

GAZİ

JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES

## Design of Two Stage Heat Recovery System in Fluidized Bed Dryer: Environmental and Economic Analysis

Deniz Gökben<sup>a</sup>, Veysel Durak<sup>b</sup>, Merve Ulular<sup>c</sup>, Ufuk Bahçecioğlu<sup>d</sup>, Mustafa Aktaş<sup>e</sup>, Yaren Güven<sup>f</sup>

Submitted: 29.09.2023 Revised: 09.11.2023 Accepted: 29.11.2023 doi:10.30855/gmbd.0705078

### ABSTRACT

**Keywords:** Fluidized bed dryer, heat recovery, specific energy consumption, energy efficiency, sand drying

<sup>a</sup> Erkont Sanayi A.Ş.  
06990 - Ankara, Türkiye  
Orcid: 0009-0002-3410-5663

<sup>b</sup> Erkont Sanayi A.Ş.  
06990 - Ankara, Türkiye  
Orcid: 0009-0001-2352-8188

<sup>c</sup> Erkont Sanayi A.Ş.  
06990 - Ankara, Türkiye  
Orcid: 0000-0003-2204-7689

<sup>d</sup> Erkont Sanayi A.Ş.  
06990 - Ankara, Türkiye  
Orcid: 0009-0002-7824-0488

<sup>e</sup> Gazi Üniversitesi,  
Teknoloji Fakültesi,  
Enerji Sistemleri Mühendisliği  
06560 - Ankara, Türkiye  
Orcid: 0000-0003-1187-5120

<sup>f</sup> Gazi Üniversitesi,  
Teknoloji Fakültesi,  
Enerji Sistemleri Mühendisliği  
06560 - Ankara, Türkiye  
Orcid: 0000-0003-0732-4692  
e mail: yarenguyen@gazi.edu.tr

\*Corresponding author:  
yarenguyen@gazi.edu.tr

Fluidized bed dryer is used to dry the silica sand used in core production in the casting industry. In this study, a heat recovery unit was designed in a drying system using waste heat recovery and the effects of specific energy consumption on heat recovery were investigated by performing energy, environmental and economic analysis. In this context, it is aimed to increase the drying efficiency, reduce carbon emissions and the effects of global warming with the heat recovery unit used in the preheating of the drying air blown by the fan. According to the results, a reduction of 12.815 m<sup>3</sup>/h in natural gas consumption and 0.032 tons CO<sub>2</sub>/h in carbon emissions will occur if the design with the 1st stage drying air preheating heat recovery unit is changed from the current design. If the current system is changed to a system with heat recovery unit, 1,428,753.81 TL can be saved annually and the payback period of the heat recovery unit was calculated 0.66 years. A reduction of 4.34 m<sup>3</sup>/h in natural gas consumption and 0.011 tons CO<sub>2</sub>/h in carbon emissions will occur if the design is changed from the current design to the design where the 2st stage in-plant water heating heat recovery unit. Thus, if the current system is changed to a system with heat recovery unit, 1,912,602,548 TL can be saved annually, and the payback period is calculated as 0.16 years. When this design is implemented, a more economical and sustainable drying system will be brought to life.

## Akışkan Yatak Kurutucuda İki Kademeli Isı Geri Kazanım Sistemi Tasarımı: Çevresel ve Ekonomik Analiz

### ÖZ

Döküm sektöründeki maça üretiminde kullanılan silis kumunun kurutulması için akışkan yataklı kurutucu kullanılmaktadır. Bu çalışmada, atık ısı geri kazanımlı kurutma sisteminde ısı geri kazanım ünitesi tasarlanarak özgül enerji tüketiminin ısı geri kazanımına etkileri enerji analizi, çevresel analiz ve ekonomik analiz yapılarak incelenmiştir. Bu kapsamda, fan ile üflenen kurutma havasının ön ısıtmasında kullanılan ısı geri kazanım ünitesi ile kurutma verimini yükseltmek, karbon salımını ve küresel ısınmanın etkilerini azaltmak amaçlanmıştır. Sonuçlara göre, mevcut tasarımdan 1. kademe kurutma havası ön ısıtma ısı geri kazanım ünitesi tasarımı geçildiği takdirde doğalgaz tüketiminde 12.815 m<sup>3</sup>/h'lik, karbon salımında ise 0.032 ton CO<sub>2</sub>/h'lik bir azalma meydana gelecektir. Mevcut sistemden ısı geri kazanım ünitesi sisteme geçildiği takdirde yıllık 1,428,753.81 TL tasarruf edilebilecek olup ısı geri kazanım ünitesinin geri ödeme süresi 0.66 yıl olarak hesaplanmıştır. Mevcut tasarımdan 2. kademe fabrika içi su ısıtma için tasarlanan ısı geri kazanım ünitesi tasarımı geçildiği takdirde doğalgaz tüketiminde 4.34 m<sup>3</sup>/h'lik, karbon salımında ise 0.011 ton CO<sub>2</sub>/h'lik bir azalma meydana gelecektir. Böylece mevcut sistemden ısı geri kazanım ünitesi sisteme geçildiği takdirde yıllık 1,912,602.548 TL tasarruf edilebilecek olup, geri ödeme süresi 0.16 yıl olarak hesaplanmıştır. Bu tasarım uygulandığında daha ekonomik ve sürdürülebilir bir kurutma sistemi hayata geçirilmiş olacaktır.

**Anahtar Kelimeler:** Akışkan yataklı kurutucu, ısı geri kazanımı, özgül enerji tüketimi, enerji verimliliği, kum kurutma

## 1. Giriş (Introduction)

Kurutma, katı maddelerin bünyesindeki sıvıları ısı yöntemleri ile buharlaştırılarak ortamdan uzaklaştırılması anlamına gelir. Konveksiyon (taşınım) ile kurutma, temas (iletim) ile kurutma, radyasyon (ışınım) ile kurutma olmak üzere üç farklı kurutma yöntemi bulunmaktadır. Kurutma uygulamalarında ısı transferi bunlardan ikisinin ya da üçünün birleşimi şeklinde gerçekleşebilir. Konveksiyon ile kurutmada sıcak hava kurutulacak malzemenin içinden, üzerinden ve arasından geçirilir. Kabin kurutucular, sandık kurutucular, tünel kurutucular, akışkan yatak kurutucular ve püskürterek kurutucular bu yöntemlere örnek gösterilebilir. Temas ile kurutma yönteminde kurutulacak madde hareketsiz kalırken ya da hareket ederken temas ettiği sıcak yüzeyden maddeye ısı taşınır. Bu yöntemin en yaygın örneği silindirik kurutuculardır. Radyasyon ile kurutma yönteminde ise, sistemdeki bir radyasyon kaynağı ile kurutulacak malzemeye ısı ulaştırılmaktadır. Bu yöntemde mikrodalga, dielektrik veya infrared gibi elektromanyetik enerji türlerinden yararlanılmaktadır [1].

Akışkan yataklı kurutucularda ürünün küresel ya da silindirik biçiminde olması amaçlanmaktadır. Bu nedenle kurutulacak olan malzeme bir elekten geçirilerek kurutucuya gönderilir. Burada, akışkanlaştırılan malzemenin nemi uzaklaştırılır. Toz veya taneli yapıdaki kurutulmuş malzeme ile akışkanlaştırma gazı arasında temas çok iyi olmaktadır. Bu nedenle kurutma havası ve tanecikler arasında ısı transferi de etkin şekilde gerçekleşir [2].

Endüstriyel kurutma, yoğun enerji gerektiren ve zaman alıcı bir işlemdir. Gelişmiş ülkelerde enerjinin büyük bir kısmı kurutma endüstrisinde kullanılmaktadır. Bu sebeple kurutma işleminde enerji miktarını azaltmak ve kurutma süresini kısaltmak kurutma teknolojisi için önemli bir konudur. Kurutma sistemlerinde enerji kazanımı sağlamak için taze hava ve egzoz havası belirli oranlarda karıştırılarak ısıtıcıya gönderilir. Kademeli kurutma sistemlerinde ise bir kademeden çıkan kurutma havası tekrar ısıtılarak sonraki kademedeki kurutma işleminde kullanılır. Egzozdan atılan havanın enerjisinin yüksek olması durumunda ısı geri kazanımlı kurutma sistemleri kullanılır [3].

Bu çalışmada, döküm sektöründe kullanılan kumun neminin alınması sürecinde kurutucunun özgül enerji tüketiminin azaltılması, atık ısı geri kazanımı sisteminin geliştirilmesi ile analizler yapılmış ve mevcut yapı detaylıca analiz edilerek enerji tüketim kaynakları belirlenmiş ve tüketim miktarları ölçülmüştür. Enerji tüketimlerini azaltacak yeni bir sistem yapısı oluşturulmuştur. Bu kapsamda ısı değiştirici kullanılarak atık ısı geri kazanımı ile daha ekonomik ve daha ekolojik sürdürülebilir bir teknoloji ortaya konması hedeflenmiştir.

## 2. Literatür Taraması (Literature Review)

Kurutucu sistemlerinin enerji kaybını azaltmaya yönelik her türlü girişim, hem sınırlı enerji kaynakları hem de çevre dostu amaçlar için büyük önem taşımaktadır. Dai vd. [4], kurutma işlemi için karbondioksit/küresel ısınma potansiyeli düşük çalışma akışkanı karışımına sahip ısı pompalarını analiz etmişler ve birincil enerji tüketiminin geleneksel kazanlı kurutma sistemlerine kıyasla %25.83-79.37 oranında azaldığını tespit etmişlerdir. Ayrıca, sistemin yaşam döngüsü iklim performansının elektrikli kazan sistemine kıyasla 4.24 kat daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Walmsley vd. [5], endüstriyel süt püskürtmeli kurutucunun termoekonomik optimizasyonunu gerçekleştirmişlerdir. Isı geri kazanımı 75°C egzoz sıcaklığı ile uygulanmıştır. Sonuçlara göre, 4 m/s yüzey hızına ve 14 boru sırasına sahip ısı eşanjörünün kullanılmasını önermişlerdir. Golman ve Julklang [6], egzoz gazı ısı geri kazanımının kullanıldığı püskürtmeli kurutma sisteminin simülasyonunu gerçekleştirmişlerdir. Sonuçlar, ısı eşanjörü ile donatılmış püskürtmeli kurutma sisteminde %16 oranında enerji verimliliği kazancı ve %50 oranında enerji tasarrufu elde edildiğini göstermiştir. Ayrıca, egzoz havası devridaimine sahip sistemde enerji verimliliğinden %34 oranında, enerji tasarrufundan %61 oranında kazanç elde edilmiştir. Delpech vd. [7], bir seramik fırını soğutma bacasının atık ısısının geri kazanılmasıyla 863 MWh enerjinin geri kazanılabileceğini ve bu atık ısı enerjisinin fırın öncesi kurutucunun besleme havasını ısıtmak için kullanılabileceğini bulmuşlardır. Patel ve Bade [8], sprey kurutucu sistemlerinde ısı geri kazanım sistemlerinin fırsatlarını araştırmışlardır. Doğrudan ısı geri kazanım sistemi ve %80 devridaim oranı ile kurutucunun verimliliğinin %30 oranında arttığı, hibrit ısı geri kazanım sistemi ve %80 devridaim oranı ile kurutucunun verimliliğinin %45 oranında arttığı sonucuna varılmıştır. Lamrani vd. [9], ahşap kurutma işlemlerinde ısı geri kazanım sistemi ve fotovoltaik/termal (PV/T) hava kolektörünün kullanımını sayısal olarak araştırmışlardır. Sonuçlar, 0.8 etkinliğe sahip ısı geri kazanım sisteminin kullanılmasının güneşte kurutma süresini %40'a kadar

azalttığını ve hem ısı geri kazanım sisteminin hem de PV/T hava kolektörünün kullanılmasının kurutucunun enerji tüketimini %86.5'e kadar azalttığını göstermiştir. Ayrıca, hem PV/T hem de ısı geri kazanım sisteminin kullanılması, yıllık CO<sub>2</sub> emisyonlarını %78.5'e kadar azaltmıştır. Ogulata [10] tarafından yapılan bir başka sayısal araştırmada, tekstil kurutmada plaka tipi bir ısı eşanjöründe taze hava girişine atık ısı geri kazanımı uygulanmıştır. Golman ve Julklang [11] tarafından yapılan bir başka çalışmada, egzoz kurutma gazının kısmen geri dönüştürülmesi yoluyla enerji geri kazanımının enerji tasarrufu ve verimliliği üzerindeki etkisini araştırmak için model simülasyonları kullanılmıştır. Sonuçlar, egzoz havasının devridaim oranının %20'den %80'e çıkarılmasıyla enerji verimliliğinin %10'dan yaklaşık %35'e yükseldiğini göstermiştir.

Bellocchi vd. [12], makarna kurutma işleminde gelişmiş adsorban malzemeye dayalı düşük dereceli bir atık ısı geri kazanım sisteminin kullanımına odaklanmışlardır. Sonuçlar, bu tür bir geri kazanım sisteminin kullanılmasının kurutma işlemi için toplam enerji yükünün %40 oranında azalmasına yol açacağını göstermiştir. Krokida ve Bisharat [13], ısı geri kazanım sistemi ve ısı pompası kullanımının bir kurutucu sisteminin verimliliği üzerindeki etkisini araştırmak için matematiksel bir model geliştirmişlerdir. Sonuçlar, bir ısı eşanjörünün tek başına egzoz akışından toplam enerjinin %25'inden daha azını geri kazanabileceğini, hem bir ısı eşanjörü hem de bir ısı pompası kullanılarak %40 ısı geri kazanımı elde edilebileceğini göstermiştir. Ishaq ve Dinçer [14], çimento fabrikasının egzoz ısısının hammaddelerin kurutulması amacıyla kullanıldığı bir sistem önermişlerdir. Bu şekilde, ortam havasının ısıtılmasındaki yüksek enerji girdisi kesilerek kurutucu sisteminden maliyet tasarrufu sağlanması amaçlanmıştır. Atkins vd. [15], süt tozu sprey kurutucusunun egzozundan ısı geri kazanım potansiyelini değerlendirmişlerdir. Sonuçlar optimum döngü kütle akış hızında ısı geri kazanım etkinliğinin %70'e ulaştığını ve bunun da giriş havası sıcaklığında 35°C'lik bir artışa karşılık geldiğini göstermiştir. Walmsley vd. [16], kurutucu egzozlarının kullanımının 10.8 MW'lık bir ısı geri kazanımı elde edilmesinde kritik bir ısı kaynağı olduğunu ve bunun 5,1 MW'lık kısmının egzoz ısı geri kazanımından elde edildiğini bulmuşlardır. Fiaschi vd. [17], performans iyileştirme amacıyla endüstriyel bir tekstil kurutucusunun ısı geri kazanım sistemini yeniden tasarlamışlardır. Çalışma, tek çiplik borulu temel konfigürasyonla karşılaştırıldığında, ikiz kutu geometrisinin benimsenmesinin ısı geri kazanımını yaklaşık %180 oranında artırdığını göstermiştir. Julklang ve Golman [18] tarafından yapılan bir başka çalışmada, %50-70 toplam etkinlik faktörüne sahip bir ısı geri kazanım sistemi ile enerji tasarrufunda %15.1 oranında iyileşme sağlandığı gösterilmiştir. Akbari vd. [19], bir kurutucunun egzoz gazından atık ısı geri kazanımı için döner ısı eşanjörünün performansını analiz etmişler ve ısı eşanjörü için ortalama %38.8 verim elde edilebileceğini bulmuşlardır. Kong vd. [20], kaplama kağıdı makinesi kurutma işleminde bir atık ısı geri kazanım ünitesinin enerji verimliliğini %7.3 oranında artırabileceğini ve spesifik enerji tüketimini %4.6 oranında azaltabileceğini kanıtlamışlardır. Guo vd. [21], linyitin kurutulması amacıyla önceden kurutulmuş linyit yakıtlı enerji santrallerine atık ısı geri kazanım sisteminin dahil edilmesi için teorik bir model geliştirmişler ve atık ısı geri kazanım sistemi ile santralin termal verimliliğinin %1.87 oranında arttığını tespit etmişlerdir. Kemp [22], ısı geri kazanım yöntemini kurutucularda enerji azaltma yöntemlerinden biri olarak vurgulamış ve ısı geri kazanımının kurutucu ısı ihtiyacını üçte bir oranında azaltabileceğini göstermiştir. Baker vd. [23], iyi karıştırılmış akışkan yataklı kurutucularda egzoz ısısı geri kazanımı uygulamışlar ve ısı geri kazanım sistemi ile ısıtıcı görevinde %33.2'ye varan azalmalar olduğunu bulmuşlardır. Han vd. [24], linyit kurutma sisteminde kurutucu egzoz ısısını geri kazanmayı başarmışlar ve giriş havasını 23°C'den 55°C'ye ısıtmışlardır. Aktaş vd. [25], güneş ısı geri kazanım destekli kızılötesi kavun kurutucu üzerinde deneysel bir çalışma gerçekleştirmişler ve toplam giriş enerjisinin %23-28'inin ısı geri kazanım ünitesi vasıtasıyla sağlanabileceği sonucuna varmışlardır. Aktaş vd. [26] bir başka çalışmada, kızılötesi kayısı kurutma işlemini deneysel olarak incelemişler ve ısı geri kazanım ünitesi kullanarak toplam enerji girdisinin %62'sine kadar geri kazanım sağlamışlardır. Yahya vd. [27], ısı geri kazanımı olan ve olmayan akışkan yataklı kurutucuyu karşılaştırmışlardır. Sonuçlar, ısı geri kazanımlı akışkan yataklı kurutucunun çeltiğin nem içeriğini kuru bazda %28.52'den %16.28'e getirmek için gereken süreyi yaklaşık üç dakika azalttığını göstermiştir.

Bu makalede kurutucuda özgün olarak yapılan iki kademeli atık ısı geri kazanımı ile,

- Atık ısı geri kazanımının kurutucunun özgül enerji tüketimine etkisinin belirlenmesi,
- İkinci kademe ile gerektiğinde enerjinin depolanabilmesi,
- Atık ısı geri kazanım ünitesinin geri ödeme sürelerinin belirlenmesi,
- Atık ısı geri kazanımı ile eş değer karbon emisyon azaltımı potansiyelinin ortaya konması,

amaçlanmıştır. Bu doğrultuda çalışma literatüre iki kademeli atık ısı geri kazanımının kurutma maliyetine etkisinin ortaya konması, iki kademeli atık ısı geri kazanım metodunun akışkan yatak kurutucunun verimini nasıl etkilediğinin belirlenmesi katkılarını sunacaktır.

### 3. Materyal ve Metot (Material and Method)

#### 3.1. Mevcut kum kurutma sisteminde kurutma veriminin belirlenmesi (Determination of drying efficiency of existing sand drying system)

Çalışma kapsamında mevcut kum kurutma sisteminde yapılan ölçümler neticesinde elde edilen veriler Tablo 1’de verilmiştir. Mevcut (ısı geri kazanımsız) kurutma sisteminde yapılan ölçümler ile özgül enerji tüketimi, kurutma maliyeti ve kurutma veriminin hesaplanması amaçlanmıştır. Bu anlamda, mevcut ısı ve kütle transferi yapısı ile yeni tasarım karşılaştırılarak sonuçlar enerji ve çevresel etkiler açısından irdelenmiştir.

Tablo 1. Mevcut kum kurutma sisteminin parametre değerleri (Parameter values of existing sand drying system)

Parametre	Değer
Kum giriş debisi, kg/h	7,500
Giriş kum nemi, %	4.39
Çıkış kum nemi, %	0.01
Saatlik elektrik enerjisi tüketimi, kWh	52.64
Doğalgaz tüketimi, m <sup>3</sup> /h	69.81

Yapılan deneylerde giriş kumunun kuru madde miktarı belirlenmiştir. Sonrasında, Tablo 1’de verilen giriş kum nem içeriği %4.39 ve çıkış kum nem içeriği ise %0.01 olarak hesaplanmıştır.

Mevcut kum kurutma fırın sisteminde başlangıç kuru kum miktarı;

$$\text{Başlangıç Kuru Kum Miktarı} = \text{Kum Giriş Miktarı} \times \left(1 - \left(\frac{\text{Giriş Kum Nemi}}{100}\right)\right) \quad (1)$$

çıkış yaş kum miktarı ise;

$$\text{Çıkış Yaş Kum Miktarı} = \frac{\text{Başlangıç Kuru Kum Miktarı}}{1 - \left(\frac{\text{Çıkış Kum Nemi}}{100}\right)} \quad (2)$$

eşitlikleri ile hesaplanır. Buharlaşan su miktarı;

$$\dot{m}_b = \text{Kum Giriş Miktarı} - \text{Çıkış Yaş Kum Miktarı} \quad (3)$$

eşitliği kullanılarak hesaplanır. Kurutma sürecinde özgül enerji tüketimi birim kütle nem başına harcanan enerji miktarı olup;

$$\text{ÖET} = \frac{\text{Elektrik Tüketimi} + (\text{Doğalgaz Tüketimi} \times 10.64)}{\text{Buharlaşan Su Miktarı}} \quad (4)$$

eşitliğinden [23], mevcut kurutucunun kurutma verimi ise;

$$\eta = \frac{\sum \dot{m}_b \times h_{fg}}{\sum \dot{Q}_{giren}} \quad (5)$$

eşitliğinden bulunur. Burada  $\dot{Q}_{giren}$  yakıt ve elektrik tüketiminin toplamı olup,

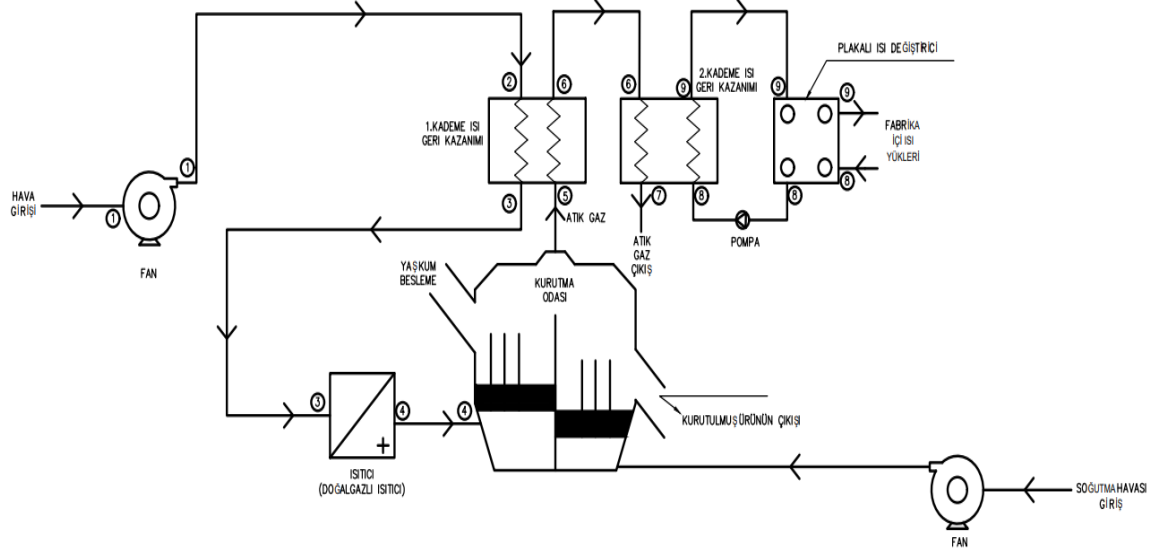
$$\dot{Q}_{giren} = \dot{Q}_{yakıt} + \dot{E}_{elektrik} \quad (6)$$

eşitliği ile ifade edilmektedir.

#### 3.2. Tasarım (Design)

Yaş olarak gelen kumlar kum (47-52 AFS) havuzuna boşaltılmaktadır. Ardından kum kurutma sistemi çalıştırılarak kepçe yardımı ile yaş kumlar siloya aktarılmaktadır. 5 kepçe (yaklaşık 10 ton) yüklem yapılmaktadır. 10 ton/h kum 100°C’de kurutulmaktadır. Makine içine giren kum alttan gelen sıcak hava

ile içerde bir hava akımı oluşturarak kumu kurutmaktadır. Kuruyan kum elekten geçerek mekanik, çift yönlü bant ile silolara taşınmaktadır. Ardından maça denilen parça içindeki boşlukların elde edilmesi için kullanılan kalıp elemanlarının yer aldığı maçahanedeki makinelere gönderilmektedir. Şekil 1'de kum kurutma fırınına ait şematik gösterim, Şekil 2'de ise kum kurutma sisteminin fotoğrafı verilmiştir.



Şekil 1. Kum kurutma fırınının şematik gösterimi (Schematic representation of the sand drying oven)



Şekil 2. Kum kurutma sisteminin fotoğrafı (Photo of the sand drying system)

### 3.3. Atık ısı geri kazanımlı kum kurutma veriminin teorik analizi (Theoretical analysis of sand drying efficiency with waste heat recovery)

Çalışmada kullanılan 1. kademe ısı geri kazanım ünitesine ait bilgiler Tablo 2'de, 2. kademe ısı geri kazanım ünitesine ait bilgiler Tablo 3'te verilmiştir.



Tablo 2. 1. Kademe ısı geri kazanım ünitesi parametre değerleri (1st stage heat recovery unit parameter values)

Parametre	Değer
Isı geri kazanım ünitesi hava giriş sıcaklığı, °C	30
Isı geri kazanım ünitesi hava çıkış sıcaklığı, °C	98.41
Isı geri kazanım ünitesi hava giriş debisi, m <sup>3</sup> /s	1.916
Havanın yoğunluğu, kg/m <sup>3</sup>	1.032
Havanın özgül ısı, kJ/kg°C	1.008

Tablo 3. 2. Kademe ısı geri kazanım ünitesi parametre değerleri (2nd stage heat recovery unit parameter values)

Parametre	Değer
Isı geri kazanım ünitesi hava giriş sıcaklığı, °C	10
Isı geri kazanım ünitesi hava çıkış sıcaklığı, °C	60
Isı geri kazanım ünitesi su giriş debisi, m <sup>3</sup> /s	0.8
Suyun yoğunluğu, kg/m <sup>3</sup>	994.2
Suyun özgül ısı, kJ/kg°C	4.18

Mevcut kum kurutma sistemine ısı geri kazanım ünitesi eklenmesi sonucunda geri kazanılan ısı güç;

$$\dot{W} = \dot{Q} \times \rho \times c_p \times (T_2 - T_1) \quad (7)$$

ile doğalgaz tüketimindeki azalım;

$$\text{Doğalgaz Tüketimindeki Azalım} = \frac{\text{Isı geri kazanım ünitesinde geri kazanılan ısı güç}}{10.64} \quad (8)$$

eşitliklerinden hesaplanır. Doğalgaz tüketimindeki azalım ile ısı geri kazanımlı doğalgaz tüketimi;

$$\text{Isı Geri Kazanımlı Doğalgaz Tüketimi} = \text{Doğalgaz tüketimi} - \text{Doğalgaz tüketimindeki azalım} \quad (9)$$

eşitliğinden bulunur. Isı geri kazanımlı özgül enerji tüketimi;

$$\text{Isı Geri Kazanımlı ÖET} = \frac{\text{Elektrik tüketimi} + (\text{Isı geri kazanımlı doğalgaz tüketimi} \times 10.64)}{\text{Buharlaştırılan su miktarı}} \quad (10)$$

eşitliği kullanılarak hesaplanır. Buharlaştırma gizli ısı 2,336.1 kJ/kg'dır. Isı geri kazanımlı kurutma verimi;

$$\text{Isı Geri Kazanımlı Kurutma Verimi} = \frac{\left(\frac{\text{Buharlaştırılan su miktarı}}{3,600}\right) \times (\text{Buharlaştırma gizli ısı})}{\text{Elektrik tüketimi} + (\text{Isı geri kazanımlı doğalgaz tüketimi} \times 10.64)} \quad (11)$$

eşitliğinden, yakıt tüketimindeki % azalma ise;

$$\text{Yakıt Tüketimindeki Azalma} = \left(\frac{\text{Doğalgaz tüketimi} - \text{Isı geri kazanımlı doğalgaz tüketimi}}{\text{Doğalgaz tüketimi}}\right) \times 100 \quad (12)$$

eşitliğinden hesaplanarak bulunur.

$$\text{IPCC doğalgaz} = 0.000233 \text{ ton CO}_2/\text{kWh} \quad (13)$$

Mevcut CO<sub>2</sub> salımı;

$$\text{CO}_2 \text{ Salımı} = \text{IPCC doğalgaz} \times \text{Doğalgaz Tüketimi} \times 10.64 \quad (14)$$

eşitliğinden, ısı geri kazanım ile CO<sub>2</sub> salımı;

$$\text{Isı Geri Kazanım ile CO}_2 \text{ Salımı} = \text{IPCC doğalgaz} \times \text{Isı geri kazanımlı doğalgaz tüketimi} \times 10.64 \quad (15)$$

eşitliğinden hesaplanarak bulunur.

Çalışma kapsamında, mevcutta iki kademeli ısı geri kazanım sistemine sahip olmayan akışkan yatak kum kurutma sistemi deneysel olarak incelenmiştir. Elde edilen deneysel veriler Tablo 1'de sunulmuş,

bu verilere bağlı olarak ısı geri kazanım üniteleri tasarlanmış ve bu tasarıma göre analiz edilmiştir. Böylece, mevcut deneysel verilere ve ısı geri kazanım sisteminin kurulum maliyetine göre ekonomik analiz yapılarak elde edilebilecek enerji tasarrufuna göre geri ödeme süresi hesaplanmıştır.

#### 4. Bulgular (Results)

Bu çalışmada, döküm sektöründe enerji tüketiminin azaltılmasına yönelik yeşil ve verimli enerji teknolojilerine dönüşümde yeni nesil bir atık ısı geri kazanımı sistemine ve yüksek kurutma verimine sahip kum kurutma sistemi tasarlanmıştır. Tablo 4'te mevcut kum kurutma tasarımına, Tablo 5'te 1. kademe kum kurutma tasarımına, Tablo 6'da 2. kademe kum kurutma tasarımına ait değerler verilmiştir.

Tablo 4. Mevcut kum kurutma tasarımına ait parametre değerleri (Parameter values of the existing sand drying design)

Parametre	Değer
Başlangıç kuru kum miktarı, kg/h	7,170.75
Çıkış yaş kum miktarı, kg/h	7,171.47
Buharlaşan su miktarı, kg/h	328.53
Mevcut özgül enerji tüketimi, kWh/kg	2.42
Mevcut kurutma verimi, %	26.86

Tablo 5. Atık ısı geri kazanımlı kum kurutma tasarımına ait parametre değerleri (1. kademe: kurutma havası ön ısıtma) (Parameter values of sand drying design with waste heat recovery (1st stage: drying air preheating))

Parametre	Değer
Geri kazanılan ısı gücü, kW	136.350
Doğalgaz tüketimindeki azalım, m <sup>3</sup> /h	12.815
Isı geri kazanımlı doğalgaz tüketimi, m <sup>3</sup> /h	56.995
Isı geri kazanımlı özgül enerji tüketimi, kWh/kg	2.01
Isı geri kazanımlı kurutma verimi, %	32.35
Yakıt tüketimindeki azalma, %	18.36
Mevcut CO <sub>2</sub> salımı, ton CO <sub>2</sub> /h	0.173
Isı geri kazanım ile CO <sub>2</sub> salımı, ton CO <sub>2</sub> /h	0.141
Yıllık karbon salımındaki azalma, ton CO <sub>2</sub> /yıl	217.3

Tablo 6. Atık ısı geri kazanımlı kum kurutma tasarımına ait parametre değerleri (2. kademe: fabrika içi su ısıtma) (Parameter values for sand drying design with waste heat recovery (2nd stage: in-plant water heating))

Parametre	Değer
Isı geri kazanım ünitesi su giriş sıcaklığı, °C	10
Isı geri kazanım ünitesi su çıkış sıcaklığı, °C	60
Isı geri kazanım ünitesi su giriş debisi, m <sup>3</sup> /h	0.8
Suyun yoğunluğu, kg/m <sup>3</sup>	994.2
Suyun özgül ısı, kJ/kg°C	4.18
Isı geri kazanım ünitesinde geri kazanılan ısı gücü, kW	46.175
Doğalgaz tüketimindeki azalım, m <sup>3</sup> /h	4.339
Isı geri kazanımlı doğalgaz tüketimi, m <sup>3</sup> /h	52.65
Yakıt tüketimindeki azalma, %	6.2165
Isı geri kazanım ile karbon salımı, ton CO <sub>2</sub> /h	0.162
Yıllık karbon salımındaki azalma, ton CO <sub>2</sub> /yıl	73.59

Tablo 4, 5 ve 6'da görüldüğü gibi ısı geri kazanımı ile özgül enerji tüketimi 2.42 kWh/kg değerinden 2.01 kWh/kg değerine azaltılmış, yakıt tüketimi de mevcut sisteme göre %18.36 oranında azalmıştır. Yapılan hesaplamalar sonucunda Şekil 1'de verilen noktalara ait sıcaklık değerleri Tablo 7'de verilmiştir.

##### 4.1. Ekonomik analiz (Economic analysis)

Döküm sektöründe kullanılan kumun kurutulması sürecinde kurutucunun özgül enerji tüketiminin azaltılması, atık ısı geri kazanımı sisteminin geliştirilmesi için ısı geri kazanım ünitesi tasarımı yapılacaktır. Mevcut durumda kum kurutma fırınında günde 7.5 ton/h ve 22 saatte ortalama 165 ton silis kumu kurutulmaktadır. Elektrik tüketimi saatte 52.64 kWh, doğalgaz saatteki tüketimi 69.81 m<sup>3</sup>/h'tir. Mevcut kurutma verimi %26.8 ve karbon salımı ton başına 0.173 CO<sub>2</sub>/h olarak hesaplanmıştır. Sistemin net bugünkü değerleri göz önünde bulundurularak bir ekonomik analiz gerçekleştirilmiştir.

Tablo 7. Sistemdeki sıcaklık değerleri (Temperature values in the system)

Nokta	Sıcaklık değeri (°C)
1: Fan giriş-çıkış	30.0
2: 1. kademe ısı değiştirici giriş	30.0
3: 1. kademe ısı değiştirici çıkış	98.4
4: Doğalgazlı ısıtıcı çıkış-kurutma odası giriş	270.5
5: Kurutma odası atık ısı çıkış	210.5
6: 1. kademe ısı değiştirici atık ısı çıkış-2. kademe ısı değiştirici atık ısı giriş	92.1
7: 2. kademe ısı değiştirici atık ısı çıkış	59.8
8: 2. kademe ısı değiştirici soğuk su girişi	10.0
9: 2. kademe ısı değiştirici sıcak su çıkışı	60.0

1. kademe kurutma havası ön ısıtma ısı geri kazanım ünitesinin çevrime eklenmesi ile kurutma veriminin %32.35 olması öngörülmektedir. Karbon salımı azaltılıp ton başına 0.141 CO<sub>2</sub>/h'e düşecektir. Isı geri kazanımı ile doğalgaz tüketimi saatte 56.99 m<sup>3</sup>/h'e düşerek yakıt tüketimindeki azalma %18.35 olacaktır. Böylece mevcut sistemden ısı geri kazanım ünitesi entegreli sisteme geçildiği takdirde yıllık 1,428,753.81 TL tasarruf edilmesi mümkündür. Isı geri kazanım ünitesinin yatırım maliyeti 938,940 TL olup geri ödeme süresi 0.64 yıldır. 2. kademe fabrika içi su ısıtma için tasarlanan ısı geri kazanım ünitesinin çevrime eklenmesi ile kurutma veriminin %28.45 olması öngörülmektedir. Karbon salımı azaltılıp ton başına 0.162 CO<sub>2</sub>/h'e düşecektir. Isı geri kazanımı ile doğalgaz tüketimi saatte 52.65 m<sup>3</sup>/h'e düşerek yakıt tüketimindeki azalma %18.35 olacaktır. Böylece mevcut sistemden ısı geri kazanım ünitesi entegreli sisteme geçildiği takdirde yıllık 1,912,602.548 TL tasarruf edilmesi mümkündür. Isı geri kazanım ünitesinin yatırım maliyeti 156,600 TL olup geri ödeme süresi 0.16 yıldır.

Elde edilen sonuçların enerji sistemleri açısından önemli bir ölçüde olduğu kanıtlanmış ve bu çalışma ile bu akışkan yatak kurutucuda ısı geri kazanımının etkileri ve önemi ortaya konmuştur.

## 5. Sonuçlar (Conclusions)

Bu çalışmada, döküm sektöründe kullanılan kumun kurutulmasını sağlayan kurutucuda atık ısı geri kazanım sisteminin kullanılarak özgül enerji tüketiminin azaltılması amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda bir ısı geri kazanım ünitesi tasarımı ve gerekli analizler yapılmıştır. Sistemde kullanılan mevcut tasarım ile atık ısı geri kazanımlı tasarımdan elde edilen sonuçlar Tablo 8'de verilmiştir.

Tablo 8. Mevcut tasarım ve atık ısı geri kazanımlı tasarım parametre değerleri (Existing design and waste heat recovery design parameter values)

	Mevcut Tasarım	Atık Isı Geri Kazanımlı Tasarım (1. Kademe Kurutma Havası)	Atık Isı Geri Kazanımlı Tasarım (2. Kademe Su Isıtma)	İyileşme Oranı	
				1.Kademe	2.Kademe
<b>Kurutma Verimi, %</b>	%26.8	%32.35	-	%5.55	-
<b>Doğalgaz Tüketimi, m<sup>3</sup>/h</b>	69.81	56.995	52.655	12.815	17.155
<b>Karbon Salımı, ton CO<sub>2</sub>/h</b>	0.173	0.141	0.162	0.032	0.011

Elde edilen sonuçlara göre aşağıdaki sonuçlar literatüre kazandırılmıştır;

- Mevcut tasarımdan 1. kademe kurutma havası ön ısıtma ısı geri kazanım ünitesinin çevrime eklendiği tasarıma geçildiği takdirde kurutma veriminde %5.55'lik bir artış, doğalgaz tüketiminde 12.815 m<sup>3</sup>/h'lik bir düşüş, karbon salımında ise 0.032 ton CO<sub>2</sub>/kWh'lik bir azalma meydana geleceği hesaplanmıştır.
- Mevcut tasarımdan 2. kademe fabrika içi su ısıtma için tasarlanan ısı geri kazanım ünitesinin çevrime eklendiği tasarıma geçildiği takdirde doğalgaz tüketiminde 4.34 m<sup>3</sup>/h'lik, karbon salımında ise 0.011 ton CO<sub>2</sub>/kWh'lik bir azalma meydana geleceği hesaplanmıştır.
- Birinci kademe kurutma veriminin artışı, ikinci kademe yakıt tüketimindeki azalma oranları ortaya konularak yenilikçi bir ısı geri kazanım ünitesi tasarımı ortaya konmuştur.
- Atık ısının geri kazanıldığı bu tasarımda kurutma verimi yükselerek enerji maliyetinin azalması



öngörülmektedir.

- Enerji tüketimini azaltmayı amaçlayan bu yeni tasarım ile atmosfere salınan sera gazı emisyonlarının azaltılması, Paris İklim Anlaşması'nın hedeflerinin gerçekleşmesine katkı sağlanması öngörülmektedir.

Tasarlanan sistemin enerji, ekonomik ve çevresel analizlerinin yapıldığı bu çalışmada, karbon salımının düşürülerek kurutma veriminin artırılması ve enerji tüketiminin minimize edilmesi öngörülmektedir.

### Teşekkür (Acknowledgment)

Çalışmaya vermiş olduğu katkılardan dolayı Erkunt Sanayi A.Ş.'ye teşekkür ederiz.

### Çıkar Çatışması Beyanı (Conflict of Interest Statement)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması bildirilmemiştir.

### Semboller ve Kısaltmalar (Symbols and Abbreviations)

$c_p$	Havanın özgül ısısı, kJ/kg°C
$h_{fg}$	Buharlaştırma gizli ısısı, kJ/kg
$\dot{m}_b$	Buharlaştırma su miktarı, kg/h
PV/T	Fotovoltaik/termal
$\dot{Q}$	Isı geri kazanım ünitesi hava giriş debisi, m <sup>3</sup> /s
$\dot{Q}_{giren}$	Yakıt ve elektrik tüketiminin toplamı, kWh
$T_1$	Isı geri kazanım ünitesi hava giriş sıcaklığı, °C
$T_2$	Isı geri kazanım ünitesi hava çıkış sıcaklığı, °C
$\dot{W}$	Isı geri kazanım ünitesinde geri kazanılan ısı güç, kW
$\eta$	Kurutma verimi, %
$\rho$	Havanın yoğunluğu, kg/m <sup>3</sup>

### Kaynaklar (References)

- [1] H. Genççele, "Kurutma Ders Notları," Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Gıda Mühendisliği Bölümü, Gıda Teknolojisi Anabilim Dalı, [Erişildi: Eylül 2023].
- [2] Bayrock, D. and W. M. Ingledew. "Mechanism of Viability Loss During Fluidized Bed Drying of Baker's Yeast," *Food Research International*, vol. 30, pp. 417-425, 1997. doi:10.1016/S0963-9969(97)00072-0
- [3] A. Güngör ve N. Özbalta, "Endüstriyel Kurutma Sistemleri," *III. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi ve Sergisi, İzmir, Türkiye, 20-23 Kasım, 1997*, pp. 737-747.
- [4] B. Dai, P. Zhao, S. Liu, M. Su, D. Zhong, J. Qian, X. Hu and Y. Hao, "Assessment of Heat Pump with Carbon Dioxide/Low-Global Warming Potential Working Fluid Mixture for Drying Process: Energy and Emissions Saving Potential," *Energy Conversion and Management*, vol. 222, pp. e113225, 2020. doi:10.1016/j.enconman.2020.113225
- [5] T. G. Walmsley, M. R. W. Walmsley, M. J. Atkins, J. R. Neale and A. H. Tarighaleslami, "Thermo-Economic Optimisation of Industrial Milk Spray Dryer Exhaust to Inlet Air Heat Recovery," *Energy*, vol. 90, pp. 95-104, 2015. doi:10.1016/j.energy.2015.03.102
- [6] B. Golman and W. Julklang, "Simulation of Exhaust Gas Heat Recovery from A Spray Dryer," *Applied Thermal Engineering*, vol. 73, pp. 899-913, 2014. doi:10.1016/j.applthermaleng.2014.08.045
- [7] B. Delpéch, M. Milani, L. Montorsi, D. Boscardin, A. Chauhan, S. Almahmoud, B. Axcell and H. Jouhara, "Energy Efficiency Enhancement and Waste Heat Recovery in Industrial Processes by means of the Heat Pipe Technology: Case of the Ceramic Industry," *Energy*, vol. 158, pp. 656-665, 2018. doi:10.1016/j.energy.2018.06.041

- [8] S. K. Patel and M. H. Bade, "Energy Analysis and Heat Recovery Opportunities in Spray Dryers Applied for Effluent Management," *Energy Conversion and Management*, vol. 186, pp. 597-609, 2019. doi:10.1016/j.enconman.2019.02.065
- [9] B. Lamrani, A. Draoui and F. Kuznik, "Thermal Performance and Environmental Assessment of a Hybrid Solar-Electrical Wood Dryer Integrated with Photovoltaic/Thermal Air Collector and Heat Recovery System," *Solar Energy*, vol. 221, pp. 60-74, 2021. doi:10.1016/j.solener.2021.04.035
- [10] R. T. Oğulata, "Utilization of Waste-Heat Recovery in Textile Drying," *Applied Energy*, vol. 79, pp. 41-49, 2004. doi:10.1016/j.apenergy.2003.12.002
- [11] B. Golman and W. Julklang, "Analysis of Heat Recovery from A Spray Dryer by Recirculation of Exhaust Air," *Energy Conversion and Management*, vol. 88, pp. 641-649, 2014. doi:10.1016/j.enconman.2014.09.012
- [12] S. Bellochi, G. L. Guizzi, M. Manno, M. Pentimalli, M. Salvatori and A. Zaccagnini, "Adsorbent Materials for Low-Grade Waste Heat Recovery: Application to Industrial Pasta Drying Processes," *Energy*, vol. 140, pp. 729-745, 2017. doi:10.1016/j.energy.2017.09.008
- [13] M. K. Krokida and G. I. Bisharat, "Heat Recovery from Dryer Exhaust Air," *Drying Technology*, vol. 22, pp. 1661-1674, 2004. doi:10.1081/DRT-200025626
- [14] H. Ishaq and İ. Dinçer, "A New Energy Efficient Single-Stage Flash Drying System Integrated with Heat Recovery Applications in Industry," *Drying Technology*, vol. 38, pp. 735-746, 2019. doi:10.1080/07373937.2019.1702557
- [15] M. J. Atkins, M. R. W. Walmsley and J. R. Neale, "Integrating Heat Recovery from Milk Powder Spray Dryer Exhausts in the Dairy Industry," *Applied Thermal Engineering*, vol. 31, pp. 2101-2106, 2011. doi:10.1016/j.applthermaleng.2011.03.006
- [16] T. G. Walmsley, M. R. W. Walmsley, M. J. Atkins and J. R. Neale, "Integration of Industrial Solar and Gaseous Waste Heat into Heat Recovery Loops Using Constant and Variable Temperature Storage," *Energy*, vol. 75, pp. 53-67, 2014. doi:10.1016/j.energy.2014.01.103
- [17] D. Fiaschi, G. Manfrida, L. Russo and L. Talluri, "Improvement of Waste Heat Recuperation on An Industrial Textile Dryer: Redesign of Heat Exchangers Network and Components," *Energy Conversion and Management*, vol. 150, pp. 924-940, 2017. doi:10.1016/j.enconman.2017.05.053
- [18] W. Julklang and B. Golman, "Effect of Process Parameters on Energy Performance of Spray Drying with Exhaust Air Heat Recovery for Production of High Value Particles," *Applied Energy*, vol. 151, pp. 285-295, 2015. doi:10.1016/j.apenergy.2015.04.069
- [19] A. Akbari, S. Kouravand and G. Chegini, "Experimental Analysis of A Rotary Heat Exchanger for Waste Heat Recovery from the Exhaust Gas of Dryer," *Applied Thermal Engineering*, vol. 138, pp. 668-674, 2018. doi:10.1016/j.applthermaleng.2018.04.103
- [20] L. Kong, H. Liu, J. Li and J. Tao, "Waste Heat Integration of Coating Paper Machine Drying Process," *Drying Technology*, vol. 29, pp. 442-450, 2011. doi:10.1080/07373937.2010.506620
- [21] X. Guo, M. Liu, F. Lai, D. Chong, J. Yan and F. Xiao, "Theoretical Study and Case Analysis of A Predried Lignite-Fired Power Plant with the Waste Heat Recovery System," *Drying Technology*, vol. 30, pp. 425-434, 2012. doi:10.1080/07373937.2011.645981
- [22] I. C. Kemp, "Reducing Dryer Energy Use by Process Integration and Pinch Analysis," *Drying Technology*, vol. 23, pp. 2089-2104, 2005. doi:10.1080/07373930500210572
- [23] C. G. J. Baker, Y. M. Al-Roomi and G. Al-Sharrah, "Optimal Design of Well-Mixed Fluidized Bed Dryers," *Drying Technology*, vol. 18, pp. 1509-1535, 2000. doi:10.1080/07373930008917791
- [24] X. Han, M. Liu, J. Wang, J. Yan, J. Liu and F. Xiao, "Simulation Study on Lignite-Fired Power System Integrated with Flue Gas Drying and Waste Heat Recovery - Performances Under Variable Power Loads Coupled with Off-Design Parameters," *Energy*, vol. 76, pp. 406-418, 2014. doi:10.1016/j.energy.2014.08.032
- [25] M. Aktaş, S. Şevik, A. Amini and A. Khanlari, "Analysis of Drying of Melon in A Solar-Heat Recovery Assisted Infrared Dryer," *Solar Energy*, vol. 137, pp. 500-515, 2016. doi:10.1016/j.solener.2016.08.036
- [26] M. Aktaş, A. Sözen, A. Amini and A. Khanlari, "Experimental Analysis and CFD Simulation of Infrared Apricot Dryer with Heat Recovery," *Drying Technology*, vol. 35, pp. 766-783, 2017. doi:10.1080/07373937.2016.1212871
- [27] M. Yahya, A. Rachman and R. Hasibuan, "Performance Analysis of Solar-Biomass Hybrid Heat Pump Batch-Type Horizontal Fluidized Bed Dryer Using Multi-Stage Heat Exchanger for Paddy Drying," *Energy*, vol. 254, e124294, 2022. doi:10.1016/j.energy.2022.124294

