

Endüstriyel Uygulamalarda Güneş Enerjisinden Termal Olarak Yararlanma

Burcu KOÇAK¹, Halime PAKSOY*¹

¹Çukurova Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Kimya Bölümü, Adana

Geliş tarihi: 14.09.2020

Kabul tarihi: 23.10.2020

Öz

Endüstride güneş enerjisi kullanımı ile fosil yakıtlara bağımlılık azalırken, verimlilik ve rekabet gücü artabilmektedir. Güneş enerjisinin endüstriyel uygulamalarda ekonomik olarak uygulanabilmesi için termal enerji depolama (TED) sistemlerinin kullanımı gereklidir. TED sistemleri endüstride güneş enerjisi uygulamalarının verimliliğini artırmaktadır. Endüstriyel uygulamalarda TED sistemlerinin performansı kullanılan teknolojiye, endüstriyel süreç türüne ve uygulama sıcaklık aralığına bağlıdır. Bu çalışmada güneş enerjisi endüstriyel uygulamaları ve TED sistemleri ele alınmıştır. Güneş enerjisinin ve TED sistemlerinin entegre edilebileceği endüstriyel prosesler, güneş enerjisi teknolojileri, bunların sürdürülebilirlikleri araştırılmıştır. Süt pastörizasyon prosesi örnek alınarak, güneş enerjisi ve TED sistemi entegrasyonu incelenmiştir. Yıkıntı atıklarından geliştirilen duyuur ısı depolama malzemeleri ile dolu TED sistemi entegrasyonunda %52,5 verim sağlanabileceği tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Güneş enerjisi, Endüstriyel uygulamalar, Termal enerji depolama, Süt pastörizasyon

Using Solar Thermal Energy in Industrial Applications

Abstract

Industrial productivity and competitiveness can increase with decreasing dependency on fossil fuels by using solar energy in the industry. Using TES together with solar energy is needed for cost-effective solar heat industrial applications. TES systems that are used in industrial solar applications can increase the energy efficiency in industry. Performance of thermal energy storage systems mainly depends on type of TES technology, industrial process and temperature levels of processes. This study is focused on solar heat industrial processes and TES systems. Suitable industrial processes for solar and TES systems, solar energy technologies and sustainability of TES were investigated. Integration of solar energy and TES system were analyzed in a milk pasteurization process as a case study. Energy efficiency of 52,5 % was achieved by integration of TES system filled with sensible thermal energy storage materials developed from demolition wastes.

Keywords: Solar Energy, Industrial applications, Thermal energy storage (TES), Milk pasteurization

*Sorumlu yazar (Corresponding author): Halime PAKSOY, hopaksoy@cu.edu.tr

1. GİRİŞ

Türkiye'deki endüstriyel enerji tüketimi hızla artmakta olup, endüstriler toplam enerji tüketiminde %37'lik paya sahiptir [1]. Ancak endüstride enerji tüketiminde ağırlıklı olarak dış kaynaklı fosil yakıtların kullanılması, CO₂ salınımını artırmakla birlikte, ürünlerin birim fiyatlarını artırmakta ve küresel pazardaki rekabeti azaltmaktadır. Bu sebeple, endüstride güneş enerjisi uygulaması ve termal enerji depolama (TED) sistemleri entegrasyonunun önemi her geçen gün artmaktadır.

Türkiye'de güneş enerjisinin endüstride kullanımı sınırlı olup, 380 TWh'lik güneş enerjisi teknik potansiyelinin sadece %2'sinden yararlanılmaktadır. Bunun %91'i konutlar, %4'ü turizm sektörü, %3'ü ticari binalar ve %2'si endüstri için sıcak su üretiminde kullanılmaktadır [2]. Enerji, endüstriyel üretimlerde ürün maliyetlerinin %4-5'ini oluşturmaktadır [3]. Bu da endüstride enerji kullanım maliyetlerinin azaltılmasının önemini göstermektedir. Enerji ihtiyacının ancak %23'ü yerli kaynaklardan sağlanan Türkiye'de, güneş enerjisinden verimli bir şekilde yararlanılması hem ülke ekonomisine hem de çevreye önemli katkılar sağlayacaktır.

Endüstride enerji, üretim, montaj, sıcak su eldesi, proses ısıtma ve soğutma, bina ısıtma ve soğutma, aydınlatma gibi birçok faaliyetlerde kullanılabilir [4]. Endüstride tüketilen enerjinin yaklaşık %30'u gıda, kimya ve petrokimya endüstrilerinde kullanılmaktadır [5]. Enerji kullanımının en yoğun olduğu prosesler ise sterilizasyon, pastörizasyon, kurutma, hidrolize, damıtma ve buharlaşma, yıkama ve temizlik ve polimerizasyon gibi proseslerdir [6]. Sanayide 200°C'nin altındaki prosesler, özellikle gıda sektörü, güneş enerjisi kullanımı için uygundur. Prosesinin yaklaşık %90'ının 100-200 °C arasında olduğu yiyecek ve içecek endüstrisi güneş enerjisi uygulamaları için büyük potansiyele sahiptir [3].Güneş enerjisinin entegre edildiği endüstriyel uygulamalar çoğunlukla İspanya, Avusturya, İtalya, İsviçre gibi ülkelerde görülmektedir [3]. Türkiye'de yüksek potansiyel olmasına rağmen sanayide güneş enerjisi kullanımı yaygın değildir.

Literatürde güneş enerjisinin sanayiye entegrasyonu ile ilgili farklı çalışmalar bulunmaktadır. Kalogirou [6]'nın yaptığı bir çalışmada, 5 farklı kolektör türünün endüstride farklı proseslerdeki uygulamaları incelenmiş ve uygun kolektör türü ve proses sıcaklık aralığına göre yıllık enerji tasarrufunun 0,015 ila 0,028 £/kWh arasında olacağı sonucuna ulaşılmıştır. Bolognese ve ark. [7] makarna endüstrisinde farklı kolektör tiplerinin entegrasyonunu simule ederek, karşılaştırma çalışması yapmışlardır. Buscemi ve arkadaşları [8] İtalya'da bir makarna endüstrisine doğrusal fresnel kolektör alanı ve beton TED sistemi entegre ederek makarna kurutma prosesinde 40% enerji verimliliği sağlamışlardır. Beath [9] Avustralya'da çeşitli alanlarda 2498 adet endüstriyel tesisi incelemiş, proses sıcaklıkları, endüstri tipleri, enerji kullanım karakteristikleri üzerine detaylı çalışma yapmıştır. Bu çalışmanın sonucunda proses sıcaklıkları 200°C'nin altında olan gıda, tekstil ve ağaç sanayinde güneş enerjisi kullanımının uygun olabileceği ve bu alanlarda doğal gaz tüketiminin azaltılabileceği sonucuna ulaşılmıştır. Sharma ve arkadaşları [10] Hindistan'da bir süt üretim tesisinin enerji tüketim dağılımını analiz edip, proseslerin %70'inin 50-200 °C arasında yer aldığı süt üretim tesisinin güneş enerjisi entegrasyonu için uygun olduğunu tespit etmişlerdir.

Güneş enerjisi, enerji maliyetlerini düşürmek için etkin bir kaynaktır. Ancak, güneş enerjisinin verimliliği mevsimlere ve günün farklı saatlerine göre değişkenlik göstermektedir. Güneş enerjisinin kesintili bir kaynak olması, endüstri uygulamaları için bir dezavantaj oluşturmaktadır. TED sistemleri, çeşitli sektörlerde ısıtma ve soğutma taleplerini karşılamak ve yenilenebilir enerji kaynaklarını sürekli ve etkin kullanmak için alternatif çözümler sunmaktadır [11]. Duyulur ısı depolama, gizli ısı depolama ve termo-kimyasal depolama olmak üzere 3 çeşit TED yöntemi bulunmaktadır. TED sistemleri daha çok binalarda ısıtma ve soğutma uygulamalarında kullanılmaktadır [12]. Yüksek sıcaklıktaki TED uygulamaları daha çok duyulur ısı yöntemiyle yapılmaktadır.

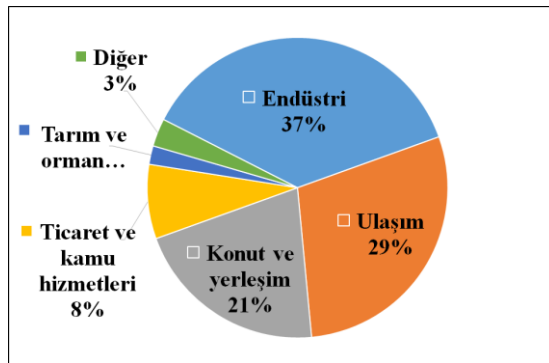
Bu çalışmanın amacı endüstride güneş enerjisinden yararlanacak sistemleri araştırarak, fosil yakıtlara bağımlılığı azaltmak, endüstride verimliliği ve rekabet gücünü artırmaktır. Bu amaçla, güneş enerjisinden öncelikli olarak yararlanabilecek endüstriyel sektör ve prosesler belirlenmiş, güneş enerjisinin farklı endüstriyel proseslerde entegrasyonu için gerekli teknolojiler ve uygulama koşulları araştırılmıştır. Güneş enerjisinden yararlanmada kullanılacak termal enerji depolama sistemleri belirlenip, gıda endüstrisi örnek uygulamaları olarak süt pastörizasyon prosesinde enerji analizi yapılmış, güneş enerjisi ve TED sistemi entegrasyonunun teknik ve ekonomik uygulanabilirlikleri incelenmiştir.

2. MATERYAL VE METOT

2.1. Teknik ve Ekonomik Uygulanabilirlik

2.1.1. Öncelikli Endüstriyel Sektör ve Prosesler

Uluslararası Enerji Ajansı'na göre, küresel enerji tüketimi son kırk yılda iki kattan fazla artmıştır. 1973 yılında 4661 Mtep enerji tüketimi 2017 yılında 9717 Mtep'e ulaşmıştır [13]. Şekil 1'e göre endüstri sektörü, dünya toplam enerji tüketiminin %37'sini oluşturmaktadır.



Şekil 1. Sektörlere göre enerji tüketim oranları [13]

Dünyada büyük endüstri grupları farklı türlere göre sınıflandırılmış, enerji tüketim payları Çizelge 1'de verilmiştir. Endüstriyel sektörlerde güneş enerjisinden yararlanma teknik potansiyelinin belirlenebilmesi için farklı proseslerin sıcaklık

gereksinimlerinin belirlenmesi gerekmektedir. Çizelge 2'de farklı proseslerdeki sıcaklık gereksinimleri verilmiştir.

Çizelge 1. Dünya endüstri sektörü: endüstri türleri, büyük endüstri grupları ve enerji tüketim payları (EP) [14]

End. Tipi	End. Grubu	EP,%
Enerji-Yoğun İmalat	Gıda, kağıt hamuru ve kağıt, temel kimyasallar, rafine, demir ve çelik, demir dışı metaller, metal olmayan mineraller	%27
Enerji-Yoğun Olmayan İmalat	İlaç, boya ve kaplamalar, yapıştırıcılar, deterjanlar, elektrik ve elektronik endüstrisi	%39
İmalat Dışı	Tarım, ormancılık, balıkçılık, madencilik, inşaat	%34

Çizelge 2. Farklı prosesler için gerekli sıcaklık aralıkları [15]

Sektör	Proses Türleri	Sıcaklık Aralığı, °C
Yiyecek ve İçecek	Pastörizasyon	60-140
	Sterilizasyonu	40-140
	Kurutma	40-200
	Buharlaştırma	40-130
	Yıkama	30-200
Kimya	Biyokimyasal Reaksiyonlar	30-50
	Destilasyon	100-220
	Pişirme	90-110
	İnceltme	110-140
Kağıt	Ağartma	40-150
	Pişirme	110-180
	Kurutma	90-200
Plastik	Ön Isıtma	50-70
	Kurutma	50-150
Tekstil	Ağartma	40-100
	Boyama	40-130
	Kurutma	80-110
	Yıkama	50-110

IEA tarafından [13] verilen dünya enerji kaynaklı CO₂ emisyon değerleri incelendiğinde, 2017 yılında 33 milyar ton olan CO₂ emisyonunun yaklaşık 20%’sinden endüstrilerin sorumlu olduğu görülmektedir. Yenilenebilir enerjinin endüstriye entegre edilmesi ile zararlı emisyonların azaltılabileceği bilinmektedir. Örneğin, UNEP 2015 raporuna göre, bulunduğu bölgeye bağlı olarak, 1,4 MW (2000 m²)’lık bir güneş enerjisi sistemi, yaklaşık 175 ton CO₂ emisyonu tasarrufu sağlayabilmektedir.

Elde edilen enerji tüketim payları ve proseslerin sıcaklık verileri incelendiğinde, mevcut güneş enerjisi toplacılarıyla öncelikli olarak yiyecek, içecek ve tekstil sektörlerinin güneş enerjisinden yararlanmaya uygun olabileceği belirlenmiştir.

2.1.2. Güneş Enerjisi Teknolojileri ve Uygulama Koşulları

Endüstriyel güneş enerjisi uygulamalarında proses sıcaklık aralığına göre kullanılacak güneş enerjisi kolektör tipleri Çizelge 3’de listelenmiştir. Sistem maliyetleri kolektör tipine, boyutuna ve panel kalitesine göre değişebilmektedir. Firmaların internet sitelerinden derlenen verilere göre, kolektörlerin ortalama maliyet verileri Çizelge 4’deki gibidir.

Çizelge 3. Proses sıcaklık aralığına göre kolektör tipleri [6]

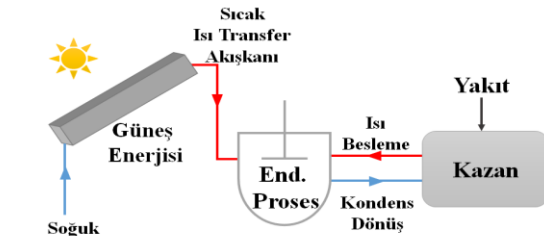
Sıcaklık Aralığı	Kolektör Tipi
80 °C’ye kadar	Güneşle hava ısıtıcı kolektör Düz plaka kolektör (FPC) Vakumlu tüp kolektör (ETC) Düz Plaka ve tüp kolektörler
150 °C’ye kadar	Şeffaf yalıtım malzemeli düz plaka kolektörler Çok camlı düz plaka kolektörler FPC İnert gaz ve ultra yüksek vakumlu tüp kolektörler
400 °C’ye kadar	Parabolik çanak kolektörler Parabolik oluklu kolektörler Doğrusal Fresnel kolektörler

Çizelge 4. Kolektör tip ve maliyetleri

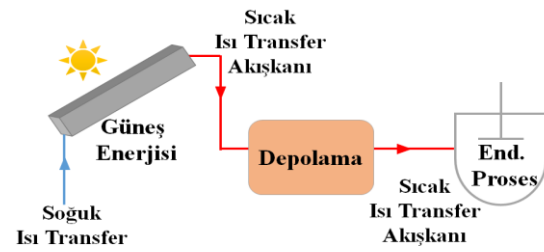
Kolektör Tipi	Marka	Fiyat
Güneşle hava ısıtıcı	Solar Engine	~700 \$/m ²
FPC	Sun Rain	~300 \$/m ²
ETC	Thermoflux	~220\$/m ²
Parabolik çanak	Dezhou Gaia	~100\$/m ²
Parabolik oluklu	Dezhou Gaia	~170 \$/m ²

Güneş enerjinin endüstriyel proseslere entegrasyonunda doğrudan proses seviyesinde entegrasyon ve/veya dolaylı entegrasyon yapılabilir. Doğrudan entegrasyonda güneş enerjisiyle ısıtılan buhar, hava, su veya yağ gibi ısı transfer akışkanları prosesde dolaşmaktadır. Dolaylı uygulamalarda ise buhar kazanları için besleme suyunun ön ısıtması, ısıtma, kurutucu ve evaporatör gibi ünitelerde uygulamalar yapılabilmektedir.

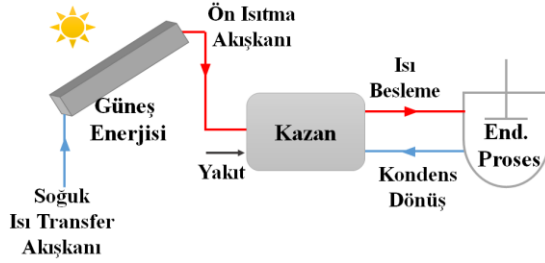
Şekil 2’de proses seviyesinde güneş enerjisinin doğrudan entegrasyonu, Şekil 3’de depolama ünitesi ile proses doğrudan entegrasyon ve Şekil 4’te ise güneş enerjisinin buhar kazanı için besleme suyuna dolaylı entegrasyonu, IRENA 2015 teknoloji raporuna [15] göre yeniden çizilerek verilmiştir.



Şekil 2. Proses seviyesinde doğrudan entegrasyon [15]



Şekil 3. Depolama ünitesi ile doğrudan entegrasyon [15]



Şekil 4. Dolaylı entegrasyon [15]

2.1.3. Termal Enerji Depolama Sistemleri

Gizli ısı depolama, duyulur ısı depolama ve termokimyasal depolama olarak 3 çeşit termal enerji depolama yöntemi bulunmaktadır. Duyulur ısı depolama yönteminde maddenin sıcaklık değişiminde depoladığı ısıdan faydalanılırken, gizli ısı depolama yönteminde faz değiştiren maddelerin (FDM) faz değişimi esnasında alıp/verdikleri ısıdan faydalanılmaktadır. Termokimyasal depolama yönteminde ise kimyasal reaksiyonlar esnasında maddelerin depoladıkları ısıdan yararlanılmaktadır [16,17].

Kısa süreli depolamalarda daha çok istenilen sıcaklıkta faz değiştiren (katı-sıvı, katı-katı) çeşitli organik ve inorganik FDM'ler kullanılmaktadır. Bunlar arasında en yaygın kullanılanlar olarak su-buz, parafinler ve çeşitli tuz hidratları sayılabilir.

Uzun süreli depolamalarda ise daha çok Akiferde Termal Enerji Depolama (ATED), Kanallarda Termal Enerji Depolama (BTES), Yer altı mağaraları, Çukur ve Tanklarda Termal Enerji Depolama (CTES) gibi duyulur ısı depolama tekniklerinden faydalanılır [18]. Kısa süreli duyulur ısı depolamada dolgulu yataklar ve tanklar tercih edilmektedir. Bu sistemlerde alüminyum, taş, tuğla, magnezyumun gibi doğal malzemeler kullanılabilirdiği gibi, son yıllarda çeşitli atık ürünler de duyulur ısı depolama malzemesi olarak kullanılabilir.

Uygun termal enerji depolama yönteminin seçiminde proses türü ve sıcaklıkları önemli parametrelerdir. Termokimyasal depolama yöntemi halen araştırılmakta olan bir konu olup sanayide yaygın kullanımı bulunmamaktadır. Gizli

ısı depolama yöntemi, faz değiştiren maddelerin teknik zorlukları ve yüksek maliyeti nedeniyle, sanayide yaygın olarak kullanılmamakta, düşük sıcaklık aralığında bina uygulamalarında tercih edilmektedir. Duyulur ısı depolama teknolojileri ise yüksek sıcaklık aralığında ve endüstriyel uygulamalarda kullanılabilir [17].

Bu sebeple çalışmanın bu aşamasında endüstriyel uygulamalar için duyulur ısı depolama sistemleri ve depolama malzemeleri üzerine odaklanılmıştır. Duyulur ısı depolama sistemlerinin entegre edilebileceği proses seçenekleri ve sıcaklık aralığı ise Çizelge 5'de listelenmiştir.

Çizelge 5. Duyulur ısı depolama sistemlerinin entegre edilebileceği endüstriyel prosesler ve sıcaklık aralıkları [15]

Sektör	Proses	Sıcaklık Aralığı, °C
Gıda	Kurutma	30-90
	Yıkama	60-90
	Pastörizasyon	60-80
	Kaynatma	95-105
	Sterilizasyon	110-120
	Isı kazanımı	40-60
İçecek	Yıkama	60-80
	Sterilizasyon	60-90
	Pastörizasyon	60-70
Kağıt	Piştirme ve kurutma	60-80
	Kazan besleme suyu ısıtma	60-90
	Ağartma	130-150
Metal	Elektrokaplama	30-80
Tekstil	Ağartma	60-100
	Boyama	70-90
	Kuruta	100-130
	Yıkama	40-80
	Dikme	160-180
	Presleme	80-100
Kimya	Proses Isıtma	120-180
	Su ön ısıtma	60-90
Plastik	Distilasyon	140-150
	Ayırma	200-220
	Kurutma	180-200

Çizelge 5'de görüldüğü üzere sanayide 200 °C'nin altındaki prosesler, özellikle gıda sektörü, güneş

enerjisi kullanımı için uygundur. Endüstriyel uygulamalarda ekonomik çözümler sağlanabilmesi için ucuz duyulur ısı depolama malzemelerinin geliştirilmesi gerekmektedir. Literatürde araştırma yapılmış olan bazı duyulur ısı depolama malzemelerinin termal özellikleri Çizelge 6'da verilmiştir. Bazalt, alüminyum, karbon çeliği ve demir bilinen duyulur ısı depolama malzemeleri arasındadır. Ayrıca, son zamanlarda, madencilik ve metalurji endüstrisi yan ürünleri, asbest içeren atıklar (Kofalit) ve cürüf gibi endüstriyel atık ürünler yüksek sıcaklıktaki uygulamalar için geliştirilmektedir.

Çizelge 6. Duyulur ısı depolama malzemelerinin özellikleri

Malzeme	P, kgm^{-3}	Cp, $\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$	T, °C	Ref.
Su	1000	4190	<100	[19]
Beton	2200	850	<600	[20]
Silis	2500	0,90	<1000	[21]
Alüminyum	3350	902	<550	[22]
Bazalt	2644	770	<1000	[23]
Kofalit	3120	800	<1100	[24]
Cürüf	3500	930	<1000	[25]

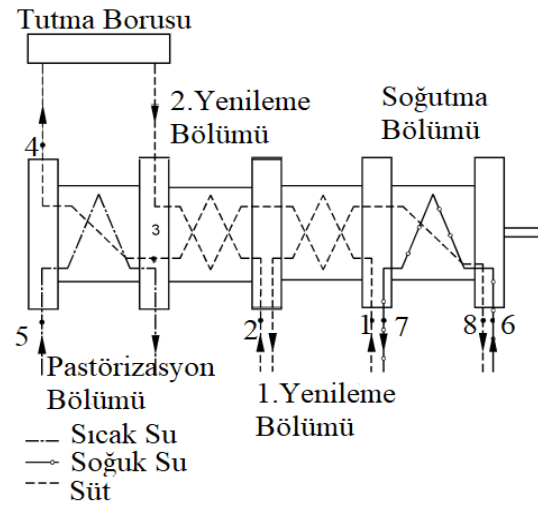
Ucuz ve enerji yoğunluğu yüksek depolama malzemelerinin kullanılması, düşük maliyetli ve yüksek verimli termal enerji depolama sistemleri için çok önemlidir. Bu nedenle, atık malzemelerin depolama malzemesi olarak kullanılması, depolama sistemlerinde daha iyi bir alternatif oluşturmaktadır. Bu amaçla, bu çalışmada ele alınacak örnek endüstri uygulamasında, kentsel dönüşümde açığa çıkan yıkıntı atıklarından geliştirilen depolama malzemesi TED sisteminde değerlendirilecektir.

2.2. Endüstriyel Uygulama

Çalışmanın bu aşamasında süt endüstrisinde pastörizasyon prosesindeki enerji tüketimi ele alınarak, bu proste güneş enerjisi ve TED sistemi entegrasyonu incelenmiştir. Süt pastörizasyon prosesi, sütü minimum 100 °C'ye ısıtarak içerisindeki zararlı mikroorganizmaların %90-99'unun yok edildiği önemli bir prostedir. Süt pastörizasyon prosesine ilişkin veriler

Kazimirova'nın [26] süt pastörizasyon prosesinde enerji tüketimi ile ilgili yaptığı çalışmadan alınmıştır. Bu çalışmada, 20000 L/saat kapasiteli PPM 2010 AN pastörizasyon cihazı, santrifüj, homojenleştirme ve tutma borusu, şamandıralı dengeleme deposu, sıcak su tankı, sıcak su pompası, su buharı karıştırıcısı, bağlantı boruları ve armatürler, pastörizasyon sisteminin elemanlarıdır [26].

PPM 2010 AN Pastörizasyon cihazı 0,5 m² yüzey alanında 0,6-0,8 mm kalınlığında plakalardan oluşmaktadır. Plakalarda ters yönde 110 °C'ye kadar sıcak su geçişi olmaktadır [26]. Aynı cihazın soğutma bölümünde ise soğuk su girişi bulunmaktadır. Sistemde soğutma ünitesinde ısı geri kazanımı bulunmaktadır. Bu sayede ısıtma için harcanan enerjinin %82'si soğutma ünitesinden kazanılabilmektedir. Pastörizasyon cihazının şeması Şekil 5'deki gibidir.



Şekil 5. Pastörizasyon cihazının şematik gösterimi [26]

Şekil 5'de belirtilen numaralara karşılık sıcaklık ölçüm noktaları şöyledir;

- 1: Ham süt girişi (T_1)
- 2: Birinci ve ikinci yenileme bölümündeki süt sıcaklığı (T_2)
- 3: Pastörizasyon bölümü giriş süt sıcaklığı (T_3)
- 4: Pastörizasyon sıcaklığı ($T_4=T_p$)

- 5: Sıcak su giriş sıcaklığı (T_5)
 6: Soğuk su giriş sıcaklığı (T_6)
 7: Soğutma suyu çıkış sıcaklığı (T_7)
 8: Soğutma ünitesi çıkışında süt sıcaklığı (T_8)

Bu ölçüm noktalarındaki örnek sıcaklık ölçümleri Çizelge 7’de verilmiştir.

Çizelge 7. Pastörizasyon ünitesi sıcaklıkları [26]

Ölçüm Noktaları	Sıcaklıklar, °C		
	1. Ölçüm	2. Ölçüm	3. Ölçüm
1:	5,7	5,1	5,4
2:	48,2	48,0	48,0
3:	60,1	60,0	61,0
4:	72,4	72,2	72,1
5:	85,3	84,6	84,8
6:	1,5	1,6	2,1
7:	6,7	6,4	6,8
8:	4,6	4,8	5,3

Pastörizasyon cihazında ham sütün sıcaklığının (T_1) pastörizasyon sıcaklığına (T_p) çıkartılması için harcanan ısı enerjisi Eşitlik 1’den hesaplanır:

$$Q_1 = m_1 \cdot C_{p1} \cdot (T_p - T_1) \quad (1)$$

Ele alınan PPM 2010 AN süt pastörizasyon cihazında süt debisi (m_1) 5,72 kg/s, sütün 40 °C’de özgül ısısı (C_{p1}) 4300 J/kgC olarak alınmıştır. Süt ısıtmada kullanılan sıcak suyun debisi (m_{su}) 11,1 kg/s’dir. Suyun özgül ısısı 4186 J/kgC’dir [26].

Süt pastörizasyon prosesindeki ısı ihtiyacını karşılamak için doğal gaz kazan, güneş enerjisi ve TED entegrasyonlu güneş enerjisi olmak üzere 3 ayrı senaryo tasarlanıp, enerji-maliyet analizi yapılmıştır. 3 senaryo için de prosesin günde 16 saat, haftada 7 gün süre ile çalıştığı ve sistemin Adana bölgesinde yer aldığı varsayılmıştır.

2.2.1. Senaryo 1: Doğal Gaz Kazan Isıtma Sistemleri

Süt pastörizasyon prosesinde sıcak su ihtiyacı sıcak su tankından karşılanmaktadır. Senaryo 1’de, sıcak su tankının ısıtılması için gerekli enerjinin tamamı doğal gaz kazanından sağlanmaktadır.

%90 verimle çalışan doğal gaz kazan sistemi için enerji-maliyet verileri Çizelge 8’de verilmiştir.

Çizelge 8. Doğal gaz kazan sistemi verileri

Özellikler	Veriler	Kaynak
1 m ³ doğal gazın düşük ısıtma değeri	9,16 kW saat	[27]
Doğal gaz tüketim bedeli	1,393 TL/Sm ³	[28]
Emisyon faktörü, EF	1,92 kg/m ³	[29]

Doğal gaz kazan ısıtma sisteminde, doğal gazın yanması ile açığa çıkacak CO₂ emisyon miktarı Eşitlik 2’den hesaplanır [30].

$$CO_2 \text{ emisyonu} = \text{Isıtma talebi} \times \text{Çalışma saati} / \text{yıl} \times EF \quad (2)$$

2.2.2. Senaryo 2: Güneş Enerjisi ile Doğrudan Isıtma Sistemleri

Senaryo 2’de süt pastörizasyon prosesine güneş enerjisi sistemi entegre edilmiştir. Güneş enerjisi sistemi için, 200 °C sıcaklığa kadar çıkabilen, yüksek verimlilikte Solitem PTC1100 parabolik oluk tipi güneş kolektörü seçilmiştir. Solitem PTC1100 parabolik oluk tipi kolektörün özellikleri Çizelge 9’da verilmiştir.

Çizelge 9. Solitem PTC1100 parabolik oluk tipi güneş kolektörlerinin özellikleri [31]

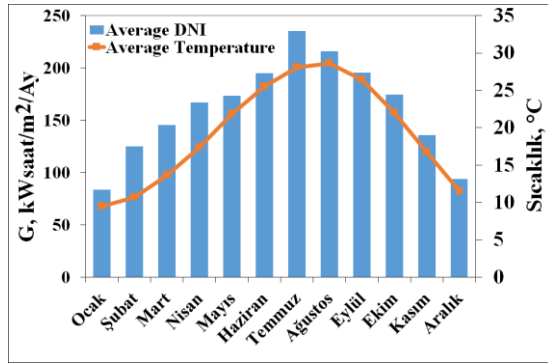
Özellikler	Değerler
Kollektör açıklığı, W_A	: 4,0 m
Kollektör boyu, L_A	: 5,0 m
Optik verim, $\eta_{0,hem}$: 0,75
Isı kaybı katsayısı, a_1	: 0,1123 Wm ⁻² K ⁻¹
Sıcaklığa bağlı ısı kaybı katsayısı, a_2	: 0,00128 Wm ⁻² K ⁻²
Emici boru iç çapı	: 66 mm
Işın gelme açısı, θ	: 45 ° (varsayılan)
Işın gelme açısı düzeltme faktörü, K_{hem}	: 0,92 ($\theta:45^\circ$ için)

PTC 1100 parabolik oluk tipi kolektörde ısı transfer akışkanı olarak Therminol 66 sentetik yağ tercih edilmiştir.

IEA SHC Task 49 A.2.1 nolu teknik rapora göre, endüstriyel prosesler için kolektör alanı Eşitlik 3'den yapılır [32].

$$A = \frac{Q_{\text{proses}}}{G \eta_{0,\text{hem}} K_{\text{hem}} \cdot a_1 (T_{\text{yağ}} - T_{\text{çevre}}) - a_2 (T_{\text{yağ}} - T_{\text{çevre}})^2} \quad (3)$$

Işın gelme açısının, θ , 45° olduğu varsayılmıştır. Bu açıda, ışın gelme düzeltme faktörü (K_{hem}) 0,92'dir [33]. Eşitlik 3'te G , doğrudan ışınım değerini göstermektedir. Kolektör alanı ve kolektörden elde edilebilecek enerji hesabında, G değeri için Adana bölgesi doğrudan ışınım değerleri kullanılmıştır. Adana bölgesi için aylık ortalama ışınım değerleri ve güneşlenme süresi Şekil 6'da verilmiştir.



Şekil 6. Adana bölgesi için aylık ortalama ışınım miktarları ve güneşlenme süreleri [34, 35]

Güneş enerjisi sisteminin yatırım maliyeti hesabında kolektör birim fiyatları Bölüm 2.1.2'de araştırılmıştır. Sistemde bulunan pompa, boru, eşanjör, depolama tankı, yalıtım malzemesinin yaklaşık maliyetleri Çizelge 10'da verilmiştir.

Çizelge 10. Güneş enerjisi sistemi parçalarının ortalama maliyeti [36]

Sistem parçaları	Maliyet (\$)
Pompa	15100
Eşanjör	36300
Boru	2340
İzolasyon	4160

2.2.3. Senaryo 3: Depolama Ünitesi ile Doğrudan Entegrasyon

Senaryo 3'de güneş enerjisi sistemi, TED sistemi ile birlikte süt pastörizasyon prosesine entegre edilmiştir. Güneş enerjisi sistemi için Senaryo 2'deki veriler kullanılmıştır. TED sistemi dolgulu yatakta duyulur ısı depolama olarak tasarlanmıştır. Dolgulu yatak içerisinde, Türkiye'de son yıllarda artan kentsel dönüşümden açığa çıkan ve depolamasında zorluklar yaşanan yıkıntı atıkları, aday termal enerji depolama malzemesi olarak değerlendirilmiştir. Yıkıntı atıklarından duyulur ısı elde edebilmek için uygulanan prosesler ve elde edilen depolama malzemesinin termal ve mekanik özellikleri daha önceki çalışmada ele alınmıştır [37]. Bu çalışmaya göre; yıkıntı atıklarından geliştirilen duyulur ısı depolama malzemelerinin özellikleri Çizelge 11'deki gibidir.

Çizelge 11. Yıkıntı atıklarından geliştirilen depolama malzemelerinin özellikleri [37]

Özellik	Değer	Birim
Yoğunluk	2855	Kgm ⁻³
Özgül Isı	1280@50-100 °C 1457@100-400 °C	Jkg ⁻¹ K ⁻¹
Mukavemet	5,4	MPa
İletkenlik	0,53	Wm ⁻¹ K ⁻¹

TED sistemi içerisinde ısı transfer akışkanı olarak Therminol 66 sentetik yağ kullanılmıştır. Sentetik yağın fiziksel ve termal özellikleri sıcaklıkla değişebilmektedir. Teknik veri sayfasına göre [38], Therminol 66 sentetik yağın sıcaklığa bağımlı yoğunluk ve özgül ısı bağıntıları Eşitlik 4 ve 5'de verilmiştir.

$$\rho_{\text{yağ}} = -0,614254 T - 0,000321 T^2 + 1020,62 \quad (4)$$

$$C_{p_{\text{yağ}}} = 0,003313 T + 0,000008970785 T^2 + 1,496005 \quad (5)$$

Senaryo 3'te entegre edilen dolgulu yatak TED sisteminin verimi %67 olup, maliyet verileri Çizelge 12'deki gibidir.

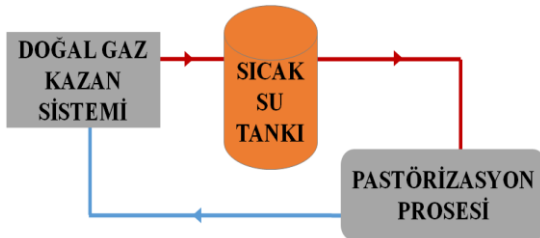
Çizelge 12. TED sistemi parçalarının ortalama maliyeti

Sistem parçaları	Maliyet	Kaynak
Depolama tankı	7000 \$ (4m ³) - 13000 \$ (12m ³)	[36]
Therminol 66 Isı transfer yağı	8,85 \$/kg	[31]
İnşaat atıklarından depolama malzemesi	0,0012 \$/kg	[39]

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1. Senaryo 1: Doğal Gaz Kazan Sistemleri

Senaryo 1’de pastörizasyon prosesinin ihtiyacı olan ısı doğal gaz kazan sisteminden karşılanmaktadır. Şekil 7’de doğal gaz kazan sisteminin pastörizasyon prosesine entegrasyonu gösterilmektedir. Doğal gaz kazanı pastörizasyon ünitesine sıcak su besleyen sıcak su tankını ısıtmaktadır.

**Şekil 7.** Doğalgaz kazan ısı besleme sistemi

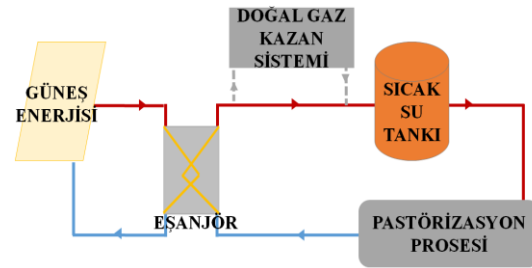
Ele alınan örnek süt pastörizasyon prosesinde, Eşitlik 1’e göre, süt ısıtmak için ihtiyaç duyulan enerji 1641 kW’tır. Soğutma ünitesinden sağlanan geri kazanım (%82) dikkate alındığında, pastörizasyon prosesine için gerekli olan ısı miktarı; 295 kW’tır. Ele alınan işletmede günde 16 saat çalışan pastörizasyon cihazı için gerekli enerji ihtiyacı günlük 4725 kWsaat/gün, yıllık 1700 MWsaat/yıl dır.

Süt ısıtmada kullanılan sıcak suyun debisi (m_{su}) 11,1 kg/s’dir. Suyun özgül ısısı 4186 J/kg°C’dir. Suyun çıkış sıcaklığı (t_{10}) eşitlik 1’den 78,9 °C hesaplanmıştır.

%90 kazan verimli doğal gaz ısıtma sistemlerinde, 1 m³ doğal gazın düşük ısıtma değeri ortalama 9,16 kWsaat’dir [27]. Buna göre, süt pastörizasyon prosesinin 1,7 GWsaat/yıl’lık enerji ihtiyacı için gerekli doğal gaz miktarı yıllık ortalama 185.700 Sm³/yıl’dır. Botaş 2020 yılı Ağustos ayı verilerine göre sanayi bölgesi için doğal gaz tüketim bedeli 1,393 TL/Sm³’dir [28]. Buna göre, ele alınan süt pastörizasyon prosesi için doğal gaz maliyeti 258.680 TL/yıl’dır. Eşitlik 2’ye göre, doğal gazın yanması ile doğaya salınacak CO₂ emisyon miktarı 357 ton/yıl’dır.

3.2. Senaryo 2: Güneş Enerjisi ile Doğrudan Isıtma Sistemleri

Senaryo 2’de süt pastörizasyon prosesi enerji ihtiyacı için güneş enerjisinin prosese doğrudan entegrasyonu incelenmiştir. Şekil 8’de güneş enerjisi sisteminin pastörizasyon prosesine entegrasyonu gösterilmektedir. Kolektörlerden gelen ısı transfer yağlarındaki ısı proses çıkış suyuna eşanjör ile aktarılmaktadır. Güneş enerjisinden gün içerisinde fayda sağlanabilecek süre güneşlenme süresi ile sınırlıdır. Doğal gaz kazan sistemi, güneş enerjisinin etkin kullanılmadığı saatlerde kullanılmak üzere yedek ısıtıcı olarak sistemde bulunmaktadır.

**Şekil 8.** Güneş enerjisi proses seviyesinde doğrudan entegrasyon

Soliterm PTC 1100 parabolik oluk tipi kolektörlerden oluşan alanın büyüklüğü, sistemden yüksek verim sağlanabilmesi için, güneşlenme süresi ve doğrudan ışıma değerinin en düşük olduğu Ocak ayına göre hesaplanmıştır. Şekil 6’da (Bölüm 2.2.2) verildiği üzere Adana bölgesinde Ocak ayında ortalama güneşlenme süresi 4,5 saat, kolektör yüzeyine gelen ortalama doğrudan ışıma

değeri (G) ise 83,48 kWsaat/m²/ay'dır. Minimum ışınlam değeri ve güneşlenme süresi dikkate alındığında, Eşitlik 3'e göre, gerekli olan kolektör alanı 770 m²'dir. 770 m² güneş kolektöründen sağlanabilecek enerji miktarı 1030 MWsaat/yıl'dır. 90% eşanjör verimi dikkate alındığında, süt pastörizasyon prosesinin ihtiyacı olan 880 MWsaat/yıl enerji güneş enerjisinden karşılanabilmektedir. Güneşlenme süresi ve ışınlam miktarının yüksek olduğu dönemlerde prosesin enerji ihtiyacından fazla gelen 150 MWsaat/yıl enerji ise sistemde depolama olmadığı için kullanılamamaktadır. Güneşin etkin olmadığı dönemlerde, süt pastörizasyon prosesi için geri kalan 900 MWsaat/yıl enerji ise doğal gaz kazan sisteminden sağlanmaktadır.

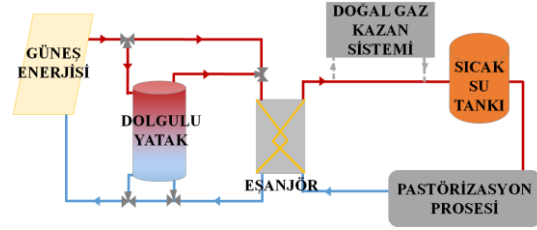
Bu senaryoda 770 m² parabolik oluk kolektör sistemi ile %46,6 enerji verimliliği sağlanabilmektedir. Sağlanan enerji verimliliği doğal gaz tüketimini de aynı oranda azaltarak, doğal gaz maliyetini ve CO₂ emisyonunu sırasıyla 138.200 TL/yıl ve 191 ton/yıl'a düşürmektedir.

Çizelge 4 ve Çizelge 10'daki maliyet verileri dikkate alındığında, süt pastörizasyon prosesi için entegre edilebilecek 770 m² parabolik oluklu güneş kolektör sisteminin maliyeti yaklaşık 1.380.000 TL'dir (\$/TL: 7,3 alınmıştır). Bu sistemde doğal gaz maliyetinden sağlanan yıllık 120.500 TL tasarruf ile güneş enerjisi yatırım maliyeti yaklaşık 11,5 yılda amorti edilebilmektedir.

3.3. Senaryo 3: Depolama Ünitesi ile Doğrudan Entegrasyon

Senaryo 3 ile dolgulu yatakta duyulur ısı depolama sistemi güneş enerjisine entegre edilmiştir. Şekil 9 güneş enerjisinin prosese TED sistemi ile doğrudan entegrasyonunu göstermektedir.

Senaryo 3, Senaryo 2'de olduğu gibi 770 m² PTC1100 parabolik oluk tipi kolektör ile tasarlanmıştır. Senaryo 2'de kayıp olarak belirtilen 150 MWsaat/yıl enerji, bu senaryoda dolgulu yatak depolama tankında depolanmaktadır.



Şekil 9. Depolama ünitesi ile doğrudan entegrasyon

%67 depolama tankı verimi dikkate alındığında, TED sisteminden 100 MWsaat/yıl enerji güneşin etkin olmadığı saatlerde tekrar prosese kazandırılabilir. Bu sayede, enerji verimliliği 46,6%'dan 52,5%'e çıkarılmaktadır. Sağlanan enerji verimliliği ile doğal gaz maliyeti ve CO₂ emisyonu sırasıyla 123.000 TL ve 169 ton/yıl'a düşmektedir.

TED sisteminde depolanan ısı miktarı Eşitlik 6 ve 7'de gösterildiği gibi dolgulu yatak içinde yer alan depolama malzemesi, ısı transfer yağı ve depolama tankını oluşturan diğer malzemelerin (çelik tank vb) depoladıkları toplam enerjidir [40].

$$Q_{\text{sistem}} = Q_{\text{dm}} + Q_{\text{yağ}} + Q_{\text{tank}} \quad (6)$$

$$Q_{\text{sistem}} = (V_{\text{tank}} * (1-\epsilon) * \rho_{\text{dm}} * C_{p_{\text{dm}}} * \Delta T_{\text{dm}}) + (V_{\text{tank}} * \epsilon * \rho_{\text{yağ}} * C_{p_{\text{yağ}}} * \Delta T_{\text{yağ}}) + (m_{\text{tank}} * C_{p_{\text{tank}}} * \Delta T_{\text{tank}}) \quad (7)$$

%30 boşluk oranında yıkıntı atıklarından geliştirilen depolama malzemeleri ile dolu depolama tankında, Therminol 66 sentetik yağı ısı transfer akışkanı olarak kullanılmıştır. Eşitlik 7'ye göre, yatak boşluk oranı, depolama malzemesi ve yağ özellikleri dikkate alındığında, 150 MWsaat/yıl kapasiteli depolama tankının hacmi 4 m³ olmalıdır. TED sisteminin özellikleri Çizelge 13'te verilmiştir.

Özellikleri verilen bu TED sisteminin ısı depolama kapasitesi günlük 417 kWsaat olup, güneşin etkin olmadığı saatlerde süt pastörizasyon ünitesinin enerji ihtiyacına katkı sağlayabilecektir.

Çizelge 13. TED sistem parametreleri

TED sistem özellikleri	Değer	Birim
Depolama Tankı Çapı, D_T	1,2	m
Depolama Tankı Yüksekliği, h_T	3,6	m
Duyulur ısı depolama malzemesi yoğunluğu, ρ_{dm}	2180	Kg/m^3
Duyulur ısı depolama malzemesi özgül ısı, C_{pdm}	1,457	kJ/kgC
Isı transfer yağı yoğunluk, $\rho_{vağ}$	892,8@ 175°C	Kg/m^3
Isı transfer yağı özgül ısı, $C_{pvağ}$	2,103@ 175 °C	kJ/kgC
Yatak boşluk oranı, ϵ	0,30	-
En yüksek sıcaklık, T_{max}	200	°C
En düşük sıcaklık, T_{min}	100	°C

Çizelge 4, 10 ve 12'deki maliyet verilerine göre, Senaryo 3'te ele alınan 770 m² güneş kolektör alanı ve 4 m³ hacimli TED sisteminin toplam maliyeti 1.488.000 TL'dir. Bu sistemde TED maliyeti 109.800 TL olup, bunun 58.600 TL'sini yüksek birim fiyatı nedeni ile Therminol 66 ısı transfer yağı oluşturmaktadır. Bu sistemde doğal gaz maliyetinden sağlanan 135.800 TL/yıl tasarruf ile TED sistemi entegre edilmiş güneş enerjisi yatırımı yaklaşık 11 yılda kendini amorti edebilmektedir.

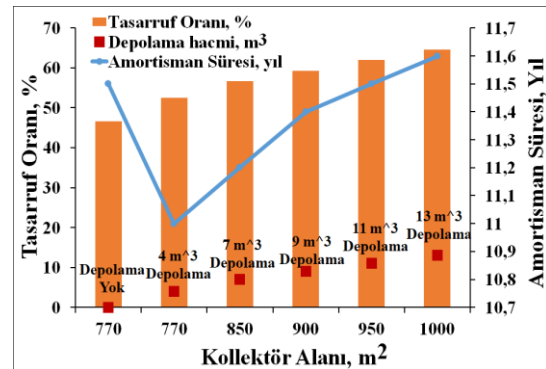
İncelenen senaryoların çevresel ve maliyet analizleri Çizelge 14'de özetlenmiştir. Senaryo 3'ün hem ekonomik hem de CO₂ salınımların azaltımı bakımından en önemli seçenek olduğu görülmektedir.

Çizelge 14. Örnek gıda uygulaması senaryolarının karşılaştırılması

Senaryolar	1	2	3
Enerji tüketimi (TL/yıl)	259.000	138.000	123.000
CO ₂ salınımı, (ton/yıl)	357	191	169
Tasarruf, (%)	-	46,6	52,5
Amortisman süresi (yıl)	-	11,5	11

TED sistemi entegrasyonlu güneş enerjisi sistemlerinde sağlanan tasarruf ve yatırım maliyeti

kolektör alanı ve TED hacmine göre değişebilmektedir. Senaryo 3, farklı güneş kolektör alanı büyüklüğüne göre incelenmiş, sağlanan tasarruf ve yatırım maliyetindeki değişim Şekil 10'da gösterilmiştir. Sistemde güneş enerjisi kolektör alanı ve buna bağlı olarak TED hacmi artırılarak tasarruf oranı artırılabilir. Ancak beraberinde amortisman süresi de artmaktadır. Senaryo 3'te 770 m² kolektör alanı ve 4 m³ depolama hacmi ile sağlanan 52,5% tasarruf, 1000 m² kolektör alanı ve 13 m³ depolama hacmi ile 60%'ın üzerine çıkabilmektedir. Benzer şekilde, Tsuc ve arkadaşları [41]'nin Meksika'da yaptığı bir çalışmada parabolik oluk tipi kolektörlerin endüstriyel proseslere entegrasyonunda proses türü, yedek ısıtıcı türü, iklim türü, kolektör alanı ve depolama kapasitesine bağlı olarak 40-80% arası enerji verimliliği sağlanabileceğini belirtmişlerdir.

**Şekil 10.** Kolektör alanına göre tasarruf oranı ve amortisman süresindeki değişim

4. SONUÇ

Bu çalışmada, endüstride güneş enerjisinin farklı proseslerde uygulanabilmesi için gerekli teknolojiler araştırılmıştır. Güneş enerjisinden öncelikli olarak yararlanılabilecek endüstriyel sektörler ve prosesler belirlenmiştir. Özellikle proseslerin %90'ının 200 °C'nin altında olduğu gıda ve tekstil endüstrileri güneş enerjisi uygulamaları için en uygun endüstri dalları olarak belirlenmiştir. Çalışmada, duyulur ısı depolama, gizli ısı depolama ve termokimyasal ısı depolama sistemleri araştırılmış ve gerek kolay teknolojisi gerekse ekonomik uygulanabilirliği açısından

duyulur ısı depolama yöntemi endüstriyel uygulamalarda en uygun yöntem olarak belirlenmiştir.

Endüstride güneş enerjisi ve TED sistemlerinin entegrasyon yöntemleri belirlenmiştir. Güneş enerjinin endüstriyel proseslere entegrasyonunda doğrudan proses seviyesinde entegrasyon, TED sistemi ile doğrudan entegrasyon ve/veya dolaylı entegrasyon yapılabileceği tespit edilmiştir.

Örnek endüstri uygulaması olarak gıda endüstrisinde süt pastörizasyon prosesi incelenmiştir. Süt pastörizasyon prosesinde ısı ihtiyacının karşılanması için 3 örnek entegrasyon senaryosu sunulmuştur. Bu yöntemler şöyledir:

1. Doğal gaz kazanı ısıtma sistemleri
2. Güneş enerjisi ile doğrudan ısıtma sistemleri
3. Depolama ünitesi ile doğrudan entegrasyon

Bu sistemlerin birbiri ile karşılaştırıldığında, doğal gaz kazan sistemleri 259.000 TL/yıl ile en yüksek enerji tüketim masrafına sahiptir. Doğal gaz tüketim miktarının yüksek olması sebebi ile CO₂ salınımı diğer senaryolara göre çok yüksektir. Amortisman süreleri arasında büyük fark bulunmamasına rağmen, gerek tasarruf oranının yüksek olması gerekse CO₂ salınımının düşük olması sebebi ile TED entegrasyonlu Senaryo 3 endüstriyel uygulamalarda sürdürülebilir faydalar sağlamaktadır.

Bu sonuçlar endüstride güneş enerjisinin termal enerji depolama sistemleriyle beraber kullanıldığında çevreyi koruyan, düşük maliyetli ve sürdürülebilir enerji kaynağı olabildiğini göstermektedir. Özellikle endüstride artan enerji maliyetlerine çözüm sunarak, ürünlerin küresel pazarda yer almasına olanak sağlamaktadır. Ayrıca dışa bağımlı olmayan yerel kaynakların kullanılması enerji güvenilirliği ve ülke ekonomisine katkı açısından da önemlidir.

Bu çalışmada ele alınan TED sisteminde yıkıntı ve inşaat atıklarından elde edilen duyulur ısı depolama malzemesinin kullanımı ile atık malzemelerin değerlendirilip doğal kaynakların korunabildiği çevreci ve ekonomik sistemlerin

kurulabileceği görülmektedir. %30 yatak boşluk oranlı TED sisteminde kullanılan Therminol 66 ısı transfer yağı, yüksek birim fiyatı nedeni ile TED sistemi toplam maliyetinin yarısından fazlasını oluşturmaktadır. Bu durum, dolgulu yatak TED sistemlerinde ucuz ve sürdürülebilir depolama malzemelerinin kullanımı ile ısı transfer yağı kullanım miktarının azaltılmasının önemini gözler önüne sermektedir. İleriki çalışmalar için yüksek maliyetli ısı transfer yağları yerine, düşük maliyetli farklı ısı transfer akışkanları üzerine araştırmalar yapılması önerilmektedir.

5. TEŞEKKÜR

“Endüstriyel uygulamalarda güneş enerjisinden termal olarak yararlanma” başlıklı FBA-2017-6366 bireysel projeye verdiği destekten ötürü, “Çukurova Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) Birimine” teşekkür ederiz.

6. KAYNAKLAR

1. International Energy Agency, Key World energy statistics, 2018.
2. Enerji Verimliliği Çevresi ve Daire Başkanlığı, Yenilenebilir enerji, <http://www.yegm.gov.tr/yenilenebilir.aspx> (Erişim Tarihi:07.01.2020).
3. Lauterbach, C., Schmitt, B., Jordan, U., Vajen, K., 2012. The Potential of Solar Heat for Industrial Processes in Germany, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 16, 5121-5130.
4. Ramos, C., Ramirez, R., Beltran, J., 2014. Potential Assessment in Mexico for Solar Process Heat Applications in Food and Textile Industries, Energy Procedia 49, 1879-1884.
5. Baniassadi, A., Momen, M., Amidpour, M., 2015. A New Method for Optimization of Solar Heat Integration and Solar Fraction Targeting in Low Temperature Process Industries, Energy 90, 1674-1681.
6. Kalogirou, S., 2003. The Potential of Solar Industrial Process Heat Applications, Applied Energy 76, 337-361.
7. Bolognese, M., Viesi, D., Bartali, R., Crema, L., 2020. Modeling Study for Low-carbon Industrial Processes Integrating Solar Thermal

- Technologies. A Case Study in the Italian Alps: The Felicetti Pasta Factory, *Solar Energy*, 208, 548-558.
8. Buscemi, A., Panno, D., Ciulla, G., Beccali, M., Lo Brano, V., 2018. Concrete Thermal Energy Storage for Linear Fresnel Collectors: Exploiting the South Mediterranean's Solar Potential for Agri-food Processes, *Energy Conversion and Management*, 166, 719-734.
 9. Beath, A.C., 2012. Industrial Energy Usage in Australia and the Potential for Implementation of Solar Thermal Heat and Power, *Energy*, 43, 261-272.
 10. Sharma, A.K., Sharma, C., Mullick, S.C., Kandpal, T.C., 2017. Potential of Solar Industrial Process Heating in Dairy Industry in India and Consequent Carbon Mitigation, *Journal of Cleaner Production*, 140, 714-724.
 11. Paksoy, H.Ö., 2007. Thermal Energy Storage for Sustainable Energy Consumption Fundamentals, Case Studies and Design, (Editor: Paksoy H.Ö.), Part of the NATO Science Series, ISBN 978-1-4020-5290-3, 234, 428, Springer, Dordrecht.
 12. Konuklu, Y., Ostry, M., Paksoy, H.O., Charvat P., 2015. Review on Using Microencapsulated Phase Change Materials in Buildings, *Energy and Buildings*, 106, 134-155.
 13. IEA, International Energy Agency, 2019a. World Energy Balances Overview, <https://www.iea.org/reports/world-energy-balances-overview> (Erişim Tarihi:07.01.2020)
 14. EIA, International Energy Outlook, 2016, DOE/EIA-0484(2016), [www.eia.gov/forecasts/ieo/pdf/0484\(2016\).pdf](http://www.eia.gov/forecasts/ieo/pdf/0484(2016).pdf). (Erişim Tarihi:07.01.2020)
 15. IRENA, Solar Heat for Industrial Processes Technology Brief, 2015, http://www.irena.org/DocumentDownloads/Publications/IRENA_ETSAP_Tech_Brief_E21_Solar_Heat_Industrial_2015.pdf, (Erişim Tarihi: 26.01.2020)
 16. Alva, G., Liu, L., Huang, X., Fang, G., 2017. Thermal Energy Storage Materials and Systems for Solar Energy Applications, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 68, 693-706.
 17. Palacios, A., Barreneche, C., Navarro, M.E., Ding Y., 2020. Thermal Energy Storage Technologies for Concentrated Solar Power. A review from a materials perspective, *Renewable Energy*, 156, 1244-1265, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.10.127>
 18. IEA-International Energy Agency, 2015. TCP on Solar Heating and Cooling, Task 45, Seasonal Thermal Energy Storage: Report on State of the art and Further Necessary R&D, (Erişim tarihi: 01.08.2020).
 19. Ayappan, S., Mayilsamy, K., Sreenarayanan, V.V., 2016. Performance Improvement Studies in a Solar Greenhouse Drier Using Sensible Heat Storage Materials. *Heat Mass Transf.*, 52, 459-467.
 20. Prasad, L., Muthukumar, P., 2013. Design and Optimization of Lab-scale Sensible Heat Storage Prototype for Solar Thermal Power Plant Application. *Solar Energy*, 97, 217-229.
 21. Bruch, A., Fourmigue, J.F., Couturiebr, R., 2014. Experimental and Numerical Investigation of a Pilot-scale Thermal Oil Packed Bed Thermal Storage System for CSP Power Plant, *Solar Energy*, 105, 116-125.
 22. Cascetta, M., Cau, G., Puddu, P., Serra, F., 2015. A Study of a Packed-bed Thermal Energy Storage Device: Test Rig, Experimental and Numerical Results, *Energy Procedia* 81, 987-994.
 23. Tiskatine, R., Aharoune, A., Bouirden, L., Ihlal, A., 2017. Identification of Suitable Storage Materials for Solar Thermal Power Plant Using Selection Methodology. *Applied Thermal Engineering*, 117, 591-608.
 24. Calvet, N., Gomez, J.C., Faik, A., Roddatis, V.V., Meffre, A., Glatzmaier, G.C., Doppiu, S., Py, X., 2013. Compatibility of a Post-industrial Ceramic with Nitrate Molten Salts for Use as Filler Material in a Thermocline Storage System, *Applied Energy*, 109, 387-393.
 25. Motte, F., Falcoz, Q., Veron, E., Py, X., 2015. Compatibility Tests Between Solar Salt and Thermal Storage Ceramics from Inorganic Industrial Wastes, *Applied Energy*, 155, 14-22.
 26. Kazimirova, V., 2013. Heat Consumption and Quality of Milk Pasteurization, *Acta Technologica Agriculturae*, 16, 55-58.
 27. Meyers, S., Schmitt, B., Chester-Jones, M., Sturm, B., 2016. Energy Efficiency, Carbon Emissions and Measures Towards Their

- Improvement in the Food and Beverage Sector For six European Countries, *Energy*, 104, 266-283.
28. www.botas.gov.tr (Erişim Tarihi: 17.08.2020)
29. EPA- United States Environmental Protection Agency, <https://www3.epa.gov/ttnchie1/ap42/ch01/final/c01s04.pdf> (Erişim tarihi: 12.06.2020)
30. Sivasakthivel, T., Murugesana, K., Sahoo, P.K., 2012. Potential Reduction in CO₂ Emission and Saving in Electricity by Ground Source Heat Pump System for Space Heating Applications-A Study on Northern Part of India, *Procedia Engineering* 38, 970-979.
31. Horta, P., 2015. Process Heat Collectors: State of the Art and Available Medium Temperature Collectors. Technical Report A.1.3, IEA SHC Task 49, 33.
32. Giovenetti, F., Horta, P., 2016. Comparison of Process Heat Collectors with Respect to Technical and Economic Conditions. IEA SHC Task 49 Technical Report A.2.1, 36.
33. Fischer, S., Kovacs, P., Lampe, C., Serrats E.M., 2013. IEA-SHC TASK 43: Solar Rating and Certification Procedures-White Paper on Concentrating Collectors, International Energy Agency (IEA), Technical report, 74, 2013.
34. Climate-Data, <https://tr.climate-data.org/asya/tuerkiye/adana/adana-239/#climate-graph> (Erişim tarihi: 01.06.2020)
35. Global solar atlas, www.globalsolaratlas.info (Erişim tarihi: 01.06.2020)
36. Costo, A.A., 2016. Integration of a Concentrating Solar Thermal System in an Expanded Cork Agglomerate Production Line. *Yüksek Lisans Tezi, Tecnico Lisboa*, 92, 2016.
37. Koçak, B., Paksoy, H., 2019. Using Demolition Wastes from Urban Regeneration as Sensible Thermal Energy Storage Material. *Int J Energy Res.*, 43, 6454-6460.
38. Therminol 66 teknik veri sayfası, <https://www.therminol.com/product/71093438> (Erişim tarihi: 01.06.2020)
39. Kocak, B., Fernandez, A.I., Paksoy, H., 2021. Benchmarking Study of Demolition Wastes with Different Waste Materials as Sensible Thermal Energy Storage, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 219, 110777.
40. IEA-ECES, 2018. Applications of Thermal Energy Storage in the Energy Transition-Benchmarks and Developments, [Gibb et al., German Aerospace Center (DLR)], IEA Technology Collaboration Programme on Energy Conservation through Energy Storage (IEA-ECES), 154.
41. Tzuc, O.M., Bassam, A., Ricalde, L.J., Jaramillo, O.A., Flota-Bañuelos, M., Soberanis, M.A.E., 2020. Environmental-economic Optimization for Implementation of Parabolic Collectors in the Industrial Process Heat Generation: Case Study of Mexico, *Journal of Cleaner Production*, 242, 118538.