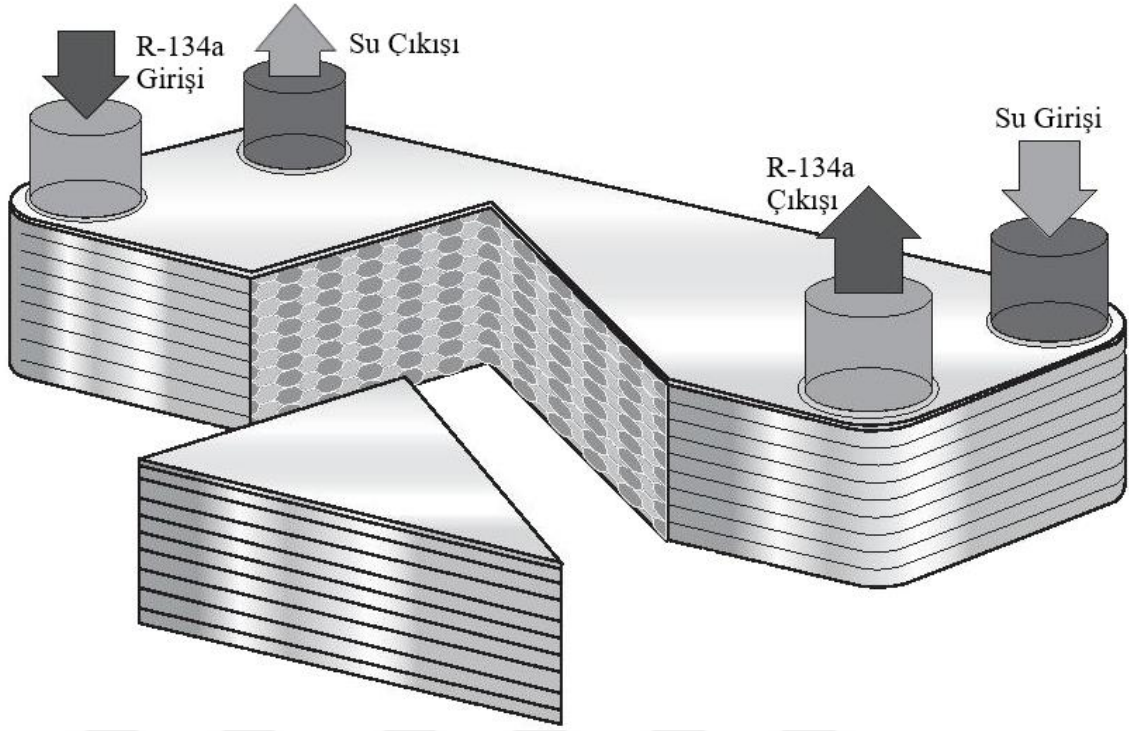
Isı pompası sistemimizde kullanılan scroll kompresör R22, R134a ve R407c soğutucu akışkanlarla uyumlu, orta ve yüksek sıcaklık uygulamalarında kullanılabilir özelliklerine sahiptir. Tablo 7’de sütün pastörizasyonu için kullanılan ısı pompası gaz devresinde kullanılan kompresöre ait teknik veriler sunulmuştur.

Tablo 7. Kompresöre Ait Teknik Veriler

Teknik Özellikler	Scroll Kompresör
Model	ZR22 K3E
Kapasite (Hp)	1,8
Soğutma Kapasitesi (R407c) Kw	4,6
Soğutma Kapasitesi (R134a) Kw	3,2
Soğutma Kapasitesi (R22) Kw	34
Süpürme Hacmi (m ³ /h)	5,3
Yağ Şarjı (Lt)	0,5
Boyutlar H X D X M (mm)	383x357x264

Kondenser

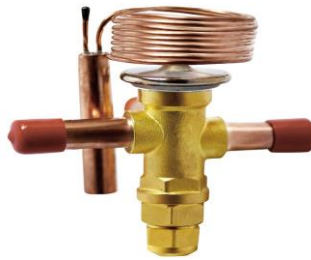
Su soğutmalı, plakalı tip Alfa Laval marka, 52-20H model kondenser kullanılmıştır. Kompresörde sıcaklığı ve basıncı yükselttilerek kızgın buhar durumuna getirilen akışkan, kondenserde yoğunlaştırılır. Yoğuşma esnasında soğutucu gaz (R-134a), evaporatör ve kompresörden aldığı ısını süte verir. Kondenser plaka ve bağlantı malzemeleri AISI 316 kalite paslanmaz çelikten imal edilmiştir. Kondenserin su ve gaz devresi tamamen kapalıdır. Dış yüzeyi ise izole edilmiştir. Şekil 39’da sistemde kullanılan kondenser ve evaporatöre ait akış şeması üç boyutlu çizimi gösterilmiştir.



Şekil 39. Kondenser ve evaporatör akış şeması üç boyutlu çizimi.

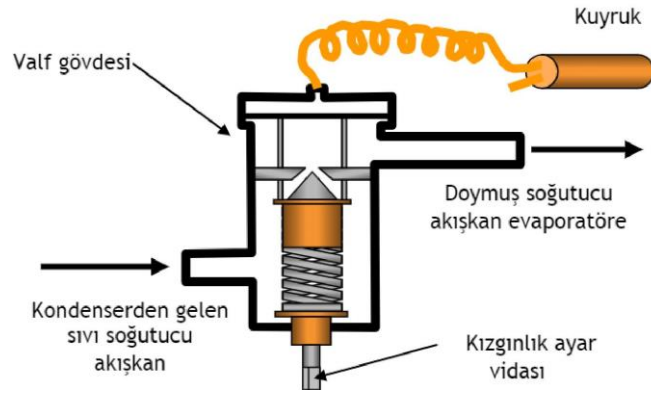
Genleşme vanası (Kısılma vanası)

Kondenserden ayrılan yüksek basınç ve sıcaklıktaki aşırı soğutulmuş sıvı soğutkan akışkan, genleşme vanası yardımıyla düşük basınç ve sıcaklığa genişletilir. Genleşme vanası, aynı zamanda evaporatöre verilmesi gereken soğutkan miktarının ayarlanmasını da sağlamaktadır. Soğutucu akışkanın evaporatöre bir genleşme vanası gibi basınç düşürme elemanı üzerinden girmesi, ısı pompası sisteminin temel prensiplerindendir. Şekil 40’da ısı pompası sisteminde kullanılan genleşme vanasına ait resim gösterilmektedir.



Şekil 40. Sistemde kullanılan genleşme vanası.

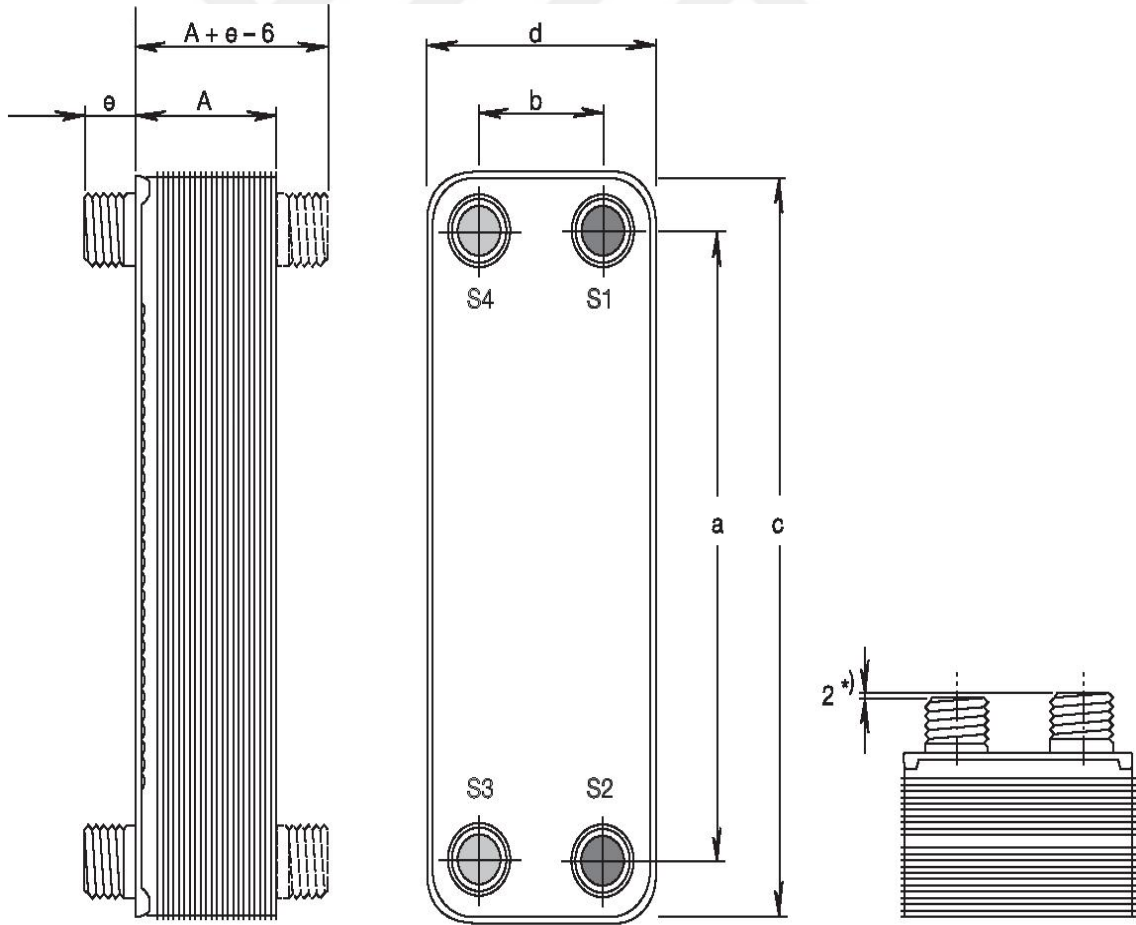
Şekil 40’da görüldüğü gibi genleşme valfleri, içi soğutucu gaz ile dolu körüğün kılcal bir boru aracılığıyla bağlantılı olduğu hissedici uç, soğutucu akışkanın giriş ve çıkışının sıcaklığa bağlı olarak kontrol edildiği orifis, kızdırma ısısı ayarlarının yapıldığı vidalı yay olmak üzere 3 ana bölümden oluşmaktadır. Şekil 41’de genleşme vanasının yapısı gösterilmiştir.



Şekil 41. Genleşme vanasının yapısı (Whitman *et al.* 2005).

Evaporatör

R-134a gazının sudan ısı alarak buharlaştığı, su soğutmalı kaynaklı-levhali tip evaporatör kullanılmıştır. Boruların içerisinden R-134a akışkanını, dış yüzeyinden su akmaktadır. Görevi, soğutkanın sudan ısı alarak buharlaşmasını ve suyun da soğumasını sağlamaktır. Şekil 42’de kondenser ve evaporatöre ait teknik data iki boyutlu çizimi gösterilmiştir.



Şekil 42. Kondenser ve evaporatör teknik data iki boyutlu çizimi.

Alfa Laval marka, CB14-20H model evaporatör kullanılmış olup, plaka ve bağlantı malzemeleri AISI 316 kalite paslanmaz çelikten imal edilmiştir. Evaporatörün su ve gaz

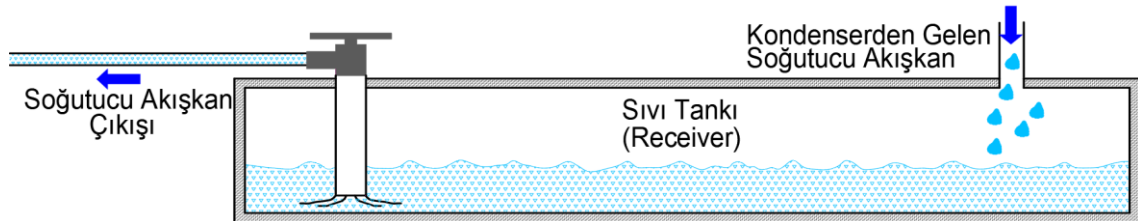
devreleri tamamen kapalı olup dış yüzeyi izole edilmiştir. Tablo 8’de kondenser ve evaporatöre ait teknik veriler gösterilmiştir.

Tablo 8. Kondenser ve Evaporatöre Ait Teknik Veriler

Teknik Veriler	CB14-20H Evaporatör	CB52-20H Kondenser
Maksimum/Minimum Çalışma Sıcaklığı (°C)	175/-160	175/-160
Maksimum Çalışma Basıncı (bar)	32	32
Hacim (lt)	0,02	0,095
Maksimum Debi (m ³ /h)	3,6	8,1
Yükseklik c (mm)	208	526
Genişlik d (mm)	78	112
Dikey Bağlantı Mesafesi (mm)	172	466
Yatay Bağlantı Mesafesi (mm)	42	50
Boş Ağırlık (kg)	1,24	5,04

Gaz devresi yardımcı elemanları

Sistemde kondenserden sonra sisteme uygun, silindirik tipli bir sıvı tankı bulunmaktadır. Sıvı tankında yüksek basınç altında ve çevre sıcaklığına yakın bir sıcaklıkta bulunan sıvı haldeki soğutkan, sıvı borusu üzerinden genişleme vanasına gelmektedir. Sabit basınçtaki sıvı soğutkan, çevreden daha sıcak olan sıvı tankı içinde beklerken çevreye ısı verir ve bir miktar soğur. Sıvı tankının dışında soğutkanı izlemek için bir de gözetleme camı bulunmaktadır. Sıvı tankı çalışma prensibi Şekil 43’de gösterilmiştir.



Şekil 43. Sıvı tankı çalışma prensibi.

Sıvı deposundan sonra genişleme vanasına gelmeden önce sistemde selenoid valf ve dryer (kurutucu filtre) bulunmaktadır. Selenoid valfi, kompresör üzerindeki kapasite kontrol mekanizmalarının çalışmasını temin eder. Kurutucu filtre (dryer) ise devredeki nemi absorbe eder. Buharlaşma sıcaklığı 0 °C altına düştüğünde devredeki rutubetin donarak tıkanıklığa yol açmasını engeller. Bunun yanı sıra filtraj vazifesi de görür. Şekil 44’de ısı pompası sisteminde kullanılan filtre dryer (kurutucu) fotoğrafı ve kesiti gösterilmiştir.



Şekil 44. Isı pompası sisteminde kullanılan filtre dryer (kurutucu) fotoğrafları.

Süt devresi

Paslanmaz çelik süt pompası, paslanmaz çelik çiğ süt (balans) ve pastörize ürün tankı, dört geçişli plakalı eşanjör, üç yollu vana, kontrol panosu ve paslanmaz çelik boru hatlarından oluşmaktadır. Şekil 45'de deney sisteminde kullanılan süt devresi genel görünüm fotoğrafı gösterilmektedir.



Şekil 45. Süt devresi genel görünüm fotoğrafı.

Ön ısıtma/ön soğutma plakalı ısı eşanjörü (Ekonomizör)

Bir adı da rejeneratör olan ısı eşanjörleri, termal enerjiyi iki veya daha fazla sıvı arasında, katı bir yüzey ile bir sıvı arasında veya katı parçacıklar ile bir sıvı arasında, farklı sıcaklıklarda ve termal temas ile aktarmak için kullanılan cihazlardır. Günümüzde yaygın olarak kullanılan ısı değiştiriciler konstrüksiyon bakımından borulu, plaka tipi, genişletilmiş yüzey ve rejeneratif eşanjörler olarak sınıflandırılmaktadır (Shah and Sekulic 2003).

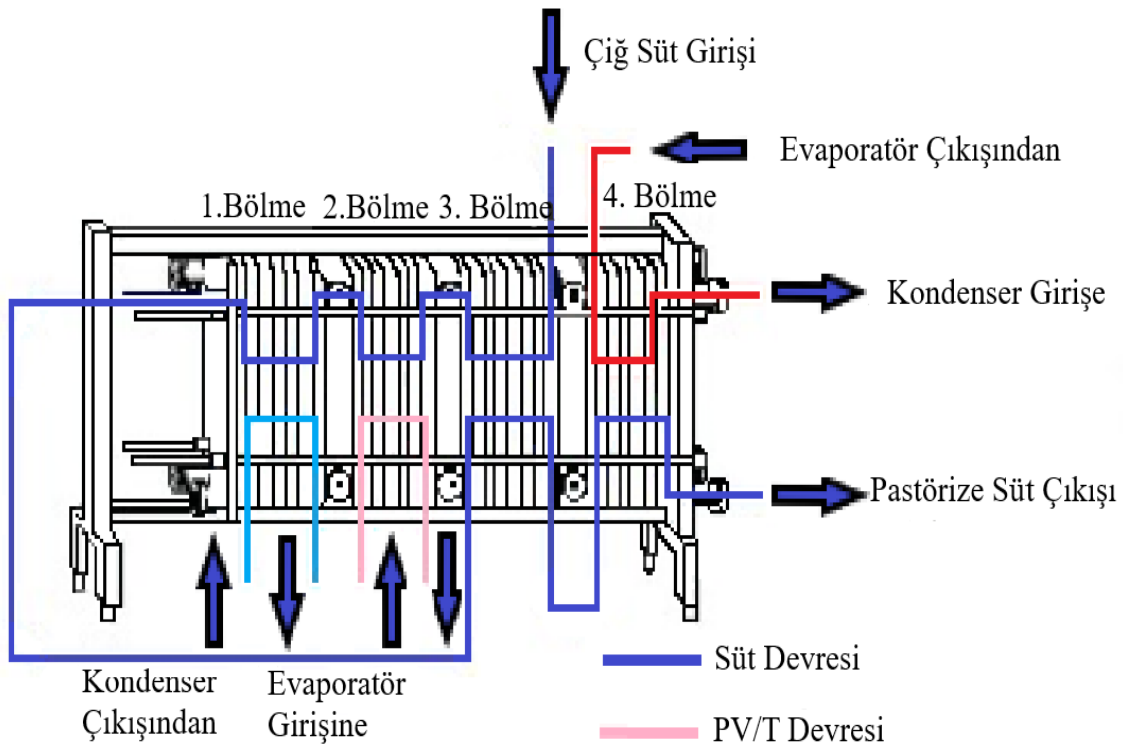
Plakalı ısı değiştiricileri sistem gereksinimleri dikkate alınarak contalı, kaynaklı, lehimli olarak imal edilebilmektedir. Deney sistemimizde kullanılan eşanjör, plakalı, contalı tip olup Cr-Ni 304 kalite paslanmaz çelikten imal edilmiştir. Temizlik, kontrol ve bakım için ayrı ayrı bileşenlerine kolayca ayrılabilir olması, ısı transfer yüzey alanı, plaka boyutu, oluklu desen ve geçiş düzenlemelerinin esnekliği sayesinde farklı bir proses veya değişen yükler için kolayca değiştirilebilme imkanı sağlaması veya yeniden düzenlenebilir olması avantajlı yönleridir. Görevi, çiğ sütü kondenserden gelen sıcak suyla ve PV/T panel ile ısıtılan boyler suyu ile ısıtmaya tabi tutmak ayrıca evaporatörde soğuyan suya ve çiğ süte pastörize süttten ısı çekilmesini sağlamaktır. Böylece ısı pompası sisteminin performansını da artırmaktır. Bir başka ifadeyle enerji harcamadan sütün ön ısıtma ve ön soğutma ihtiyacını karşılamaktadır. Tüm pastörizasyon elemanlarını taşıyabilecek ve borulama sistemini etkilemeyecek şekilde tasarlanmıştır. Platform malzeme olarak AISI 304 kalite paslanmaz çelik profilden imal

edilmiştir. Ayarlanabilir ayakları sayesinde kurulumu kolaydır. Gövdeyi oluşturan parçalar AISI 304 paslanmaz çelikten imal edilmiştir. Gövde üzerinde sabit gövde, hareketli gövde üst taşıyıcı ray sistemi, alt taşıma mili, ara bölmeler ve sıkıştırma saplamaları bulunmaktadır. Gövde üzerindeki kademe sayısı istenilen sıcaklık değerlerine göre en verimli olacak şekilde hesaplanarak kademe sayısı ve plaka sayısı belirlenebilmektedir.



Şekil 46. Dört geçişli plakalı eşanjör fotoğrafı.

Şekil 46’da pastörizasyon sisteminde kullanılan dört geçişli plakalı eşanjör fotoğrafı, Şekil 47’de ise üç boyutlu çizimi ve akış şeması gösterilmiştir.



Şekil 47. Dört geçişli plakalı eşanjör üç boyutlu çizimi ve akış şeması.

Şekil 36’da akış şeması gösterilen, sütün pastörizasyonu için tasarlanan ve kurulumu yapılan sistemde, süt pompası vasıtasıyla eşanjörün ikinci bölmesine gönderilen çiğ süte PV/T sistem ile ısıtılan su ile ön ısıtma yapılmıştır. Eşanjörün birinci bölmesinde, ikinci bölmesinde ön ısıtmış olarak çıkan süt ısı pompasının kondenslerinde ısıtan suyla çarpıştırılarak pastörizasyon sıcaklığına getirilmesi amaçlanmıştır. Pastörize olan süt, üç yollu vana vasıtasıyla eşanjörün üçüncü bölmesinde önce çiğ sütle daha sonra dördüncü bölmesinde ısı pompasının evaporatöründe soğuyan suyla çarpıştırılarak ürün sıcaklığına düşürülmesi hedeflenmiştir. Proses çevrimi, sütün plakalı eşanjör birinci bölmesi çıkışında pastörizasyon sıcaklığına gelinceye kadar devam ettirilmiştir. Pastörize olan süt, pastörize süt tankına gönderilmiştir. Isı pompasının sıvı devresi plakalı eşanjörün birinci devresi, evaporatör, plakalı eşanjörün dördüncü bölmesi, kondenser arasında çevrimini gerçekleştirmiştir. Tablo 9’da sütün pastörizasyonunda kullanılan plakalı eşanjör özellikleri belirtilmiştir.

Tablo 9. Plakalı Eşanjör Özellikleri

Teknik Özellikler	Plakalı Eşanjör
Toplam Hacim (lt)	5
Toplam Isı Transfer Alanı (m ²)	1,09
Maksimum Çalışma Basıncı (bar)	7,80
Maksimum Çalışma Sıcaklığı (°C)	125
Toplam Plaka Sayısı	34
Plaka Malzemesi	AISI 316
Plaka Kalınlığı (mm)	0,5
Conta Malzemesi	EPDM

Paslanmaz çelik süt pompası

Yarı hermetik olup paslanmaz çelikten yapılmıştır. Pompa, balans (çiğ süt) tankından gelen sütün süt devresinde devrini (sirkülasyon) sağlamaktadır. Şekil 48’de süt devresinde kullanılan, paslanmaz çelikten imal edilmiş süt pompasının resmi, Tablo 10’da ise teknik özellikleri gösterilmiştir.

Tablo 10. Süt Pompası Özellikleri

Teknik Özellikler	Kendinden Emişli Süt Pompası
Tip	Santrifüj
Kapasite	3000 Lt/h
Basma Yüksekliği (m)	8
Pompa Gövdesi, Salmastra yuvası, Fan	Paslanmaz Çelik (AISI 304 - DIN 1.4301)



Şekil 48. Paslanmaz çelik süt pompası fotoğrafı.

Servomotorlu üç yollu vana

PV/T destekli ısı pompası ile sütün pastörizasyonu, elle set edilebilen bir termostat ve onun kumanda ettiği servomotorlu üç yollu vana ile kontrol edilmektedir. Şekil 36'da akış şeması gösterilen sistemde plakalı eşanjör birinci bölümü çıkış süt sıcaklığı dijital termometre göstergesi olan termostat ile ölçülmektedir. Bu değerin pastörizasyon sıcaklığına ulaşması ile plakalı eşanjörün dördüncü bölümü çıkışındaki servomotorlu üç yollu vana otomatik olarak çalışır. Daha sonra "balans (çiğ süt) tankı" çıkış ağzını kapatarak, "pastörize süt çıkışı" ağzını açar ve pastörize olmuş sütü ilgili tanka gönderir. Sistemde UNOX marka, UKST-05 model, IP67 koruma sınıflı, 8-10 saniye açma kapama zamanlı, 24 V DC servomotor kullanılmıştır. Şekil 49'da sistemde kullanılan servomotorlu üç yollu vananın fotoğrafı gösterilmiştir.



Şekil 49. Servomotorlu üç yollu vana fotoğrafı.

Balans (Çiğ Süt) ve pastörize süt tankı

Sistemde kullanılan balans (çiğ süt) tankı ve pastörize süt tankı kapasitesi 100 litredir. Tanklar AISI 304 paslanmaz çelik malzemeden yapılmıştır. Çiğ ürün giriş, CIP, pastörize olmayan ürün dönüş, tahliye hatlarına ve vanalarına sahiptirler. Şekil 50’de balans (çiğ süt) ve pastörize süt tankı resmi gösterilmiştir.

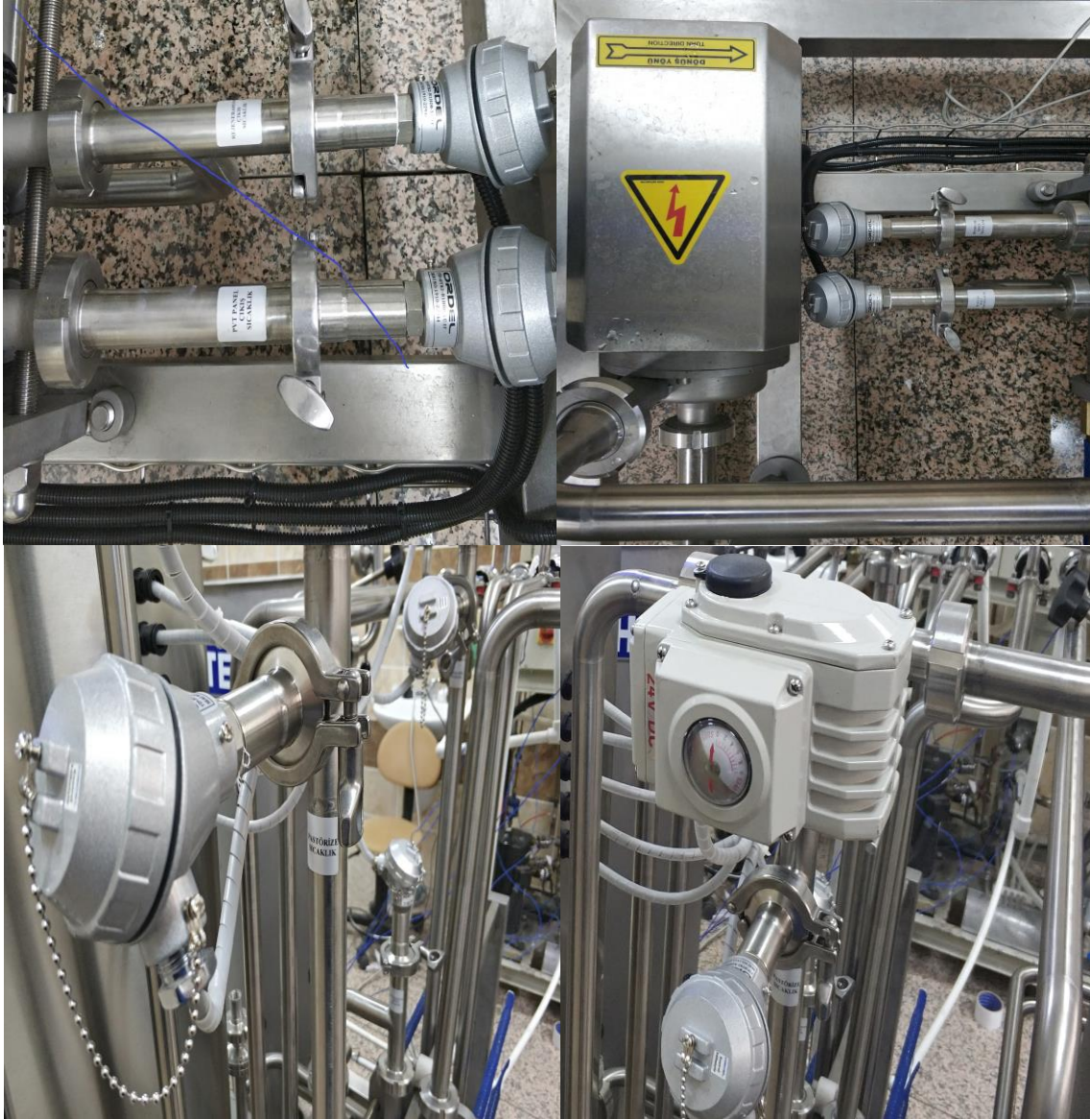


Şekil 50. Balans (Çiğ Süt) ve pastörize süt tankı fotoğrafları.

Süt devresi yardımcı elemanları

Sistemde dolaşan sütün sıcaklıkları Şekil 36’da gösterilen akış şemasında belirtilen noktalarda, pastörizasyon sıcaklığı, rejenerasyon sıcaklığı, mayalanma sıcaklığı olmak üzere PT-100 sıcaklık sensörleri ile ölçülmüştür. Ölçülen sıcaklıklar data loggerda kaydedilmiş,

deneyisel veri olarak kullanılmıştır. Şekil 51’de sistemde kullanılan sıcaklık sensörlerine ait fotoğraflar , Tablo 11’de ise PT-100 sıcaklık sensörlerine ait teknik bilgiler sunulmuştur.



Şekil 51. PT-100 sıcaklık sensör fotoğrafları.

Tablo 11. PT-100 Sıcaklık Sensörü Teknik Özellikleri

Teknik Özellikler	PT-100 sıcaklık sensörü
Ölçme aralığı (°C)	0-100
Hassasiyet (°C)	0,0143
Tekrarlanabilirlik (°C))	< +/- 0,25
Maksimum Çalışma Sıcaklığı (°C)	125
Çıkış sinyali (V)	4-20/0-10
Reaksiyon süresi (ms)	20 ms
Şoka karşı direnci (g)	10

Süt devresinde sütün debisi, sisteme monte edilen manyetik indüktif akış sensörü ile ölçülerek ayarlanmıştır. Akış sensörü 0,005- 1,5 m³/h ölçüm aralığına, iki adet dijital, bir adet

Analog çıkışa sahiptir. DN15 dişli bağlantı ile sisteme montajı yapılmıştır. Çalışma ortam sıcaklığı 10-70 °C, dayanma basıncı 16 bar'dır. Üründe kullanılan malzemeler ve ıslak parçaların tamamı paslanmaz çelikten imal edilmiştir. IP 67 koruma özelliğine sahip olan manyetik indüktif akış sensörün fotoğrafı Şekil 52'de gösterilmiştir.



Şekil 52. Manyetik indüktif akış sensör fotoğrafı.

Su devresi

Deney sisteminde PV/T panel ve boyler arasında, boyler ve plakalı eşanjör arasında, ısı pompası (kondenser-evaporatör) ve plakalı eşanjör arasında olmak üzere üç ayrı su devresi bulunmaktadır. Su devresi sirkülasyon pompaları, tek serpantinli boyler, monokristal PV/T panel, plakalı eşanjör, kondenser, evaporatör ve sirkülasyon hatlarından oluşmaktadır. Su devresi PV/T panel-boyler, boyler-plakalı eşanjör ve ısı pompası sıvı devresi olmak üzere üç ayrı hat üzerinde kapalı devre çevrim yapmaktadır.

Sirkülasyon Pompası

Sistemde pastörize edilecek çiğ süte ön ısıtma uygulayabilmek için yapay ısıtım ile ısıtılan PV yüzeyinin ısısı, panel arkasına yerleştirilen bakır borular içerisinden su sirkülasyonu yaptırılarak boylerde istenilen sıcaklıkta depolanmıştır. Depolanan sıcak su plakalı eşanjörün bölmesine sirkülasyon yaptırılarak burada süt ile çarpıştırılması sağlanmıştır. Ayrıca ısı pompası sıvı devresinde kullanılan sirkülasyon pompası ile kondenserde iş yapan akışkanın ısısının suya, evaporatörde ise iş yapan akışkana ısı geçişi sağlanarak çevrimin tamamlanması sağlanmıştır. Sistemde kullanılan sirkülasyon pompa fotoğrafları Şekil 53'de gösterilmiştir.



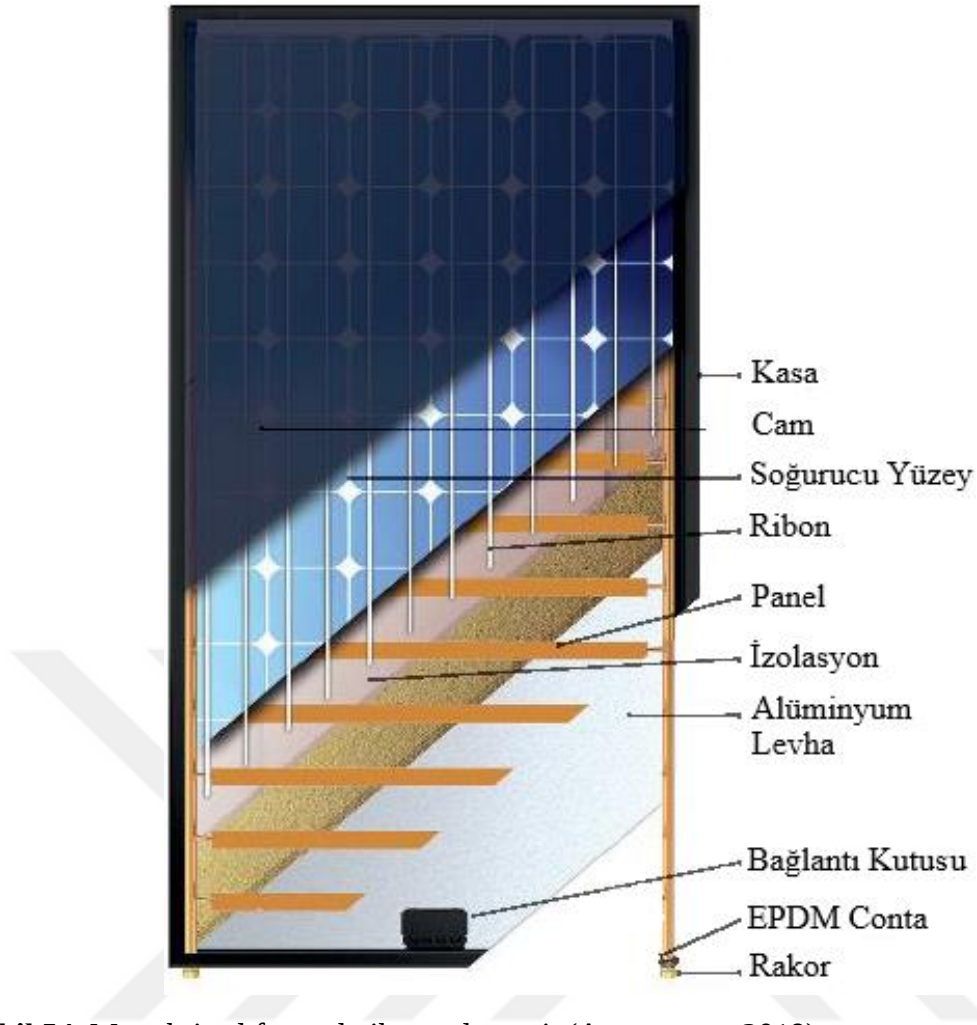
Şekil 53. Sistemde kullanılan sirkülasyon pompa fotoğrafları.

Monokristal fotovoltaiik hücre modülü

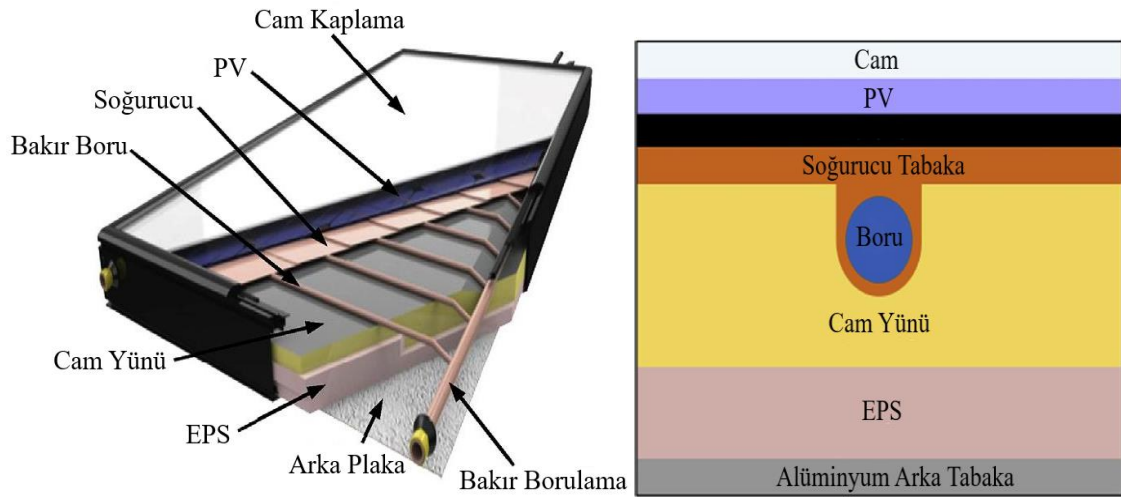
Deney düzeneğinde polikristal güneş panellerine göre daha yüksek dereceli sliikondan yapılmış ve dolayısıyla daha yüksek verimliliğe sahip 190 W gücünde monokristal yapılı bir fotovoltaiik panel kullanılmıştır. Üreticisi Solimpex olan modülün teknik özellikleri Tablo 12’de, panel resmi, borulama düzeni ve kesiti ise Şekil 54 ve Şekil 55’te verilmiştir.

Tablo 12. Monokristal Fotovoltaiik Panel Teknik Özellikleri

Teknik Özellikler	Monokristal PV Hücre Modülü
Ebatlar	828mm x 1601mm x 90mm
Toplam Yüzey (m ²)	1,37
Açıklık Yüzeyi (m ²)	1,36
Hücre Yüzeyi (m ²)	1,3
Ağırlık (kg)	24,4
Taşınan Sıvı Hacmi	1,21
Hücre Paneli	Mono Kristal Silisyum Modül
Hücre Sayısı	72
Hücre Ebatları	125mm x 125mm
Nominal Güç (W)/Nominal Akım (I)	190 / 5,2
Kısa Devre Akımı (I) ISC	5,6
Nominal Voltaj (V) VMP	36,4
Kısa Devre Voltajı (V) VSC	45,2
Soğurucu Yüzey / Boru	Bakır
Test Basıncı (Bar)	20
Maksimum Çalışma Basıncı (bar)	10
Dış Cam	4mm PV Modül Camı
Sızdırmazlık	EPDM & Silikon Conta
Verimlilik Garantisi	%90 < 10 Yıl, %80 < 20 Yıl



Şekil 54. Monokristal fotovoltaik panel resmi (Anonymous 2019).



Şekil 55. Monokristal fotovoltaik panel borulama düzeni ve kesiti (Anonymous 2019).

Tek Serpantinli Boyler

Deney sisteminde çığ süte plakalı eşanjör vasıtasıyla ön ısıtma uygulayabilmek için plakalı eşanjörün su devresinde dolaşan suyun ısıtılması, PV panelin ısısının boylerde depolanan suya aktarılması ile gerçekleştirilmiştir. Kapalı sistemde boyler-PV panel arasında dolaştırılan su, istenilen sıcaklığa geldiğinde plakalı eşanjörün ilgili bölmesine gönderilerek

süt ile çarpıştırılması sağlanmıştır. Böylece suyun ısısının süte aktarılması sağlanarak ön ısıtma gerçekleştirilmiştir. Deney sisteminde 80 lt hacminde Baymak marka tek serpantinli boyler kullanılmıştır. Şekil 56’da sistemde kullanılan boylere ait üç boyutlu çizimi, Tablo 13’de ise teknik özellikler gösterilmiştir.

Şekil 56. Boyler üç boyutlu çizimi ve bağlantı şeması resmi (Anonim 2019b).

Teknik Özellikler	Baymak Aqua Boyler
Kapasite (Lt)	80
Boiler gövde ve serpantin malzemesi	St 37/2
Yükseklik (mm)	845
İzolasyon Dahil Çap (mm)	500
PV/T Giriş Çıkış Çapı (inç)	1”
Plakalı Eşanjör Giriş Çıkış Çapı (inç)	1”
Ağırlık (kg)	38
Toplam S serpantin Yüzey Alanı (m²)	0,47

Novus marka iki adet veri kaydedici kullanılmış, deney düzeneginde elde edilen tüm veriler kayıt edilerek okunmuştur. Data logger teknik özellikleri Tablo 14’de, katalog resmi ve fotoğrafı ise Şekil 57’de verilmiştir.



Şekil 57. Data logger katalog resmi ve fotoğrafı.

Tablo 14. Data Logger Teknik Özellikleri

Teknik Özellikler	Data logger
Analog Giriş	8 adet analog pin
Analog Hassasiyet	Termokupol: $\pm 0,2$ -Diğer bağlantılar: $\pm 0,15$
Dijital Giriş ve Çıkışlar	8 adet dijital pin
Röle Çıkışı	2 röle SPST-NO/NC, 3A/250Vac.
RS485 Arayüzü	Modbus RTU olarak kullanılabilir
Ethernet Arayüzü	10/100 Mbps
Dâhili Hafıza	2 MB
SD Kart	0,47
Çalışma Ortamı	0...50 °C, bağıl nem maksimum %80, rakım maksimum
Güç Besleme	100...240 VAC, 50...60 Hz
Ölçüler	165x117x70 milimetre

Solar Piranometre

Deney düzeneğimizde ışınım değerini ölçmek için Hukseflux marka piranometre kullanılmıştır. Piranometreye ait katalog fotoğrafı Şekil 58’de, teknik özellikler ise Tablo 15’de gösterilmiştir.



Şekil 58. Piranometreye ait katalog fotoğrafı.

Tablo 15. Piranometre Teknik Özellikleri

Teknik Özellikler	Piranometre
Ölçülen	Hemisferik güneş ışıınımı
ISO sınıfı	2
Belirsizlik	Maksimum %1,8
Çalışma Sıcaklığı	-40... +80 °C
Kablo Uzunluğu	3 m
Çalışma Voltajı	5...30 VDC
İletişim	RS485
Analog Çıkış	0-1 V
Ölçüm Aralığı	0...1600 W/m ²
Analog Çıkış	4-20 mA

Isı pompası deneysel verilerin değerlendirilmesi

PV/T destekli ısı pompası sisteminde pastörizasyon süresince kompresör, süt pompası, ısı pompası ve PV/T su devresi sirkülasyon pompalarının çektikleri güçle orantılı olarak elektriksel bir enerji sarf edilmektedir. Isı pompası sisteminde 1 kg süt başına harcanan toplam enerji;

$$q_{ip} = \frac{t_1 W_{komp} + t_2 W_{pompst} + t_3 W_{pompsu} + t_4 W_{pompvt}}{M_{st}} \quad (13)$$

formülüyle hesaplanmıştır. Formülde ifade edilen M_{st} değeri pastörize edilen süt miktarıdır. W_{komp} , W_{pompst} kompresörün ve süt pompasının tükettiği elektrik enerjisi olup;

$W_{komp} = I V \sqrt{3} \cos\phi$ (14) formülüyle, ısı pompası ve PV/T su devresi sirkülasyon pompalarının harcadığı elektrik enerjisi ise;

$W_{pompsu/pompvt} = I V \cos\phi$ (15) formülüyle hesaplanmıştır. Su devresi sirkülasyon pompalarının elektrik enerjisi PV panelden karşılanmıştır.

Kompresörün motoru için $\cos\phi$ güç katsayısı 0,88, süt pompası motorunun $\cos\phi$ güç katsayısı ise 0,8 alınmıştır. Tablo 16'da konvansiyonel sistemlerde kullanılan motorların $\cos\phi$ güç katsayı değerlerini içeren grafik gösterilmiştir.

Tablo 16. Konvansiyonel Sistemlerde Kullanılan Motorların $\cos\phi$ Güç Katsayı Değerleri (Özyurt 2002)

Motorlar	$\cos\phi$ değerleri
Karıştırıcı motoru (çift-cidarlı kazan)	0,69
Süt pompası motoru (plakalı pastörizatör)	0,7
Balans tankı motoru	0,7
Seperatör motoru	0,88
Homojenizatör motoru	0,83
Vakum pompası motoru	0,8

Sistemde kullanılan R-134a soğutucu akışkanın kütleli debisi,

$$\dot{m}_{R134a} = V_{dep} \frac{\lambda}{v_1} \quad (16)$$

ifadesiyle hesaplanmaktadır. V_{dep} ifadesi kompresörün deplasman hacmi, λ ise emme oranı olup, söz konusu değerler sistemde kullanılan 2880 d/dk. hızdaki scroll kompresör kataloğundan alınmaktadır. v_1 ise çevrimin 1 noktasındaki R-134a'nın özgül hacmidir.

Kompresörde sıkıştırma miktarı;

$$\dot{W}_{komp} = \dot{m}_{R134a}(h_2 - h_1) = I V \sqrt{3} \cos\phi \quad (\text{kW}) \quad (17)$$

Kondenserde soğutucu akışkanın verdiği, suyun aldığı ısı miktarı;

$$\dot{Q}_{kond} = \dot{m}_{R134a}(h_2 - h_3) = \dot{m}_{su} c_{psu} (T_{suçkkond} - T_{sugkond}) \quad (\text{kW}) \quad (18)$$

Evaporatörde soğutucu akışkanın aldığı, suyun verdiği ısı miktarı;

$$\dot{Q}_{evap} = \dot{m}_{R134a}(h_1 - h_5) = \dot{m}_{su} c_{psu} (T_{sugevap} - T_{suçkevap}) \quad (\text{kW}) \quad (19)$$

Plakalı eşanjörde sütün aldığı ısı miktarı;

$$\dot{Q}_E = \dot{m}_{st} c_{pst} (T_{stçk} - T_{ç}) \quad (\text{kW}) \quad (20)$$

Bir ısı pompasının etkinliği, performans katsayısı (COP) ile değerlendirilmekte, kondenserde atılan ısı miktarının kompresörde harcanan işe oranı olarak formüle edilmektedir. Çalışmamızda kondenserde atılan ısı, plakalı eşanjörde dolaşan sülle çarpıştırılan suya aktarılmıştır.

Performans katsayısı (COP);

$$COP_{ip} = \frac{\dot{Q}_{kond}}{\dot{W}_{komp}} = \frac{\dot{m}_{su} c_{psu} (T_{suçkkond} - T_{sugkond})}{I V \sqrt{3} \cos\phi} \quad (21)$$

Sistem performans katsayısı ise;

$$COP_{sis} = \frac{\dot{Q}_{kond} + \dot{Q}_E}{\dot{W}_{komp} + \dot{W}_{pompst}} = \frac{\dot{m}_{su} c_{psu} (T_{suçkkond} - T_{sugkond}) + \dot{m}_{st} c_{pst} (T_{stçk} - T_{ç})}{I_{komp} V_{komp} \sqrt{3} \cos\phi_{komp} + I_{pompst} V_{pompst} \sqrt{3} \cos\phi_{pompst}} \quad (22)$$

formülüyle hesaplanmıştır.

Yaptığımız çalışmada, sütün pastörizasyonu için kullanılan ısı pompası sisteminde ısıtma ve soğutma işlemleri aynı proses içerisinde gerçekleşmektedir. Sütün pastörizasyonu için belirli bir sıcaklığa getirilip soğutulması gerekmektedir. Dolayısıyla ısı pompası sistemi ile gerek ısıtma gerekse soğutma işlemleri için enerji kazancı sağlanmaktadır. Bu yüzden sistem performans katsayısının tekrar tanımlanması gerekmektedir. Sistemde ısıtma için enerji kazancı kondenserde suya aktarılan ısı miktarı ile plakalı eşanjörde çiğ süte verilen ısı

miktardır. Sütün ürün işleme (mayalanma) sıcaklığına kadar soğutulması ile sağlanan enerji kazancı ise evaporatörde sütün suya aktarılan ısı miktarı ile plakalı eşanjörde pastörize sütün soğutulması ile sağlanan enerji miktarıdır. Proses boyunca sistemdeki enerji sarfiyatları kompresöre verilen iş ile süt pompası ve sirkülasyon pompalarında harcanan iş toplamından oluşmaktadır. Sirkülasyon pompaları enerji ihtiyaçları PV/T sistem panel gücünden karşılanmıştır. Bu ifadeler ışığı altında kurulan sistem için toplam performans katsayısı;

$$STPK = \frac{\dot{Q}_{kond} + \dot{Q}_{evap} + \Sigma \dot{Q}_E}{\dot{N}_{komp} + \dot{N}_{pompst}} \quad (23)$$

formülü ile ifade edilebilmektedir. Sistem performans katsayısı yeniden düzenlenirse;

$$STPK = \frac{\dot{m}_{su} c_{psu} (T_{suçkkond} - T_{sugkond}) + \dot{m}_{su} c_{psu} (T_{sugevap} - T_{suçkevap}) + 2\dot{m}_{st} c_{pst} (T_{stçk} - T_c)}{I_{komp} V_{komp} \sqrt{3} \cos \phi_{komp} + I_{pompst} V_{pst} \sqrt{3} \cos \phi_{pompst}} \quad (24)$$

denklemleri ile hesaplanmıştır.

Belirsizlik Analizi

İncelenen parametrelerin maksimum bağıl belirsizlikleri, Kline and McClintock (1953) tarafından önerilen tahmin yönteminden faydalanılarak hesaplanmıştır. Belirsizlik analizi sonuçları performans katsayısı (COP) için %5,4 olarak elde edilmiştir. Sonuçla ilişkili belirsizlik W_R , bağımsız değişkenlerle ilişkili olanlar $w_1, w_2, \dots, w_n$ 'dir. Bağımsız değişkenlerdeki belirsizliklerin tümü bazı oranlarla verilmiş ise, bu oranlara sahip sonuçtaki belirsizlik Kline and McClintock (1953) tarafından aşağıdaki gibi ifade edilmiştir.

$$W_R = \left[\left(\frac{\partial R}{\partial x_1} W_1 \right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial x_2} W_2 \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial R}{\partial x_n} W_n \right)^2 \right]^{1/2} \quad (25)$$

Sistemde kullanılan ölçüm aletlerine ait değişken değerlerindeki ölçüm belirsizlikleri Tablo 17'de gösterilmiştir.

Tablo 17. Değişken Ölçüm Belirsizlikleri

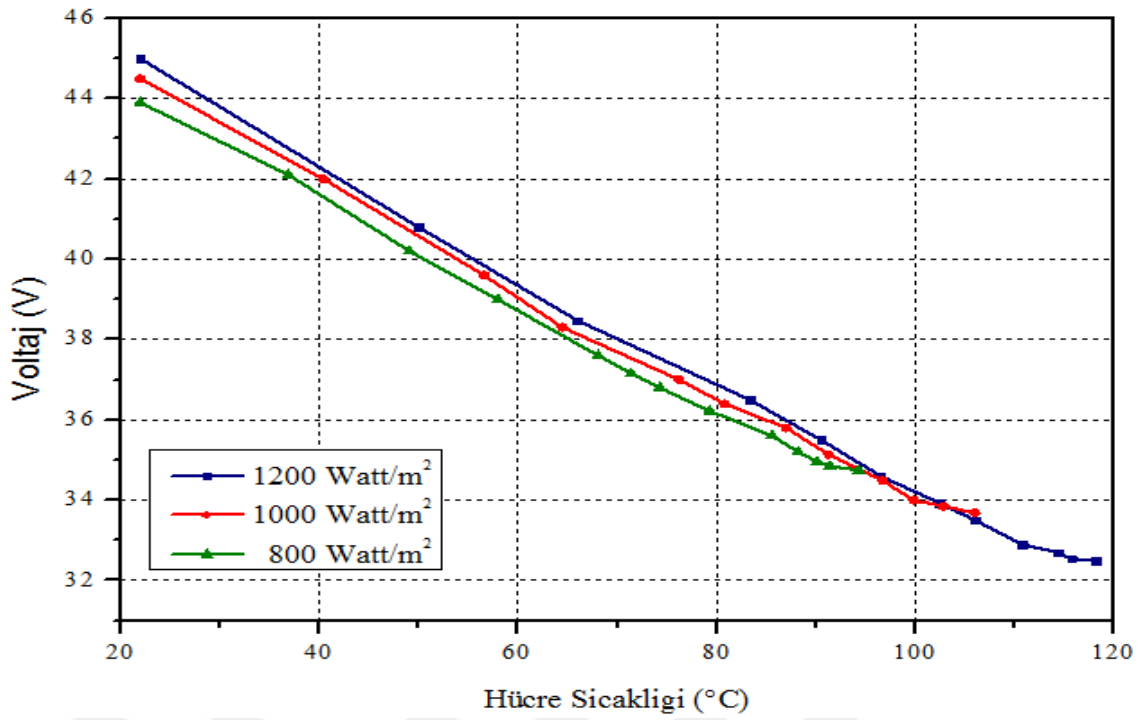
Değişken	Ölçüm Aleti	Belirsizlik
Sıcaklık	Sıcaklık Sensörü	0,0143
Basınç	Basınç Sensörü	0,016
Su/süt debisi	Flowmetre	0,02
Gaz Debisi	Flowmetre	0,01
Voltaj	Voltmetre	0,03
Akım	Ampermetre	0,03
Işınım	Piranometre	0,018

ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

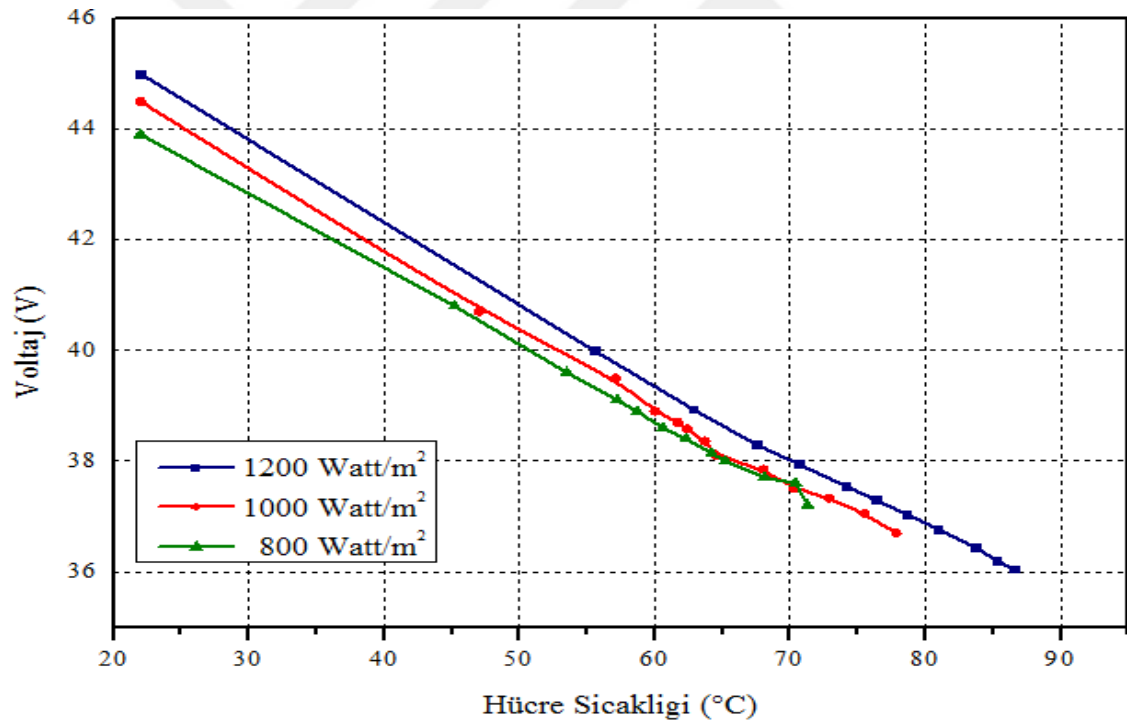
DeneySEL Ölçümler

Bu çalışmada, peynire işlenecek sütü pastörize etmek amacıyla mekanik buhar çevrimi prensibine göre çalışan, dört geçişli ekonomizör ve fotovoltaiik termal (PV/T) sistem ile desteklenen bir ısı pompası sistemi kurulmuştur. Deneyler, Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yenilenebilir Enerji Laboratuvarında, laboratuvar ortamında yapılmıştır. Tezin amacı olan “Fotovoltaiik panelin soğuması sağlanarak, elektrik üretiminin artırılmaya çalışılması, bunu yaparken de ısı enerjisinin sütün pastörizasyonu için faydalanabilir hale getirilmesi” için sistemin CAD ortamında tasarımı yapılmış daha sonra ölçüm yapılacak noktalar belirlenmiş ve bunlara uygun sensörler düzeneğe ilave edilerek deneyler yapılmıştır. Gerçek zamanlı olarak, kararlı hal deney sonuçları kaydedilmiş, çıkan sonuçlar irdelenmiştir. 190 W kapasiteli monokristal bir adet fotovoltaiik panel kullanılmış olup, panel arkasında yerleştirilen, direk akış tipli, bakır borulu termal sistem ile sütün ön ısıtmasında kullanılmak üzere sıcak su ihtiyacı karşılanmıştır. Güneş enerjisi olarak yapay ışı nım kaynağı kullanılmıştır. Farklı panel su debisi, ışı nım değerleri ve süt debisi, depolanan su sıcaklıklarına göre deneyler yapılmış, bu parametrelerin sistem üzerine etkileri araştırılmıştır. Elde edilen sonuçların değerlendirilebilmesi açısından fotovoltaiik panelin üç farklı ışı nımda, soğutma yapılmadan performansı da ayrıca incelenmiştir. Deney düzeneğinde kullanılan tüm ölçüm aletlerinin kalibrasyonu yapıldıktan sonra deneylere başlanmıştır.

Deneylerin amacı sütün pastörizasyonu için gerekli enerjinin bir kısmını PV/T sistemden karşılamak, pastörizasyon süresini kısaltarak birim süt başına pastörizasyon için harcanan enerji miktarını azaltmak, sistem verimliliğini artırmak ve verimlilik performansları üzerine odaklanmaktır.



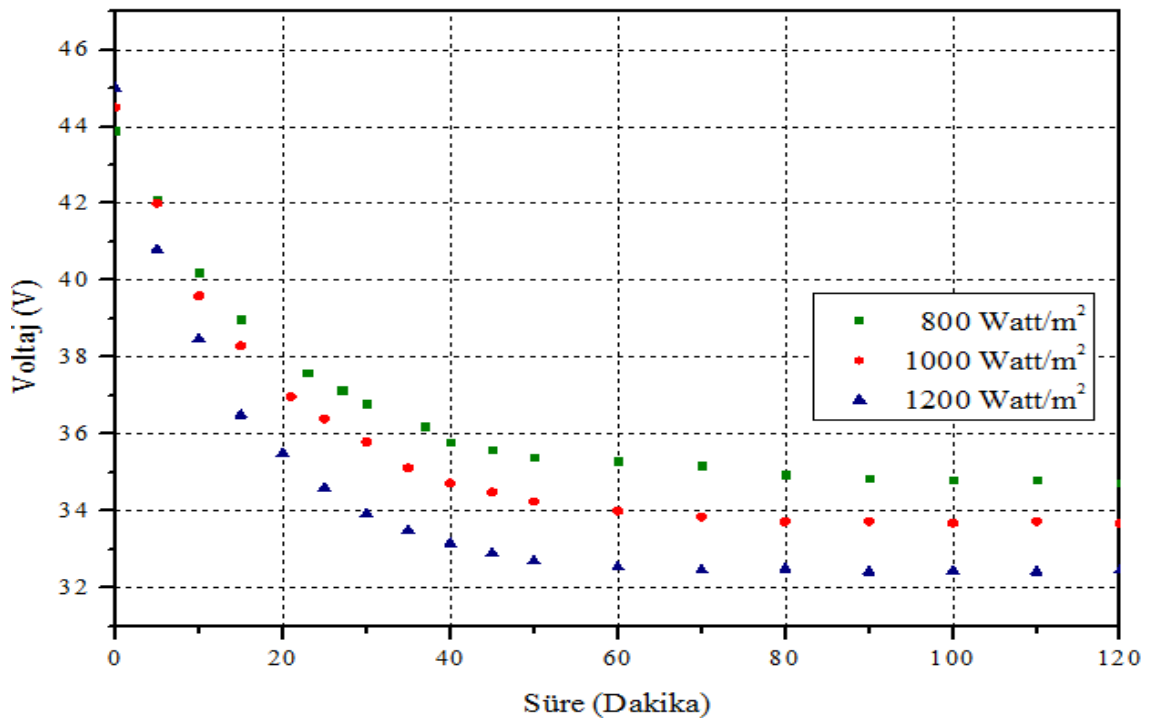
Şekil 59. 800/1000/1200 W/m² ışınlm altında PV panel voltaj-hücre sıcaklığı değışim grafiği.



Şekil 60. 800/1000/1200 W/m² ışınlm altında PV/T sistem voltaj-hücre sıcaklığı değışim grafiği.

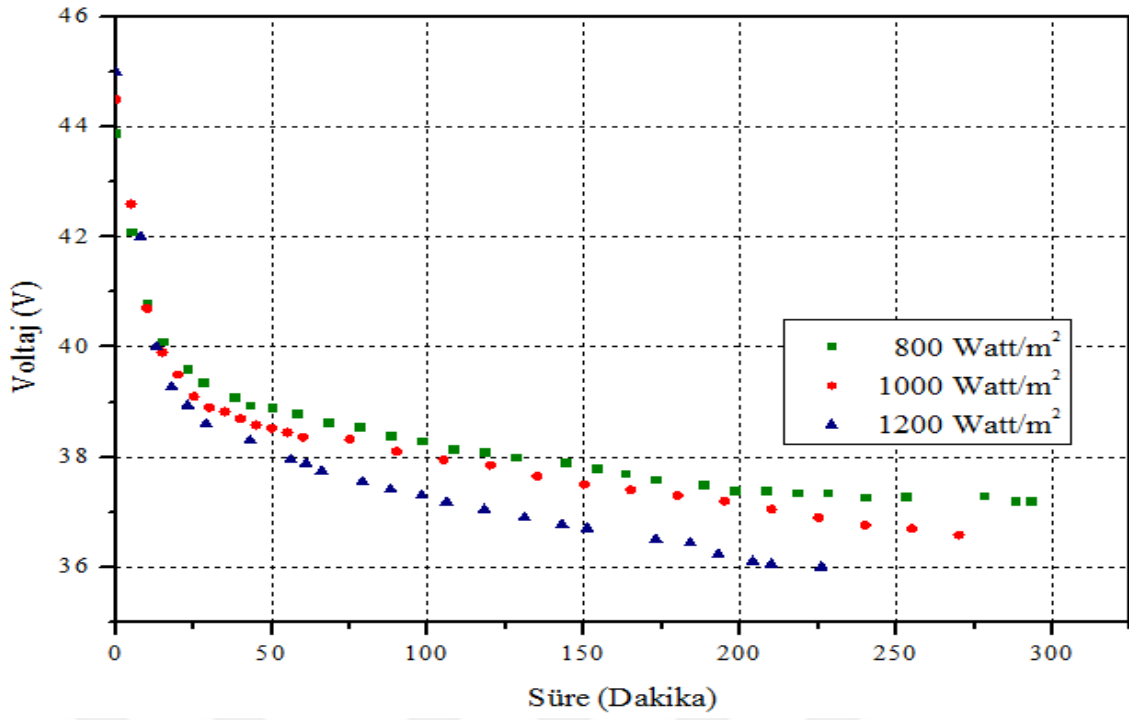
Şekil 59’da görüleceği üzere, fotovoltaik panel 800/1000/12000 W/m² ışınlma maruz kaldığında panel hücre sıcaklığının artışına bağlı olarak, panel çıkış voltajında düşüş meydana gelmiştir. 800 W/m² ışınlm değeriinde hücre sıcaklığı 22 °C’den 94,3 °C’ye, 1000 W/m² ışınlm değeriinde 22 °C’den 106 °C’ye, 1200 W/m² ışınlm değeriinde ise 22 °C’den 118,2 °C’ye kadar yükselmiş, bu noktadan sonra ise hücre sıcaklıkları sabit kalmıştır. Şekil 60’da

fotovoltaik panel arkasına yerleştirilen, bakır borulu kollektör içinden 80 litre boyler suyu dolaştırılarak, panel hücre sıcaklığı 800 W/m^2 ışıınım değerinde $71,3 \text{ }^\circ\text{C}$ 'ye, 1000 W/m^2 ışıınım değerinde $77,8 \text{ }^\circ\text{C}$ 'ye, 1200 W/m^2 ışıınım değerinde ise $86,5 \text{ }^\circ\text{C}$ 'ye düşürülmüştür. Chow *et al.* (2003) yaptıkları araştırmada PV hücre sıcaklığındaki her $10 \text{ }^\circ\text{C}$ artışın kristal silikon PV hücre elektrik gücünde yaklaşık %5 düşüşe neden olduğunu ortaya koymuşlardır. Panel yüzey sıcaklığının düşüşüne bağlı olarak voltaj değerleri, 800 W/m^2 ışıınım seviyesinde, soğutmasız halde 34,7 Volt değerinde sabitlenirken PV/T sisteminde 37,4 Volt değerinde, 1000 W/m^2 ışıınım seviyesinde soğutmasız halde 33,5 Volt değerinde sabitlenirken PV/T sisteminde 36,7 Volt değerinde, 1200 W/m^2 ışıınım seviyesinde ise soğutmasız halde 32,5 Volt değerinde sabitlenirken PV/T sisteminde 36,1 Volt değerinde sabitlenmiştir.



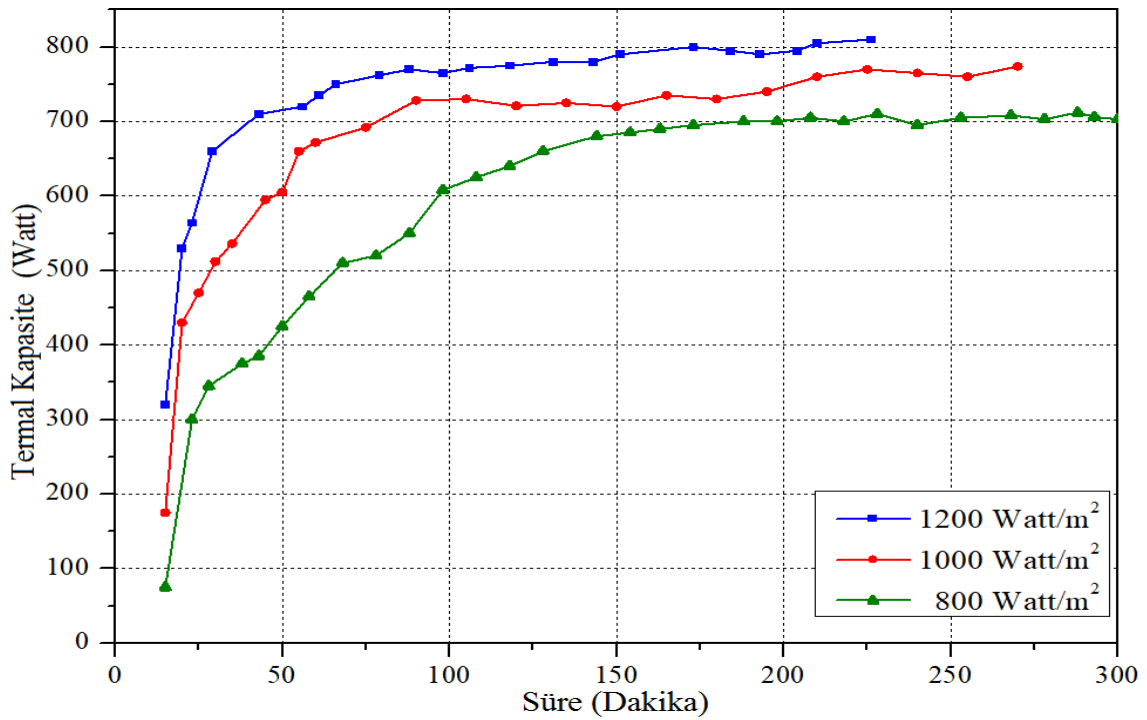
Şekil 61. $800/1000/1200 \text{ W/m}^2$ ışıınım altında PV panel voltaj-süre değişim grafiği.

Şekil 61’de görüleceği üzere, fotovoltaik panel $800/1000/12000 \text{ W/m}^2$ ışıınımına maruz kaldığında, zamanla panel yüzey sıcaklığının artışına bağlı olarak voltajın düştüğü ve belirli bir süre sonra düşüşün yavaşlayarak sabit kaldığı belirlenmiştir. Şekilde görüldüğü gibi ışıınım miktarı arttıkça voltaj düşüm hızı artış göstermiş ve aynı süreye denk gelen zaman noktasında yüksek ışıınımına maruz kalan panel yüzey sıcaklığı daha fazla olduğundan daha düşük voltaj çıkışı elde edilmiştir. ışıınım değerlerine göre ulaştıkları en yüksek panel yüzey sıcaklığından itibaren voltaj sabit kalmıştır.

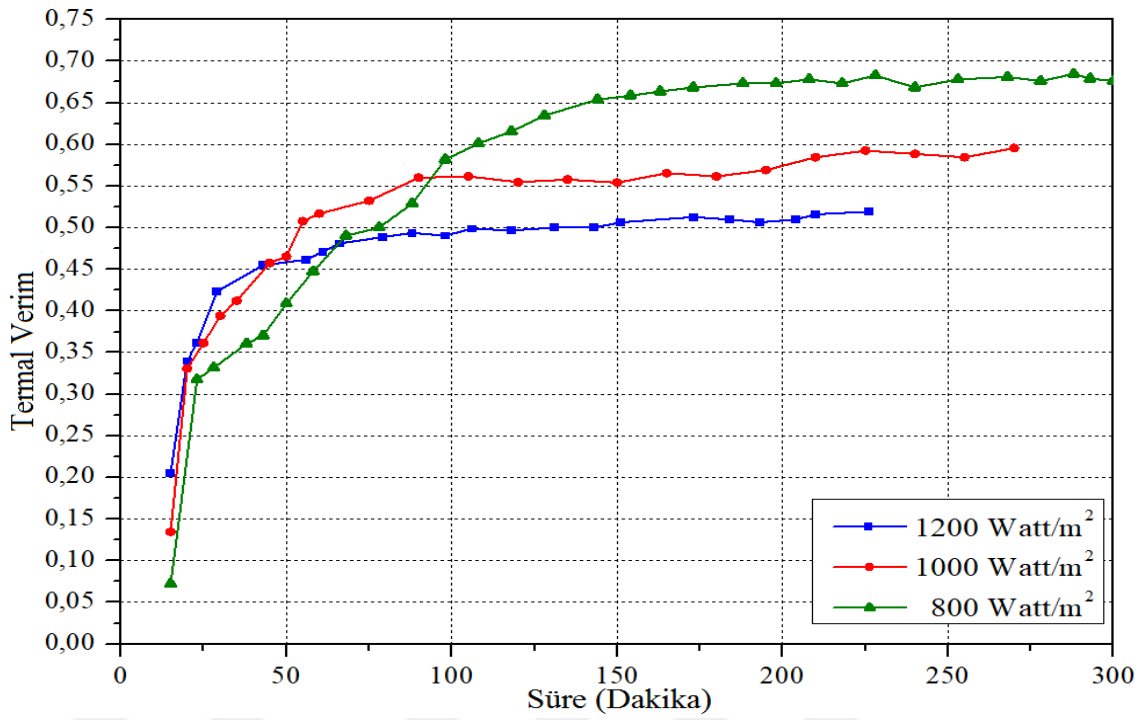


Şekil 62. 800/1000/1200 W/m² ışınlm altında PV/T sistem voltaj-süre değişim grafiği.

Şekil 62’te fotovoltaiik panel arkasına yerleştirilen, bakır borulu kollektör içinden 80 litre boyler suyu sirkölasyon yaptırılarak panel hücre sıcaklığı dūřürölümüřtür. Panel yüzey sıcaklığının dūřüřüne paralel olarak, 120 dakika için soğutmasız PV panel voltaj değerinin 800 W/m² ışınlm seviyesinde 34,7 Volt değerinden 38 Volt değerine, 1000 W/m² ışınlm seviyesinde 33,5 Volt değerinden 37,8 Volt değerine, 1200 W/m² ışınlm seviyesinde 32,5 Volt değerinden 37,1 Volt değerine çıktığı gözlemlenmiştir.

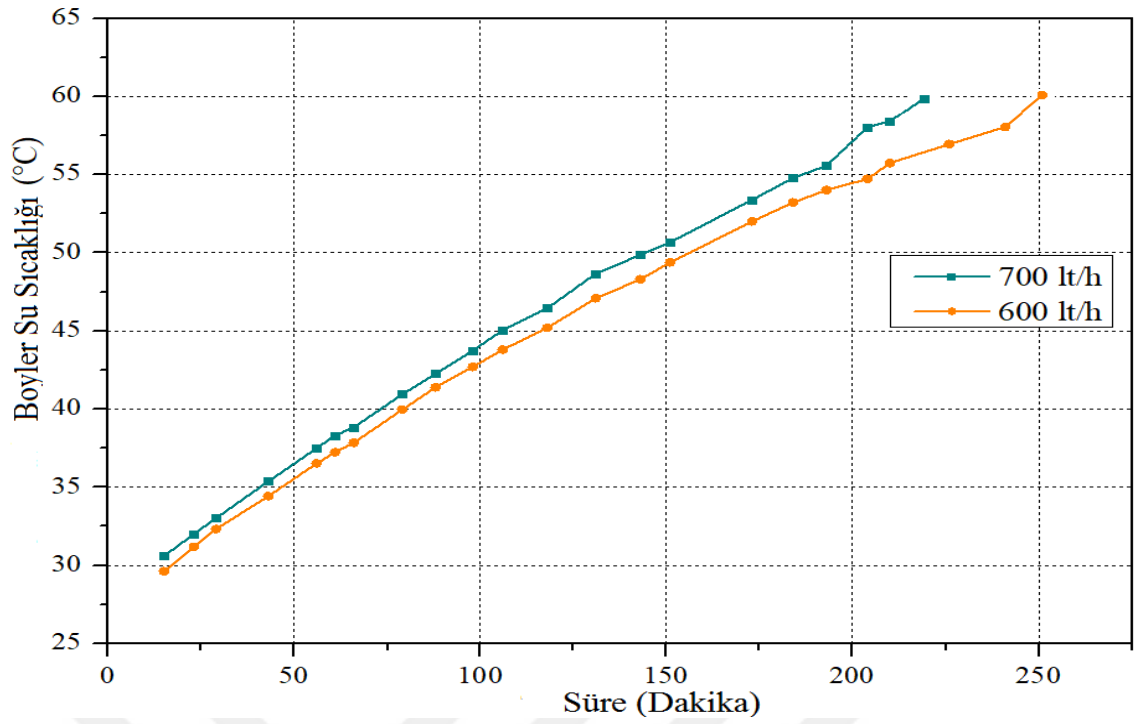


Şekil 63. 800/1000/1200 W/m² ışınlm altında PV/T termal kapasite-süre değişim grafiği.

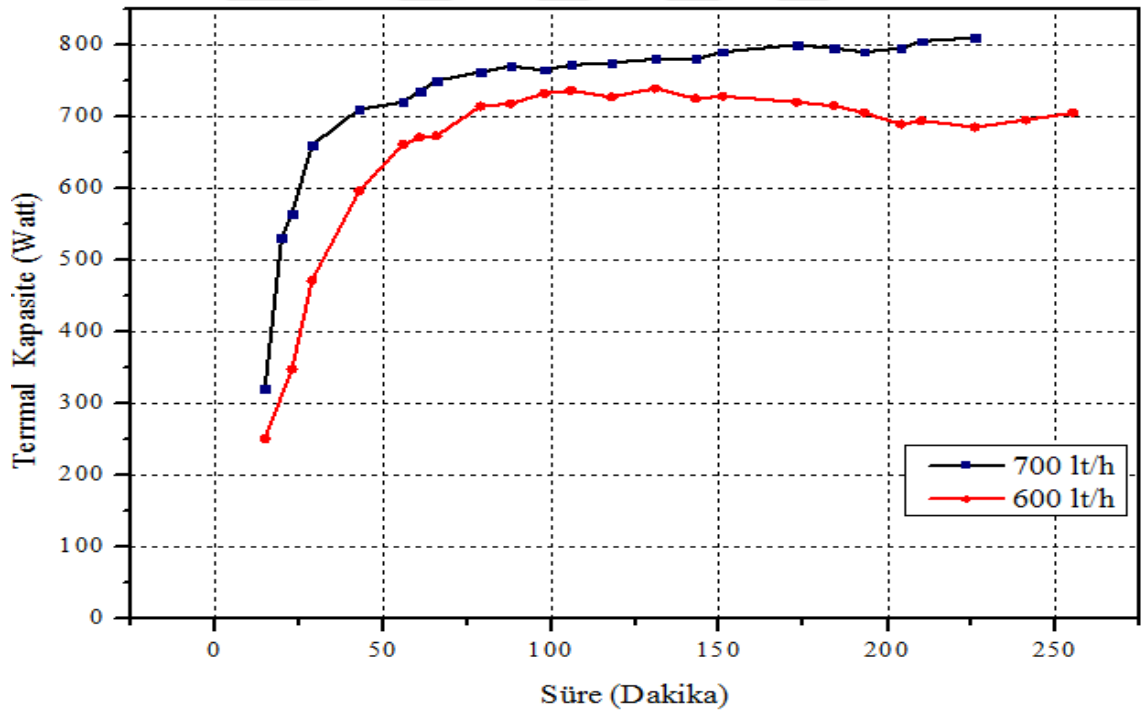


Şekil 64. 800/1000/1200 W/m² ışınlm altında PV/T termal verim-süre değişim grafiği.

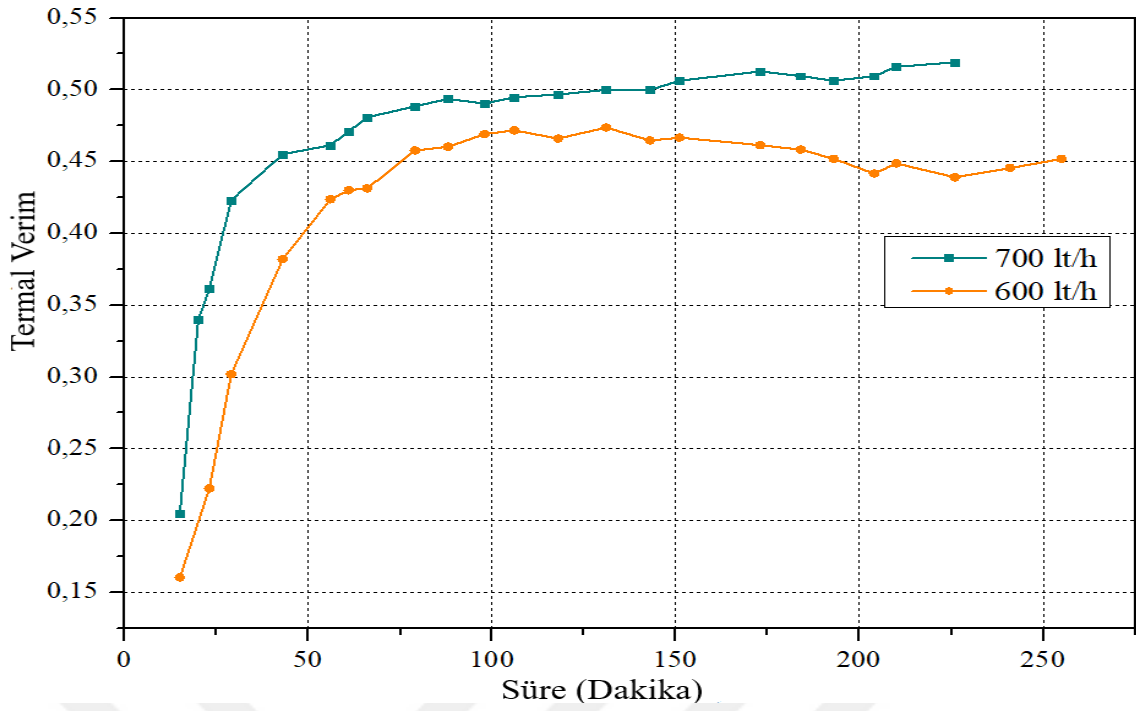
Şekil 63'te ve Şekil 64'de fotovoltaiik panel arkasına yerleştirilen, bakır borulu kollektör içinden 80 litre boyler suyu sirkölasyon yaptırılarak PV/T sistem termal kapasiteleri ve termal verimleri farklı ışınlm değerlerinde irdelenmiştir. Yapılan deneyler sonucu elde edilen veriler doğrultusunda, hesaplanan PV/T sistem termal kapasitelerinin ışınlm artışına bağlı, artan yüzey sıcaklıkları ile orantılı olarak hızlı bir şekilde arttığı, belli bir süre sonra artışın yavaşlayarak hemen hemen sabitlendiği tespit edilmiştir. 800 W/m² ışınlm değerinde termal kapasitenin yaklaşık 710 Watt değerine, 1000 W/m² ışınlm değerinde termal kapasitenin yaklaşık 770 Watt değerine, 1200 W/m² ışınlm değerinde termal kapasitenin yaklaşık 810 Watt değerine kadar çıktığı gözlemlenmiştir. PV/T sistem termal verimleri, hücre sıcaklıklarına bağlı olarak artan ışınlm miktarı ile başlangıçta doğru orantılı olarak seyir göstermiştir. Hücre sıcaklılarındaki artış birlikte, PV/T sistemden (hücre, borulama vs.) ortama geçen termal kayıpların artması nedeniyle 800 W/m² ışınlm değerinde en yüksek termal verim elde edilmiştir. ışınlm miktarının artışına bağlı olarak termal enerjinin arttığı, termal verimin, giriş suyu sıcaklığı ve ortam sıcaklığı arasındaki farkın artışına bağlı olarak düştüğü saptanmıştır (Khelifa *et al.* 2014). 800 W/m² ışınlm değerinde termal verim %68,3, 1000 W/m² ışınlm değerinde termal verim %59,2, 1200 W/m² ışınlm değerinde termal verim %51,9 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 65. 1200 W/m² ışınlam altında 700 lt/h-600 lt/h debi parametrelerine göre boyler su sıcaklığı-süre değişim grafiği.

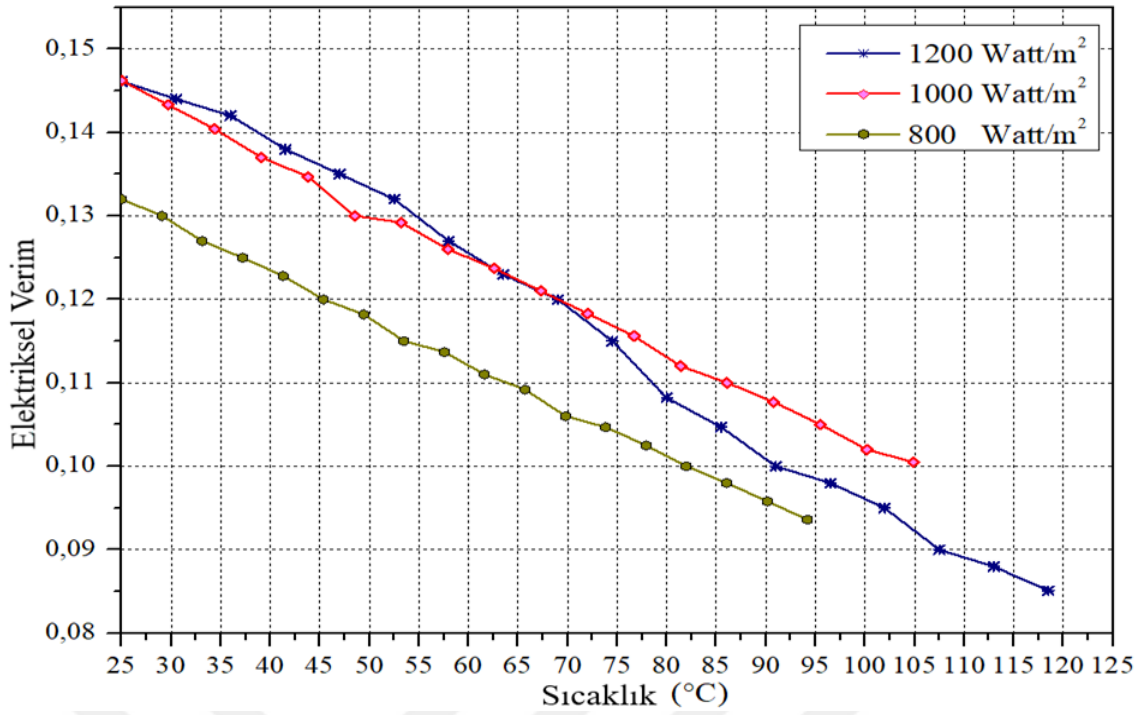


Şekil 66. 1200 W/m² ışınlam altında 700 lt/h-600 lt/h debi parametrelerine göre termal kapasite-süre değişim grafiği.



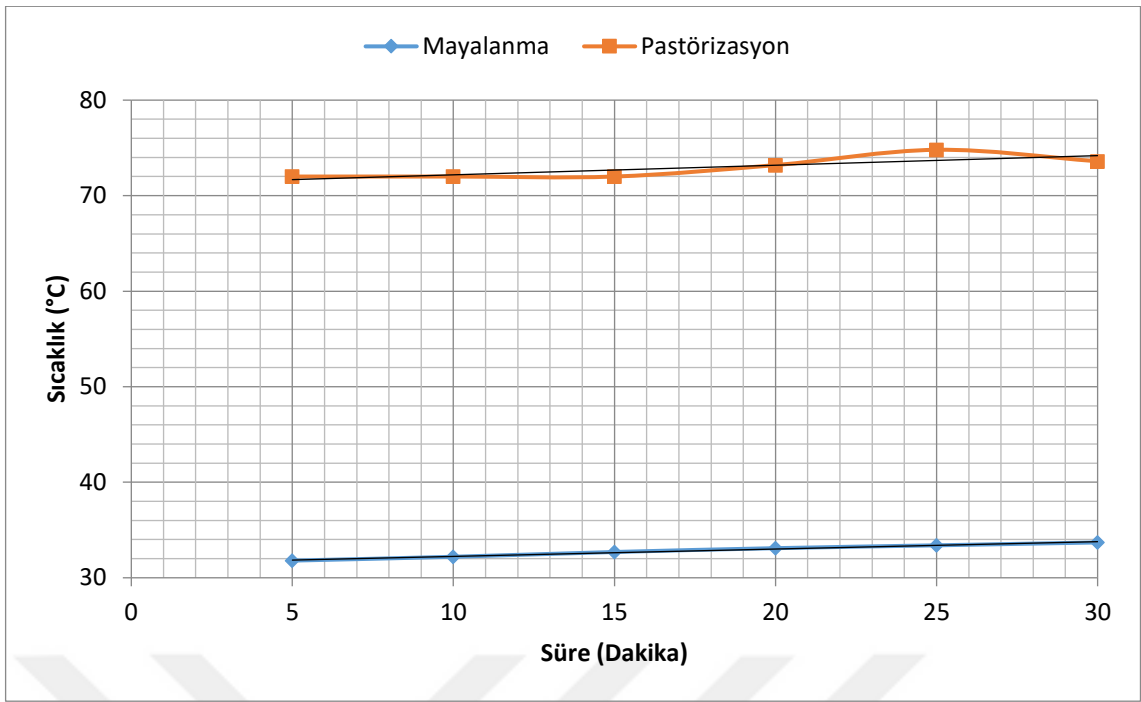
Şekil 67. 1200 W/m² ışınlm altında 700 lt/h-600 lt/h debi parametrelerine göre termal verim-süre değişim grafiği.

Şekil 65, Şekil 66, Şekil 67’de panel yüzeyine uygulanan 1200 Watt/m² ışınlm değeri altında, fotovoltaiik panel arkasına yerleştiren bakır borulu kollektör içinden 80 lt boyler suyu 700 lt/h ve 600 lt/h olmak üzere farklı debilerde sirkülasyon yaptırılarak 60 °C’ye çıkarılmış, boyler suyu sıcaklığı, PV/T sistem termal kapasiteleri ve termal verimlerin süre ile değişim grafikleri oluşturulmuştur. Grafikler incelendiğinde bakır boru kollektör içerisinden kapalı sistemde dolaştırılan su debisinin artması ile boyler suyu sıcaklığının daha az zamanda 60 °C’ye çıktığı, termal kapasite dolaysısıyla termal verimin arttığı saptanmıştır. Aynı ışınlm değeri altında, debi değerinin yükseltilmesi, kollektör ısı verimliliğinin artmasına neden olduğu ortaya konmuştur (Sultan and Tso 2018). 1200 W/m² ışınlm değeri altında 700 lt/h panel su debisi için 80 lt kapalı sistem su sıcaklığı 60 °C’ye 225 dakikada ulaşırken, bu süre 600 lt/h panel su debisi için 255 dakikaya çıkmıştır. 1200 W/m² ışınlm değeri altında 700 lt/h panel su debisi için termal kapasite 810 Watt değerine çıkarken, 600 lt/h panel su debisi için bu değer yaklaşık 739 Watt olarak hesaplanmıştır. Hesaplanan termal kapasitelere bağlı olarak 1200 W/m² ışınlm değeri altında 700 lt/h panel su debisi için en yüksek termal verim %51,9 olurken, bu değer 600 lt/h panel su debisi için %47,4 olarak hesaplanmıştır.

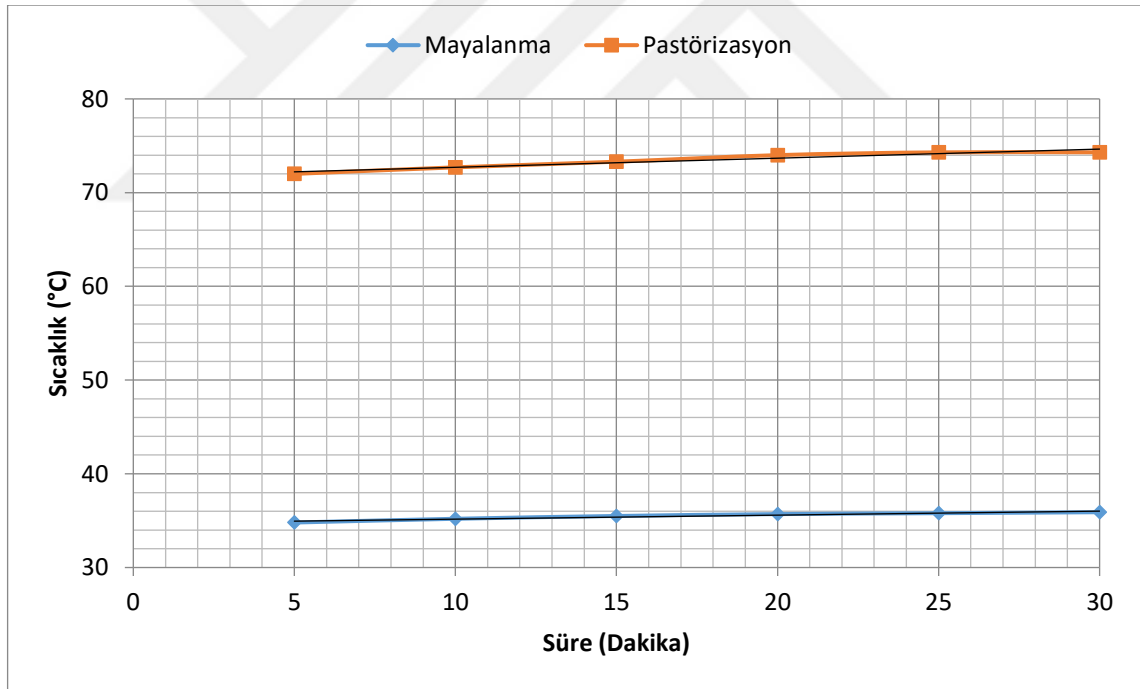


Şekil 68. 800/1000/1200 W/m² ışınlam altında fotovoltaik panel elektriksel verim-hücre sıcaklığı değişim grafiği.

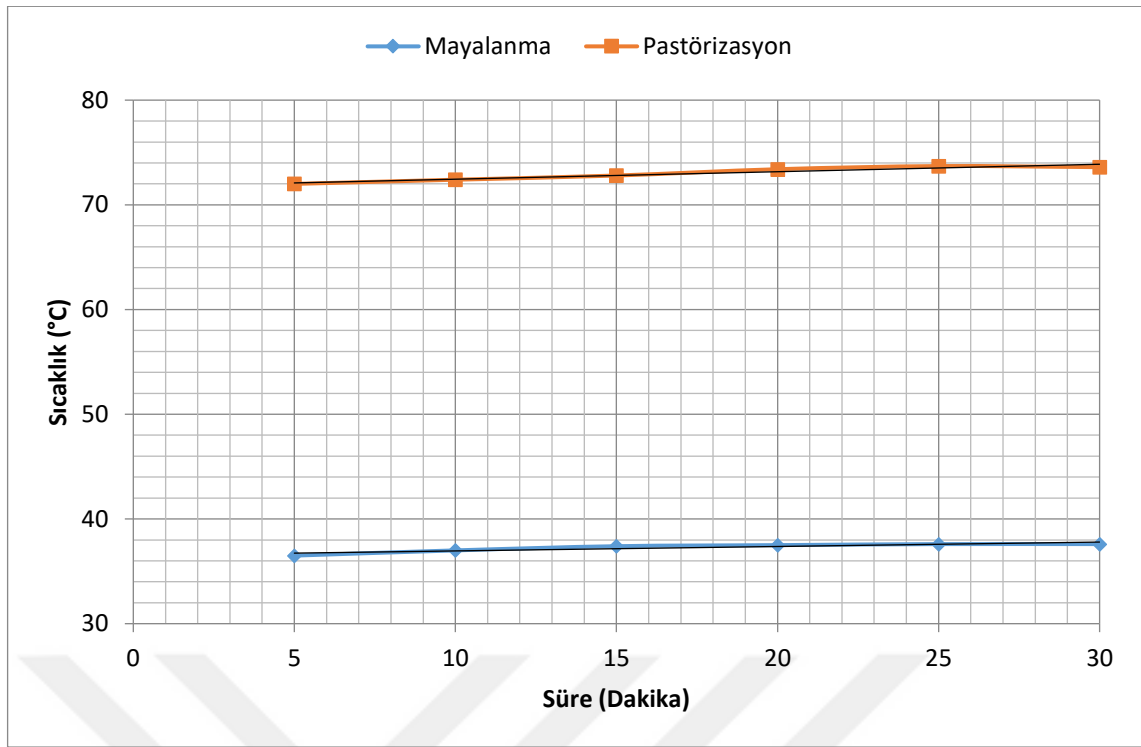
Şekil 68’de panel yüzeyine uygulanan 1200/1000/800 Watt/m² ışınlam değerleri altında fotovoltaik panel elektrik veriminin hücre sıcaklığı ile değişim grafiği sunulmuştur. Şekilde de görüleceği üzere, PV panel elektrik verimi hücre sıcaklıklarındaki artış ile birlikte düşüş göstermiştir. Başlangıçta panel verimi, ışınlam değerleri ile orantılı olarak yüksek ışınlam değerinde elektriksel verim daha fazla hesaplanmış, hücre sıcaklığının yaklaşık 60 °C değerinden sonra 1200 W/m² ışınlam değeri için verim değeri, 1000 W/m² ışınlam değeri için hesaplanan verim değerinin altına düşmüştür. PV elektriksel verimleri 800 W/m² ışınlam değeri için 94,3 °C hücre sıcaklığında %9,36 değerine, 1000 W/m² ışınlam değeri için 106 °C hücre sıcaklığında %10,05 değerine, 1200 W/m² ışınlam değeri için 118,2 °C hücre sıcaklığında %8,50 değerine düşmüştür. Fotovoltaik panel arkasına yerleştirilen bakır borulu kollektör içinden 80 lt boyler sirkülasyon yaptırılarak hücre sıcaklıkları 800 W/m² ışınlam değeri için 71,3 °C sıcaklığına, 1000 W/m² ışınlam değeri için 77,8 °C sıcaklığına, 1200 W/m² ışınlam değeri için 86,5 °C sıcaklığına düşürülmüştür. Uygulanan soğutma yöntemi ile PV panel sıcaklığında düşüş sağlandığı, böylece elektriksel verim artışına katkı sağlandığı ortaya konmuştur. (Alzaabi *et al.* 2014). Azalan hücre sıcaklığı ile birlikte panel elektriksel verimleri, 800 W/m² ışınlam değeri için %13,3 artarak %10,6 değerine, 1000 W/m² ışınlam değeri için %14,4 artarak %11,5 değerine, 1200 W/m² ışınlam değeri için %22,4 artarak %10,4 değerine çıkarılmıştır.



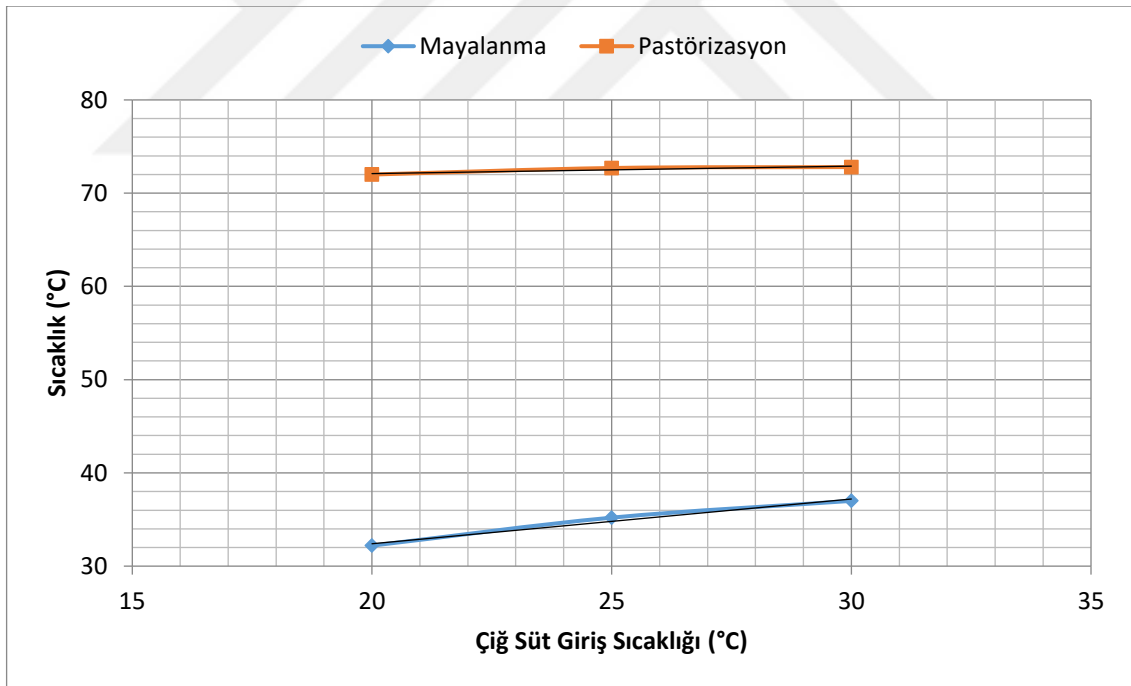
Şekil 69. 20 °C çiğ süt sıcaklığı parametresine göre yapılan deneyde, ölçülen süt sıcaklıkları-süre değişim grafiği.



Şekil 70. 25 °C çiğ süt sıcaklığı parametresine göre yapılan deneyde, ölçülen süt sıcaklıkları-süre değişim grafiği.



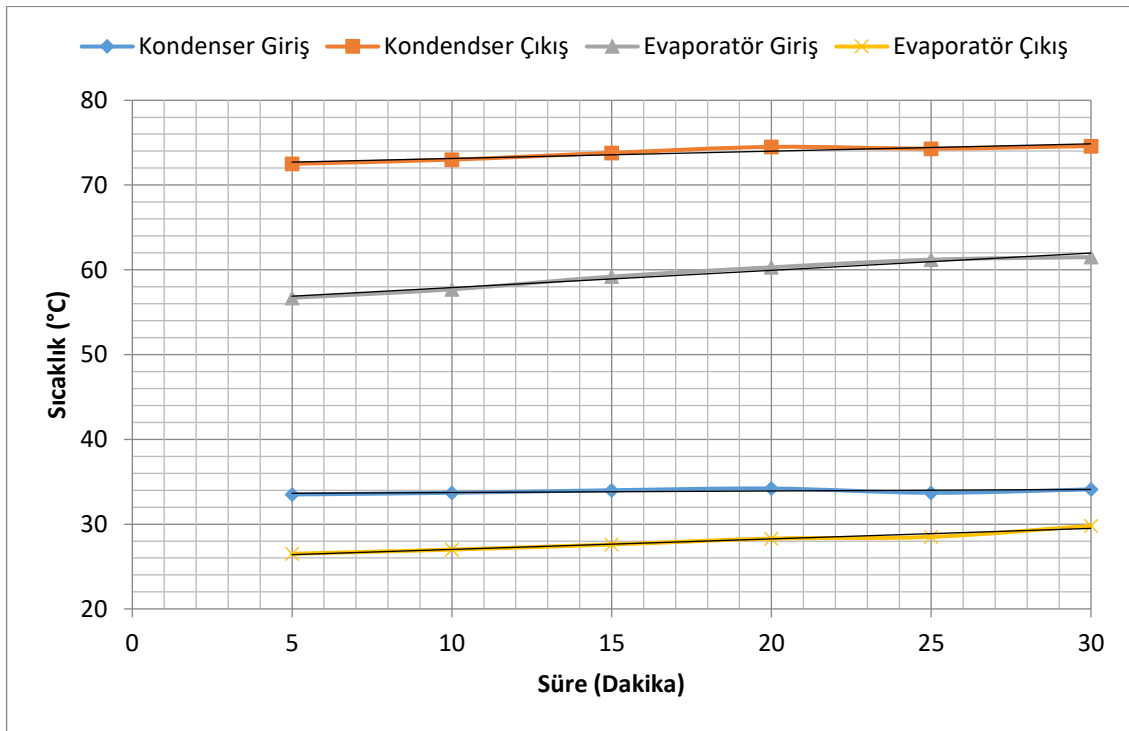
Şekil 71. 30°C çiğ süt sıcaklığı parametresine göre yapılan deneyde, ölçülen süt sıcaklıkları-süre değişim grafiği.



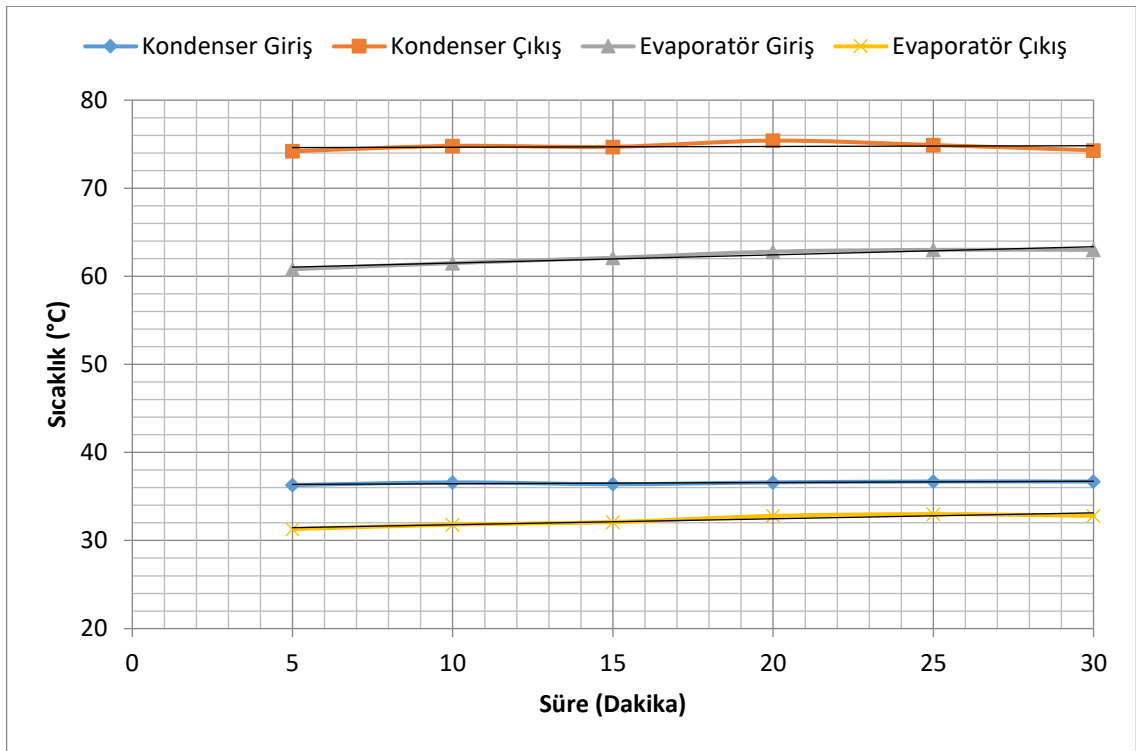
Şekil 72. 20 °C, 25 °C, 30 °C çiğ süt sıcaklığı parametrelerine göre yapılan deneylerde, ölçülen süt sıcaklıklarının değişim grafiği.

Şekil 69, Şekil 70, Şekil 71'de 20 °C, 25 °C ve 30 °C çiğ süt sıcaklıkları ve 120 l/h sabit süt debisi için sütün, ısı pompası kondenser çıkış suyu ile ısıtılan plakalı eşanjör birinci bölmesinden çıkış sıcaklığı olan pastörizasyon sıcaklık değeri ve pastörize sütün ısı pompası evaporatör çıkış suyu ile soğutulan plakalı eşanjör dördüncü bölmesinden çıkış sıcaklığı olan mayalanma sıcaklık değerlerinin sürekli rejim durumunda zamanla değişimi gösterilmiştir.

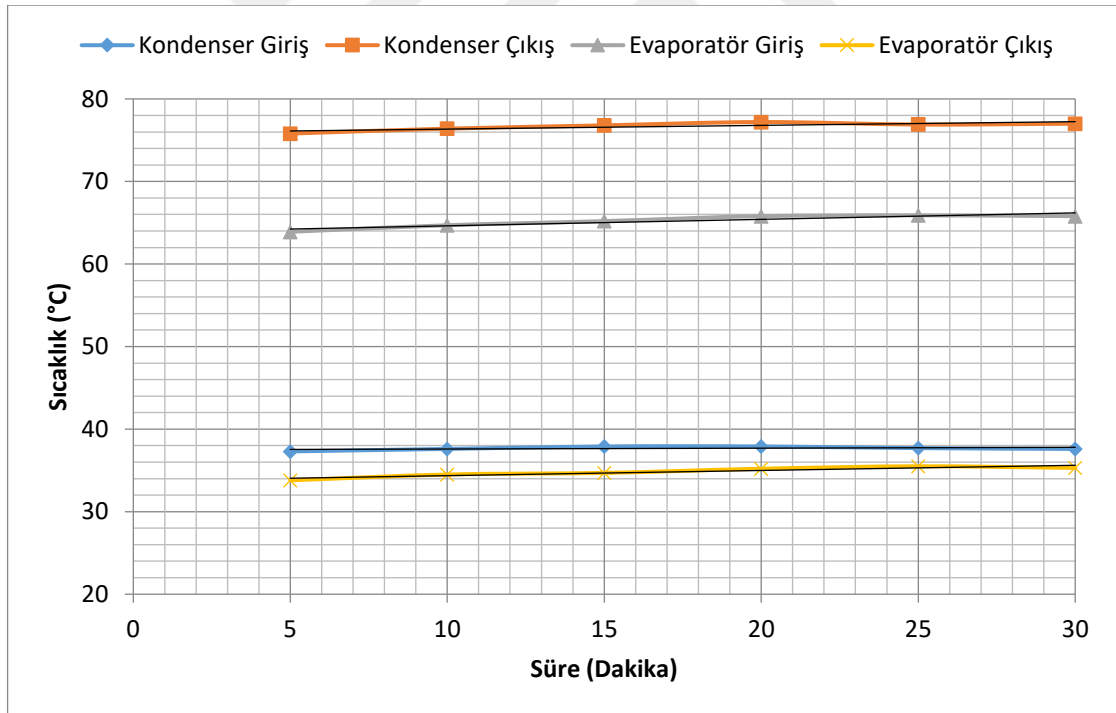
Sıcaklık değerlerinin istenilen değerlerde sabit kalması, zamanla değişmemesi istenen bir durumdur (Özyurt 2002). Şekil 72’te görüldüğü gibi sabit debi şartları altında, artan çiğ süt sıcaklıklarına bağlı olarak, pastörizasyon sıcaklık değerinde çok fazla değişim gözlemlenmemesine rağmen ürün işleme sıcaklığı olan mayalanma sıcaklığında artışın olduğu gözlemlenmiştir. Mayalanma sıcaklığının, artan başlangıç süt giriş sıcaklığı ile artış göstermesinin nedeni, Şekil 36’da gösterilen sistemin akış şemasından görüldüğü gibi pastörize edilen sütün plakalı eşanjörün üçüncü bölümünde daha yüksek sıcaklıktaki çiğ süt ile, dördüncü bölümünde ise daha yüksek sıcaklıktaki evaporatör çıkış suyu ile çarpıştırılması, sütün soğuması için yapılan ön soğutma işleminde sıcaklık farkının azalması nedeniyle eşanjörde transfer edilen ısı miktarının düşmesidir.



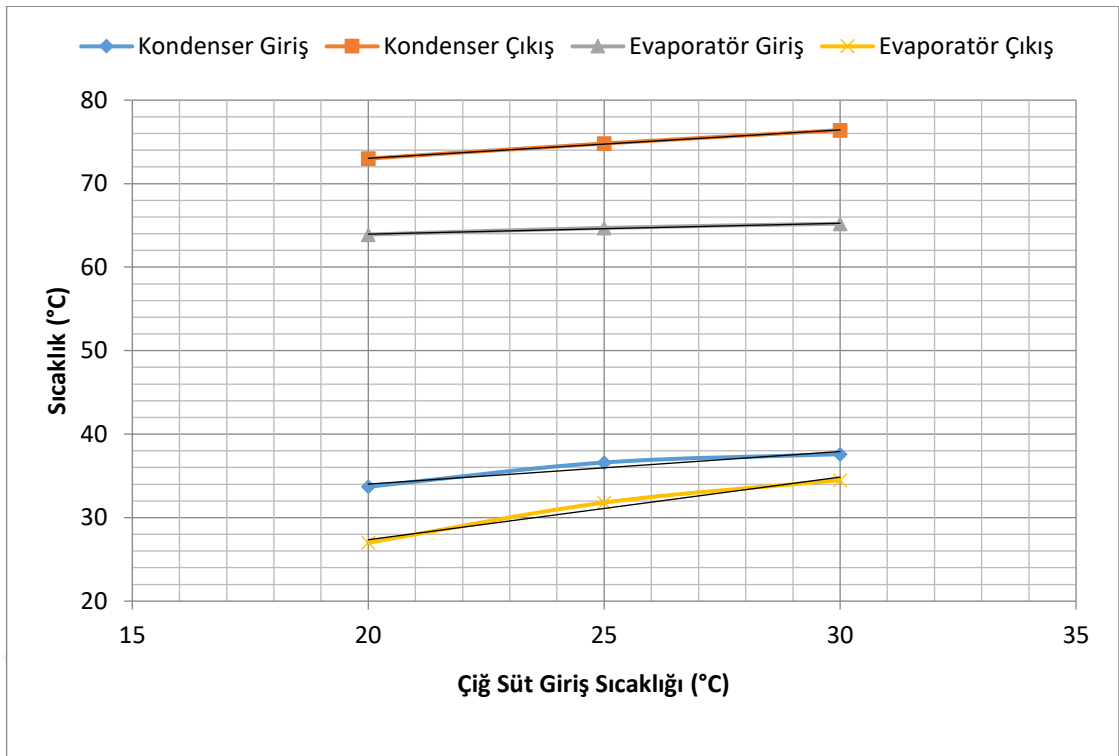
Şekil 73. 20 °C çiğ süt sıcaklığı parametresine göre yapılan deneyde, ölçülen ısı pompası su devresi sıcaklıkları-süre değişim grafiği.



Şekil 74. 25 °C çığ süt sıcaklığı parametresine göre yapılan deneyde, ölçülen ısı pompası su devresi sıcaklıkları-süre değişim grafiği.

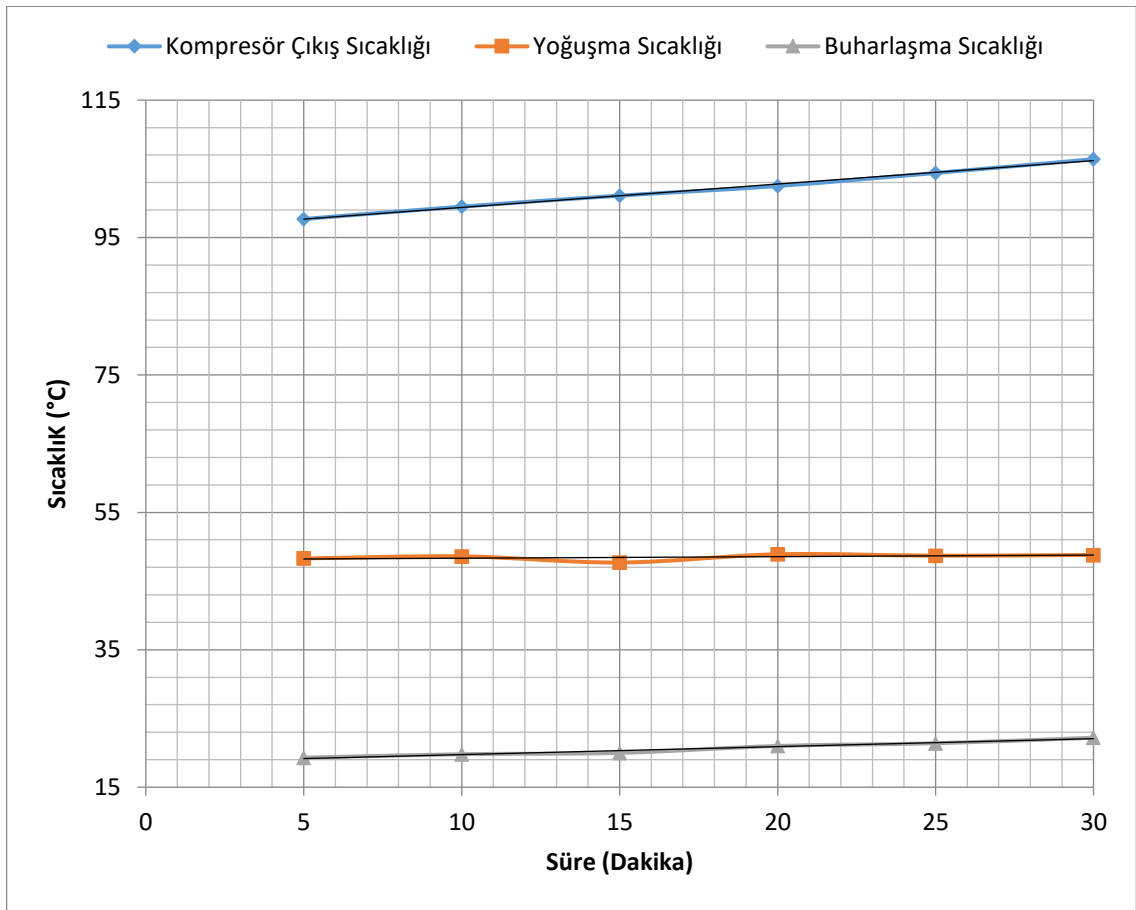


Şekil 75. 30 °C çığ süt sıcaklığı parametresine göre yapılan deneyde, ölçülen ısı pompası su devresi sıcaklıkları-süre değişim grafiği.

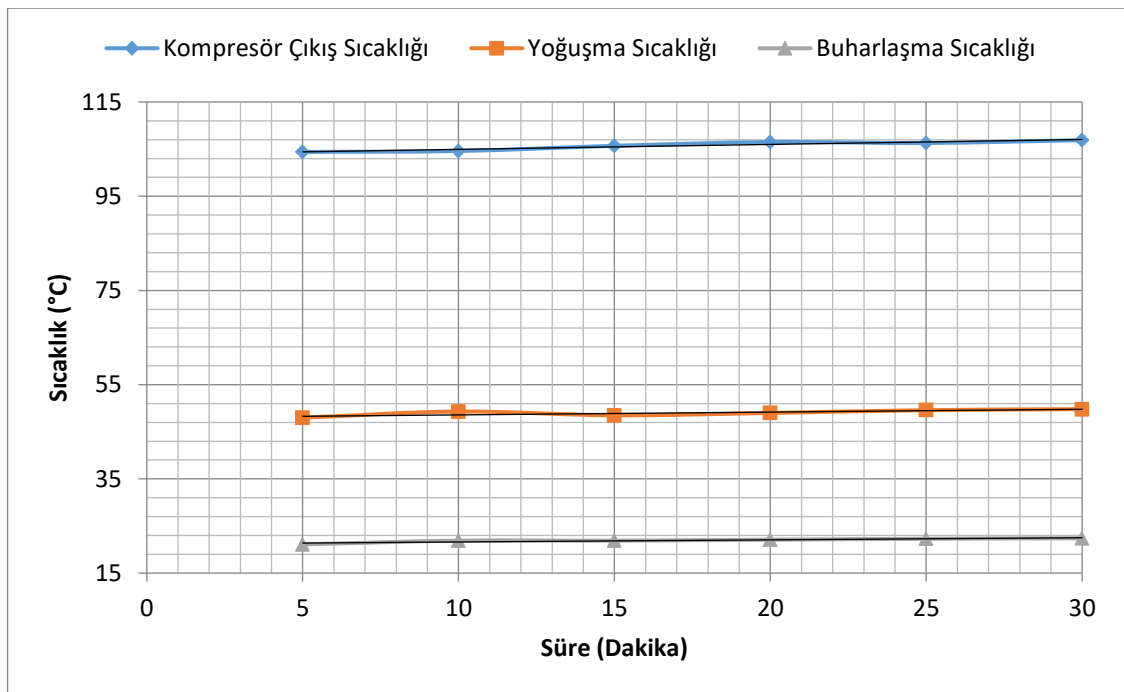


Şekil 76. 20 °C, 25 °C, 30 °C çiğ süt sıcaklığı parametrelerine göre yapılan deneylerde, ölçülen ısı pompası su devresi sıcaklıklarının değişim grafiği.

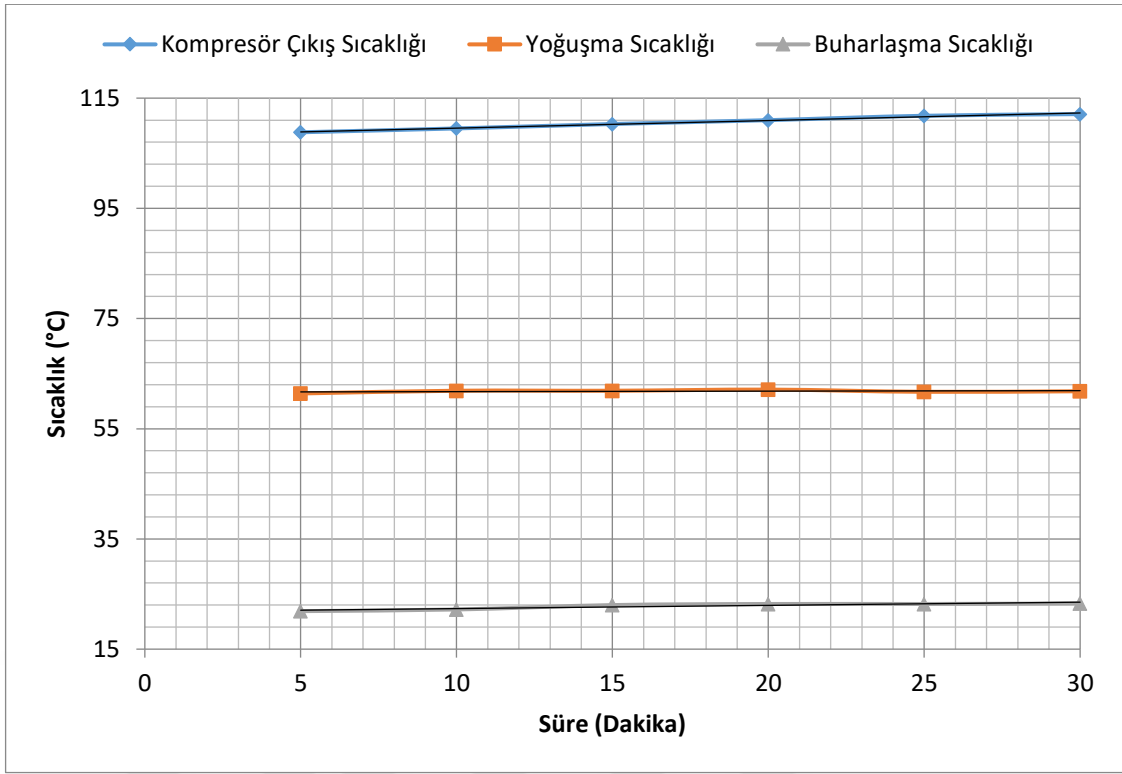
Şekil 73’de 20 °C, Şekil 74’de 25 °C, Şekil 75’de 30 °C çiğ süt sıcaklıkları ve 120 l/h sabit süt debisi için, ısı pompası kondenser giriş-çıkış suyu sıcaklık değerleri ve evaporatör giriş-çıkış suyu sıcaklık değerlerinin sürekli rejim durumunda zamanla değişimi gösterilmiştir. Sıcaklık değerlerinin istenilen değerlerde sabit kalması, zamanla değişmemesi istenen bir durumdur (Özyurt 2002). Şekil 76’da görüldüğü gibi aynı sabit debi şartları altında, artan çiğ süt sıcaklıklarına bağlı olarak kondenser giriş-çıkış suyu ve evaporatör giriş-çıkış suyu sıcaklıklarında artışın olduğu gözlemlenmiştir. Isı pompası kondenser giriş-çıkış suyu sıcaklık değerleri ve evaporatör giriş-çıkış suyu değerlerinin artış göstermesinin nedeni, Şekil 36’da gösterilen sistemin akış şemasından görüldüğü gibi plakalı eşanjörün birinci ve dördüncü bölmesinde ısı pompası su devresinin artan süt giriş sıcaklığına bağlı olarak daha yüksek sıcaklıkta süt ile çarpıştırılmasıdır.



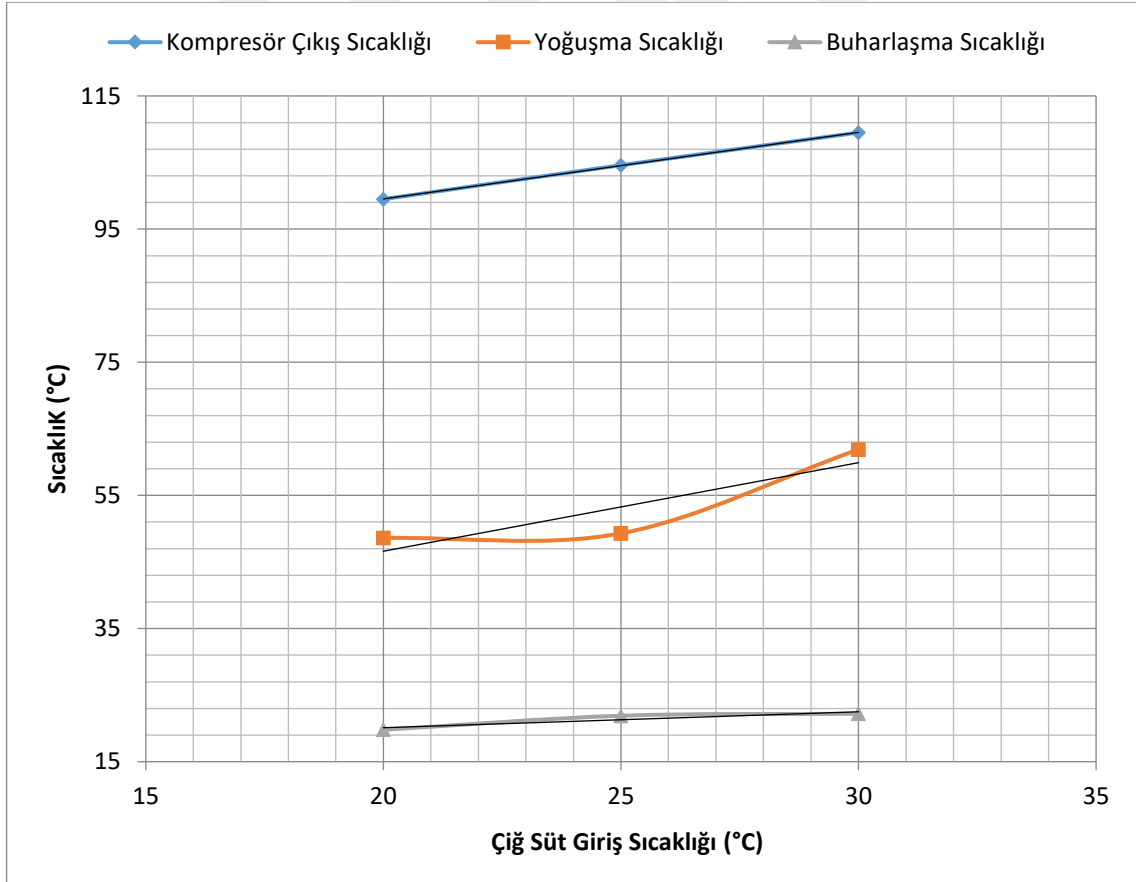
Şekil 77. 20 °C çiğ süt sıcaklığı parametresine göre yapılan deneyde, ölçülen ısı pompası gaz devresi sıcaklıkları-süre değişim grafiği.



Şekil 78. 25 °C çiğ süt sıcaklığı parametresine göre yapılan deneyde, ölçülen ısı pompası gaz devresi sıcaklıkları-süre değişim grafiği.

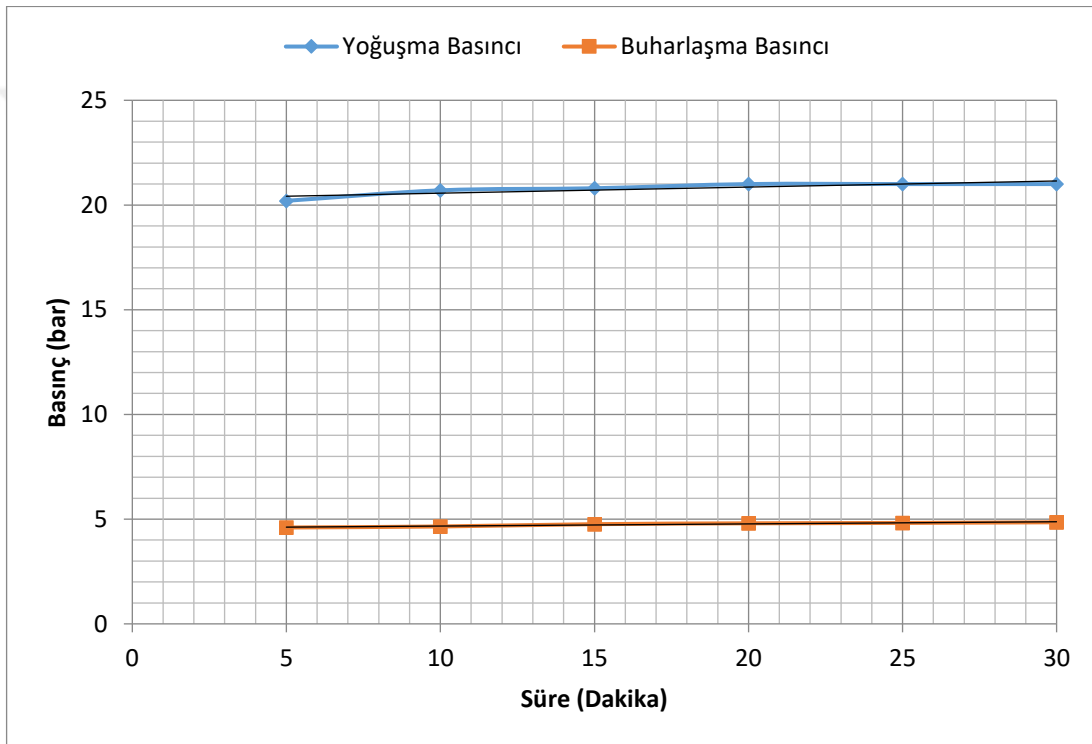


Şekil 79. 30 °C çiğ süt sıcaklığı parametresine göre yapılan deneyde, ölçülen ısı pompası gaz devresi sıcaklıkları-süre değişim grafiği.

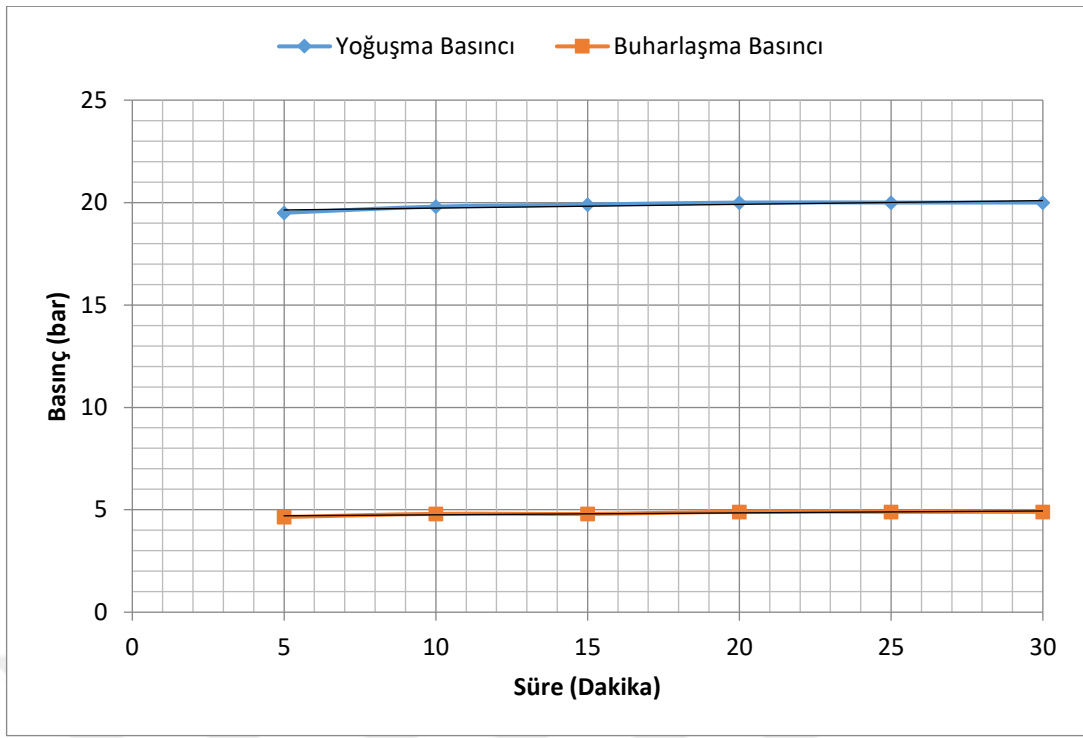


Şekil 80. 20 °C, 25 °C, 30 °C çiğ süt sıcaklığı parametrelerine göre yapılan deneylerde, ölçülen ısı pompası gaz devresi sıcaklıkları değişim grafiği.

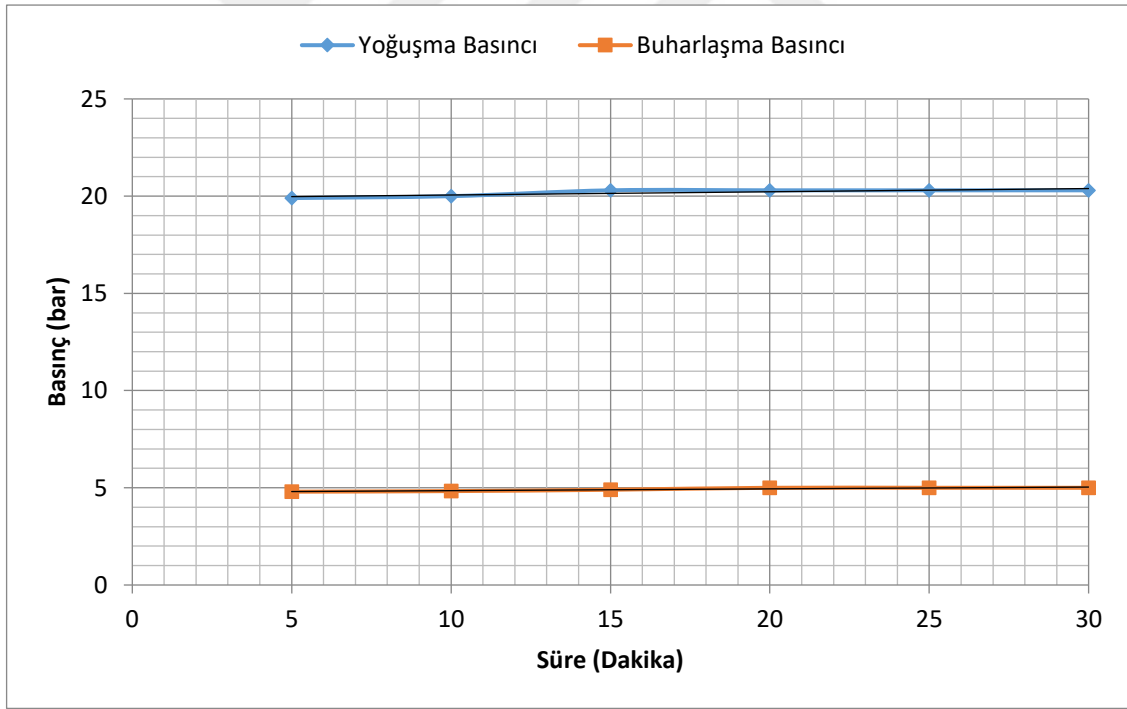
Şekil 77, Şekil 78, Şekil 79’da 20 °C, 25 °C ve 30 °C çiğ süt sıcaklıkları ve 120 l/h sabit süt debisi için, ısı pompası kompresör çıkış sıcaklığı, yoğuşma sıcaklığı, buharlaşma sıcaklık değerlerinin sürekli rejim durumunda zamanla değişimi gösterilmiştir. Sıcaklık değerlerinin istenilen değerlerde sabit kalması, zamanla değişmemesi istenen bir durumdur (Özyurt 2002). Şekil 80’de görüldüğü gibi sabit debi şartları altında, artan çiğ süt sıcaklıklarına bağlı olarak, kompresör çıkış sıcaklığı, yoğuşma sıcaklığı, buharlaşma sıcaklık değerlerinde artışın olduğu gözlemlenmiştir. Kompresör çıkış sıcaklığı, yoğuşma sıcaklığı, buharlaşma sıcaklık değerlerinin artış göstermesinin nedeni, Şekil 36’da gösterilen sistemin akış şemasından görüldüğü gibi ısı pompası su devresi evaporatör ve kondenser giriş sıcaklıklarının artan başlangıç süt giriş sıcaklığı ile daha yüksek oluşudur.



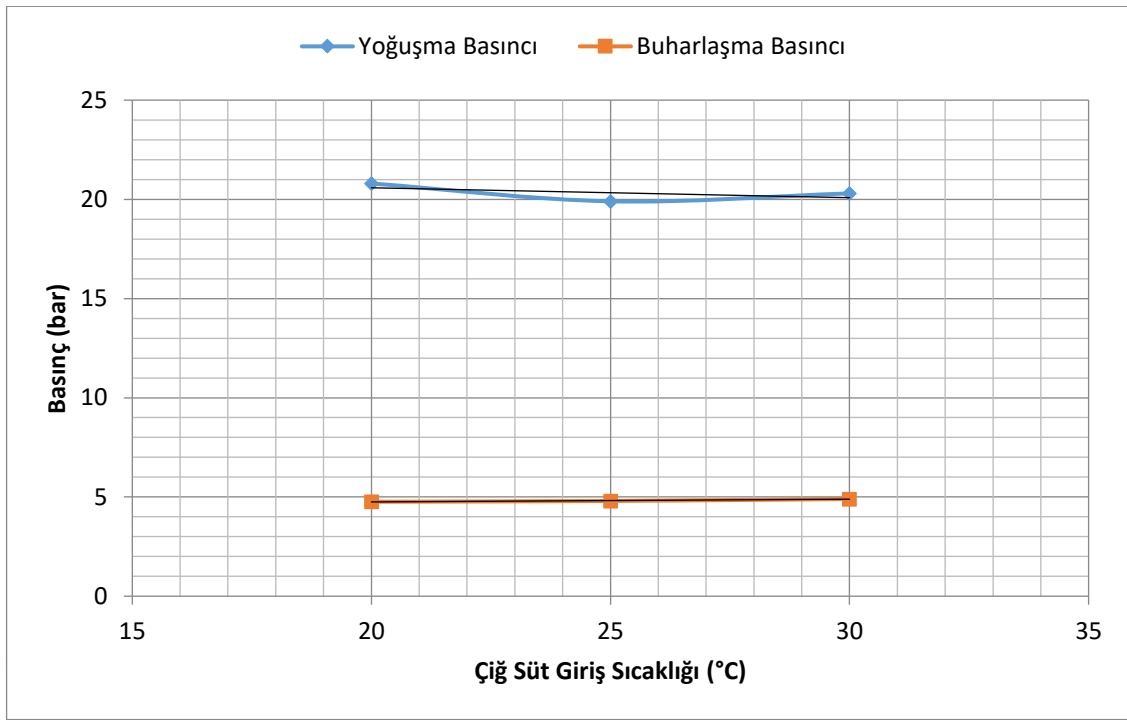
Şekil 81. 20 °C çiğ süt sıcaklığı parametresine göre yapılan deneyde, ölçülen ısı pompası gaz devresi basınç değerleri-süre değişim grafiği.



Şekil 82. 25 °C çiğ süt sıcaklığı parametresine göre yapılan deneyde ölçülen ısı pompası gaz devresi basınç değerleri-süre değişim grafiği.

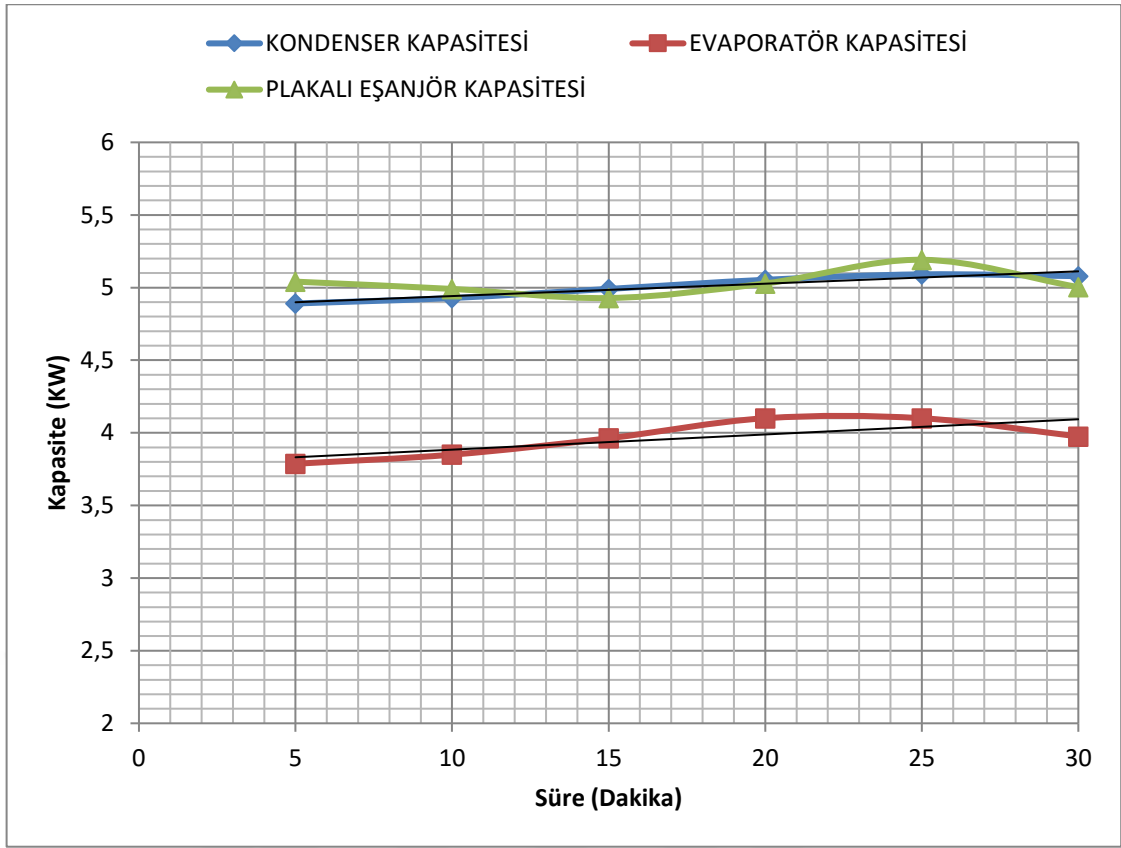


Şekil 83. 30 °C çiğ süt sıcaklığı parametresine göre yapılan deneyde, ölçülen ısı pompası gaz devresi basınç değerleri-süre değişim grafiği.

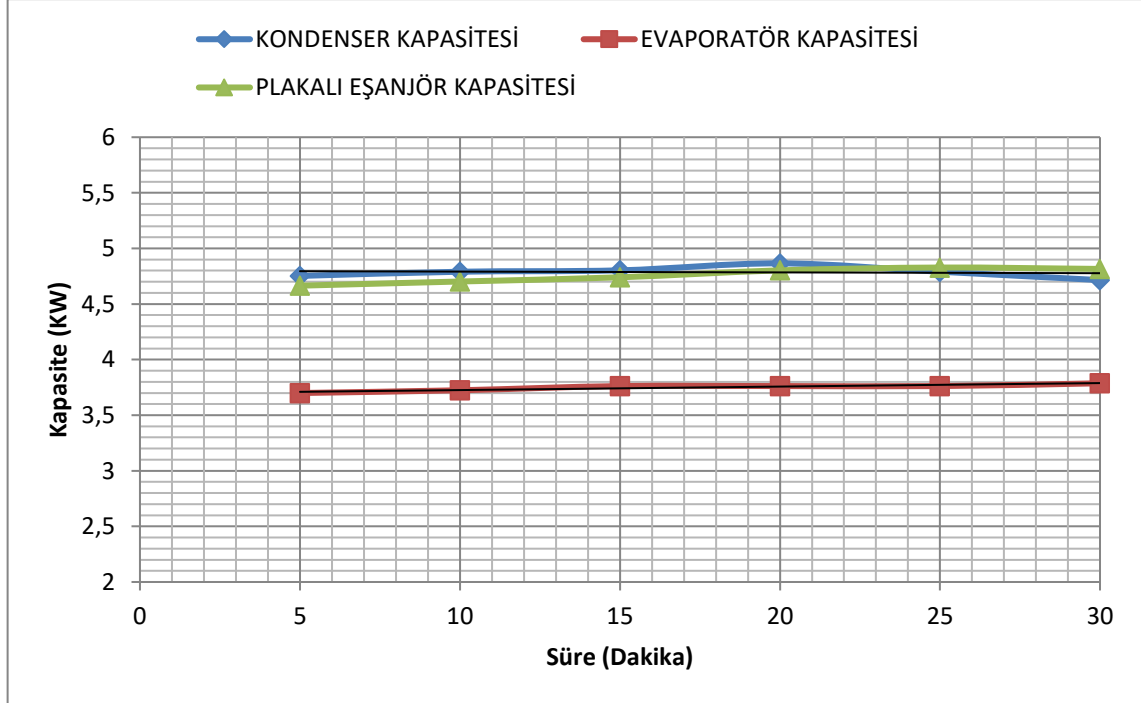


Şekil 84. 20 °C, 25 °C, 30 °C çiğ süt sıcaklığı parametrelerine göre yapılan deneylerde, ölçülen ısı pompası gaz devresi basınç değerleri değişim grafiği.

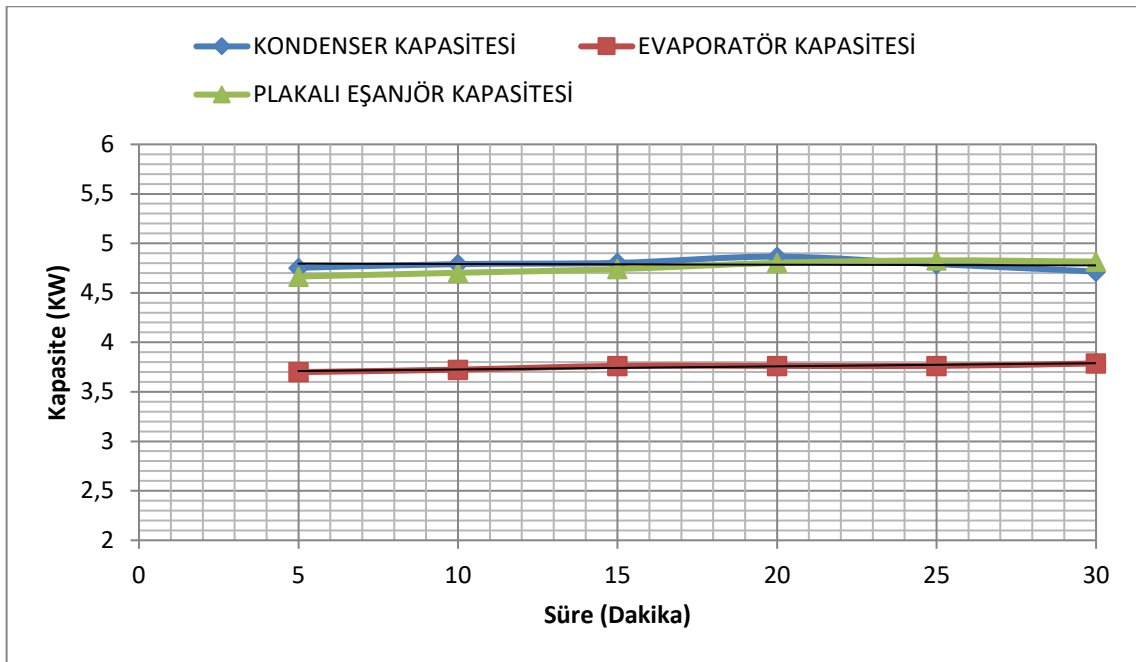
Şekil 81, Şekil 82, Şekil 83'te 20 °C, 25 °C ve 30 °C çiğ süt sıcaklıkları ve 120 l/h sabit süt debisi için, ısı pompası R134-a soğutucu akışkan yoğuşma ve buharlaşma basıncı değerlerinin sürekli rejim durumunda zamanla değişimi gösterilmiştir. Basınç değerlerinin istenilen değerlerde sabit kalması, zamanla değişmemesi istenen bir durumdur (Özyurt 2002). Şekil 84'de görüldüğü gibi sabit debi şartları altında, farklı çiğ süt giriş sıcaklıkları için yoğuşma ve buharlaşma basınç değerlerinde önemli derecede bir değişiklik olmamıştır. Eşit çiğ süt debi parametresi altında, basınç değerlerinin çiğ süt başlangıç giriş sıcaklıklarına göre değişim göstermemesine neden olarak kompresör işinin değişmemesi gösterilebilir.



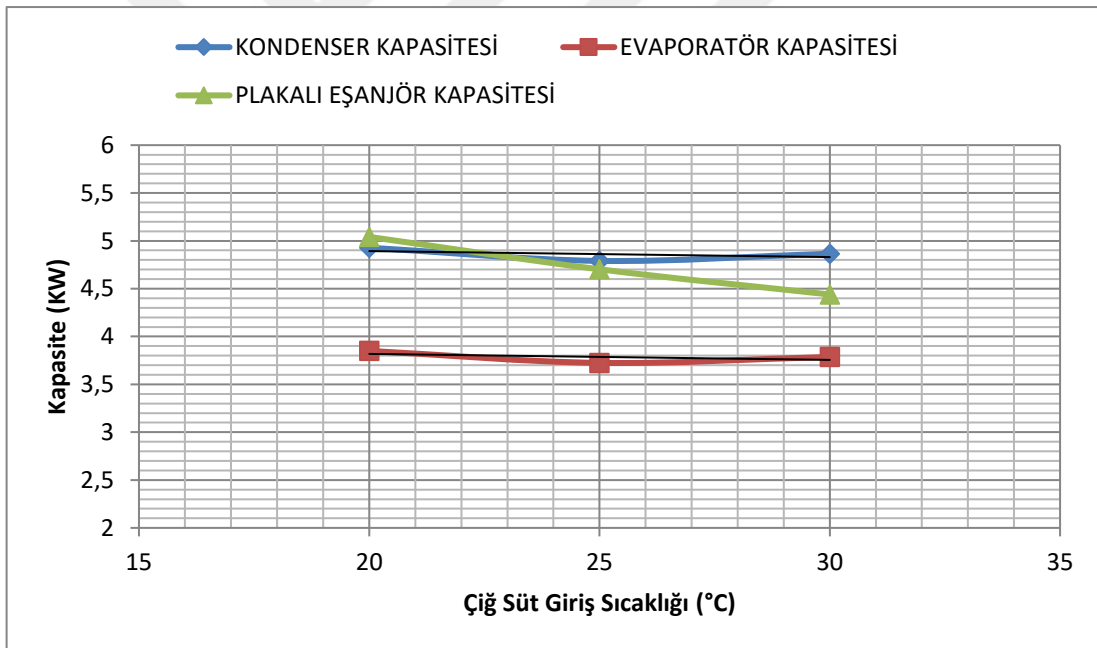
Şekil 85. 20 °C çiğ süt sıcaklığı parametresine göre yapılan deneyde, hesaplanan kondenser, evaporatör ve plakalı eşanjörde sağlanan enerji miktarları-süre değişim grafiği.



Şekil 86. 25 °C çiğ süt sıcaklığı parametresine göre yapılan deneyde, hesaplanan kondenser, evaporatör ve plakalı eşanjörde sağlanan enerji miktarları-süre değişim grafiği.



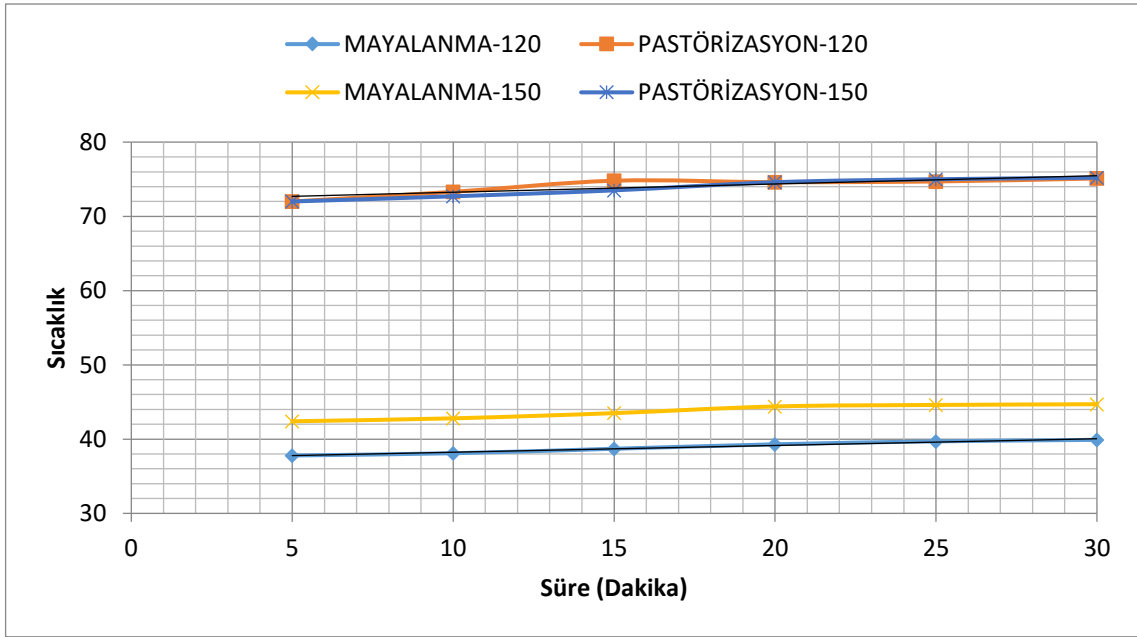
Şekil 87. 30 °C çiğ süt sıcaklığı parametresine göre yapılan deneyde, hesaplanan kondenser, evaporatör ve plakalı eşanjörde sağlanan enerji miktarları-süre değişim grafiği.



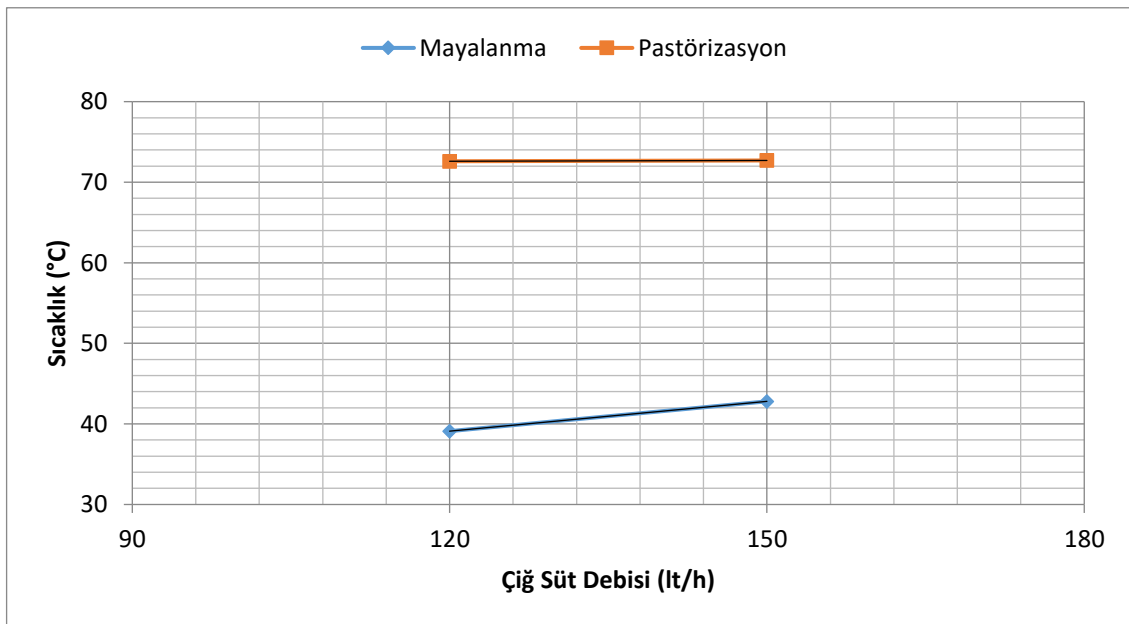
Şekil 88. 20 °C, 25 °C, 30 °C çiğ süt sıcaklığı parametrelerine göre yapılan deneylerde, hesaplanan kondenser, evaporatör ve plakalı eşanjörde sağlanan enerji miktarları değişim grafiği.

Şekil 85, Şekil 86, Şekil 87’de 120 l/h sabit süt debisi, 20 °C, 25 °C ve 30 °C çiğ süt giriş sıcaklık parametrelerine göre yapılan deneylerde ısı pompası elemanları kondenser, evaporatör ve plakalı eşanjörde sağlanan enerji miktarlarının sürekli rejim durumunda zamanla değişimi gösterilmiştir. Şekillerde de görüleceği üzere sistem elemanlarında sağlanan enerji miktarları kararlı hal durumunda zamanla değişim göstermemiştir. Kapasite değerlerinin sabit kalması, zamanla değişmemesi istenen bir durumdur (Özyurt 2002). Şekil

88’de görüldüğü gibi sabit debi şartları altında, artan çiğ süt sıcaklıklarına bağlı olarak, kondenser ve evaporatörde sağlanan enerji miktarlarında değişme olmadığı, plakalı eşanjörde sağlanan enerjide ise azalma meydana gelmiştir. Plakalı eşanjörde sağlanan enerji miktarındaki azalışa nedeni, Şekil 36’da gösterilen sistemin akış şemasından görüldüğü gibi pastörize edilen sütün plakalı eşanjörün üçüncü bölmesinde daha yüksek sıcaklıktaki çiğ süt ile, dördüncü bölmesinde ise daha yüksek sıcaklıktaki evaporatör çıkış suyu ile çarpıştırılması, sütün soğuması için yapılan ön soğutma işleminde sıcaklık farkının azalması nedeniyle eşanjörde transfer edilen ısı miktarının düşmesidir.

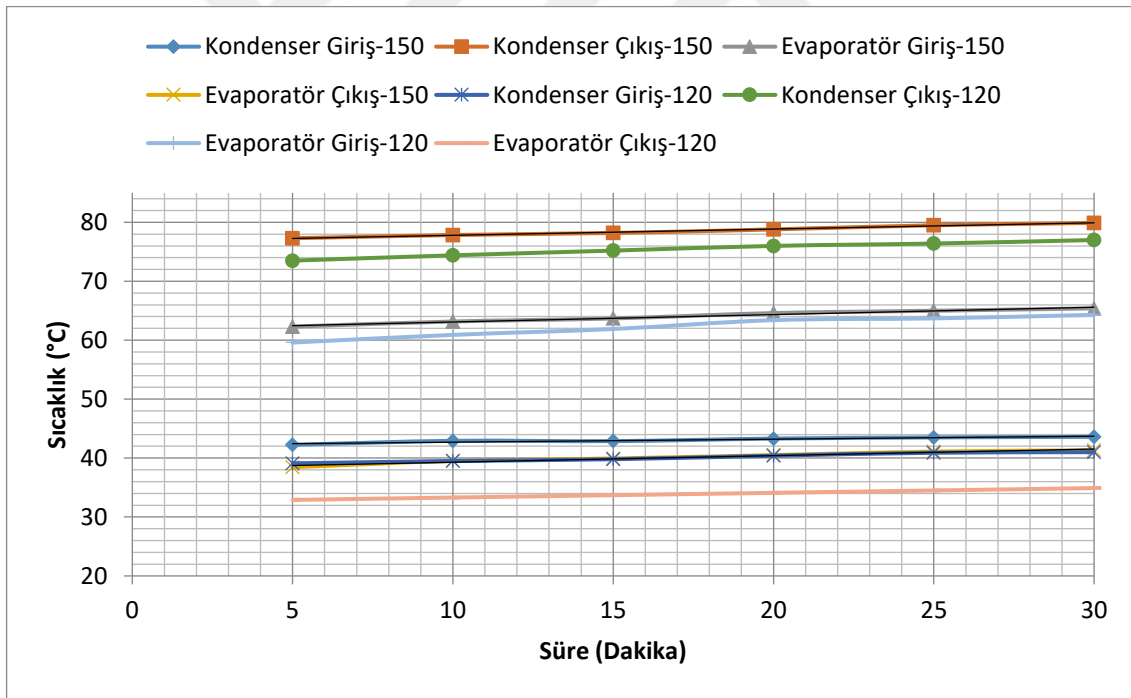


Şekil 89. 20 °C çiğ süt sıcaklığı, 120-150 lt/h süt debileri parametrelerine göre PV/T destekli yapılan deneylerde, ölçülen mayalanma ve pastörizasyon sıcaklıkları-süre değişim grafiği.

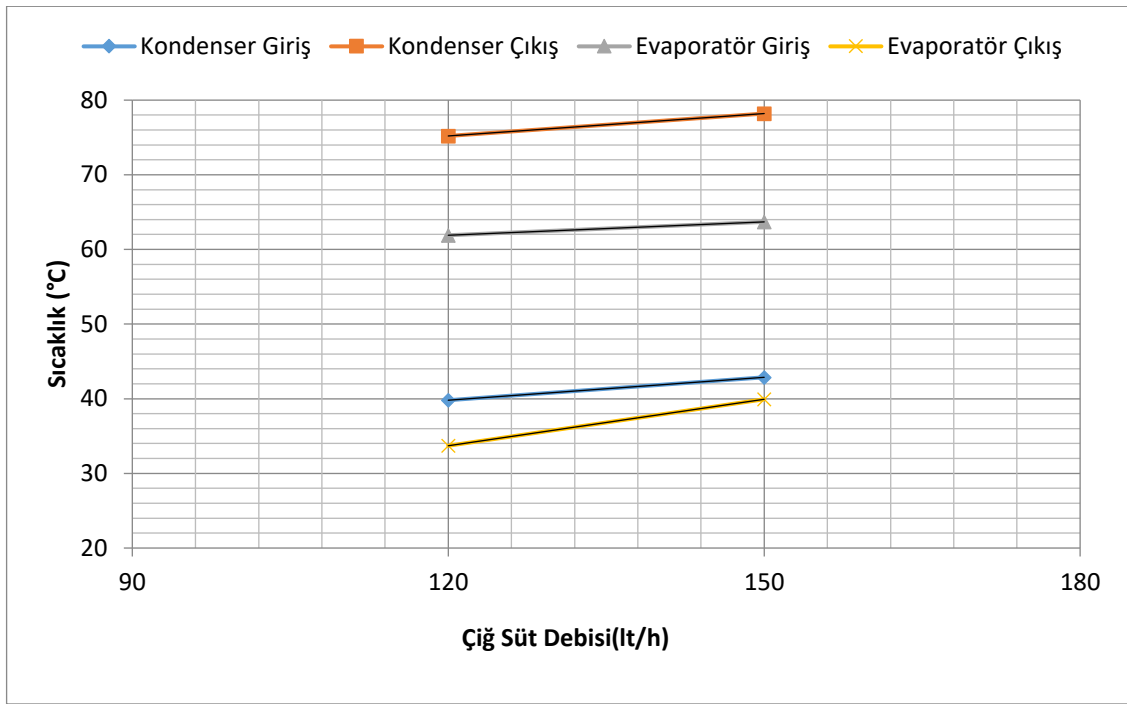


Şekil 90. 20 °C çiğ süt sıcaklığı, 120-150 lt/h süt debileri parametrelerine göre PV/T destekli yapılan deneylerde, ölçülen mayalanma ve pastörizasyon sıcaklıklarının değişim grafiği.

Şekil 89’da 20 °C çiğ süt sıcaklığı ve 120 lt/h-150 lt/h sabit süt debi parametrelerine göre sütün, ısı pompası kondenser çıkış suyu ile ısıtılan plakalı eşanjör birinci bölmesinden çıkış sıcaklığı olan pastörize sıcaklık değeri ve pastörize sütün ısı pompası evaporatör çıkış suyu ile soğutulan plakalı eşanjör dördüncü bölmesinden çıkış sıcaklığı olan mayalanma sıcaklık değerlerinin sürekli rejim durumunda zamanla değişimi gösterilmiştir. Sıcaklık değerlerinin istenilen değerlerde sabit kalması, zamanla değişmemesi istenen bir durumdur (Özyurt 2002). Şekil 90’da ise pastörize sıcaklık, rejenerasyon çıkış sıcaklık, mayalanma sıcaklık değerlerinin 120 lt/h ve 150 lt/h için karşılaştırılması verilmiştir. Şekillerden de görüleceği gibi eşit çiğ süt giriş sıcaklığı için pastörize edilen sütün debisinin 120 lt/h’ten 150 lt/h’e çıkarılması ile pastörizasyon sıcaklığı değişmezken, ürün işleme sıcaklığı olan mayalanma sıcaklığı ise artan süt debisi ile birlikte artış göstermiştir. Mayalanma sıcaklığının, eşit çiğ süt giriş başlangıç sıcaklık değeri ve artan süt debi parametresine göre artış göstermesinin nedeni, sütün plakalı eşanjörün üçüncü bölümünde ve dördüncü bölümünde, sütün soğuması için yapılan ön soğutma işleminde debi artışına bağlı olarak sıcaklık farkının azalmasıdır.

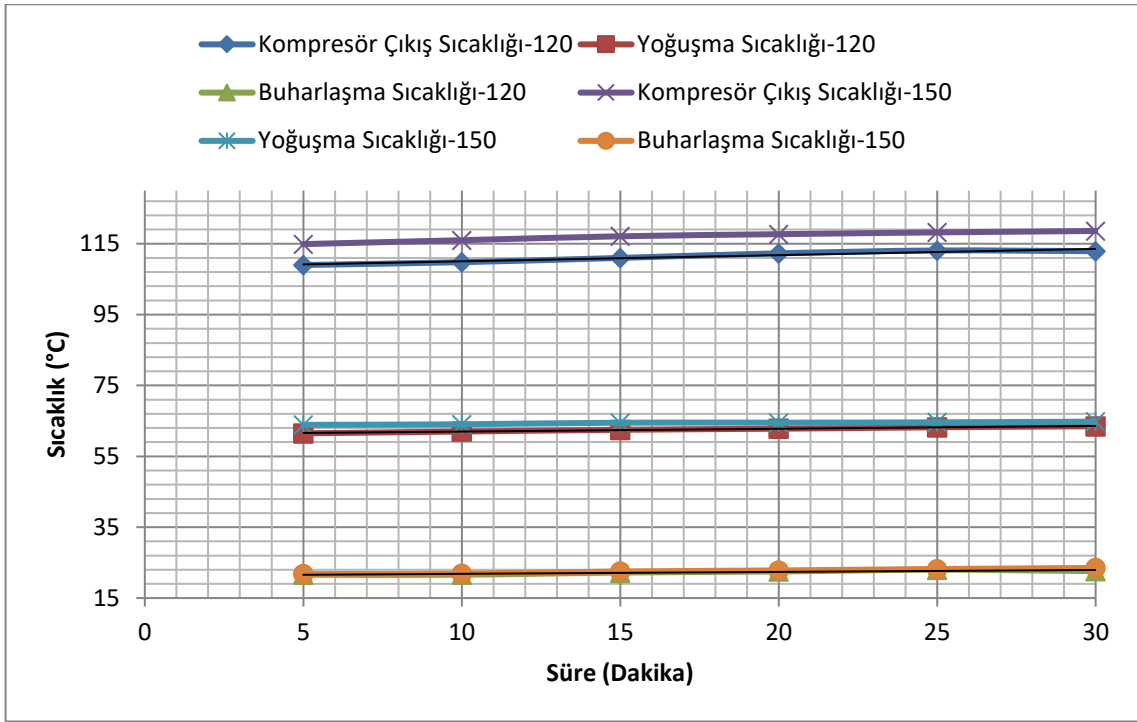


Şekil 91. 20 °C çiğ süt sıcaklığı, 120-150 lt/h süt debileri parametrelerine göre PV/T destekli yapılan deneylerde, ölçülen ısı pompası su devresi sıcaklıkları-süre değişim grafiği.

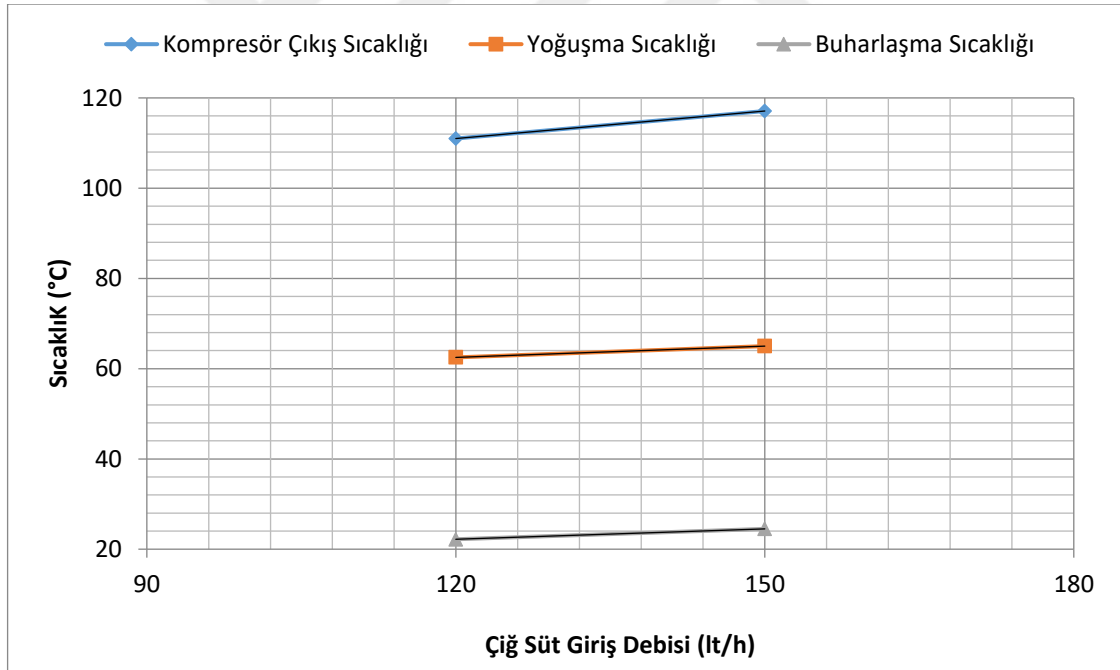


Şekil 92. 20 °C çiğ süt sıcaklığı, 120-150 lt/h süt debileri parametrelerine göre PV/T destekli yapılan deneylerde, ölçülen ısı pompası su devresi sıcaklıklarının değişim grafiği.

Şekil 91’de 20 °C çiğ süt sıcaklığı ve 120 lt/h-150 lt/h sabit süt debisi parametrelerine göre, ısı pompası kondenser giriş-çıkış suyu sıcaklık değerleri ve evaporatör giriş-çıkış suyu sıcaklık değerlerinin sürekli rejim durumunda zamanla değişimi gösterilmiştir. Sıcaklık değerlerinin istenilen değerlerde sabit kalması, zamanla değişmemesi istenen bir durumdur (Özyurt 2002). Şekil 92’de ise 20°C çiğ süt sıcaklığı ve 120 lt/h ve 150 lt/h sabit süt debileri için, ısı pompası kondenser giriş-çıkış suyu sıcaklık değerleri ve evaporatör giriş-çıkış suyu sıcaklık değerlerinin karşılaştırılması verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi aynı çiğ süt giriş başlangıç sıcaklığı parametresine göre, artan çiğ süt debisine bağlı olarak kondenser giriş-çıkış suyu ve evaporatör giriş-çıkış suyu sıcaklıklarında artışın olduğu gözlemlenmiştir. Isı pompası kondenser giriş-çıkış suyu sıcaklık değerleri ve evaporatör giriş-çıkış suyu değerlerinin artış göstermesinin nedeni, Şekil 36’da gösterilen sistemin akış şemasından görüldüğü gibi süte ön soğutma yapılan plakalı eşanjörün üçüncü bölmesi çıkış süt sıcaklığının, artan süt debisine bağlı olarak daha yüksek sıcaklıkta çıkması, ısı pompası su devresinin plakalı eşanjör dördüncü bölmesinde daha yüksek sıcaklıktaki süt ile karşılaştırılmasıdır.



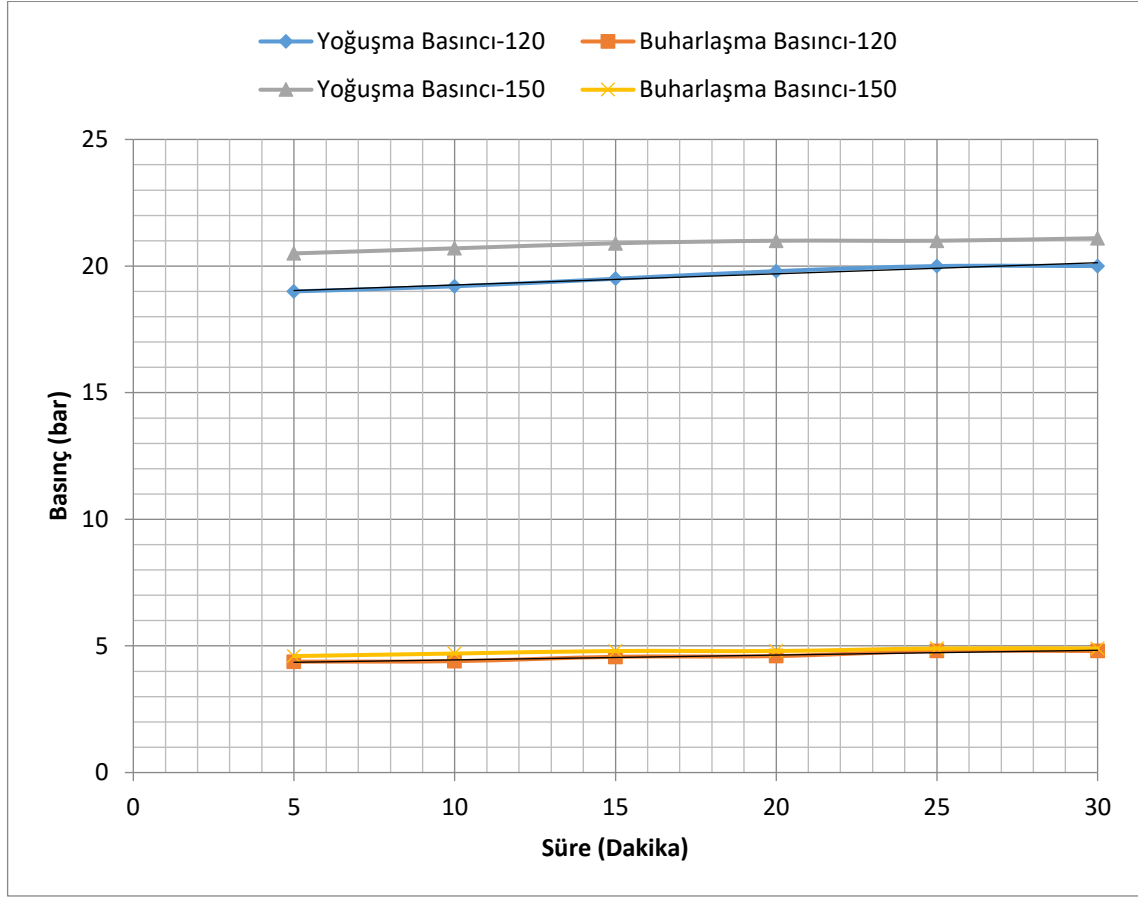
Şekil 93. 20 °C çiğ süt sıcaklığı, 120-150 lt/h süt debileri parametrelerine göre PV/T destekli yapılan deneylerde, ölçülen ısı pompası gaz devresi sıcaklıkları-süre değişim grafiği.



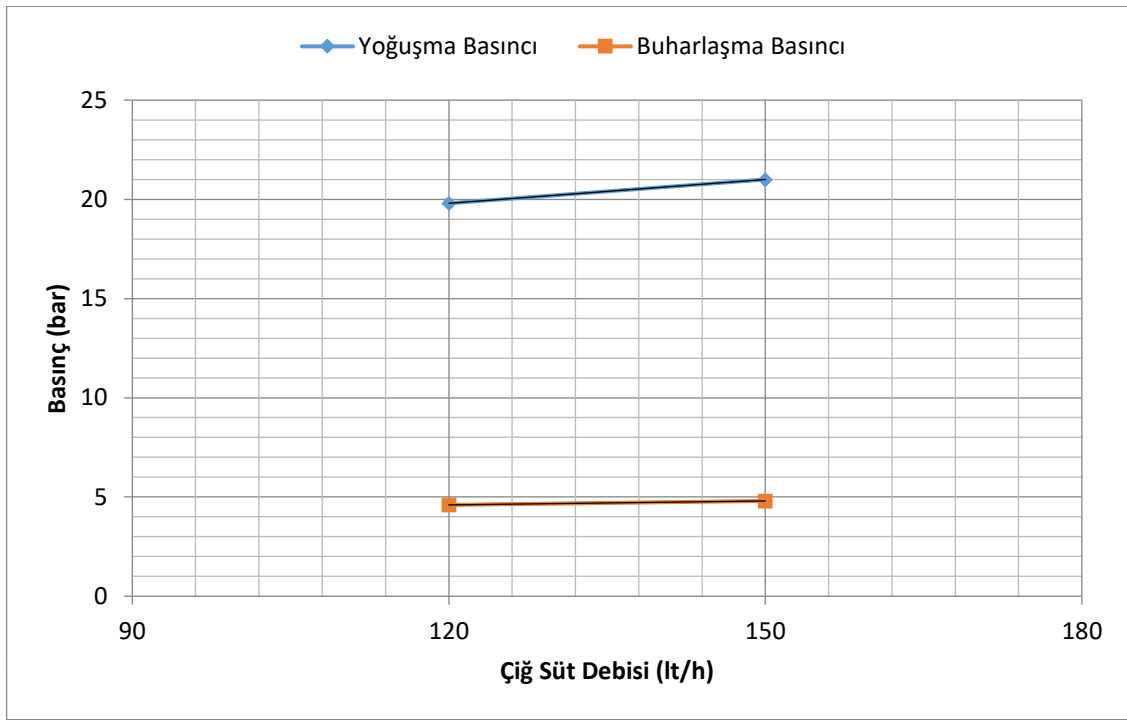
Şekil 94. 20 °C çiğ süt sıcaklığı, 120-150 lt/h süt debileri parametrelerine göre PV/T destekli yapılan deneylerde, ölçülen ısı pompası gaz devresi sıcaklıklarının değişim grafiği.

Şekil 93’de 20 °C çiğ süt sıcaklığı ve 120 lt/h-150 lt/h sabit süt debisi parametrelerine göre, ısı pompası R134-a soğutucu akışkan kompresör çıkış sıcaklık değerleri, yoğuşma sıcaklık değerleri ve buharlaştırma sıcaklık değerlerinin sürekli rejim durumunda zamanla değişimi gösterilmiştir. R134-a soğutucu akışkan sıcaklık değerlerinin istenilen değerlerde sabit kalması, zamanla değişmemesi istenen bir durumdur (Özyurt 2002). Şekil 94’de görüldüğü gibi aynı çiğ süt giriş başlangıç sıcaklığı parametresine göre, artan çiğ süt

sıcaklıklarına bağlı olarak, kompresör çıkış sıcaklığı, yoğuşma sıcaklığı, buharlaşma sıcaklık değerlerinde artışın olduğu gözlemlenmiştir. Kompresör çıkış sıcaklığı, yoğuşma sıcaklığı, buharlaşma sıcaklık değerlerinin artış göstermesinin nedeni, Şekil 36’da gösterilen sistemin akış şemasından görüldüğü gibi ısı pompası su devresi evaporatör ve kondenser giriş sıcaklıklarının artan başlangıç süt giriş sıcaklığı ile daha yüksek oluşudur.

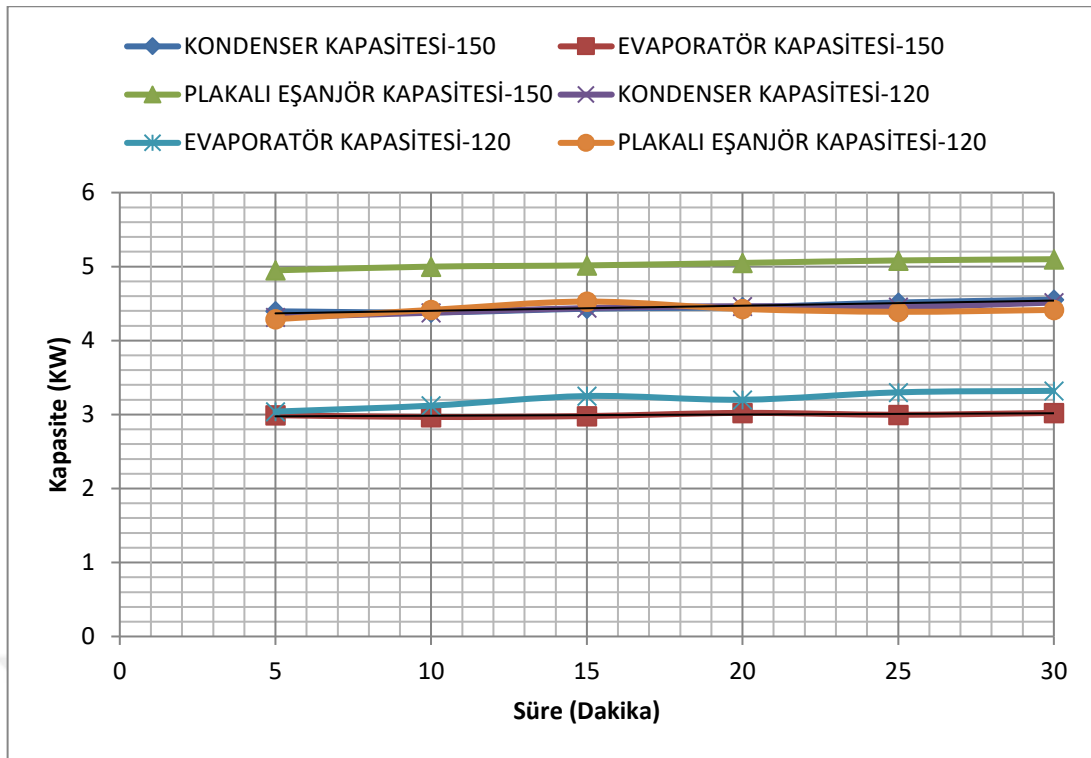


Şekil 95. 20 °C çiğ süt sıcaklığı 120-150 lt/h süt debileri parametrelerine göre PV/T destekli yapılan deneylerde, ölçülen ısı pompası gaz devresi basınç değerleri-süre değişim grafiği.

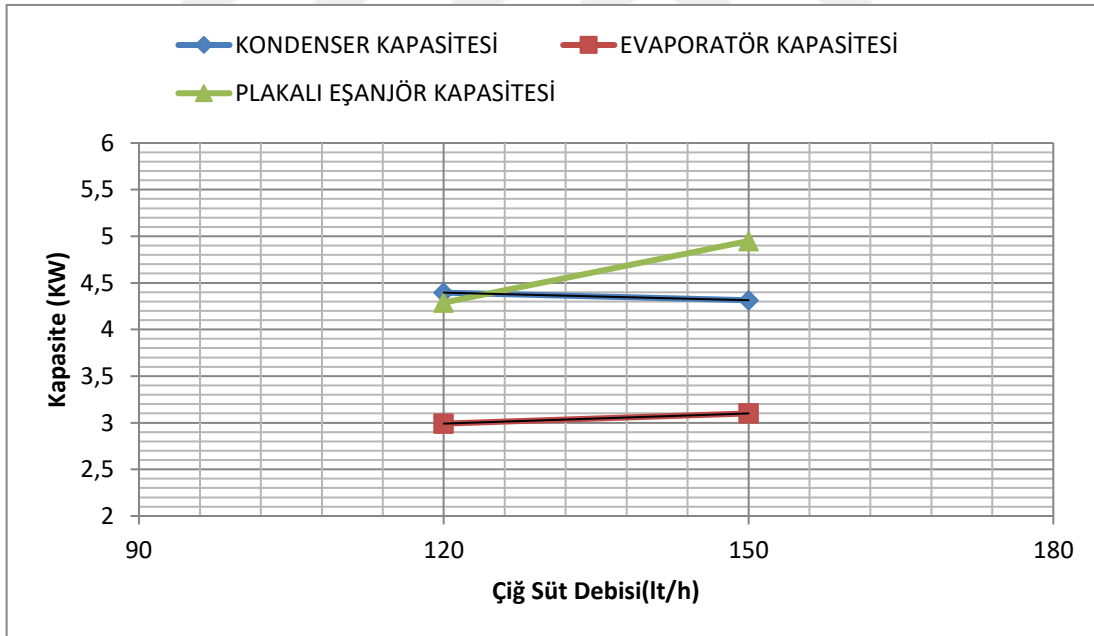


Şekil 96. 20 °C çiğ süt sıcaklığı 120-150 lt/h süt debileri parametrelerine göre PV/T destekli yapılan deneylerde, ölçülen ısı pompası gaz devresi basınç değerlerinin değişim grafiği.

Şekil 95’de 20 °C çiğ süt sıcaklığı ve 150 lt/h sabit süt debisi için, ısı pompası R134-a soğutucu akışkan yoğuşma ve buharlaşma basıncı değerlerinin, Şekil 96’de ise ısı pompası R134-a soğutucu akışkan yoğuşma ve buharlaşma basıncı değerlerinin 120-150 lt/h sabit süt debileri için PV/T destekli olarak yapılan deneylerde sürekli rejim durumunda zamanla değişimi gösterilmiştir. Şekillerde görüldüğü gibi eşit çiğ süt giriş sıcaklıkları için artan süt debisi ile birlikte yoğuşma ve buharlaşma basınç değerlerinde de önemli derecede bir değişiklik olmamıştır. Her iki durumda da yoğuşma ve buharlaşma basınçları sürekli rejimde zamanla önemli değişiklik göstermemiştir.



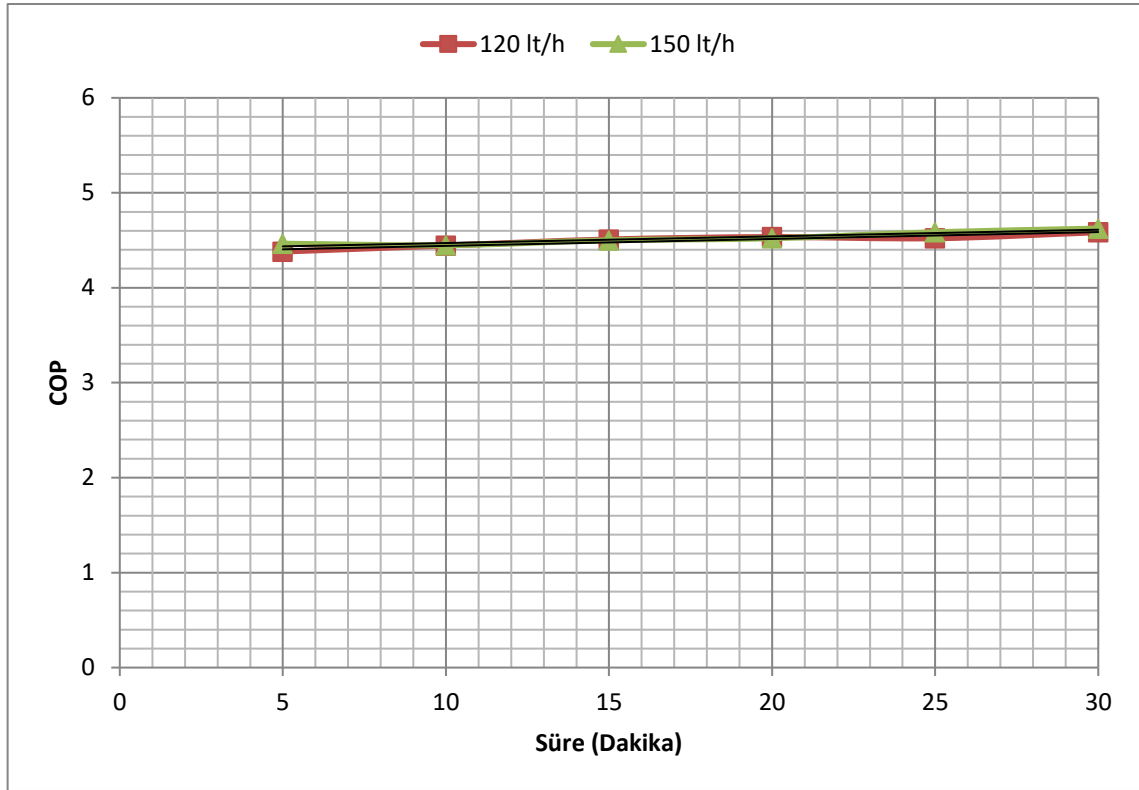
Şekil 97. 20 °C çiğ süt sıcaklığı, 150 lt/h süt debisi parametrelerine göre yapılan deneyde, hesaplanan kondenser, evaporatör ve plakalı eşanjörde sağlanan enerji miktarları-süre değişim grafiği.



Şekil 98. 20 °C çiğ süt sıcaklığı, 120-150 lt/h süt debileri parametrelerine göre yapılan deneylerde, hesaplanan kondenser, evaporatör ve plakalı eşanjörde sağlanan enerji miktarlarının değişim grafiği.

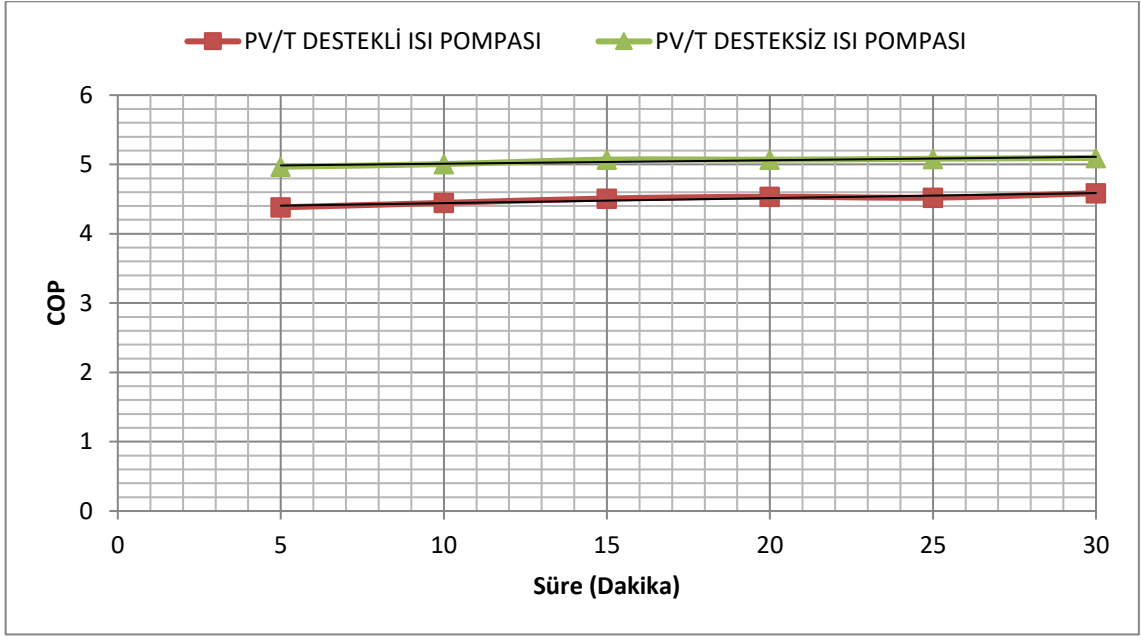
Şekil 97’de 20 °C çiğ süt sıcaklığı, 150 lt/h süt debisi için PV/T destekli yapılan deneyde hesaplanan kondenser, evaporatör ve plakalı eşanjörde sağlanan enerji miktarlarının zamanla değişim grafiği gösterilmiştir. Şekil 98’de ise 20 °C çiğ süt sıcaklığı, 120 lt/h süt debisi parametrelerine göre PV/T destekli yapılan deneyde, elde edilen verilerle hesaplanan

kondenser, evaporatör ve plakalı eşanjörde sağlanan enerji miktarlarının, eşit çiğ süt giriş sıcaklığı ve 150 lt/h debi için yapılan deneyde hesaplanan enerji miktarlarının kararlı hal durumunda zamanla değişimi ile karşılaştırılması gösterilmiştir. Şekillerde görüldüğü gibi eşit süt giriş sıcaklığı, artan çiğ süt debisine bağlı olarak ısı pompası kondenserinde ve evaporatörde sağlanan enerjide çok fazla değişim olmamasına rağmen, plakalı eşanjörde sağlanan enerjide artış söz konusu olmuştur. Kondenser, evaporatör ve plakalı eşanjörde sağlanan enerji miktarlarının her iki süt debisi ve kararlı hal durumu için hemen hemen sabit kaldığı, zamanla çok fazla değişim göstermediği gözlemlenmiştir (Özyurt 2002).



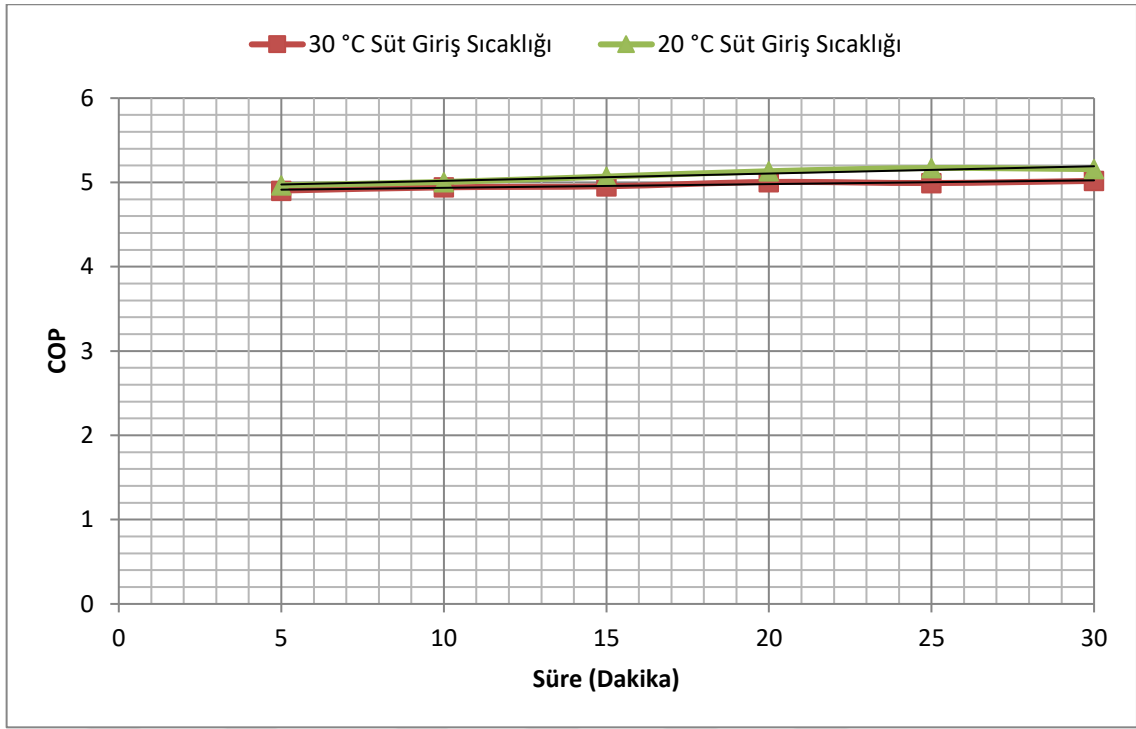
Şekil 99. 20 °C çiğ süt giriş sıcaklığı, 120 lt/h-150 lt/h süt debisi parametrelerine göre yapılan deneylerde, hesaplanan PV/T destekli ısı pompası ısıtma tesir (performans) katsayısı değerleri-süre değişim grafiği.

Şekil 99’da 20 °C çiğ süt giriş sıcaklığı, 120 lt/h-150 lt/h süt debisi parametrelerine göre yapılan deneylerde, hesaplanan PV/T destekli ısı pompası ısıtma tesir (performans) katsayısı değerinin kararlı hal durumunda zamanla değişimi gösterilmiştir. Şekilde görüleceği üzere aynı çiğ süt giriş sıcaklığı için, 120 lt/h ve 150 lt/h süt debisi parametrelerine göre ısı pompası performans katsayısının değişmediği belirlenmiştir. Isı pompası performans katsayısının süt debisinin artması ile aynı kalmasının nedeni ısı pompası kondenserinde suya aktarılan ısı miktarının değişmemesidir.



Şekil 100. 120 lt/h süt debisi, 20 °C çiğ süt giriş sıcaklığı parametrelerine göre PV/T destekli-PV/T desteksiz yapılan deneylerde, hesaplanan ısı pompası ısıtma tesir (performans) katsayısı değerleri-süre değişim grafiği.

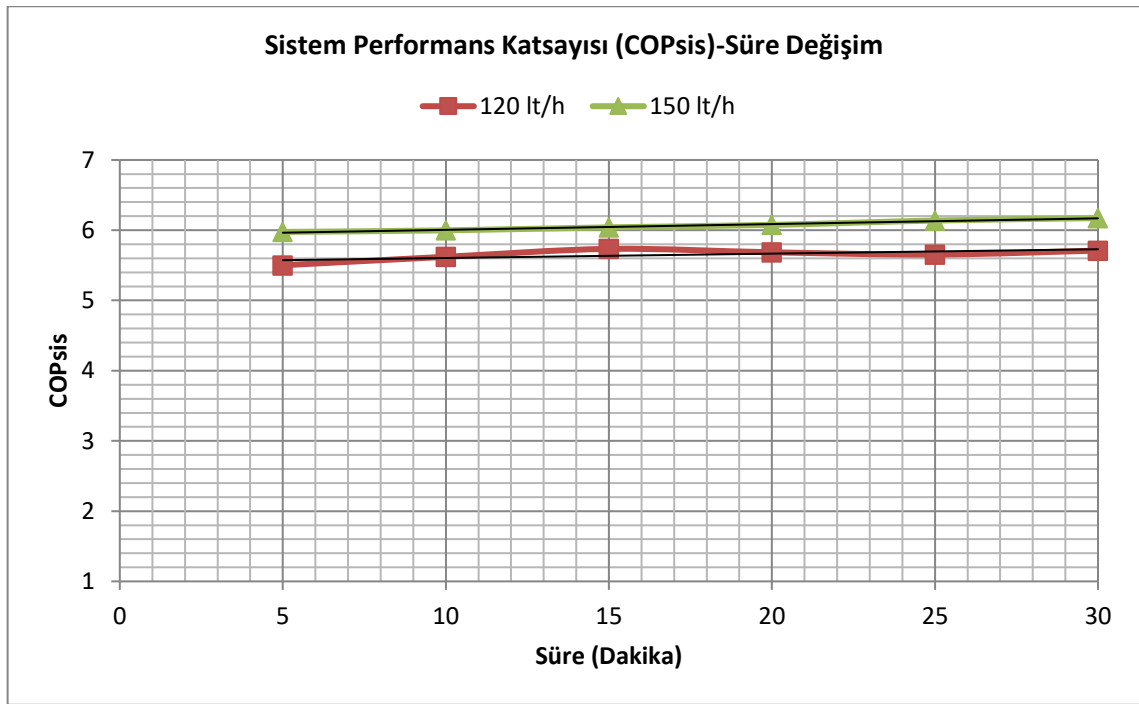
Şekil 100’de 120 lt/h süt debisi, 20 °C çiğ süt giriş sıcaklığı parametrelerine göre PV/T destekli-PV/T desteksiz yapılan deneylerde, hesaplanan ısı pompası ısıtma tesir (performans) katsayısı değerinin karalı hal durumunda zamanla değişimi gösterilmiştir. Şekilde görüleceği üzere aynı çiğ süt giriş sıcaklığı ve debisi parametrelerine göre, PV/T desteksiz ısı pompası performans katsayısının, PV/T destekli ısı pompası performans katsayı değerlerinden daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Yapılan hesaplamalarda, PV/T destekli ısı pompası kondenserinden aktarılan ısı miktarının, PV/T desteksiz sisteme göre daha düşük olduğu belirlenmiştir.



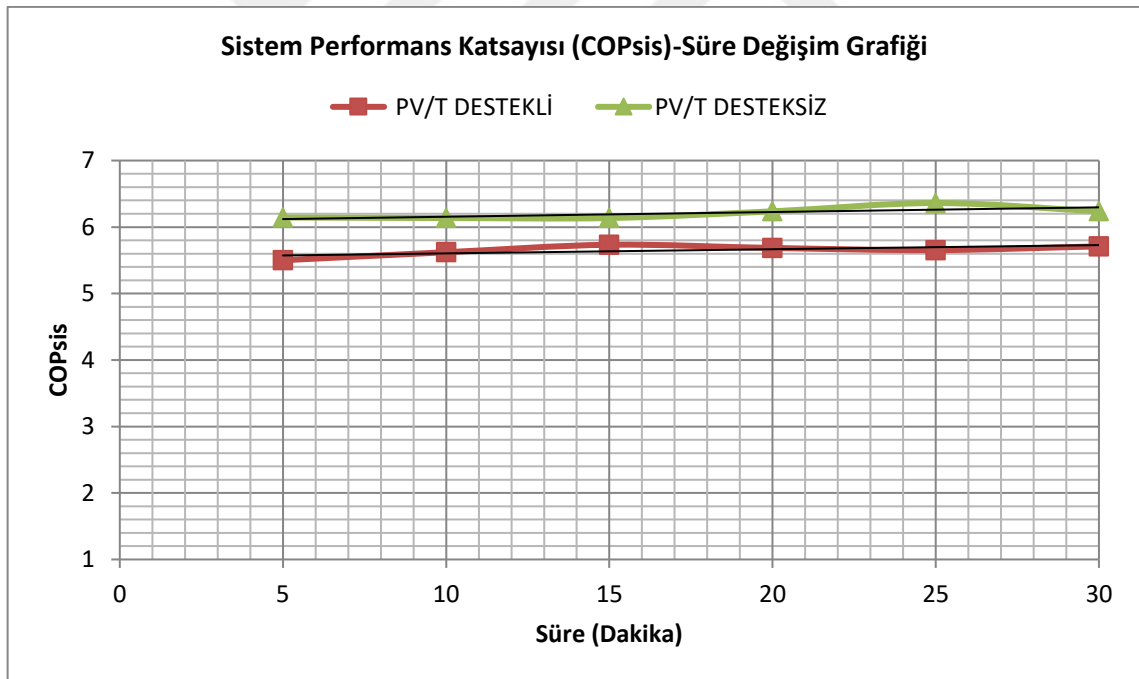
Şekil 101. 120 lt/h süt debisi, 20 °C ve 30 °C çiğ süt giriş sıcaklıkları parametrelerine göre yapılan deneylerde, hesaplanan ısı pompası ısıtma tesir (performans) katsayısı değerleri-süre değişim grafiği.

Şekil 101’de 120 lt/h süt debisi, 20 °C ve 30 °C çiğ süt giriş sıcaklıkları parametrelerine göre yapılan deneylerde, hesaplanan ısı pompası ısıtma tesir (performans) katsayısı değerinin karalı hal durumunda zamanla değişimi gösterilmiştir. Şekilde görüleceği üzere aynı süt debisi için, artan çiğ süt sıcaklığı ile ısı pompası performans katsayısının hemen hemen aynı kaldığı belirlenmiştir. Performans katsayısının değişmemesine neden olarak kondenserde aktarılan ısı miktarının her iki çiğ süt başlangıç sıcaklık değeri için birbirine yakın olmasıdır.

Şekil 102’de 20 °C çiğ süt giriş sıcaklığı, 120 lt/h-150 lt/h süt debisi parametrelerine göre yapılan deneylerde, sistem performans katsayısı değerinin karalı hal durumunda zamanla değişimi gösterilmiştir. Şekilde görüleceği üzere aynı çiğ süt giriş sıcaklığı için, artan süt debisi ile birlikte sistem performans katsayısının da arttığı belirlenmiştir. Performans katsayısındaki artış, plakalı eşanjörde süte aktarılan ısı miktarındaki artıştan kaynaklanmaktadır.



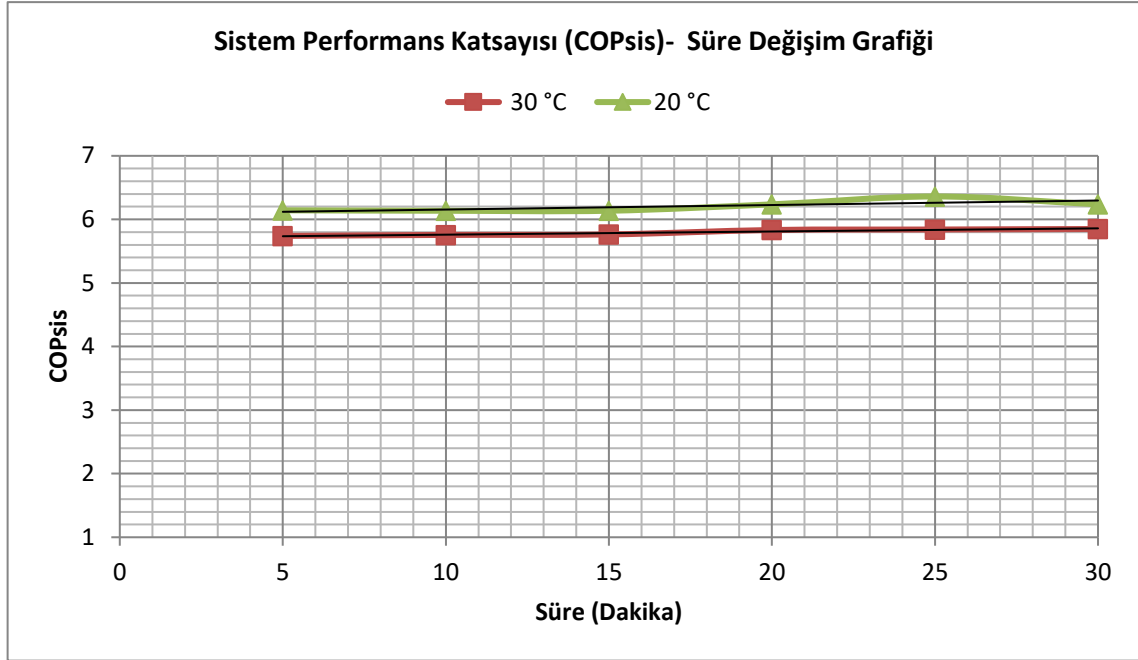
Şekil 102. 20 °C çiğ süt giriş sıcaklığı, 120 lt/h-150 lt/h süt debisi parametrelerine göre yapılan deneylerde, hesaplanan PV/T destekli ısı pompası sistem performans katsayısı değerleri-süre değişim grafiği.



Şekil 103. 120 lt/h süt debisi, 20 °C çiğ süt giriş sıcaklığı parametrelerine göre PV/T destekli-PV/T destekli olmayan yapılan deneylerde hesaplanan ısı pompası sistem performans katsayısı değerleri-süre değişim grafiği.

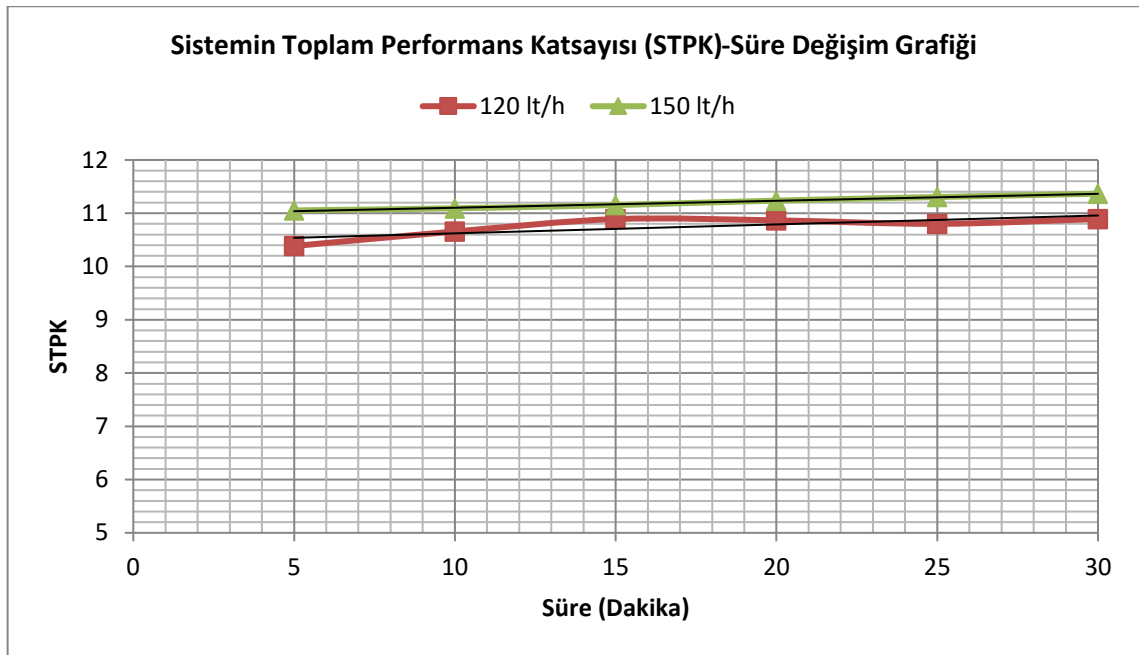
Şekil 103'de 120 lt/h süt debisi, 20 °C çiğ süt giriş sıcaklığı parametrelerine göre PV/T destekli-PV/T destekli olmayan yapılan deneylerde, hesaplanan ısı pompası sistem performans katsayısı değerinin karalı hal durumunda zamanla değişimi gösterilmiştir. Şekilde görüleceği üzere aynı çiğ süt giriş sıcaklığı ve debisi için, PV/T destekli sistem performans katsayısının,

PV/T destekli sistem performans katsayı değerlerinden daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Performans katsayılarında oluşan farklılık, PV/T destekli ısı pompası kondenserinde ve plakalı eşanjörde aktarılan ısı miktarının PV/T desteksiz sisteme göre daha az olması ile açıklanabilir.



Şekil 104. 120 lt/h süt debisi, 20 °C ve 30 °C çiğ süt giriş sıcaklıkları parametrelerine göre yapılan deneylerde, hesaplanan ısı pompası sistem performans katsayısı değerleri-süre değişim grafiği.

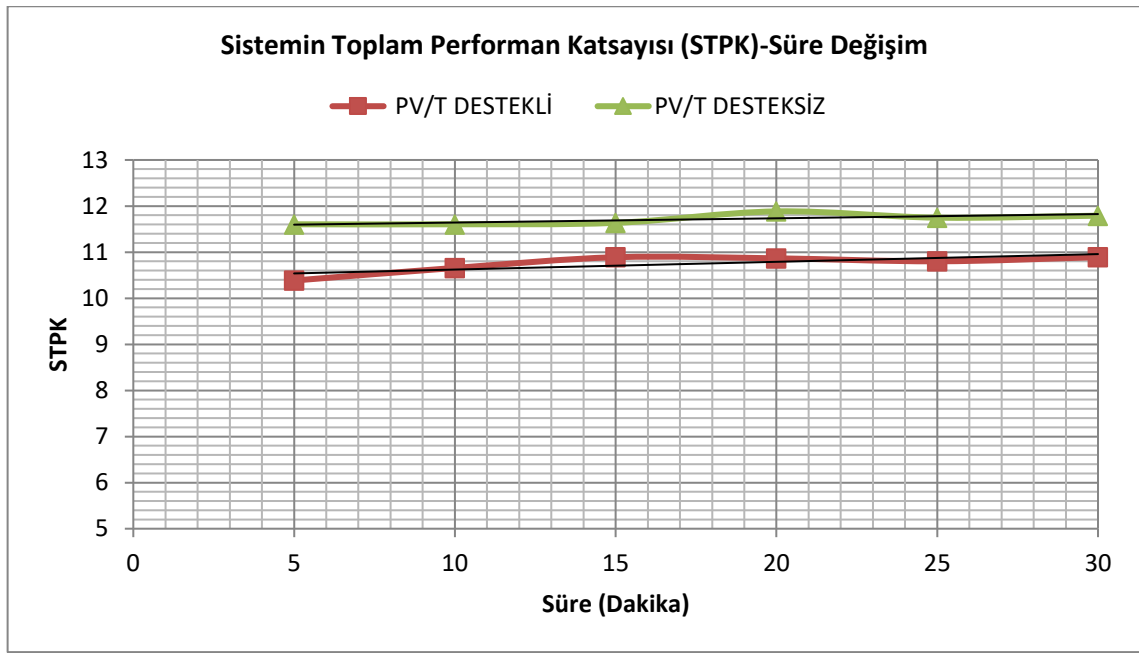
Şekil 104’de 120 lt/h süt debisi, 20 °C ve 30 °C çiğ süt giriş sıcaklıkları parametrelerine göre yapılan deneylerde, hesaplanan ısı pompası sistem performans katsayısı değerinin karalı hal durumunda zamanla değişimi gösterilmiştir. Şekilde görüleceği üzere aynı süt debisi için, artan çiğ süt sıcaklığı ile sistem performans katsayısının da çok fazla olmamakla birlikte bir miktar azaldığı belirlenmiştir. Sistem performans katsayısındaki düşüşe neden olarak plakalı eşanjörde aktarılan ısı miktarının azalması gösterilebilir.



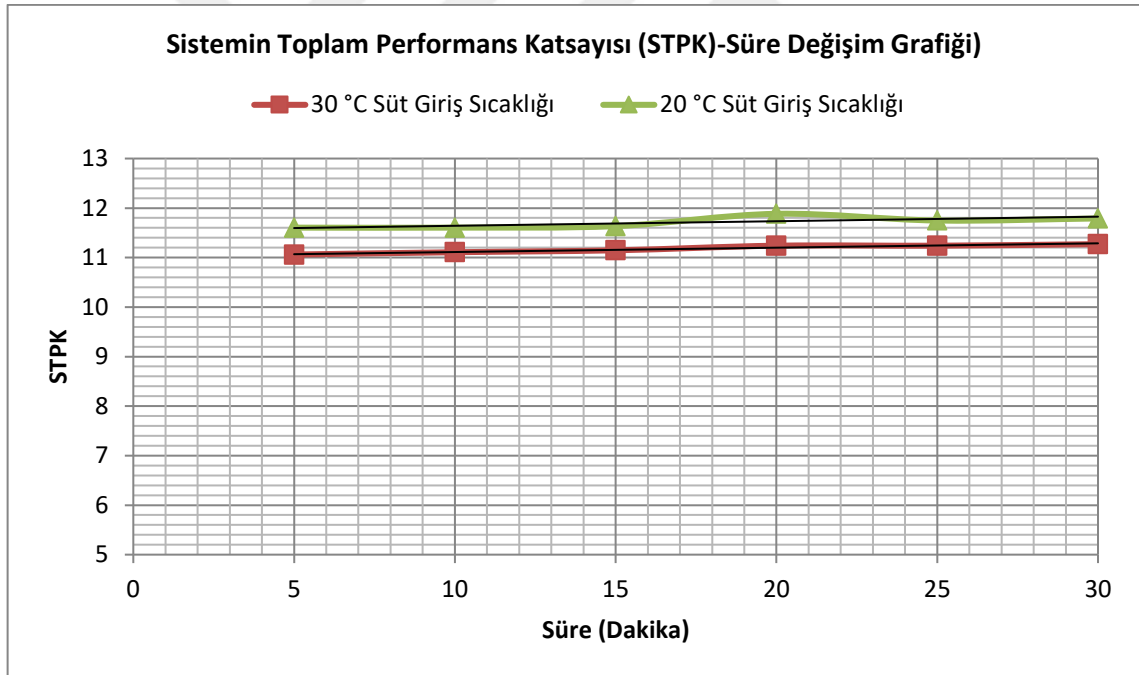
Şekil 105. 20 °C çiğ süt giriş sıcaklığı, 120 lt/h-150 lt/h süt debisi parametrelerine göre yapılan deneylerde, hesaplanan PV/T destekli sistem toplam performans katsayısı değerleri-süre değişim grafiği.

Şekil 105’da 20°C çiğ süt giriş sıcaklığı, 120 lt/h-150 lt/h süt debisi parametrelerine göre yapılan deneylerde, sistem toplam performans katsayısı değerinin karalı hal durumunda zamanla değişimi gösterilmiştir. Şekilde görüleceği üzere, aynı çiğ süt giriş sıcaklığı için, artan süt debisi ile birlikte sistem toplam performans katsayısının da arttığı belirlenmiştir. Sistem toplam performans katsayısındaki artış, plakalı eşanjörde süte aktarılan, süttten çekilen ısı miktarındaki artıştan kaynaklanmaktadır.

Şekil 106’da 120 lt/h süt debisi, 20 °C çiğ süt giriş sıcaklığı parametrelerine göre PV/T destekli-PV/T desteksiz yapılan deneylerde, hesaplanan ısı pompası sistem toplam performans katsayısı değerinin karalı hal durumunda zamanla değişimi gösterilmiştir. Şekilde görüleceği üzere aynı çiğ süt giriş sıcaklığı ve debisi için, PV/T desteksiz ısı pompası sistem toplam performans katsayısının, PV/T destekli ısı pompası sistem toplam performans katsayı değerlerinden daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Sistem toplam performans katsayılarında oluşan farklılık, PV/T destekli ısı pompası kondenseri ve evaporatöründe suya, plakalı eşanjörde ise süte aktarılan ve çekilen ısı miktarlarının, PV/T desteksiz sisteme göre daha az olması ile açıklanabilir.



Şekil 106. 120 lt/h süt debisi, 20 °C çiğ süt giriş sıcaklığı parametrelerine göre PV/T destekli-PV/T desteksiz yapılan deneylerde, hesaplanan sistem toplam performans katsayısı değerleri-süre değişim grafiği.



Şekil 107. 120 lt/h süt debisi, 20 °C ve 30 °C çiğ süt giriş sıcaklıkları parametrelerine göre yapılan deneylerde, hesaplanan sistem toplam performans katsayısı değerleri-süre değişim grafiği.

Şekil 107’de 120 lt/h süt debisi, 20 °C ve 30 °C çiğ süt giriş sıcaklıkları parametrelerine göre yapılan deneylerde, hesaplanan sistem toplam performans katsayısı değerlerinin karalı hal durumunda zamanla değişimi gösterilmiştir. Şekilde görüleceği üzere aynı süt debisi için, artan çiğ süt sıcaklığı ile sistem toplam performans katsayısının da çok fazla olmamakla birlikte bir miktar azaldığı belirlenmiştir. Sistem toplam performans

katsayındaki düşüşe neden olarak plakalı eşanjörde süte aktarılan ve sütten çekilen ısı miktarının azalması gösterilebilir.



Şekil 108. 1 kg sütün pastörizasyonu için harcanan enerji miktarlarının konvansiyonel sistemler ile karşılaştırması.

Şekil 108’de 1 kg sütün pastörizasyonu için harcanan enerji miktarlarının kullanılan sistemlere göre karşılaştırması görülmektedir. PV/T destekli ısı pompası sisteminin, Özyurt *et al.* (2004) tarafından yapılan çalışmada, kurulan çift cidarlı kazan sisteminden yaklaşık %73,3, plakalı pastörizer sisteminden %60,7, ısı pompası sisteminden ise %25,5 daha az enerji harcadığı şekilden görülmektedir. Bu sonuçlar kurulan PV/T destekli ısı pompası sisteminin, daha önce kurulan ısı pompası sisteminden, çift cidarlı kazan sisteminden, plakalı pastörizer sisteminden daha verimli olduğunu göstermektedir. Yapılan çalışmada, sütün pastörizasyonu için kurulan ısı pompası sisteminin, PV/T sistem ile desteklenmesinin kg süt başına harcanan enerji miktarında yaklaşık %8,8 düşüş sağladığı belirlenmiştir. PV/T destekli ısı pompası sisteminde pastörize edilen sütün debisindeki %25 artış, 1 kg süt için harcanan enerji miktarında harcanan enerjide %14,5 azalma sağlamıştır.

SONUÇ ve ÖNERİLER

Sonuçlar

Peynire işlenecek sütü pastörize etmek amacıyla kurulan PV/T destekli ısı pompası sisteminde çeşitli deneysel ve enerji analizleri yapılmış, elde edilen sonuçlar sunulmuştur. Deneylerde PV/T desteğinin, farklı süt giriş sıcaklığı ve debi parametrelerinin sistem üzerine etkileri incelenmiştir. Farklı ısıtım değerleri ve panel soğutma suyu debi parametrelerine göre PV/T sistem analizleri yapılmıştır. Kurulan hibrit fotovoltaiik-termal ısı pompası sistemi daha önce çalışılmış ısı pompası sistemleri ve klasik yöntemlerle karşılaştırılmıştır.

Bu çalışmada çeşitli deneysel araştırmalardan elde edilen bazı önemli bulgular maddeler halinde sıralanmış ve özetlenmiştir:

- 1- PV/T destekli ısı pompası sisteminin daha önce kurulan çift cidarlı kazan sisteminden yaklaşık %73,3, plakalı pastörizer sisteminden %60,7, ısı pompası sisteminden ise %25,5 daha az enerji harcadığı belirlenmiştir.
- 2- Pastörize edilen süt debisinde değişiklik, kurulan sistemin toplam performans katsayısını (STPK) etkilemektedir. Artan süt debisi ile birlikte sistemin toplam performans katsayısının da arttığı belirlenmiştir. Performans katsayısındaki artış, plakalı eşanjörde süte aktarılan, süttten çekilen ısı miktarındaki artıştan kaynaklanmaktadır.
- 3- Pastörize edilen süt giriş sıcaklığındaki değişiklik, kurulan sistemin toplam performans katsayısını (STPK) etkilemektedir. Artan süt sıcaklığı ile birlikte sistemin toplam performans katsayısının da azaldığı belirlenmiştir. Performans katsayısındaki düşüşe neden olarak plakalı eşanjörde süte aktarılan ve süttten çekilen ısı miktarının azalması gösterilebilir.
- 4- PV/T destekli ısı pompası ısıtma tesir (performans) katsayısı (COP) 4,38, sistem performans katsayısı (COP_{sis}) 5,5, sistem toplam performans katsayısı (STPK) ise 10,4 olarak hesaplanmıştır. Söz konusu katsayılar önceki çalışmalarla kıyaslandığında kayda değer olarak nitelendirilebilir düzeydedir.
- 5- Pastörizasyon işleminde süt giriş sıcaklığı mayalanma (ürün işleme) sıcaklığını etkilediği belirlenmiştir. Artan süt giriş sıcaklığına bağlı olarak mayalanma sıcaklığının da yükseldiği tespit edilmiştir.

- 6- Pastörizasyon işleminde çiğ süt debisinin pastörizasyon süresini etkilediği belirlenmiştir. Pastörizasyon sütün debisinin 120 lt/h değerinden 150 lt/h değerine çıkarılması ile toplam pastörizasyon süresini 170 dakikadan 145 dakikaya indirmiştir. Bu da bir kilogram başına harcanan enerjide %14,5 düşüş sağlamıştır.
- 7- PV/T desteği çiğ sütün toplam pastörizasyon süresini azaltmıştır. Aynı süt giriş sıcaklık ve debi parametrelere göre 180 dakikalık pastörizasyon süresi 170 dakikaya düşürülmüştür. PV/T desteği ile bir kilogram başına harcanan enerjide %8,8 düşüş sağlanmıştır.
- 8- PV/T sistem vasıtasıyla, PV panel yüzey sıcaklığının düşmesine bağlı olarak elektriksel panel verimi 800 W/m^2 ısınım değeri için %9,4 ten %10,6 değerine, 1000 W/m^2 ısınım değeri için %10,1 den %11,5 değerine, 1200 W/m^2 ısınım değeri için %8,5 ten %10,4 değerine çıkarılmıştır.
- 9- PV/T sistem termal verimleri, hücre sıcaklıklarına bağlı olarak artan ısınım miktarı ile başlangıçta doğru orantılı olarak seyir göstermiştir. Hücre sıcaklıklarındaki artış birlikte, PV/T sistemden (hücre, borulama vs.) ortama geçen termal kayıpların artması nedeniyle 800 W/m^2 ısınım değerinde en yüksek termal verim elde edilmiştir. 800 W/m^2 ısınım değerinde termal verim %68,3, 1000 W/m^2 ısınım değerinde termal verim %59,2, 1200 W/m^2 ısınım değerinde termal verim %51,9 olarak hesaplanmıştır.
- 10- 1200 W/m^2 ısınım değeri altında 700 lt/h panel su debisi için en yüksek termal verim %51,9 olurken, bu değer 600 lt/h panel su debisi için %47,4 olarak hesaplanmıştır.

Öneriler

- 1- PV/T sistem alanını artırarak hem sıcak su kapasitesi hem de elektrik çıkış gücünü artırmak mümkün olacaktır. Böylece sütün pastörizasyonu için ön ısıtma kapasitesi artırılacak ayrıca diğer sistem bileşenlerinin elektrik taleplerini karşılamak mümkün olacaktır.
- 2- Yapılan çalışmada, pastörizasyon işleminde süte ön ısıtma, PV/T sistemden elde edilen sıcak su ile yapılmaktadır. Erzurum ilinin jeotermal su kaynak potansiyeli göz önünde bulundurularak, ön ısıtma için yenilenebilir enerji kaynaklarından, jeotermal su kaynağı kullanmak mümkün olacaktır.

- 3- Su devresi ve süt pompası sirkülasyon pompaları frekans invertörlü kullanılarak istenilen debiye göre çekilen elektrik gücü ayarlanabilir. Böylece sistemin performans katsayısına direk etki eden elektrik sarfiyatı azaltılabilecektir.
- 4- Hem PV/T sistemine hem de ısı pompası su devresine nanopartiküller eklenerek ısı transferinin iyileştirilmesi sağlanabilecektir.
- 5- Süt devresi ve su devresinde gerek borulardan gerekse sistem bileşenlerinden ortama olan ısı transferi izolasyon yapılarak düşürülebilir. Böylece pastörizasyon süresini azaltmaya yönelik pozitif katkı sağlanabilir.



KAYNAKLAR

- Aktaş, Y., 2008. R-134a Soğutucu Akışkanlı Isı Pompası Sisteminin Sütün Pastörizasyonunda Kullanımının Deneysel İncelenmesi. Y. Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum, Türkiye.
- Afshari, F., 2016. Gaz Karışımları Kullanan Isı Pompalarının Enerji ve Ekserji Verimlerinin Deneysel Olarak İncelenmesi. Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum, Türkiye.
- Al-Waeli, A.H.A., Sopian, K., Kazem, H.A., Chaichan, M.T., 2017. PV/T (photovoltaic/thermal): status and future prospects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 77(C), 109–130.
- Al-Waeli, A.H.A., Kazem, H.A., Chaichan, M.T., Sopian, K., 2019. *Photovoltaic/Thermal (PV/T) Systems: Principles, Design, and Applications*. Springer International Publishing, 282 p, Cham, Switzerland.
- Alzaabi, A.A., Badawiyeh, N.K., Hantoush, H.O., Hamid, A.K., 2014. Electrical/thermal performance of hybrid PV/T system in Sharjah. *International Journal of Smart Grid and Clean Energy*, 3(4), 385–389.
- Anonim, 2018. Dünya ve Türkiye Enerji ve Tabii Kaynaklar Görünümü (2017). ETKB, www.enerji.gov.tr/Resources/Sites/1/Pages/Sayi_15/mobile/index.html (03.4.2020).
- Anonim, 2019a. Ulusal Enerji Denge Tablosu (2018). EİGM, <https://enerji.gov.tr/enerji-isleri-genel-mudurlugu-denge-tablolari> (03.4.2020).
- Anonim 2019b. Baymak. <https://www.baymak.com.tr/media/4234/aqua-tek-serpantinli-hizli-boylerler-brosur.pdf> (23.04.2019).
- Anonymous, 2017. Milk Pasteurization, HTST, LTLT, and UHT Treatment. <https://dairytechnologist.com/milk-pasteurization> (02.08.2019).
- Anonymous, 2018. Renewable. International Renewable Energy Agency, <https://www.irena.org/solar> (23.04.2019).
- Anonymous, 2019. Solimpex Solar Energy Corporation. <https://www.solimpeks.com/volther-powervolt-es> (23.03.2019).
- Atia, M.F., 2010. Solar Energy Utilization for Milk Pasteurization. M.S. Thesis, Ain Shams University, Cairo, Egypt.
- Bergmans, J., 1981. Report for the International Energy Agency Implementing III, Agreement on Advanced Heat Pumps, Heat Pump Systems Applied in Industry. Annex Leuven Universty, Belgium.
- Bileşik Oksijen Sanayi A.Ş., 2006. Soğutucu Gazlar. Kocaeli.
- Brennan, J.G., 2006. *Food Processing Handbook*. Wiley-VCH, 603 p, Weinheim, Germany.
- Callejo, L.H., Saavedra S.G., Gómez V. A., 2019. A review of photovoltaic systems: Design, operation and maintenance. *Solar Energy*, 188, 426–440.
- Chow, T.T., Hand, J.W., Strachan, P.A. 2003. Building-integrated photovoltaic and thermal applications in a subtropical hotel building. *Applied Thermal Engineering*, 23(16), 2035–2049.
- Cuevas, A. and Sinton, R.A., 2003. Characterization and Diagnosis of Silicon Wafers and Devices. *Practical Handbook of Photovoltaics*, T. Markvart and L. Castener Eds., Elsevier, Oxford.
- Cüce, E., Bali, T., Sekuçoğlu, S.A., 2011. Effects of Passive Cooling on Performance of Silicon Photovoltaic Cells. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 6(4), 299–308.

- Çağlar, A., 2006. Theoretical and Experimental Performance Analysis of a Solar Assisted Heat Pump. Master Thesis, Middle East Technical University, Ankara.
- Çelik, A. N. and Açıkgoz, N., (2007). Modelling and Experimental Verification of the Operating Current of Mono-crystalline Photovoltaic Modules Using Four-and Five-Parameter Models. *Applied Energy*, 84(1),1–15.
- Çengel, Y. A. ve Boles, M. A., 2008. Mühendislik Yaklaşımıyla Termodinamik. Literatür Yayınları, 867 s, İstanbul.
- Çomaklı, Ö., Yüksel, B., Kara, YA., Çağlar A. ve Tülek, Y., 1994. Heat Pump Utilization in Milk Pasteurization. *Energy Conversion Management*, 35, 91-96.
- Dash, S.K., 2000. Pasteurization of Milk. College of Agricultural Engineering and Technology, Odisha University of Agriculture and Technology http://ouat.nic.in/sites/default/files/5pasteurisation_of_milk_dairy_and_food_engineering.pdf (18.12.2019).
- Demir, H., Mobedi, M., Ülkü, S., 2005. Adsorpsiyonlu Isı Pompaları. VII. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi, İzmir, Türkiye.
- Dong, X., Tian Q., Li, Z. 2017. Experimental Investigation on Heating Performance of Solar Integrated Air Source Heat Pump. *Applied Thermal Engineering*, 123, 1013–1020.
- Doshi, T.K. and Souza, N.S.D., 2011. The Economics of Solar PV in Singapore. *Energy Studies Institute*, 63 p, Singapore.
- Drabczyk, K.. and Panek. P., 2012. Silicon-Based Solar Cells Characteristics and Production Processes. Institute of Metallurgy and Materials Science of Polish Academy of Sciences, 70 p, Krakow, Poland.
- FAO 2019a: Dairy Market Review. <http://www.fao.org/3/ca3879en/ca3879en.pdf> Rome, Italy.
- FAO 2019b: Food Outlook, Biannual Report On Global Food Markets, <http://www.fao.org/3/ca4526en/ca4526en.pdf> Rome, Italy.
- Foster, R., Ghassemi, M., Cota, A., 2010. Solar Energy: Renewable Energy and the Environment. CRC Press, 335 p, Florida, USA.
- Gürü, M. ve Yalçın, H., 2012. Mühendislik Termodinamiği. Palme Yayınları, 698 s, Ankara.
- Haddad, W.M., Chellaboina, V.S., Nersesov, S.G., 2005. Thermodynamics: A Dynamical Systems Approach. Princeton University Press, 200 p, New Jersey.
- Hendrie, S.D., 1980. Evaluation of Combined Photovoltaic/Thermal Collectors. ISES International Congress and Silver Jubilee, 1865–1869.
- IEA 2018: Renewables, Analysis and Forecasts to 2023. Renewable Energy Division, CEEW&TERI, New Delhi.
- IEA 2019: Renewables, Global Status Report. <https://www.ren21.net/reports/global-status-report/> (24.07.19).
- IEA-WEO 2019: World Energy Outlook, IEA Publications, Paris.
- International Dairy Federation (IDF) 1986: Monograph on Pasteurised Milk. Bulletin Number 200, Brussels.
- Izquierdo, M., Agustín, P., Martín, E., 2014. A Micro Photovoltaic-Heat Pump System for House Heating by Radiant Floor: Some Experimental Results. *Energy Procedia*, 48, 865–75.
- Jarimi, H., Bakar,M.N.A., Manaf, N.A., Othman, M., Din, M., 2013. Mathematical Modelling of a Finned Bi-Fluid Type Photovoltaic/Thermal (PV/T) Solar Collector. *IEEE Conference on Clean Energy and Technology (CEAT)*, 163–168.
- Kalogirou, S.A., 2001. Use of TRNSYS for Modelling and Simulation of a Hybrid PV–Thermal Solar System for Cyprus. *Renewable Energy*, 23(2), 247–260.
- Kara, Y.A., 1993, Süt Pastörizasyon İşlemlerinde Isı Pompası Kullanımı. Y. Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum, Türkiye.
- Karagöl, E.T. ve Kavaz, İ., 2017. Dünyada ve Türkiye’de Yenilenebilir Enerji. *Siyaset Ekonomi ve Toplumsal Araştırmalar Vakfı (SETA)*, 197 (1), 7-30.

- Khelifa, A., Touafek, K., Moussa, H.B., 2014. Approach for the Modelling of Hybrid Photovoltaic–Thermal Solar Collector. *IET Renew. Power Gener.*, 9(3), 207–217.
- Kim, H.J., 2019. *Solar Power and Energy Storage Systems*. Pan Stanford Publishing Pte. Ltd., 177 p, Singapore.
- Kiss, A.A. and Ferreira, C.A.I., 2016. *Heat Pumps in Chemical Process Industry*. CRC Press, 442 p, Florida, USA.
- Kline, S. and McClintock, F.A., 1953. Describing Uncertainties in Single-Sample Experiments. *Mechanical Engineering*, 75(1), 3-8.
- Metin M., 1998. Süt Teknolojisi. *Ege Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayınları*, 33, 793, Bornova, Türkiye.
- Nardi, I., Ambrosini, D., Rubeis, T., Paoletti, D., Muttillio, M., Sfarra, S., 2017. Energetic Performance Analysis of a Commercial Water-Based Photovoltaic Thermal System (PV/T) Under Summer Conditions. In *Journal of Physics: Conference Series*, 923(1), 012040.
- Ömeroğlu, G., 2018. CFD Analysis and Electrical Efficiency Improvement of a Hybrid PV/T Panel Cooled by Forced Air Circulation. *International Journal of Photoenergy*, (12), 1–11.
- Ömeroğlu, G. ve Öner, İ.V., 2018. Fotovoltaik Termal (Pvt) Sistemlerinde Farklı Tip Kanatçıklar Kullanılarak Optimum Çalışma Sıcaklığının Tayini. *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, 9(1), 177–183.
- Öner, İ.V., Yeşilyurt M.K., Yılmaz, E.Ç., Ömeroğlu, G., 2016. Photovoltaic Thermal (PVT) Solar Panels. *International Journal of New Technology and Research*, 2(12), 13-16.
- Öztürk H.H., 2007. Güneş Enerjisinden Fotovoltaik Yöntemle Elektrik Üretiminde Güç Dönüşüm Verimi ve Etkili Etmenler. *EMO*, http://www.emo.org.tr/ekler/3a921ffad054cb0_ek.pdf 16.06.2019.
- Özyurt, Ö., 2002. Isı Pompaları ve Süt Pastörizasyonu. *Doktora Tezi*, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum, Türkiye.
- Özyurt, O., Çomaklı, O., Yılmaz, M., Karşı, S., 2004. Heat pump Use in Milk Pasteurization. *International Journal of Energy Research*, 28, 833–846.
- Özyurt, Ö. and Çomaklı, Ö., 2018. Steady-state Simulation of Heat Pump Using Milk Pasteurization. *Journal of Engineering Research and Applied Science*, 7(1), 835-847.
- Parida, B., Iniyar, S., Goic, R., 2011. A Review of Solar Photovoltaic Technologies. *Renewable And Sustainable Energy Reviews*, 15 (3), 1625–1636.
- Quigley, L., O’Sullivan, O., Stanton, C., Beresford, T.B., Ross, R.P., Fitzgerald, G.F., Cotter, P.D., 2013. The Complex Microbiota of Raw Milk. *FEMS Microbiology Reviews*, 37, 664–698.
- Robinson, K. 2002. *Dairy Microbiology Handbook*. Wiley Interscience, 765 p, New York, USA.
- Rossi, F., Parisi, M.L., Maranghi, S., Manfreda, G., Basosi, R., Sinicropi, A., 2019. Environmental Impact Analysis Applied to Solar Pasteurization Systems. *Journal of Cleaner Production*, 212, 1368-1380.
- Saga, T., 2010. Advances in Crystalline Silicon Solar Cell Technology for Industrial Mass Production. *NPG Asia Materials*, 2, 96–102.
- Sarhaddi, F., Farahat, S., Ajam, H., Behzadmehr, A.M.I.N., Adeli, M.M., 2010. An Improved Thermal and Electrical Model for a Solar Photovoltaic Thermal (PV/T) Air Collector. *Applied Energy*, 87 (7), 2328–2339.
- Sarkar, J., Bhattacharyya, S., Gopal, M.R., 2004. Transcritical Carbon Dioxide Based Heat Pumps: Process Heat Applications. *International Refrigeration and Air Conditioning Conference*, Purdue University, USA.
- Shah, R., and Sekulic, D.P., 2003. *Fundamentals of Heat Exchanger Design*. John Wiley& Sons, 941 p, Hoboken, New Jersey.

- SHC 2019: Solar Heat Worldwide, Global Market and Development Trends in 2018, Detailed Market Figures 2017, IEA Solar Heating and Cooling Programme, Gleisdorf, Austria.
- Söylemez, M.S., 2006. Optimum Heat Pump in Milk Pasteurizing for Dairy. *Journal of Food Engineering*, 74, 546-551.
- Sultan, S.M and Tso, C.P., 2018. A Thermal Performance Study for Different Glazed Water Based Photovoltaic Thermal Collectors. In *AIP Conference Proceedings*, Vol. 2030, No. 1, p. 020307.
- Sumathi, S., Kumar, L.A., Surekha, P., 2015. *Solar PV and Wind Energy Conversion Systems*. Springer, 790 p, Switzerland.
- Toledo, R.T., Singh, R.K., Kong F., 2018. *Fundamentals of Food Process Engineering*. Springer, 449 p, Cham, Switzerland.
- TSEK, 1981. Yayın NO:5. Ankara.
- U.S. Energy Information Administration, 2017. Residential Energy Consumption Survey.
- Wang, G., Zhao, Y., Quan, Z., Tong J., 2017. Application of a Multi-functionsolar-heatpump System in Residential Buildings. *Applied Thermal Engineering*, 130, 922–937.
- Whitman, B., Johnson, B., Tomczyk, J.A., Whitman, W.C., Johnson, W.M., 2005. *Refrigeration and Air Conditioning Technology Lab. Manual 5th Edition*. Thomson Delmar Learning, 1324 p, New York, USA.
- Yanıktepe, B., Özalp, C., Savrun, M.M., Köroğlu, T., Cebeci, Ç., 2011. Rüzgar-Güneş Hibrid Güç Sistemi Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Uygulama Örneği. 6th International Advanced Technologies Symposium (IATS'11), 16-18 May, Elazığ, Turkey.
- Yıldırım, N. and Genç, S., 2017. Energy and Exergy Analysis of a Milk Powder Production System. *Energy Conversion and Management*, 149, 698-705.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler	
Adı Soyadı:	Sedat AKMEŞE
Doğum tarihi:	
Doğum Yeri:	
Uyruğu:	
Adres:	
Tel:	
E-mail:	
Eğitim	
Lise:	Erzurum Atatürk Lisesi
Lisans:	Atatürk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi
Yüksek lisans:	Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
Doktora:	Atatürk Üniversitesi
Yabancı Dil Bilgisi	
İngilizce:	İyi
Üye Olunan Mesleki Kuruluşlar	
Tezden Üretilmiş Yayınlar	
1. Akmeşe, S., Omeroglu, G., Comakli O., (2021). Photovoltaic Thermal (PV/T) System Assisted Heat Pump Utilization For Milk Pasteurization. Solar Energy, 218, 35-47.	