



ENDÜSTRİDE GÜNEŞ ENERJİSİ UYGULAMALARI İÇİN YÜKSEK SICAKLIKTAKİ TERMAL ENERJİ DEPOLAMA

High Temperature Thermal Energy Storage for Solar Heat Industrial Applications

Burcu Koçak
Halime Paksoy

ÖZET

Endüstride üretim maliyetlerini düşürmek, fosil yakıt tüketimini, CO₂ emisyonlarını ve enerji kaynaklarında dış ülkelere bağımlılığı azaltmak için kullanılacak en önemli yenilebilir enerji kaynağı güneştir. Güneş enerjisi yüksek sıcaklıktaki endüstriyel prosesler için uygun olmakla birlikte, verimliliğinin günün saatlerine ve mevsimlere göre farklılık göstermesi, sürekli kullanımının önünde bir engel oluşturmaktadır. Yüksek sıcaklıktaki endüstriyel proseslerin, güneş enerjisinden verimli ve sürekli bir şekilde yararlanabilmesi için termal enerji depolama (TED) teknolojileri kullanılmalıdır. Düşük maliyet ve teknik uygulanabilirlik açısından, yüksek sıcaklıktaki endüstriyel uygulamalarda, atık bazlı depolama malzemelerinin kullanıldığı duyulur ısı TED sistemleri ön plana çıkmaktadır. Bu bildiride, Dünya'daki duyulur ısı TED sistemlerinin endüstriyel uygulamaları ve son teknolojiler analiz edilerek, Türkiye'deki fırsatlar ve potansiyel ortaya konmuştur.

Anahtar Kelimeler: Duyulur ısı termal enerji depolama, Güneş enerjisi, Güneş enerjisi endüstriyel uygulamaları

ABSTRACT

Solar energy is the most important renewable energy source that can be used in the industry to reduce production costs, fossil fuel use, CO₂ emissions and dependence on foreign countries for energy resources. Although solar energy is suitable for high temperature industrial applications, variability in its efficiency according to the time of the day and seasons is the main obstacle for its continuous usage. Thermal energy storage (TES) technologies should be used in high temperature solar heat industrial applications to obtain continuous and higher efficiency from solar energy. In terms of low cost and technical applicability, sensible heat TES systems using waste-based materials as storage materials come forward in high temperature solar heat industrial applications. In this paper, latest technologies on sensible heat TES technologies for solar heat industrial applications are investigated to reveal opportunities in Turkey.

Key Words: Sensible heat thermal energy storage; Solar energy, Solar heat industrial applications.

1. GİRİŞ

Türkiye'de enerji arzının %85'i çevreye dönüşü olmayan zararlar veren fosil yakıtlardan karşılanmaktadır. Ne yazık ki, taş kömürü ve doğalgazın neredeyse tamamı, ham petrolün ise %90'ı dış ülkelere yüksek maliyetle ithal edilmektedir. TÜİK 2017 verilerine göre, Türkiye'de enerji tüketimi 107 milyon TPE'ye ulaşmış, en çok tüketen sektörlerden biri olan endüstrinin payı %33 olarak gerçekleşmiştir [1].

Endüstride fosil yakıt yerine kullanılacak en önemli yenilebilir enerji kaynağı güneştir. Güneş, enerjisi en bol ve sınırsız yenilenebilir enerji kaynağıdır. Güneşin sahip olduğu enerji potansiyeli yılda

yaklaşık 1575 ile 49.837 EJ arasındadır [2]. Ancak 2017'de dünyada yalnızca 1,43 EJ güneş termal enerjisi tüketilmiştir [3].

Güneş enerjisi bol olmasına rağmen, güneş ışınımı iklime ve konuma (enlem ve boylam) bağlı olarak değişir. Bu nedenle, güneş enerjisi endüstriyel uygulaması her yerde mümkün olmayabilirken, bazı bölgeler güneş enerjisi endüstriyel uygulamaları için büyük avantajlara sahiptir [4].

Uluslararası Enerji Ajansı (IEA) 2018 yılı verilerine göre dünya genelinde sadece 741 adet güneş enerjisi endüstriyel uygulaması bulunmaktadır [3]. Bunların çoğu Amerika, İspanya, Almanya ve güney Afrika gibi ülkelerde yer almaktadır [5]. Türkiye, güneş enerjisi potansiyeli en yüksek ülkeler arasında yer almaktadır. Global Solar Atlas'a göre Türkiye için yıllık ortalama direk normal ışınım (DNI) değeri yılda 1537 kWhm⁻²'dir [6]. Ancak, Türkiye'de düşük sıcaklıktaki kısıtlı miktardaki sıcak su üretimi dışında güneş enerjisi endüstriyel uygulaması bulunmamaktadır.

Güneş enerjisi, yüksek sıcaklıktaki endüstriyel prosesler için büyük bir fırsat olmakla birlikte, verimliliğinin günün saatlerine ve mevsimlere göre farklılık göstermesi, sürekli kullanımının önünde bir engel oluşturmaktadır. Yüksek sıcaklıktaki endüstriyel proseslerin, güneş enerjisinden verimli ve sürekli bir şekilde yararlanabilmesi için termal enerji depolama (TED) teknolojileri kullanılmalıdır. Özellikle, AB "Yeşil Mutabakatı"na ve AB sınırlarında getirilmesi planlanan karbon vergisi uygulamasına uyumlu endüstriyel üretim yapılabilmesi için güneş enerjisinden verimli ve ekonomik olarak yararlanılmasında TED kullanımı her zamankinden daha çok önem kazanmaktadır.

Duyulur ısı depolama, gizli ısı depolama ve termo-kimyasal ısı depolama olmak üzere 3 farklı TED teknolojisi bulunmaktadır. Uygun TED yönteminin seçiminde proses türü ve sıcaklıkları önemli parametrelerdir. Termokimyasal depolama yöntemi teknoloji hazırlık seviyesi (Teknolojik hazırlık seviyesi -THS<4) düşük olup, yüksek maliyeti nedeni ile sanayide kullanımı halen araştırılmaktadır. Faz değiştiren maddelerin teknik zorlukları, yüksek maliyeti nedeniyle, gizli ısı depolama yöntemi de endüstriyel uygulamalarda henüz ticari olarak uygulanmamaktadır (THS:5-6). Duyulur ısı depolama yöntemi (THS: 8-9) ise yüksek sıcaklıkta endüstriyel uygulamalar için ısıyı depolamanın en basit ve ekonomik olarak uygun yoludur [7].

Düşük maliyet ve teknik uygulanabilirlik açısından yüksek sıcaklıktaki endüstriyel uygulamalarda duyulur ısı TED sistemleri ön plana çıkmaktadır. Ancak, duyulur ısı depolama malzemelerinin düşük depolama kapasitesi, TED sisteminin birim hacimde depolama kapasitesini düşürmekte ve daha fazla depolama hacmine gerek duyulmasına neden olmaktadır [8]. Duyulur ısı depolama sistemlerinde ihtiyaç duyulan yüksek hacim sebebi ile son yıllarda ucuz, çevreci ve yüksek enerji kapasiteli depolama malzemeleri üzerine çalışmalar artmış, alternatif duyulur ısı depolama teknolojileri araştırılmaya başlanmıştır. Bu amaçla ülkemizdeki kentsel dönüşüm yıkıntı atıklarından ucuz ve sürdürülebilir TED malzemesi geliştirilmiştir.

Duyulur ısı TED sistemlerinde elde edilebilecek verimi artırmak ve endüstriyel ölçekli uygulamalarda ekonomik çözümler sunabilmek için atık bazlı depolama malzemeleri, yüksek verimli TED sistemleri ve endüstriyel prosese entegrasyon yöntemleri ile ilgili çalışmalar önem kazanmaktadır. Bu bildiride, Dünya'daki TED endüstriyel uygulamaları ve son teknolojiler analiz edilerek, Türkiye'deki fırsatlar ve potansiyel ortaya konacaktır.

2. DUYULUR ISI DEPOLAMA

Güneş enerjisi, geceleri ve bulutlu günlerde güneş ışığı eksikliğinden dolayı kesintili bir enerji kaynağıdır [9]. Güneş enerjisi birçok endüstriyel süreçte kullanılabilmesine rağmen, güneş ışığının değişkenliği, sürekli kullanımın önündeki ana engeldir.

Duyulur ısı TED sistemlerinde, termal enerji, TED malzemelerinin sıcaklık değişiminden faydalanılarak depolanmaktadır. TED malzemelerinde depolanan duyulur ısı miktarı ($Q_{\text{depolanan}}$) TED malzemesinin kütlesi (m_{STESM}), TED malzemesinin özgül ısısı (C_p), TED sisteminin başlangıç ve son sıcaklığının farkının ($T_s - T_0$) bir fonksiyonudur (Bakınız eşitlik 1) [10].

$$Q_{\text{depolanan}} = m_{\text{STESM}} \cdot C_p \cdot (T_s - T_0) \quad (1)$$

Duyulur ısı TED sistemlerinde gizli ısı TED ve termokimyasal TED sistemlerine kıyasla daha fazla hacime ihtiyaç duyulmasına rağmen, basit teknolojisi ve yağ, taş, kum, atık malzeme gibi ucuz ve dayanıklı TED malzemeleri ile yüksek sıcaklıktaki endüstriyel uygulamalarda en çok tercih edilen yöntemdir [10].

2.1 Yüksek Sıcaklıkta Duyulur Isı TED Sistemleri

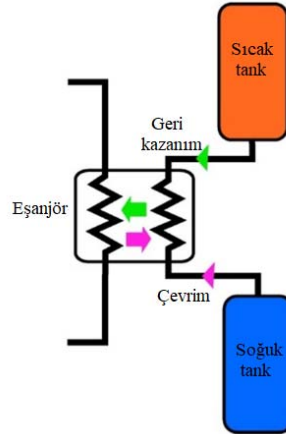
Yüksek sıcaklıkta endüstriyel uygulamalarda duyulur ısı TED sistemleri güneş enerjisinin verimliliğini artırmaktadır. Yüksek sıcaklık uygulamaları için farklı tasarım ve teknolojilerde duyulur ısı TED sistemleri bulunmaktadır. Bunlardan en yaygın olanları şöyledir:

- 2-tanklı TED
- Tek tanklı termoklin TED
- Dolgulu yatak TED
- Beton TED
- Parçacık bazlı akışkan yatak TED
- Borulu eşanjör TED sistemleri.

Her teknoloji farklı avantajlar ve dezavantaj sunmaktadır. Uygun TED teknolojisinin seçimi depolama kapasitesi, verimlilik, depolama süresi, montaj, boyut, maliyet, sıcaklık aralığı, depolama malzemesinin temini, ısı kaybı, güvenlik ve çevre gibi etmenlere bağlıdır [11, 12].

2.1.1 2-Tanklı TED Sistemi

2-tanklı TED sistemleri biri soğuk diğeri sıcak olmak üzere iki adet tank, eşanjör ve pompadan oluşur. Şekil 1'de 2-tanklı depolama sistemi gösterilmektedir. Bu sistemde, soğuk ve sıvı haldeki TED malzemesi, pompa ile soğuk tanktan sıcak tanka aktarılırken, güneş kolektöründen gelen sıcak ısı transfer akışkanındaki ısı, eşanjörde soğuk ısı transfer akışkanı tarafından emilir. Sıcaklığı artan TED malzemesi sıcak tanka gider. Böylelikle, güneşten gelen ısı, sıcak tankta depolanmış olur. Güneşin etkin olmadığı saatlerde ise sıcak tanktaki ısı, sıcak ısı transfer akışkanı eşanjörden geçirilerek geri kazanılır.



Şekil 1 2-tank eriyik tuz TED sistemi [13]

2.1.2 Termoklin TED Sistemi

Tek tanktan oluşan termoklin TED sistemleri, hem sıcak hem de soğuk depolamada kullanılabilen, en yaygın TED sistemleridir. Termoklin TED sisteminin basit şeması Şekil 2'de gösterilmiştir. Tankın içerisinde, ilgili endüstriyel prosesin sıcaklık aralığında kullanılacak, eriyik tuz, termal yağ gibi ısı transfer akışkanı bulunmaktadır. Çevrim ve geri kazanım aşamalarından oluşan termoklin depolama sistemlerinde, çevrim esnasında, güneş kolektörlerinden gelen ısı transfer akışkanı depolama tankına tankın üst kısmından girer. Tankın alt kısmından çıkan soğuk ısı transfer akışkanı güneş kolektörüne döner. Yoğunluk farkından dolayı sıcak ısı transfer akışkanı soğuk ısı transfer akışkanı ile karışmaz.

Bu sayede tank içerisinde termoklin adı verilen tabakalaşma oluşur. Bu tabakalaşma ne kadar iyi olursa depolama verimi o kadar yüksek olur [14]. Tekrarlanan çevrimler sonrasında tankın alt bölgesindeki sıcaklık üst bölge sıcaklığına yaklaşır, böylelikle depolama tankındaki ısı transfer akışkanı güneşten gelen ısıyı depolamış olur. Güneşin etkin olmadığı saatlerde ise geri kazanım çevrimleri ile tanktaki ısı ilgili endüstriyel procese aktarılır. Geri kazanım esnasında processten gelen soğuk ısı transfer akışkanı tankın altından girer ve tankın üst kısmından çıkan sıcak ısı transfer akışkanı processe verilir. Geri kazanım işlemi tankın üst kısmının sıcaklığı alt kısma yaklaştığında sona erer.

Tankın içerisinde bulunan ısı transfer akışkanı ve kullanılacak sıcaklık aralığı tank malzemesi seçiminde etmelidir. Tanklar paslanmaz çelik, fiberglas veya betondan üretilebilir [15]. Tankın dış yüzeyi izolasyon malzemesi ile kaplanarak ısı kayıpları azaltılır.

Endüstriyel uygulamalarda termoklin TED sistemlerinde en yaygın kullanılan ısı transfer akışkanı sudur. Ancak basınçlı sistem kullanılmadığı takdirde 95 °C'in üzerindeki TED sistemlerinde depolama malzemesi olarak su kullanımı uygun değildir [16]. Daha yüksek sıcaklıklardaki prosesler için termal yağ veya eriyik tuz kullanılabilir [17]. Yüksek sıcaklıktaki uygulamalarda tek tank termoklin TED sistemleri 2-tanklı depolama sistemlerine kıyasla yaklaşık %35 maliyet avantajı sağlamaktadır [10].



Şekil 2. Termoklin TED sistemi [18]

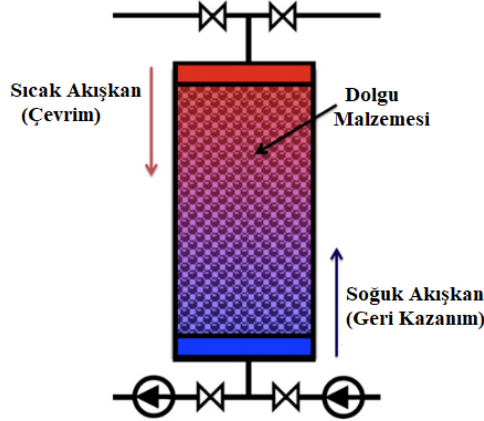
2.1.3 Dolgulu Yatak TED Sistemi

Eriyik tuzlar ve mineral yağlar yüksek sıcaklıkta TED uygulamaları için alternatif depolama malzemesi olsalar da, yüksek maliyet ve sınırlı operasyon sıcaklık aralığı sebebi ile kaya, çakıl, seramik, alüminyum, endüstriyel atıklar gibi depolama malzemeleri doldurulmuş dolgulu yatakta kullanımı ön plana çıkmaktadır [2, 19].

Dolgulu yatak TED sistemleri, uygun depolama malzemesi ve ısı transfer akışkanı seçimi ile 1000 °C'ye kadar uygulamalar için en ucuz ve basit depolama seçeneğidir [10]. Şekil 3'de dolgulu yatak depolama tankının şeması görülmektedir. Dolgulu yatak TED sistemlerinde, tankın içerisinde taş, seramik, çakıl, atık malzeme vb depolama malzemesi bulunmaktadır. Isı transfer akışkanı olarak proses sıcaklık aralığına ve depolama malzemesinin özelliklerine bağlı olarak hava, su, yağ, eriyik tuz vb kullanılabilir. Dolgulu yatak TED sistemlerinde, tek tank termoklin sistemlerine kıyasla, yüksek sıcaklık uygulamalarında kullanılan yüksek fiyatlı eriyik tuz ve termal yağların kullanım miktarı %70'e kadar azaltılmış olur [17].

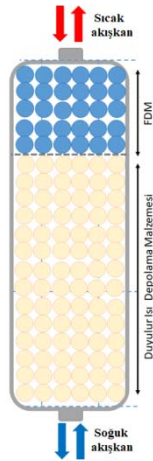
Dolgulu yatak TED sistemlerinde çevrim aşamasında sıcak ısı transfer akışkanı tankın üst kısmından girer. Sıcak akışkan tankın içerisinden geçerken depolama malzemeleri ısıyı emerek depolar. Çevrim aşaması tankın alt kısmı ile üst kısmının sıcaklığı yaklaşıncaya kadar devam eder. Depolama tamamlandıktan sonra, ihtiyaç duyulduğu dönemde geri kazanım başlar. Geri kazanımda soğuk ısı transfer akışkanı tankın alt kısmından girer. Bu sefer, tanktaki sıcak depolama malzemeleri ısını soğuk ısı transfer akışkanına aktarır. Isınan ısı transfer akışkanı tankın üst kısmından çıkarak, ısını

aktarmak üzere prosese gider. Bu döngü yine tankın üst ve alt sıcaklığı yaklaşıma kadar devam eder [17].



Şekil 3 Dolgulu Yatak TED sistemi [20]

Depolama sisteminin hacminin artması, yatırım maliyeti, depolama malzemesi ve ısı transfer akışkanı miktarını artırmakta ve endüstriyel uygulamalarda TED sisteminin kurulumu için arazi sıkıntısına sebep olmaktadır. Bunun yanı sıra, duyulur ısı TED sistemlerinde prosese gönderilen akışkanın sıcaklığında dalgalanmalar yaşanırken, tabakalaşma seviyesinin düşük olduğu durumlarda depolama verimi de düşmektedir. Son yıllarda endüstriyel uygulamalarda TED depolama kapasitesini artırmak için duyulur ısı depolama malzemeleriyle beraber faz değiştiren malzemelerim (FDM) de kullanılabilceği hibrit sistemler ile ilgili literatürde bazı çalışma bulunmaktadır. 120–400 °C aralığında yapılan bu çalışmaların genellikle laboratuvar boyutunda düzenekler olduğu ve yoğunlaştırılmış güneş enerjisi uygulamalarına yönelik olduğu görülmektedir [21, 22]. Şekil 4'de hibrit dolgulu yatak TED sisteminin şeması gösterilmektedir.



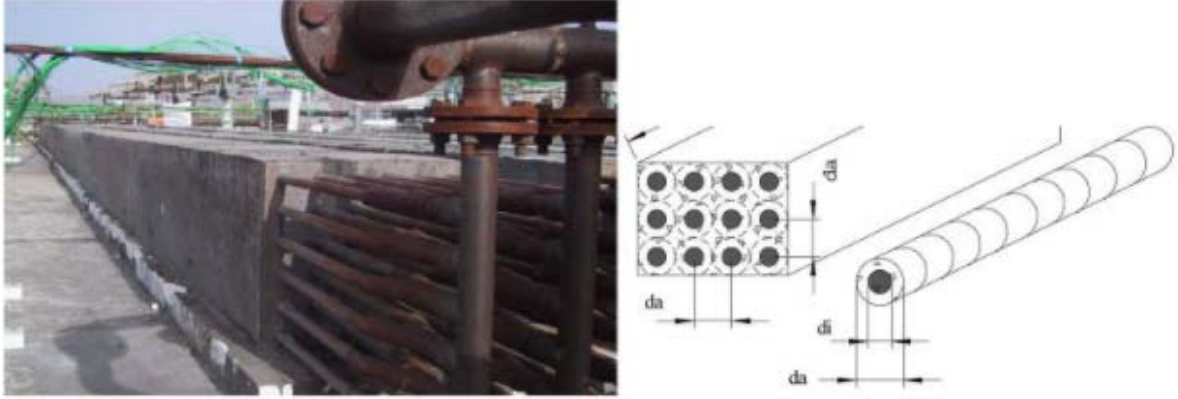
Şekil 4 Hibrit dolgulu yatak TED sistemi

2.1.4 Beton TED Sistemi

Beton bazlı TED sistemleri düşük depolama kapasitesi, yüksek ısı kaybı ve geniş kurulum alanına ihtiyaç duyulması sebebi ile dezavantaj oluştursa da kurulum maliyetinin ve çevresel etkilerinin düşük olması sebebi ile büyük ölçekli uygulamalarda fırsat sunmaktadır [10, 23]. Beton TED sistemleri 400 °C'ye kadar olan uygulamalarda kullanılabilir. Bazı çalışmalarda, çimento, kül, çelik tozları vb katkı malzemeleri ile betonun sıcaklık dayanımı artırılarak uygulama alanı 600 °C'ye kadar çıkarılabilmektedir [24, 25].

Şekil 5'te İspanya'da kurulu DLR tarafından geliştirilmiş beton TED depolama sistemi gösterilmektedir. Bu şekilde görüldüğü üzere monoblok şeklinde tasarlanan beton TED sistemi içerisinde boru ağı

mevcuttur. Borular birbirine paralel olarak yerleştirilmiştir. Boruların dizilimi, birbirleri arasındaki mesafe, çapı, sızıntı yapmaması vs beton TED sisteminin performansını etkileyen önemli parametrelerdir [26]. Güneş panelinden gelen sıcak ısı transfer akışkanı bu borulardan geçirilerek betonun ısıyı depolaması sağlanır. Geri kazanımda ise soğuk ısı transfer akışkanı borulardan geçirilir ve sıcak betondaki ısı geri kazanılır.

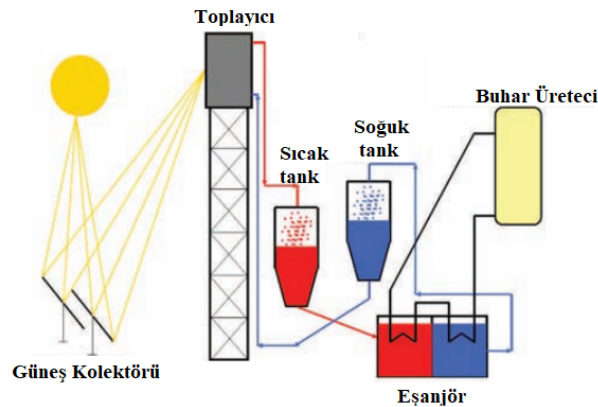


Şekil 5 Beton TED sistemi [26]

2.1.5 Parçacık Bazlı Akışkan Yatak TED Sistemi

Parçacık bazlı akışkan yataklı TED sistemlerinde depolama malzemesi olarak düşük fiyatlı ve yüksek sıcaklıklara dayanıklı kum, çimento vb katı parçacıklar kullanılmaktadır. Bu yönüyle eriyik tuzlara kıyasla hem yarı yarıya maliyet avantajı sağlamakta hem de 700 °C'nin üzerindeki proseslere entegre edilebilmektedir [27]. Şekil 6 'da parçacık bazlı akışkan yatak TED sisteminin çalışma mekanizması gösterilmektedir. Akışkan yatak TED sistemlerinde, soğuk tankta bulunan katı parçacıklar ısı transfer akışkanının hareketiyle, güneş kolektörlerinden gelen ısıyı emmek üzere toplayıcıya gönderilir. Isınan katı parçacıklar koni şeklindeki sıcak tanka aktarılır. Sıcak tankta bulunan katı parçacıklardaki ısı ise bir eşanjör yardımıyla prosese aktarılabilir. Eşanjör sonrası soğuyan katı parçacıklar tekrar soğuk tanka aktarılır.

Düşük maliyetli, yüksek verimli ve yüksek depolama kapasiteli sistemlerdir. Sistemde kullanılan katı parçacıklar 0,3 mm-1,0 mm aralığında olabilmektedir. Eriyik tuz, su vb depolama malzemeleri gibi soğukta donma problemi yoktur [28].



Şekil 6 Parçacık bazlı akışkan yatak TED sistemi [29]

2.1.6 Borulu Eşanjör TED Sistemi

Borulu eşanjör TED sistemleri, kapalı bir gövde içerisinde paralel olarak yerleştirilmiş ince borulardan oluşmaktadır. Gövde ile ince borular arasındaki boşluk depolama malzemesi ile doldurulur. Bu malzemeler kum benzeri küçük parçacıklardır. Depolama esnasında güneş kolektöründen gelen sıcak ısı transfer akışkanı gövde içerisindeki ince borulardan geçirilerek, ısını gövde içerisindeki depolama malzemesine aktarması sağlanır. Geri kazanım esnasında ise soğuk ısı transfer akışkanı ince borulardan geçirilerek sıcak depolama malzemesindeki ısıyı emerek ilgili prosese gönderilir [30]. Şekil 7'de borulu eşanjör TED sisteminin üstten görünümü gösterilmektedir. Isı transfer akışkanı borular ile ayrıldığı için depolama malzemesine doğrudan teması bulunmamaktadır.

Borulu eşanjör TED sistemleri termoklin sistemlere kıyasla daha pahalı sistemler olsa da 2-tank eriyik tuz sistemlerine kıyasla %17 maliyet avantajı sağlamaktadır [31].



Şekil 7 Borulu eşanjör TED sistemi [30]

2.2 Duyulur Isı Depolama Malzemeleri

Duyulur ısı depolama malzemeleri katı, sıvı ve atık bazlı malzeme olmak üzere 3 gruba ayrılabilir (bkz Tablo 1). Sıvı duyulur ısı depolama malzemeleri içerisinde su en yaygın kullanılan depolama malzemesidir. Ucuz, kolay bulunabilen, toksik olmayan ve yüksek enerji kapasitesine sahip olan bir malzemedir. Fakat atmosferik koşullarda 95 °C'nin üzerindeki uygulamalarda kullanılamamaktadır [11, 32]. NaCl, KCl, MgCl₂ gibi eriyik tuzlar veya bunların karışımları 700 °C'ye kadar olan TED sistemleri için uygundur. Ancak akış hatlarında donabilmekte ve tank, boru vb malzemelerde korozyon problemlerine sebep olabilmektedir. Mineral yağlar yüksek sıcaklık uygulamaları için uygun depolama malzemelerinden biridir. Donma noktalarının düşük olması kış dönemi için bir avantaj yaratsa da 350 °C üzerinde bozunmaya başlamaktadır. Bunun yanı sıra, Tablo 1'de görüldüğü gibi, birim fiyatı diğer depolama malzemelerine kıyasla daha yüksektir [2, 17].

Eriyik tuz ve mineral yağların yüksek sıcaklıkta TED uygulamalarında görülen bu dezavantajlarından dolayı, silika kum, doğal taş, çelik, alüminyum, beton, basalt vb doğal malzemeler alternatif depolama malzemesi olarak kullanılmaya başlanmıştır [33, 34]. Literatürde katı depolama malzemelerinin yüksek sıcaklık TED uygulamalarında performansını gösteren birçok çalışma bulunmaktadır. Her ne kadar bu malzemelerin özgül ısıları çok yüksek olmasa da (500 Jkg⁻¹C⁻¹ - 1300 Jkg⁻¹C⁻¹), yüksek yoğunlukları sebebi ile enerji yoğunlukları 5000 kJm⁻³K⁻¹'e çıkabilmektedir [35- 38].

Yüksek depolama kapasitesi, ucuz olması, termal ve kimyasal özelliklerinin dayanıklı olması sebebi ile katı duyulur ısı depolama malzemeleri yüksek sıcaklıktaki endüstriyel uygulamalarda tercih edilmektedir. Ancak, büyük ölçekli sistemlerde tonlarca malzeme kullanılması doğal malzemelerin tüketilmesine sebep olmaktadır. Bu sebeple, son dönemlerde, atık bazlı duyulur ısı depolama malzemeleri üzerine çalışmalar yürütülmektedir. Tablo 1'de görüldüğü üzere endüstriyel yan ürünler, endüstriyel fırın cürüfları, inşaat ve yıkıntı atıkları ve diğer kentsel atıklar, duyulur ısı depolama malzemesi olarak değerlendirilebilir.

Atık bazlı duyulur ısı depolama malzemeleri yüksek enerji yoğunlukları, termal, kimyasal ve mekanik dayanıklılıkları ve düşük fiyatları açısından yüksek sıcaklıktaki endüstriyel uygulamalar ile hem çevreci hem de ekonomik çözümler sunmaktadırlar.

Duyulur ısı depolama malzemesi olarak inşaat ve yıkıntı atıklarından geliştirilen TED malzemeleri 750 °C'ye kadar endüstriyel uygulamalar için umut vadetmektedir. Şekil 8'de kentsel dönüşüm sonucu açığa çıkan yıkıntı atıkları (a) ve bu atıkların proses edilmesiyle elde edilen küresel TED malzemeleri (b) gösterilmektedir. Önceki çalışmalarda, kentsel dönüşümden alınan inşaat atıklarından ezme, eleme, karıştırma, harç yapma, kalıpla ve kurutma prosesleri ile duyulur ısı depolama malzemesi geliştirilmiştir. Koçak ve Paksoy [39] inşaat atıklarından geliştirilen duyulur ısı depolama malzemelerinin termal, kimyasal ve mekanik özelliklerini incelenmiş, malzemenin 750 °C'ye kadar endüstriyel uygulamalar için uygun olduğunu tespit etmiştir. Koçak ve ark. [19], inşaat atıklarından geliştirilen duyulur ısı depolama malzemesini literatürdeki diğer atık ve endüstriyel yan ürünlerden geliştirilen depolama malzemeleri ile karşılaştırmış, malzemenin diğer aday depolama malzemelerine kıyasla 10 kat daha ucuz olduğu ve benzer ya da daha iyi depolama özelliklerine sahip olduğunu belirlemişlerdir. Koçak ve Paksoy [17], yıkıntı atıklarından geliştirilen bu depolama malzemelerini laboratuvar ölçekli bir dolgulu yatak depolama sisteminde 120-180 °C sıcaklık aralığında test ederek, dolgulu yatak depolama sisteminden optimum çalışma şartlarında %67'ye varan verim alınabileceğini göstermiştir. Süt pastörizasyon prosesi örnek alınarak yapılan bir simülasyon çalışmasında [40], TED sisteminde yıkıntı ve inşaat atıklarından elde edilen duyulur ısı depolama malzemesinin kullanımı ile atık malzemelerin değerlendirilip doğal kaynakların korunabileceği çevreci ve ekonomik sistemlerin kurulabileceği gösterilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 8. Kentsel dönüşüm projesinden açığa çıkan yıkıntı atığı (a), Yıkıntı atığından geliştirilen duyulur ısı depolama malzemesi (b)

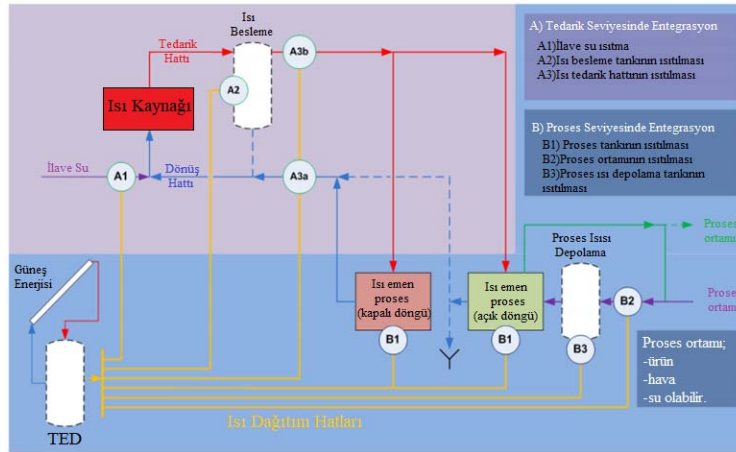
Tablo 1. Duyulur ısı depolama malzemelerinin özellikleri

	Duyulur Isı Depolama Malzemeleri	Sıcaklık, °C	Enerji Yoğunluğu, $\text{kJm}^{-3}\text{K}^{-1}$	Fiyat*	Kaynak
Atık Malzemeler	İnşaat atığı	<750	3500-4000	<0.009 TL/kg	[39]
	Endüksiyon fırın cürufu (IFS)	<1000	1200 - 1850	<0.009 TL/kg	[41]
	Asbestos içerikli atıklar (Cofalit)	<1100	2490 - 3220	<0.009 TL/kg	[42]
	Elektrikli ark fırın cürufuları (EAF)	<1100	3200 - 3400	<0.009 TL/kg	[43]
Katkı Malzemeler	Beton	<400	1900	0.43 TL/kg	[33]
	Dökme Çelik	<700	4700	34TL/kg	[33]
	Tuğla	<1200	3500	17TL/kg	[33]
	NaCl	<500	1800	1.0TL/kg	[33]
	Metal Alaşımlar	450-620	3000-4500	NA	[44]
Sıvı Malzemeler	Solar Tuz ($\text{NaNO}_3\text{KNO}_3$)(50-50)	<600	2800	3,4 TL/kg	[44]
	HITEC, $\text{NaNO}_3 - \text{KNO}_3\text{-NaNO}_2$ (7-53- 40)	<535	2560	4,3 TL/kg	[2]
	Karbonatlı Tuz	<850	3800	18,7 TL/kg	[33]
	Nitratlı Tuz	<565	3000	3,4 TL/kg	[33]
	Therminol 66	<340	1800	50 TL/kg	[17]

*8,5 TL/€ alınmıştır.

3. TERMAL ENERJİ DEPOLAMA SİSTEMLERİNİN ENTEGRASYONU

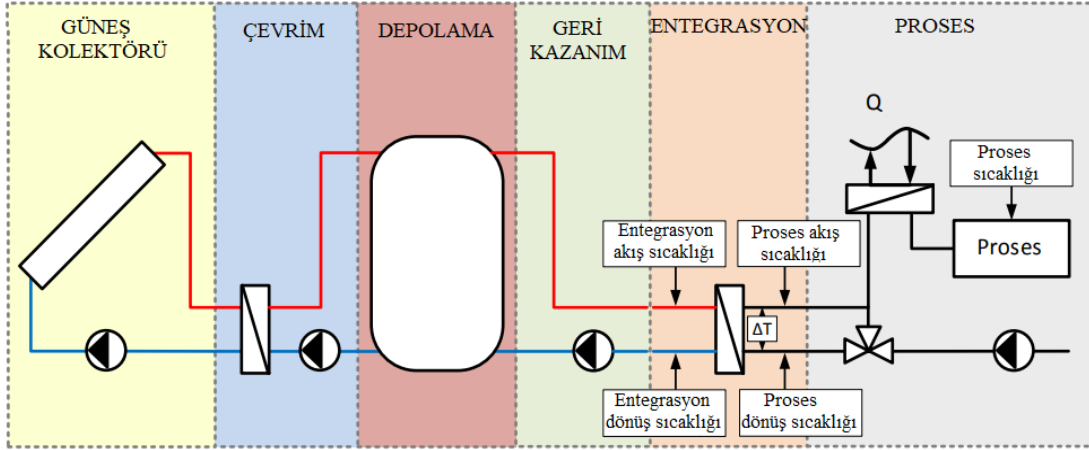
Endüstriyel prosese uygun olarak tasarlanmış TED sistemi, söz konusu endüstriyel tesise birkaç olası noktada entegre edilebilir. Endüstriyel tesislerdeki entegrasyon noktaları, Şekil 9'da gösterildiği gibi tedarik seviyesi ve proses seviyesi olarak iki gruba ayrılabilir.



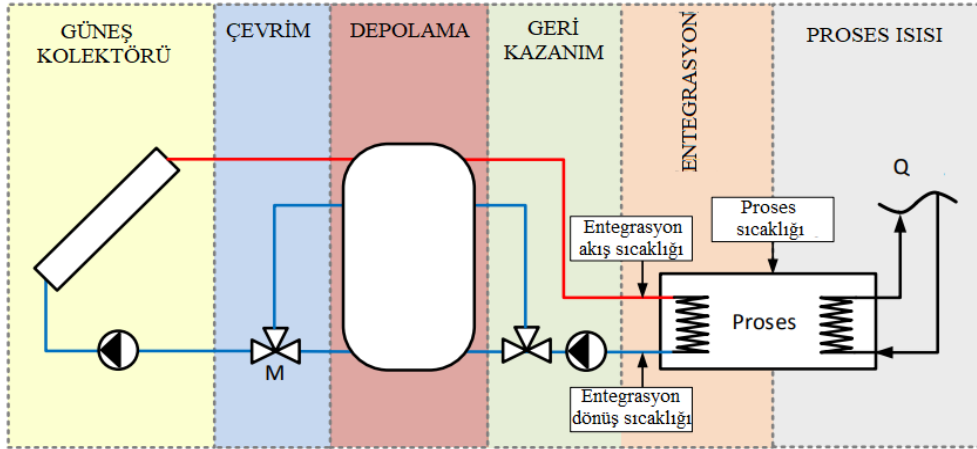
Şekil 9. TED sistemlerinin endüstriye entegrasyonu; A)Tedarik seviyesi, B)Proses seviyesi [45]

Tedarik seviyesinde, TED sistemi endüstriyel prosese bir ısı kaynağı ile entegre edilir. Dış ısı kaynakları genellikle doğal gaz, fuel-oil veya kömür gibi fosil yakıtları yakan kazanlardır. Kazanlardan elde edilen ısı, TED sisteminden gelen ısı transfer akışkanının sıcaklığını artırmak için kullanılır. Proses seviyesinde, TED sistemi doğrudan belirli bir prosese entegre edilir. Lauterbach ve arkadaşlarına [46] göre, her iki entegrasyon yönteminin kendine özgü avantajları ve dezavantajları bulunmaktadır. TED sistemlerinin endüstriyel proseslere etkin entegrasyonunu sağlamak için proses sıcaklık aralığı, enerji talebi, proses süresi vb. endüstriyel proses gereksinimleri ile depolama kapasite, süresi, tank boyutu vb. TED sistem parametreleri dikkate alınmalıdır [47].

Proses seviyesinde entegrasyonda doğrudan ve dolaylı olmak üzere 2 yöntem bulunmaktadır. Dolaylı entegrasyonda, Şekil 10'da görüldüğü üzere, depolama sistemi güneş kolektörü ve prosese bir eşanjör ile bağlanmıştır. Bu sistemlerde dolama tankındaki ısı transfer akışkanı, güneş kolektörü ve proses akışkanından farklı olabilmektedir. Depolamadan prosese aktarılan ısı, bir yedek ısıtıcı ile desteklenebilmektedir. Ancak bu sistemlerde ek eşanjörlerin kullanılması ısı kayıplarını ve maliyeti artırabilmektedir [45]. Şekil 11'de doğrudan entegrasyon yöntemi verilmiştir. Doğrudan entegrasyonda güneş kolektörü ve depolama sistemindeki ısı transfer akışkanı aynı olup, kolektörden gelen ısı transfer akışkanı doğrudan depolama sistemine verilmektedir. Depolama sisteminde geri kazanım esnasında elde edilen ısı, prosese bir eşanjör yardımıyla aktarılabilir.



Şekil 10. Dolaylı entegrasyon [45]



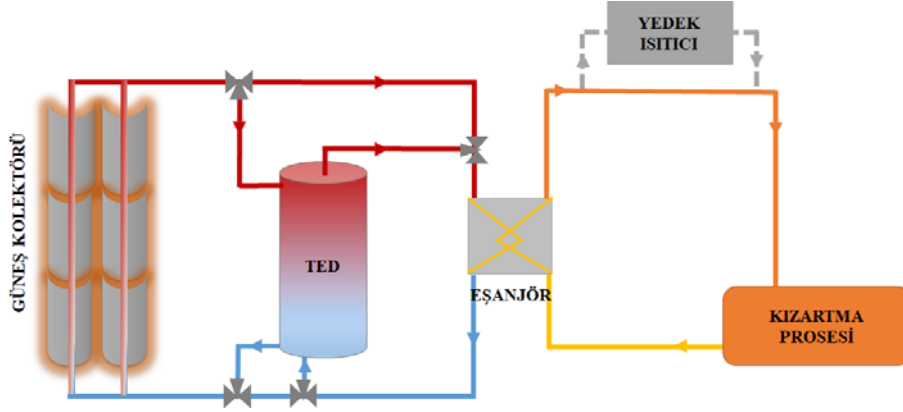
Şekil 11. Doğrudan entegrasyon [45]

4.ENDÜSTRİDE TED ENTEGRASYONU ÖRNEK UYGULAMALARI

Endüstriyel prosesler sıcaklık aralığına göre düşük sıcaklıkta prosesler (<150 °C), orta sıcaklıkta prosesler (150-400 °C) ve yüksek sıcaklıkta prosesler (>400 °C) olarak sınıflandırılabilir. Türkiye'de endüstriyel güneş enerjisi uygulamaları az sayıdaki düşük sıcaklık uygulamaları dışında bulunmamakta, 380 TWh'lik güneş enerjisi teknik potansiyelinin sadece %2'si genellikle bina ısıtma ve sıcak su eldesi gibi uygulamalarda kullanılmaktadır.

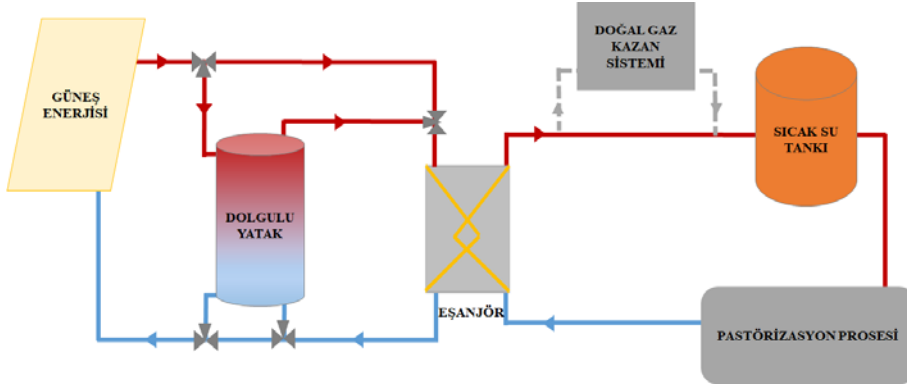
Literatürde endüstriyel proseslerde TED sistemi entegrasyonu ile ilgili çalışmalar duyulur ısıdan yararlanılan sistemler üzerinedir [10]. Koçak [48] patates cipsi kızartma prosesine güneş enerjisi ve TED sistemi entegrasyonunu incelemiştir. Entegrasyon yöntemi Şekil 12'de gösterilmiştir. Simülasyon çalışmada TED sistemi olarak dolgu yatak seçilmiştir. Dolgu yatak %70 doluluk oranı ile inşaat atıklarından geliştirilen duyulur ısı depolama malzemeleri ile doldurulmuştur. Isı transfer akışkanı olarak 340 °C sıcaklığa kadar dayanabilen Therminol 66 sentetik ısı transfer akışkanı tercih edilmiştir.

Sistemin ısı kaynağı güneş enerjisidir. Güneş enerjisi parabolik oluklu kolektörler içinde dolaşan Therminol 66 ısı transfer akışkanı ile toplanmıştır. TED sistemi ve kolektör sisteminde aynı ısı transfer akışkanı kullanıldığı için TED sistemi güneş kolektörüne doğrudan entegre edilmiştir. Örnek alınan patates kızartma prosesinde yıllık enerji ihtiyacı 16,7 GWh olarak belirlenmiştir. Çalışmada, patates kızartması prosesine 5870 m² parabolik oluklu kolektör alanı ve 200 m³ hacimli dolgulu yatak depolama tankı entegrasyonu ile CO₂ salınımı, fosil yakıt tüketim miktarı ve maliyetinden yaklaşık %40 tasarruf yapılabileceği gösterilmiştir.



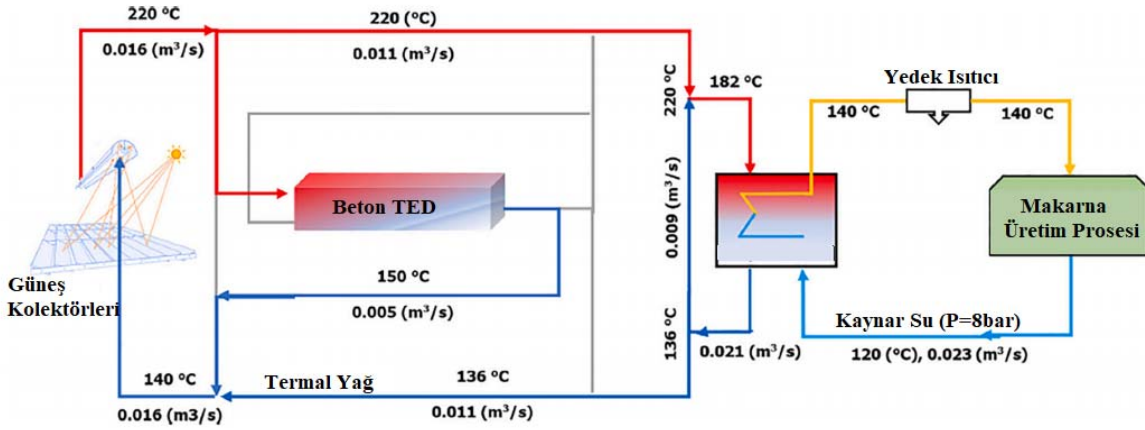
Şekil 12. Patates kızartma prosesine dolgulu yatak TED entegrasyonu [48]

Bir başka simülasyon çalışmasında [40], inşaat atıklarından geliştirilen depolama malzemeleri ile dolu dolgulu yatak TED sistemi, süt pastörizasyon prosesine entegre edilmiştir. Şekil 13'de gösterildiği üzere güneş kolektörüne doğrudan bağlı TED sistemi sıcak su tankına ısı sağlayarak tedarik seviyesinde işletmeye entegrasyonu sağlanmıştır. Ele alınan örnek süt pastörizasyon prosesinde, günde 16 saat çalışan pastörizasyon cihazı için gerekli enerji ihtiyacı yıllık 1,7 GWh dir. Bu enerji ihtiyacı mevcut koşullarda doğal gaz kazanından sağlanmakta ve bu sebeple yaklaşık 360 ton/yıl CO₂ emisyonu doğaya salınmaktadır. Bu simülasyon çalışmasında, işletmeye tedarik seviyesinde 770 m² parabolik oluk tipi güneş kolektörü ve 4m³ hacimli dolgulu yatak TED entegrasyonu ile doğal gaz tüketimi ve CO₂ salınımında yaklaşık %53 azalma sağlanabileceği gösterilmiştir.



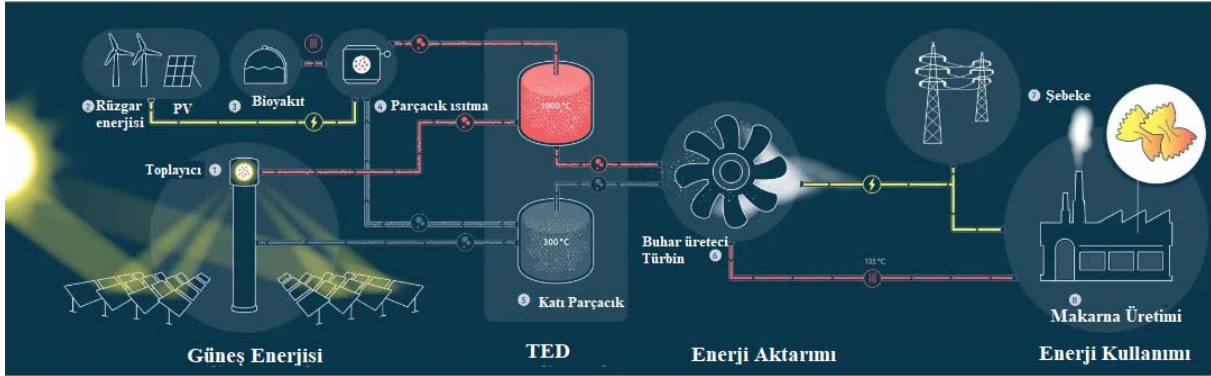
Şekil 13. Pastörizasyon prosesine TED entegrasyonu [40]

Buscemi ve ark. [49], İtalya'nın Sicilya kentinde bir makarna endüstrisine Fresnel güneş kolektörleri ile beton duvarlı ısı depolama sistem entegrasyonunu incelemiştir. Şekil 14'de güneşin prosese entegrasyon yöntemi gösterilmektedir. Fresnel güneş kolektörlerinden elde edilen ısı hem prosese hem de TED sistemine aktarılmaktadır. Bu süreçte TED sisteminde depolanan ısı, akşam saatlerinde prosese aktarılabilir. Bu çalışma ile makarna sektörünün termal enerji ihtiyacının % 40'ının 8 yıllık geri ödeme süresi ile karşılanabileceği gösterilmiştir.



Şekil 14. Makarna üretim prosesine beton TED entegrasyonu [49]

Şekil 15'de DLR Almanya tarafından geliştirilen katı parçacık akışkan yataklı TED sisteminin İtalya'daki bir makarna endüstrisine entegrasyonu gösterilmektedir. Bu sistemde 300 °C sıcaklığındaki soğuk tankta bulunan katı parçacıklar akışkan yardımıyla toplayıcıya gönderilmektedir. Toplayıcıda 1000 °C'ye kadar ısınan katı parçacıklar sıcak tanka dolmaktadır. Sistemde ayrıca rüzgar enerjisi, biyoyakıt ve PV gibi ek ısıtma kaynakları katı parçacıkların ısıtılmasına katkı sağlayabilmektedir. 1000 °C'e kadar ısınan katı parçacıklardaki ısı, türbin yardımıyla buhara çevrilmektedir. Elde edilen buhar makarna kurutma prosesine doğrudan 135 °C (3,6 bar) buhar olarak veya şebekede elektrikleştirilerek aktarılabilmektedir [28].



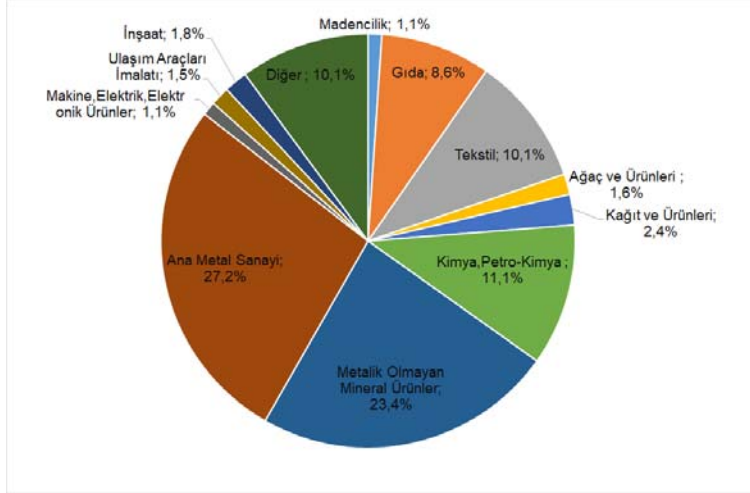
Şekil 15. Makarna üretim prosesine katı parçacık akışkan yataklı TED entegrasyonu [28]

Literatürdeki çalışmalardan da görüleceği üzere duyulur ısı TED sistemi, düşük maliyetli depolama malzemesi kullanımı, uygun entegrasyon ve yüksek verimli TED tasarımı ile yüksek sıcaklıktaki güneş enerjisi uygulamaları için umut verici bir TED yöntemidir.

5. TÜRKİYE'DEKİ FIRSAT VE POTANSİYELLER

Türkiye, genç nüfusu, kişi başı artan enerji talebi, endüstrileşmesi, hızla büyüyen şehirleşmesi ve ekonomik gelişmesi ile enerji ihtiyacı hızla artan bir ülkedir. Türkiye'de kişi başı enerji tüketimi 2007 yılında 1,35 TEP iken 2017 yılında 1,80 TEP'e çıkmıştır. Türkiye'nin kişi başı enerji tüketimi halen pek çok gelişmiş birçok ülkenin gerisindedir (Hollanda:3,78 TEP, Almanya: 3,61 TEP, Fransa:3,59) [50]. Ancak her geçen yıl artan enerji ihtiyacı, iç kaynakları hızla tüketmekte ve dış kaynaklardan ihraç edilen petrol ve doğal gaz miktarını da hızla artırmaktadır.

Türkiye'de enerji tüketim oranları incelendiğinde, endüstride enerji tüketiminin yüksek boyutlarda olduğu görülmüştür. Şekil 16'da endüstriyel sektörler için enerji tüketim payları gösterilmektedir. Buna göre ana metal sanayi, metal olmayan ürünler, kimya, petro-kimya, tekstil ve gıda en fazla enerji tüketen sektörler arasındadır.



Şekil 16. 2019 yılı endüstri sektörlerine göre enerji dağılımı [51].

Son dönemlerde rekabetin artması ile endüstride enerji verimliliği önemli bir konu olmuştur. Türkiye'deki endüstriyel enerji tüketimi hızla artmaktadır. Türkiye, güneş enerjisi potansiyeli yüksek olan bir ülke olmasına rağmen, birincil enerji tüketiminin %85'ini fosil yakıtlardan sağlamaktadır. Fosil yakıtların %70'ten fazlası dış kaynaklara bağımlıdır. Ancak endüstride enerji tüketiminde ağırlıklı olarak dış kaynaklı fosil yakıtların kullanılması, CO₂ salınımını artırmakla birlikte, ürünlerin birim fiyatlarını artırmakta ve küresel pazardaki rekabeti azaltmaktadır.

Çevresel bozulmayı engellemenin ve endüstride enerji maliyetini düşürmenin en temel yolu ise yenilenebilir enerji kaynaklarını etkin bir şekilde kullanabilmektir. Özellikle yenilenebilir enerji kaynaklarından güneş enerjisi Türkiye'de önemli bir enerji kaynağı durumundadır. 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 kullanılmaktadır [50].

Bu sebeple, güneş enerjisi teknik potansiyeli yüksek olan Türkiye'de endüstride güneş enerjisi uygulaması ve termal enerji depolama (TED) sistemleri entegrasyonunun önemi her geçen gün artmaktadır.

SONUÇ

Bu çalışmada, güneş enerjisi endüstriyel uygulamalarında, yüksek sıcaklıktaki (>300°C) endüstriyel prosesler için entegre edilebilecek TED teknolojileri, entegrasyon yöntemleri ve TED malzemeleri incelenmiş, ekonomik ve çevresel faydalar ortaya konmuştur.

Duyulur ısı depolama sistemleri gerek kolay teknolojisi gerekse ekonomik uygulanabilirliği açısından, gizli ısı depolama ve termokimyasal ısı depolama sistemlerine kıyasla, yüksek sıcaklıktaki endüstriyel prosesler için en uygun depolama yöntemidir. TED sistemleri, prosesin ihtiyacı, proses akışkanı, güneş kolektörlerindeki ısı transfer akışkanı ve diğer teknik-ekonomik parametrelere bağlı olarak tedarik seviyesinde, doğrudan veya dolaylı olarak proses seviyesinde endüstriye entegre edilebilir.

Güneş enerjisi endüstriyel uygulamalarında TED entegrasyonu endüstriyel enerji maliyetlerini düşürmekte ve güneş enerjisinden sağlanan faydayı artırmaktadır. Ancak sürdürülebilir TED sistemleri için ucuz ve çevreci depolama malzemelerinin kullanılması gerekmektedir. Bu anlamda inşaat ve yıkıntı atıklarından geliştirilen TED malzemeleri çevreci, verimli ve ekonomik fırsatlar ortaya koymaktadır.

KAYNAKLAR

- [1] TUIK, <https://www.tuik.gov.tr/> (Erişim Tarihi:20.02.2021)
- [2] Alva, G., Lin, Y., Fang, G., An overview of thermal energy storage systems , *Energy*, 144, (2018), 341-378
- [3] IEA, *Renewables 2018*, Paris 2018. <https://www.iea.org/reports/renewables-2018> [(Erişim Tarihi:01.05.2020)]
- [4] Farjana S.H., Huda, N., Mahmud, M.A. P., Saidur, R., Solar process heat in industrial systems – A global review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82(3), (2018), 2270-2286
- [5] <http://ship-plants.info/>, (Erişim Tarihi: 01.02.2021)
- [6] www.globalsolaratlas.info, (Erişim Tarihi:01.02.2021)
- [7] Palacios A., Barreneche C., Navarro, M.E., Ding Y., Thermal energy storage technologies for concentrated solar power: A review from a materials perspective”, *Renewable Energy*, 156, (2020) 1244-1265.
- [8] Tatsidjodoung P., Pierrès, N. L., Luo, L., A review of potential materials for thermal energy storage in building applications, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 18, (2013) 327-349 .
- [9] Alonso, M.C., Vera-Agullo, J., Guerreiro, L., Flor-Laguna, V., Sanchez, M., Collares-Pereira, M., Calcium aluminate based cement for concrete to be used as thermal energy storage in solar thermal electricity plants, *Cement and Concrete Research* 82, (2016) 74–86.
- [10] Koçak B., Fernandez A. I., Paksoy, H., Review on sensible thermal energy storage for industrial solar applications and sustainability aspects”, *Solar Energy*, 209, (2020), 135-169. DOI: 10.1016/j.solener.2020.08.081
- [11] Dinçer I., Rosen M.A., *Thermal Energy Storage Systems and Applications*, Wiley, West Sussex, 2002.
- [12] Roubaud E. G., Osorio, D. P., Prieto, C., Review of commercial thermal energy storage in concentrated solar power plants: Steam vs. molten salts, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 80, (2017), 133-148.
- [13] Stutz, B., Pierres, N.L., Kuznik, F., Johannes, K., Barrio, E.P.D., B’ed’ecarrats, J.P., Gibout, S., Marty, P., Zalewski, L., Soto, J., Mazet, N., Olives, R., Bezian, J.J., Minh, D.P., Storage of thermal solar energy. *C. R. Physique* 18, (2017) 401–414.
- [14] Pinel, P., Cruickshank, C.A., Beausoleil-Morrison, I., Wills, A., A review of available methods for seasonal storage of solar thermal energy in residential applications. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 15, (2011), 3341–3359.
- [15] Ataer O. E., Storage of thermal energy, in *energy storage systems in Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS)*, Developed under the Auspices of the UNESCO. Eolss Publishers, Oxford, 2006.
- [16] Guelpa E., Verda V., Thermal energy storage in district heating and cooling systems: a review. *Appl Energy* 252, (2019), 113474
- [17] Koçak B., Paksoy H., Performance of laboratory scale packed-bed thermal energy storage using new demolition waste based sensible heat materials for industrial solar applications. *Solar Energy*, 211, (2020), 1335-1346. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.10.070>
- [18] Ma Z., Neises T., Wagner M., General performance metrics and applications to evaluate various gthermal energy storage Technologies, *Proceedings of ASME 2012 6th International Conference on Energy Sustainability & 9th Fuel Cell Science*, 2012. DOI: 10.1115/ES2012-91131
- [19] Koçak B., Fernandez A. I., Paksoy, H. Benchmarking study of demolition wastes with different waste materials as sensible thermal energy storage, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 219, (2021), 110777.
- [20] Park, J. W., Park, D., Ryu, D. W., Choi, B. H., Park E.S., Analysis on heat transfer and heat loss characteristics of rock cavern thermal energy storage *Eng Geol*, 181, (2014), 142-156
- [21] Crespo A., Barreneche C., Ibarra M., Platzer W., Latent thermal energy storage for solar process heat applications at mediumhigh temperatures – A review, *Solar Energy*, 192, (2019) 3-34.
- [22] Geissbühler L., Kolman M., Zanganeh G., Haselbacher A., Steinfeld A., Analysis of industrial-scale high-temperature combined sensible/latent thermal energy storage, *Applied Thermal Engineering*, 101, (2016), 657-668.
- [23] Ndiaye K., Ginestet S., Cyr M., Thermal energy storage based on cementitious materials: A review, *AIMS Energy* , 6 (1), (2018), 97–120.
- [24] Emerson, J., Hale, M., Selvam, P., Concrete as a thermal energy storage medium for thermocline solar energy storage systems. *Sol. Energy* 96, (2013), 194–204.

- [25] Girardi, F., Giannuzzi, G.M., Mazzei, D., Salomoni, V., Majorana, C., Di Maggio, R., Recycled additions for improving the thermal conductivity of concrete in preparing energy storage systems. *Constr. Build. Mater.* 135, (2017), 565–579.
- [26] Salomoni V. A., Majorana C. E., Giannuzzi G. M., Maggio R. D., Girardi F., Mele D., Lucentini M., 2013. Conceptual Study of a Thermal Storage Module for Solar Power Plants with Parabolic Trough Concentrators, <https://www.intechopen.com/books/application-of-solar-energy/conceptual-study-of-a-thermal-storage-module-for-solar-power-plants-with-parabolic-trough-concentrat> (Erişim Tarihi: 21.02.2021)
- [27] Ma Z., Glatzmaier G.C., Mehos M., Development of solid particle thermal energy storage for concentrating solar power plants that use fluidized bed technology, *Energy Procedia* 49 (2014) 898 – 907
- [28] Buck R., Solar Particle Technology for Dispatchable Power and Heat Generation, DLR-Institute of Solar Research, ODAKtr seminer notları, 2021.
- [29] Flamant G., Gauthier D., Benoit H., Sans J. L., Garcia R., Boissière B., Ansart R., Hemati M., Dense suspension of solid particles as a new heat transfer fluid for concentrated solar thermal plants: On-sun proof of concept, *Chemical Engineering Science*, 102, (2013) 567-576, DOI: 10.1016/j.ces.2013.08.051
- [30] Xu, B., Han, J., Kumar, A., Li, P., Yang, Y., Thermal storage using sand saturated by thermal-conductive fluid and comparison with the use of concrete. *J. Storage Mater.* 13, (2017) 85–95.
- [31] Tehrani, S.S.M., Taylor, R.A., Nithyanandam, K., Ghazani, A.S., Annual comparative performance and cost analysis of high temperature, sensible thermal energy storage systems integrated with a concentrated solar power plant. *Sol. Energy* 153, 2017, 153–172.
- [32] Gracia, A., Cabeza, L. F., Phase change materials and thermal energy storage for buildings, *Energy and Buildings* 103, (2015) 414–419.
- [33] Gil A., Medrano M., Martorell I., Lázaro A., Dolado P., Zalba B., Cabeza L.F.. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14 (2010) 31-55.
- [34] Molina S., Hailot, D., Deydier, A., Bedecarrats, J. P., Material screening and compatibility for thermocline storage systems using thermal oil, *Applied Thermal Engineering*, 146, (2019), 252–259.
- [35] Khare S., Amico M. D., Knight C., Mc Garry S., Selection of materials for high temperature sensible energy storage, *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 115, (2013) 114–122.
- [36] Diago M., Iniesta, A. C., Delclos, T., Shamim, T., Calvet, N., Characterization of desert sand for its feasible use as thermal energy storage medium, *Energy Procedia* 75, (2015), 2113-2118.
- [37] Martin, C., Bonk, A., Braun, M., Odenthal, C., Bauer, T., Investigation of the long-term stability of quartzite and basalt for a potential use as filler materials for a molten-salt based thermocline storage concept, *Solar energy* 171, (2018), 827-840.
- [38] Bruch, A., Molina, S., Esence, T., Fourmigue, J.F., Couturier R., Experimental investigation of cycling behaviour of pilot-scale thermal oil packed-bed thermal storage system, *Renewable Energy*, 103, (2017), 277-285.
- [39] Koçak B., Paksoy H., Using demolition wastes from urban regeneration as sensible thermal energy storage material. *Int J Energy Res.*, (2019), 1-7, <https://doi.org/10.1002/er.4471>
- [40] Koçak B., Paksoy H., “Endüstriyel uygulamalarda güneş enerjisinden termal olarak yararlanma”, *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, Çukurova Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 35 (3), (2020) 769-782.
- [41] Agalit, H., Zari, N., Maaroufi, M., Thermophysical and chemical characterization of induction furnace slags for high temperature thermal energy storage in solar tower plants, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 172, (2017), 168–176.
- [42] Motte F., Falcoz, Q., Veron, E., Py, X., Compatibility tests between Solar Salt and thermal storage ceramics from inorganic industrial wastes, *Applied Energy*, 155, (2015), 14–22.
- [43] Fernandez, I. O., Calvet, N., Gil, A., Aseguinolaza, J. R., Faik, A., D'Aguanno, B., Thermophysical characterization of a by-product from the steel industry to be used as a sustainable and low-cost thermal energy storage material, *Energy* 89, (2015), 601-609
- [44] Wei G., Wang G., Xu C., Ju X., Xing L., Du X., Yang Y., *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 81 (2018) 1771-1786
- [45] IEA, Solar Process Heat for Production and Advanced Applications, IEA SHC Task 49, 2014. http://task49.iea-shc.org/Data/Sites/7/150218_iea-task-49_d_b2_integration_guideline-final.pdf [Erişim: 30.01.2021]

- [46] Lauterbach C., Schmitt B., Jordon U., Vajen K., The potential of solar heat for industrial processes in Germany. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16, (2012) 5121–5130.
- [47] Gibb, D., Johnson, M., Romani, J., Gasia, J., Cabeza, L.F., Seitz, A., Process integration of thermal energy storage systems – evaluation methodology and case studies. *Applied Energy*, 230, (2018), 750-760.
- [48] Koçak B., High temperature thermal energy storage in packed-bed-Case study in food industry, Doktora Tezi, Çukurova Üniversitesi, 2020.
- [49] Buscemi, A., Panno, D., Ciulla, G., Beccali, M., Lo Brano, V., Concrete thermal energy storage for linear Fresnel collectors: exploiting the South Mediterranean's solar potential for agri-food processes. *Energy Convers. Manage.* 166, (2018), 719–734.
- [50] TSKB, <https://www.tskb.com.tr/i/assets/document/pdf/enerji-sektor-gorunumu-2019.pdf>, Erişim Tarihi:24.02.2021
- [51] Türkiye 2019 Enerji Denge Tablosu, <https://www.dunyaenerji.org.tr/turkiye-enerji-denge-tablolari/>, Erişim Tarihi:24.02.2021

ÖZGEÇMİŞ

Burcu KOÇAK

1982 yılı Adana doğuludur. 2005 yılında Ege Üniversitesi Kimya Mühendisliği bölümünü bitirmiştir. Aynı Üniversiteden 2008 yılında Yüksek Lisansını tamamlamıştır. 2020 yılında Çukurova Üniversitesi Kimya Bölümü ve Barselona Üniversitesi Malzeme Bilimi Bölümünden Doktor unvanı almıştır. 2005-2020 yılları arasında Gıda ve Plastik sanayilerinde Üretim, Ar-Ge ve Yalın Üretim alanlarında çalışmıştır.

Halime PAKSOY

Üsküdar Amerikan Kız Koleji mezunu olan Halime Ö. Paksoy, Boğaziçi Üniversitesi Kimya Mühendisliği Bölümü'nde lisans eğitimini ve Çukurova Üniversitesi Kimya Bölümü'nde yüksek lisans ve doktora eğitimini tamamlamıştır. 1992 yılından beri görev yaptığı Çukurova Üniversitesi'nde 1995 yılında Doçent, 2000 yılında Profesör ünvanlarını almıştır. Akademik çalışmalarının yanı sıra Rektör Yardımcısı, Dekan ve Bölüm Başkanı olarak idari görevlerde bulunmuştur. Halen Çukurova Üniversitesi Çevre Sorunları Uygulama ve Araştırma Merkezi'nin Müdürlüğünü sürdürmektedir. 1995 yılında Uluslararası Enerji Ajansı'nın Enerji Depolama Teknoloji İşbirliği Programı (IEA ECES TCP) anlaşmasını ülkemizi temsilen Çukurova Üniversitesi adına imzalamış, bu tarihten itibaren yönetim kurulunda delege olarak ve iki dönem de başkan olarak görev yapmıştır. IEA ECES TCP Türkiye temsilciliğinin 2020'de TTMD'ye aktarılmasıyla yönetim kurulundaki görevine TTMD üyesi delege olarak devam etmektedir. TTMD Enerji Depolama ve Isı Pompası Komitesi'nin başkanlığını da sürdürmektedir. Termal enerji depolaması teknolojilerinin düşük karbonlu ve yenilenebilir enerjiye dayalı enerji sistemlerinin geliştirilmesi, uygulanması ve tanıtımı konularında AB (4 adet), NATO (1 adet), TÜBİTAK (8 adet) ve SANTEZ (1 adet) tarafından desteklenen projelerde yürütücü ve araştırmacı olarak yer almıştır. Sanayi işbirliğiyle Türkiye'de ilk defa beyaz eşyalarda, bina yapı malzemelerinde ve seralarda termal enerji depolama uygulamalarını gerçekleştirmiştir. 2018 yılında üç yılda bir düzenlenen enerji depolama konusundaki en önemli uluslararası toplantı olan "STOCK" konferansları serisinden EnerSTOCK2018 Kongresini "Earth Cannot Wait!" sloganıyla Çukurova Üniversitesi'nde düzenlemiştir.