

**T.C.
UŞAK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**SERAMİK SEKTÖRÜNDE ISI GERİ KAZANIMLI BİR PÜSKÜRTMELİ
KURUTUCUNUN ENERJİ VE EKSERJİ ANALİZİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

HASAN ÇAĞLAYAN

TEMMUZ 2015

UŞAK

**T.C.
UŞAK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**SERAMİK SEKTÖRÜNDE ISI GERİ KAZANIMLI BİR PÜSKÜRTMELİ
KURUTUCUNUN ENERJİ VE EKSERJİ ANALİZİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

HASAN ÇAĞLAYAN

UŞAK 2015

Hasan ÇAĞLAYAN tarafından hazırlanan “SERAMİK SEKTÖRÜNDE ISI GERİ KAZANIMLI BİR PÜSKÜRTMELİ KURUTUCUNUN ENERJİ VE EKSERJİ ANALİZİ” adlı bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Yrd. Doç. Dr. Abdullah YILDIZ

.....

Tez Danışmanı, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği/oy çokluğu ile Makine Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Doç. Dr. Hakan ÇALIŞKAN

.....

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Uşak Üniversitesi

Yrd. Doç. Dr. Abdullah YILDIZ

.....

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Uşak Üniversitesi

Yrd. Doç. Dr. Mustafa Ali ERSÖZ

.....

Gaz ve Tesisatı Teknolojisi (MYO), Uşak Üniversitesi

Tarih: 14/07/2015

Bu tez ile U.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Lütfullah TÜRKMEN

.....

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Hasan ÇAĞLAYAN

**SERAMİK SEKTÖRÜNDE ISI GERİ KAZANIMLI BİR PÜSKÜRTMELİ
KURUTUCUNUN ENERJİ VE EKSERJİ ANALİZİ**

(Yüksek Lisans Tezi)

Hasan ÇAĞLAYAN

**UŞAK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

Temmuz 2015

ÖZET

Son yıllarda gelişen Türkiye sanayisinde seramik sektörü önemli bir yere sahiptir. Özellikle ihracat ve istihdam açısından ülke ekonomisine sağladığı katma değer oldukça fazladır. Enerji yoğun bir prosese sahip olmasından dolayı seramik sektöründeki en önemli maliyet unsuru enerji maliyetidir. Seramik sektöründe yaklaşık olarak toplam maliyetin sadece %30' unu enerji maliyeti oluşturmaktadır. Bu oranın %20'si doğalgaza, %10' u elektriğe aittir. Özellikle, kurutucularda ve fırınlarda kullanılan doğalgazın yurtdışından ithal olarak alınması seramik sektörü için dezavantajdır. Tüm bunlardan dolayı yüksek enerji verimliliğiyle yapılacak seramik üretimi firmaların dünya ülkeleri ile rekabet edebilecek hale gelmesine neden olacak ve cari açığımızın azalması sağlanacaktır.

Seramik sektörünün birçok prosesinde yüksek sıcaklıktaki gaz dışarı atılmaktadır. Bunların içinde fırınlar en büyük potansiyele sahiptir. Bu atık ısıdan faydalanarak üretimin diğer aşamalarında ön ısıtma sağlanabilir. Atık ısı geri kazanımla hem enerji tasarrufu yapılmış hem de CO₂ emisyonu düşerek çevreye olan zarar azaltılmış olmaktadır. Bu çalışmanın amacı atık ısı geri kazanımla püskürtmeli kurutucuda ön

ısıtmanın verime, doğalgaz tüketimine etkisini incelemek, çıkan sonuçların termodinamik ve ekonomik analizini yapmaktır.

Çalışmada, Uşak Organize Sanayi Bölgesi'nde faaliyet gösteren bir seramik fabrikasında yer alan püskürtmeli kurutucuda atık ısı geri kazanımı projesi uygulanmıştır. Çıkan veriler doğrultusunda atık ısıdan önceki ve sonraki enerji ve ekserji analizleri yapılmıştır. Net Şimdiki Değer Yöntemi ile ekonomik açıdan incelenmiş ve projenin geri ödeme süresi bulunmuştur.

Atık ısı geri kazanımdan sonra enerji verimliliği %52,97' dan %53,4'e, ekserji verimliliği ise %39,46'den %41,24' e yükselmiştir. Bulunan veriler ışığında, toplamda %29' luk bir doğalgaz tasarrufu yapılmıştır. Ekonomik analize göre sistem, 11. Aydan itibaren yatırım bedelini ödeyerek kazanca geçmeye başlamıştır.

Bilim Kodu : 625.05.00

Anahtar Kelimeler : Atık ısı geri kazanımı, püskürtmeli kurutucu, seramik endüstrisi, enerji ve ekserji analizi.

Sayfa Adedi : 97

Tez Yöneticisi : Yrd. Doç. Dr. Abdullah YILDIZ

**ENERGY AND EXERGY ANALYSES OF A WASTE HEAT RECOVERY
SPRAY DRYER AT CERAMIC SECTOR**

(M.Sc. Thesis)

Hasan ÇAĞLAYAN

**UŞAK UNIVERSITY
INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY**

July 2015

ABSTRACT

Ceramic sector of turkey, which developing industry has significant role. Especially, it is greater added value in terms of export and employment for economics. Most important cost factor is energy cost because of ceramic sector has energy-intensive process. Approximately, the energy has a proportion of %30 for overall cost of ceramic sector , electric and natural gas have this ratio %10 and %20 respectively. Especially, it is disadvantage for ceramic sector due to used naturalgas at firing and dryer are received to be import. Because of all these, high energy efficient use of ceramic production will not only cause our companies to compete effectively in the global market but also help to cope with the current account deficit.

Gases at high temperature are thrown out at process of ceramic sector.kilns have a biggest potential for all process at ceramic production. During the proses, it is supported preheating utilizing waste heat at other phase of production.with waste heat recocery, it could be save energy and have decreasing emission (CO₂). The aim of this study to research effect of efficient and consumption naturalgas, it is made thermodynamical and economical analyses of result with waste heat recovery system.

At this study, the waste heat recovery project was applied at spreay dryer of ceramic plant, located in Usak Industrial Park. With result, both energy and exergy analysis

before waste heat and after waste heat were presented. The economical analysis was presented by net present value method and the payback time of the investment was calculated.

As a consequence, after waste heat recovery system, energy efficiency increased from %52,97 to %53,4 and exergy efficiency increased from %39,46 to %41,24. Findings showed that approximately %29 of the total input natural gas could be recovered. The payback time of the system was calculated by net value method was 11 months.

Science Code : 625.05.00

Key Words : waste heat recovery, spray dryer, ceramic industry, energy and exergy analysis.

Page Number : 97

Adviser : Asist. Prof. Dr. Abdullah YILDIZ

TEŞEKKÜR

Kişiliği ile kendime örnek aldığım, gerek öğrenim hayatımda gerekse de tez çalışmam sırasında yardım ve desteğini esirgemeyen çok değerli hocam ve tez danışmanım sayın Yrd. Doç. Dr. Abdullah YILDIZ' a teşekkür ederim. Ayrıca, tez jüri üyeleri Doç Dr. Hakan ÇALIŞKAN' a ve Yrd. Doç. Dr. Mustafa Ali ERSÖZ' e değerli zamanlarını ayırıp katkı sağladıkları için teşekkürü bir borç bilirim.

İş hayatım ve tez çalışmam süresince desteğini her zaman hissettiğim Umpaş Holding Yönetim Kurulu Başkanı Hasan Hilmi ALPER'e, teknik konular hakkında yardımlarını esirgemeyen Seranova Seramik' in Fabrikalar Müdürü Hüseyin KÖKEN' e, Enerji Yöneticisi Süleyman POTUR' a, Mase Hazırlama Yöneticisi İsmail YETİK'e, atık ısı geri kazanım projesinin yüklenici firması olan TÜREVMAC A.Ő.' nin sahibi olan Yavuz KAYAPINAR' a ve tüm fabrika çalışanlarına teşekkürlerimi sunarım.

Her zaman yanımda olduklarını bildiğim, yaşamım boyunca bana olan güvenlerini hiç yitirmeyen, maddi ve manevi desteklerini benden esirgemeyen aileme sonsuz teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	iii
TEŞEKKÜR.....	v
İÇİNDEKİLER.....	vi
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	viii
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	x
RESİMLERİN LİSTESİ.....	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xiv
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....	4
3. SERAMİK KAPLAMA MALZEME SEKTÖRÜ VE ÜRETİM AŞAMALARI.....	9
3.1. Seramiğin Tarihi, Tanımı ve Bileşenleri.....	9
3.2. Türkiye’ de Seramik Sanayisi	10
3.3. Seramik Kaplama Malzemelerinin Sektörel Bazda İncelenmesi.....	11
3.3.1. Dünya ve Ülke Çapında Seramik Kaplama Malzemelerinin Üretim Dağılımları.....	11
3.3.2. Seramik Kaplama Malzemeleri Sektöründe Maliyet Unsurları.....	14
3.4. Seramik Kaplama Malzemelerinin Üretim Yöntemi ve Aşamaları.....	15
4. SERAMİK SEKTÖRÜNDE ATIK ISI GERİ KAZANIMLARI.....	24
4.1. Seramik Sektöründe Atık Isı Kaynakları ve Kullanım Alanları.....	25
4.1.1. Püskürtmeli Kurutucular ve Atık Isı.....	26
4.1.2. Fırımlar ve Atık Isı.....	30

5. SERAMİK SEKTÖRÜNDE KULLANILAN PÜSKÜRTMELİ KURUTUCULARIN İNCELENMESİ.....	33
5.1. Püskürtmeli Kurutucuların Sınıflandırılması.....	34
5.2. Püskürtmeli Kurutucuların Genel Yapısı ve Kurutma Döngüsü.....	36
5.3. Püskürtmeli Kurutucularda Enerji Tüketimini Etkileyen Faktörler.....	40
6. ATIK ISI GERİ KAZANIM PROJESİ.....	42
6.1. Doğalgaz Tüketiminin Belirlenmesinde Kullanılan Programlar ve Yöntemler.....	42
6.2. Duvar Karosu Püskürtmeli Kurutucunun Aylara Göre Doğalgaz Tüketimi.....	44
6.3. Atık Isı Geri Kazanım Sisteminin Kurulum Aşamaları.....	45
6.4. Enerji ve Ekserji Hesaplamaları İçin Hazırlanan Programın Tanıtılması.....	57
7. ENERJİ, EKSERJİ VE EKONOMİK ANALİZ.....	61
7.1. Kütle Denge Analizi.....	61
7.2. Enerji Analizi.....	68
7.3. Ekserji Analizi.....	77
7.4. Ekonomik Analiz.....	85
7.5. Atık Isı Geri Kazanım Projesinin Kapasiteye ve Enerji Tasarrufuna Olan Etkileri.....	89
8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	91
8.1. Sonuçlar.....	91
8.2. Öneriler.....	92
KAYNAKLAR.....	94
ÖZGEÇMİŞ.....	97

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 3.1. İllere göre seramik kaplama malzemeleri üretimi kapasite değerleri.....	13
Çizelge 3.2. 1 m ² seramik üretiminin maliyet dağılımı.....	15
Çizelge 4.1. Atık ısı kaynaklarının kalitesine göre dağılımı.....	24
Çizelge 6.1. Püskürtmeli kurutucunun masse üretimleri ve doğalgaz tüketimleri.....	45
Çizelge 6.2. Temiz sıcak hava baca gazı bilgileri.....	47
Çizelge 6.3. Baca gazı bilgileri.....	48
Çizelge 6.4. Programdan verilerin Excele aktarılmış hali.....	60
Çizelge 7.1. Hammadde kütle ve element dağılımı.....	63
Çizelge 7.2. Doğalgazın element ve kütle dağılımı.....	63
Çizelge 7.3. Havanın element ve kütle dağılımı.....	64
Çizelge 7.4. Sisteme giren ve çıkan maddelerin kütle dağılımı.....	64
Çizelge 7.5. Sisteme giren maddelerin element, mol ve kütle dağılımı.....	65
Çizelge 7.6. Atık ısı kullanımından önceki baca gazı analiz.....	66
Çizelge 7.7. Atık ısı kullanımından sonraki baca gazı analizi.....	67
Çizelge 7.8. Sistemden çıkan maddelerin element, mol ve kütle dağılımı.....	68
Çizelge 7.9. Bazı elementlerin özgül ısı hesabında kullanılan sabitleri.....	69
Çizelge 7.10. Atık ısıdan önce sisteme giren maddelerin enerji değerleri.....	71
Çizelge 7.11. Atık ısıdan önce sistemden çıkan maddelerin enerji değerleri.....	72
Çizelge 7.12. Atık ısıdan sonra sisteme giren maddelerin enerji değerleri.....	74
Çizelge 7.13. Atık ısıdan sonra sistemden çıkan maddelerin enerji değerleri.....	75
Çizelge 7.14. Atık ısıdan önce sisteme giren maddelerin ekserji değerleri.....	80
Çizelge 7.15. Atık ısıdan önce sistemden çıkan maddelerin ekserji değerleri.....	81

Çizelge 7.16. Atık ısıdan sonra sisteme giren maddelerin ekserji değerleri.....	83
Çizelge 7.17. Atık ısıdan sonra sistemden çıkan maddelerin ekserji değerleri.....	84
Çizelge 7.18 Atık ısı geri kazanım ile sağlanan tasarruf miktarları.....	86
Çizelge 7.19. Net Şimdiki Değer tablosu.....	88

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 1.1. Türkiye enerji üretim-tüketim grafiği.....	1
Şekil 1.2. Türkiye’de enerji tüketiminin kaynaklar bazında dağılımı.....	2
Şekil 3.1. Ülkere göre Seramik Kaplama Malzemeleri üretim miktarları.....	12
Şekil 3.2. Bölgelere göre kurulu kapasite dağılımları.....	14
Şekil 3.3. Seramik fabrikasının başlıca girdi ve çıktıları.....	15
Şekil 3.4. Seramik kaplama malzemelerinin temel üretim aşamaları.....	17
Şekil 3.5. Farklı fırın bölgelerinin hava sirkülasyonu.....	22
Şekil 4.1. Seramik üretiminde kurutma ve pişirme proseslerinde doğalgaz kullanımı...25	
Şekil 4.2. Son üç yılda doğalgaz birim m ³ fiyat değişimi.....	26
Şekil 4.3. Püskürtmeli kurutucudaki ısı dengesi.....	28
Şekil 4.4. Püskürtmeli kurutucudaki atık ısı geri kazanımı.....	29
Şekil 4.5. Fırınlara giriş ve çıkış bacaları.....	30
Şekil 4.6. Soğutma havasının sisteme dahil edilmesi.....	31
Şekil 5.1 Püskürtmeli kurutucu proses aşamaları.....	33
Şekil 5.2 Püskürtmeli kurutucu çeşitleri.....	34
Şekil 5.3. Püskürtmeli kurutucudaki hava-hammadde karışımı.....	35
Şekil 5.4. Püskürtmeli kurutucunun genel görünümü.....	36
Şekil 5.5. Ana gövde görünümü.....	38
Şekil 5.6. Sıcak hava dağıtıcısının kesit diyagramı.....	39
Şekil 5.7. Püskürtmeli kurutucu içinde girdap oluşumu.....	40
Şekil 5.8. Kurutucuya giren maddelerin ısı dengesi.....	41
Şekil 6.1. Duvar Karosu fırınındaki atık ısı bacaları.....	46

Şekil 6.2. Duvar Karosu fırınındaki temiz sıcak hava bacaları.....	46
Şekil 6.3. Duvar Karosu fırınındaki baca gazları.....	47
Şekil 6.4. Temiz hava ve baca gazının eşanjörlere giriş ve çıkışları.....	53
Şekil 6.5. Atık ısı geri kazanım sisteminin genel akış şeması.....	56
Şekil 7.1. Püskürtmeli kurutucuya giren-çıkan maddeler.....	62
Şekil 7.2. Atık ısı kullanımından önce sisteme giren-çıkan kütle ve enerji miktarları....	73
Şekil 7.3. Atık ısı kullanımından sonra sisteme giren-çıkan kütle ve enerji miktarları..	76
Şekil 7.4. Net Şimdiki Değer akış diyagramı.....	86
Şekil 7.5. Püskürtmeli kurutucunun aylara göre ortalama doğalgaz tüketim değerleri (m ³ /kg)	90

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 3.1. Kırıcı sahası.....	18
Resim 3.2. Hammadde stok sahası.....	18
Resim 3.3. Hammadde değirmenleri.....	19
Resim 3.4. Püskürtmeli kurutucu.....	20
Resim 3.5. Presler.....	20
Resim 3.6. Dikey kurutucular.....	21
Resim 3.7. Sır değirmenleri.....	21
Resim 3.8. Fırınlr.....	23
Resim 4.1. Püskürtmeli kurutucudan bir görünüm.....	27
Resim 4.2. Püskürtmeli kurutucu şofbeninin termal görüntüsü.....	29
Resim 4.3. Soğutma havasının değerlendirmesine bir örnek.....	31
Resim 4.4. Fırınlrın termal ısı görüntüsü.....	32
Resim 5.1. Granül tanecik görünümü.....	35
Resim 5.2. Dağıtıcı halka.....	37
Resim 6.1. Enerji izleme programı.....	43
Resim 6.2. Standart m ³ hesaplama programı.....	44
Resim 6.3. Temiz sıcak hava bacasından alınan havanın ilk boru hattı.....	48
Resim 6.4. Temiz sıcak hava bacası çıkış hattı.....	49
Resim 6.5. İki temiz sıcak hava bacasının birleşimi.....	49
Resim 6.6. Temiz sıcak hava hatlarının birleşmesiyle oluşan boru hattı.....	50
Resim 6.7. Kompansatör sistemi.....	50
Resim 6.8. Ana boru hattının oluşumu.....	51

Resim 6.9. Baca gazı hattı.....	51
Resim 6.10. Hava-hava eşanjörü.....	52
Resim 6.11. Hava-su eşanjörü.....	52
Resim 6.12. Püskürtmeli kurutucu atık ısı giriş bölümü.....	54
Resim 6.13. Baca sıcaklıkları kontrol paneli.....	55
Resim 6.14. Baca gazı ve su ısıtma eşanjörü kontrol paneli.....	55
Resim 6.15. Koşul bilgilerinin seçilmesi.....	57
Resim 6.16. Farklı sıcaklıktaki ürünlerin özellikleri.....	58
Resim 6.17. Debi boş bırakıldı uyarısı.....	58
Resim 6.18. Basınç boş bırakıldı uyarısı.....	59
Resim 6.19. Toplam ekserji ve enerji hesapları.....	59

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış bazı simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklama
\dot{m}	kütlesel debi (kg/h)
$\dot{m}_{\text{çk}}$	Çamur (kuru) kütlesel debi (kg/h)
$\dot{m}_{\text{çs}}$	Çamur (sulu) kütlesel debi (kg/h)
\dot{m}_{sh}	Sızıntı hava kütlesel debi (kg/h)
\dot{m}_{d}	Doğalgaz kütlesel debi (kg/h)
\dot{m}_{yk}	Yakma havası kütlesel debi (kg/h)
\dot{m}_{mk}	Masse (kuru) kütlesel debi (kg/h)
\dot{m}_{mn}	Masse (nem) kütlesel debi (kg/h)
\dot{m}_{bg}	Baca gazı kütlesel debi (kg/h)
\dot{m}_{bb}	Baca gazı buharı kütlesel debi (kg/h)
\dot{m}_{bs}	Baca sızıntı hava kütlesel debi (kg/h)
V	Hacim (m^3)
c	Isıl kapasite (kJ/kgK)
T	Sıcaklık (K)
T_0	Ölü Hal Sıcaklığı (K)
\dot{E}_{ph}	Potansiyel Enerji (kJ/h)
\dot{E}_{ch}	Kimyasal Enerji (kJ/h)

\dot{E}_x^{PH}	Potansiyel Ekserji (kJ/h)
\dot{E}_x^{KE}	Kinetik Ekserji (kJ/h)
\dot{E}_x^{PE}	Fiziksel Ekserji (kJ/h)
\dot{E}_x^{CH}	Kimyasal Ekserji (kJ/h)
P_0	Ölü hal basıncı (bar)
P	Ortam basıncı (bar)
\bar{R}	Universal gaz sabiti (kJ/kmolK)
R_x	Universal gaz sabiti (kJ/kgK)
ϵ_{ex}^0	Spesifik molar kimyasal ekserji (kJ/mol)
ϵ_{ex}^{-ch}	Molar kimyasal ekserji (kJ/mol)
x_k	Molar kesir
γ_k	Sıvılar için aktiflik katsayısı
M	Molar ağırlık (kg/mol)
η_I	Enerji verimi
η_{II}	Ekserji verimi
A	Kazanç (\$)
B	Maliyet (\$)
p	Periyot (Ay)
S	Yatırım bedeli (\$)
n	Sistem Ömrü (Yıl)

Kısaltmalar**Açıklama****SKM**

Seramik Kaplama Malzemeleri

BTEP

Milyon Ton Eşdeğer Petrol

DK

Duvar Karosu

PLC

Programlanabilen Mantıksal Denetleyici

NPV

Net Bugünkü Değer

USD (\$)

Amerikan Doları

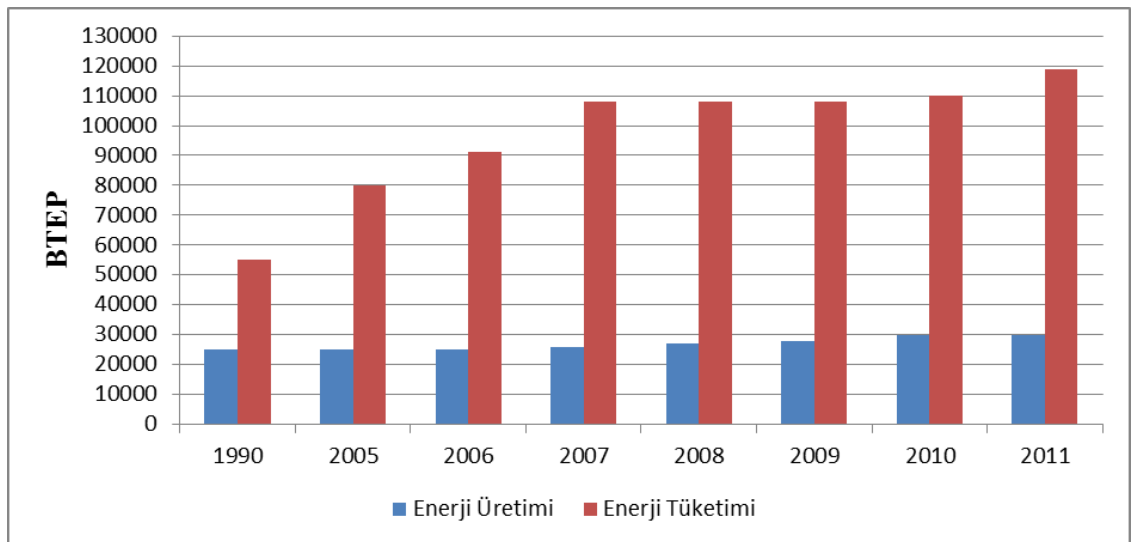
LHV

Alt Isıl Değer (kJ)

1. GİRİŞ

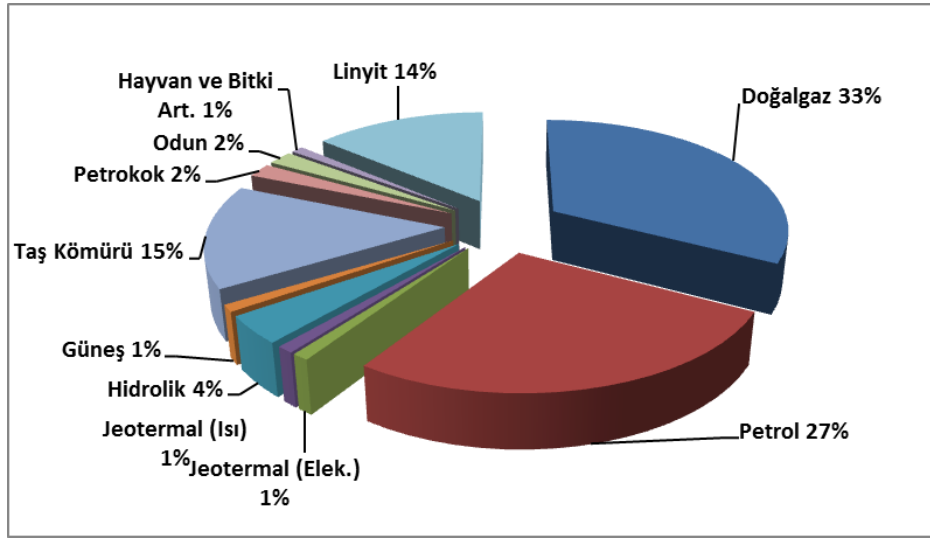
Enerji, ülke ekonomisinin gelişmesi, insanoğlunun yaşam standartlarının yüksek tutulması ve belli bir istikrarda sürdürülmesi için gerekli olan bir yapıya sahiptir. Son yıllarda teknolojinin, iletişimin ve ulaşımın hızla büyümesi enerji ihtiyacının artmasına sebep olmuştur. Enerji talebinin her geçen gün artmasıyla dünya ülkeleri ve uluslararası kuruluşlar enerji kaynaklarını elde edebilmek ve etkin bir şekilde kullanabilmek için adeta bir yarış haline girmişlerdir. Azalan kaynakların arz ve talep dengesi her geçen gün bozulmakta ve piyasada fiyat dalgalanmaları ile karşı karşıya kalınmaktadır. Artan fiyatlar sanayi sektörüne katlanarak yansımakta ve sanayi sektörü bu fiyat artışlarını absorbe edebilmek için enerji verimliliği üzerinde yoğunlaşmaktadır [1].

Dünya ülkelerinde artan nüfus ile birlikte enerji talebi de artan bir ivme izlemiştir. Bu ülkelerin en büyük örneklerinden biride Türkiye'dir. Türkiye gelişmekte olan bir ülke olup genç nüfusu da hızla artmaktadır. Ülkemizde enerji ihtiyacının %70'i yurtdışından sağlanmaktadır. Bu oran enerjide dışa bağımlılığını göstermekte ve ülkemiz için önemli bir sorun olarak karşımıza çıkmaktadır. Eğer sanayide sürdürülebilir kalkınma istiyorsak enerji maliyetlerini aşağıya çekmek veya yenilebilir enerji kaynakları üzerine etkin AR-GE çalışmaları yapmak gerekmektedir. Türkiye de enerji üretimi ve tüketimi grafiği Şekil 1.1' de gösterilmiştir [1].



Şekil 1.1. Türkiye enerji üretim-tüketim grafiği (BTEP) [1]

Bununla birlikte, Şekil 1.2' de görüldüğü gibi Türkiye'de kaynaklar bazında enerji tüketimini doğalgaz ve petrol başı çekmektedir. Bu kaynakların tamamının ithal olması enerjinin Türkiye için önemini daha da artırmaktadır. Taş kömürü ve linyit ülkemizde çıkarılan önemli enerji kaynaklarıdır. Fakat bunların sağladığı katma değer oranı; taşıma, depolama, işleme enerji miktarı açısından düşük olması ve en önemlisi yüksek oranda çevre kirliliğine sebep olması bu kaynakları ikinci plana itmektedir.



Şekil 1.2. Türkiye'de Enerji Tüketiminin Kaynaklar Bazında Dağılımı [1]

Seramik üretim sektörü enerji yoğun bir sektördür. Fırın ve kurutucular için gerekli olan enerji miktarı çok yüksektir. Bu prosesler için gerekli olan enerji doğalgazdan karşılanmaktadır. Seramik sektöründe sadece maliyetin %30' unu enerji maliyeti oluşturmaktadır.

Türkiye de seramik üretimi hem istihdam hem de ekonomi anlamında önemli bir yere sahiptir. Katma değeri yüksek ürünler üretilerek ülke ekonomisine yurt dışı pazarından önemli miktarda kaynak sağlamaktadır. Fakat son yıllarda artan enerji maliyetleri sektörün kanayan yarası haline gelmiştir. Çünkü Türkiye ye seramik sektöründe Çin, Hindistan, Avrupa, İran gibi büyük ülkelerle rekabet aşamasında enerji maliyetinden dolayı önemli bir yük binmektedir. Enerji maliyetinin yüksek olmasının sebebi;

- Yerli kaynakların yetersiz veya hiç olmayışı

- İthal edilen doğalgazın birim fiyatının çok yüksek olmasıdır [1].

Bu çalışmada, seramik kaplama sektörü prosesinde ki fırınlardan atılan yüksek sıcaklıktaki temiz ve kirli havanın ısı geri kazanımı için kurulan sistemin enerji, ekserji verimlilikleri ve ekonomik analiz değerlendirmeleri yapılmıştır.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Velic v.d. (2003), geleneksel püskürtmeli kurutucu üretimlerinde Excel programı kullanarak bazı hesaplamaları kolaylaştırmıştır. Bu program ile termodinamik hesaplamalarının kütle ve enerji balanslarını kolaylıkla yapmışlardır. Programda bazı girdilerin azaltılmasıyla kapasitenin artacağını ayrıca maliyetlerinde düşürüleceğini öngörülmüştür. Enerji tüketiminin azaltılmasının atık ısıdan yararlanılarak yapılabileceğini ve bu atık ısısında en fazla % 60'ının kullanılabilceğini savunmuşlardır. Doğalgaz tasarrufunun, atık ısıdan yararlanma ile doğru orantılı olacağını ve en fazla %14' lük bir tasarruf sağlanabileceğini söylemişlerdir. Doğalgaz tüketiminin azaltılması ile CO₂ emisyonun da azaltılabileceğini ve çevreye olan zararı minimize edilebileceğini öngörmüşlerdir [2].

Monte vd. (2003), kahve pişirim işletmesinde atık ısıdan yararlanarak, enerji geri kazanımını sağlamaya yönelik deneysel çalışmalar yapmışlardır. Atık ısıdan elde edecekleri enerji kazanımıyla ekonomik anlamda da fayda sağlanabilecektir. Aynı zamanda çevreye yayılan CO₂ emisyonunu azaltarak kirliliği önlenilebileceğini vurgulamışlardır [3].

Oğulata (2004), tekstil sektörünün enerji yoğun bir sektör olduğundan bahsetmiş ve her geçen gün enerji tüketiminin arttığını vurgulamıştır. Özellikle kurutma prosesinde kullanılan enerjinin bir hayli fazla olması yazarı atık ısı üzerine çalışma yapmaya itmiştir. Bu makalede de atık ısının tekstil sektöründeki kurutma prosesin de kullanılması üzerine deneysel bir çalışma yapılmıştır [4].

Engin ve Arı (2005), enerji yoğun bir sektör olan çimento üretimi üzerine bir çalışma yapmışlardır. Çimento üretiminde kullanılan rotary fırınların en fazla enerji tüketildiği bölüm olduğunu belirtilmiştir. Yaklaşık 600 ton kapasiteye sahip rotary fırının enerji etütü yapılmış ve enerjinin %40'ının kaybolduğu tespit edilmiştir. Kaybolan bu enerjinin %19.15' i atık gaz ile, %5.61'i yığın ile, %15.6' sı fırının dış yüzeyinde gerçekleşmektedir [5].

Apak (2007), çalışmalarında bir seramik fabrikasında enerji tüketimi yüksek olan bölümlerin enerji ve ekserji analizlerini yapmış ve bu bölümlerdeki düşük verimliliği dikkat çekmeye çalışmıştır. Sırasıyla; püskürtmeli kurutucunun %65, dikey kurutucunun %87 ve fırınların enerji verimliliği %43,4 olarak bulmuştur. Ekserji verimlilikleri ise püskürtmeli kurutucunun %30, dikey kurutucunun % 61, fırınların ise %11 bulmuştur. Burada enerji verimliliği bir hayli düşük olan fırınlar ve püskürtmeli kurutucu için enerji etütleri yapılması gerektiğini vurgulamıştır [6].

Yörü (2008), bir seramik fabrikasında uygulanan kojenerasyon sisteminin enerji ve ekserji analizini yapmıştır. Bu analizi yaparken yapay sinir ağlarından yararlanmış ve bir program tasarlamıştır. 1 saatlik periyodik aylık verilerde tüm sistemin ortalama enerji verimliliği %82,2 ve ekserji verimliliği %32,4 olarak bulmuştur. Sonuç olarak kojenerasyon sistemleri için yapay sinir ağları kullanılarak oluşturulan programın kullanılabilirliğini göstermiştir [7].

Turan (2009) yine bir seramik fabrikasında bulunan kurutucuların enerji ve ekserji analizlerini yapmıştır. Enerji verimlilikleri sırasıyla; püskürtmeli kurutucunun %66, dikey kurutucunun %39 ve fırınların %35 bulmuştur. Ekserji verimlilikleri ise sırasıyla püskürtmeli kurutucunun %54, dikey kurutucuların %43, fırınların %16 bulmuştur. Verimliliği etkileyen en büyük etkenin izolasyonun olduğunu söylemiş ve yapılacak yatırımların geri dönüş süresinin çok kısa olacağını belirtmiştir [8].

Afşar (2011), bir seramik fabrikasında doğalgaz tüketimi olan bölümlerin enerji ve ekserji analizini yapmıştır. Püskürtmeli kurutucu, dikey kurutucu ve fırınların enerji verimliliği sırasıyla; %79, %56, %79 bulmuştur. Ekserji verimlilikleri ise yine sırasıyla; %86, %66, %89 bulmuştur. Burada enerji ve ekserji kayıplarını minimuma indirecek ve verimlilikleri artıracak öneriler sunulmuştur [9].

Karellas vd. (2013), çimento sektöründe kullanılan atık ısı geri kazanım üzerine bir çalışma yapmışlardır. Standart çimento üretim prosesinde harcanan toplam enerjinin %25' i elektrik, %75'i ısı enerjisi olduğunu ifade etmiştir. Her bir proses ayrı ayrı incelendiğinde en büyük enerji kaybı atık ısı ile olmaktadır ve bu atık ısı kullanılan enerjinin %35 ile %40 arasına tekamül etmektedir. Çalışmalarında atık ısıyı enerji ve ekserji bakımından, Rankine Buhar Çevrimi ve Organik Rankine Çevrimi yöntemleri ile

incelemişlerdir. Parametrik alışmalarda Rankine Buhar evrimi daha verimli olduğu kabul edilmiş ve uygulanmıştır. Atık ısı geri kazanımı ile elektrik üretimi yapılmış ve maliyet açısından çok önemli bir katkısı olmuştur. Sistemin geri ödeme süresi 5 yıl olarak tayin edilmiştir [10].

Aghbashlo vd. (2013), son yıllarda püskürtmeli kurutucunun birçok farklı proseste kullanıldığını, burada harcanan enerjinin önemli bir maliyet unsuru olduğunu ve artan enerji maliyetinin yanında artan taleple birlikte evre kirliliğini de vurgulamıştır. Sınırlı kaynaklarla elde edilen enerjinin verimli kullanılması yönünde çalışmaları olup, bunu farklı proseslerde anlatmaya çalışmıştır. Örneğin süt tozu üretiminde, peynirin kurutulmasında, balık yağı emülsiyonunda vb. proseslerde püskürtmeli kurutucunun kullanıldığını ve çeşitli verimlilik çalışmaları yapılabileceğini ifade etmiştir. [11].

Utlu ve Hepbaşlı (2014), yıllık üretimi 24 milyon m² olan bir seramik işletmesinin termoekonomik değerlendirmesini yapmıştır. Bu değerlendirme püskürtmeli kurutucu, düşey kurutucu ve fırınlar üzerine olmuştur. Bu üç prosesi enerji, ekserji ve eksergonomik açıdan performanslarını irdelemiştir. Termodinamik anlamda kaybolan enerji fiyat oranı 53.38-135.83 MW/\$ arasında olduğunu belirlemişlerdir [12].

Mezquita vd. (2014), seramik fabrikalarında enerjinin büyük bir kısmını fırınlarda kullanıldığını ve fırınlarda da bu doğalgaz aracılığı ile olduğunu belirtmiştir. Fırınlarda enerjinin baca gazı ve soğutma havası ile %50 oranında kaybolduğunu vurgulamıştır. Fırına giren ve çıkan tüm maddelerin enerji ve ekserjilerini hesaplayan yazar, dışarıya atılan soğutma havasını atmosfer yerine fırına yakma havası olarak göndermiş ve %17 oranında enerji tasarrufu sağlamıştır. Deneysel ve teorik analizleri karşılaştırmış ve sonuçların uyumlu olduğunu ortaya koymuştur [13].

Golman ve Julklang (2014), başka bir çalışmasında yine püskürtmeli kurutucular üzerine çalışmış ve atık ısı geri kazanımının önemini vurgulamıştır. Atık ısının debisinin ve sıcaklığının artmasının verimliliği artıracadığına dair bilgiler vermiştir. Bu makalenin [15] referanslı çalışmadan farkı sisteme giren ve işlem gören çamurun verimlilik üzerine etkisidir. Sisteme giren çamurun düşük debide ve yüksek yoğunlukta verimliliği artırdığını savunmuştur [14].

Golman ve Julklang (2014), seramik fabrikasında kullanılan püskürtmeli kurutuculardan çıkan atık ısının geri kullanılarak enerji verimliliğini artırılmasına yönelik araştırma yapmıştır. Bu araştırmalarında sistemi simüle ederek Excel'in Visual Basic programlama dilinden yararlanmıştır. Sisteme giren ve çıkan tüm maddelerin enerji ve ekserji analizini yaparak verilerini programa entegre etmiştir. Sistemden çıkan atık gazın bir ısı değiştirici yardımı ile değerlendirilip tekrar sisteme entegre edilmesini öngörmüştür. Böylelikle enerji verimliliğinde maksimum %16 artış gerçekleşmiş olup enerji tasarrufu ise maksimum %50 civarındadır. Ayrıca birim zamanda üretilen çamurun arttığı yani kapasitenin yükseldiğini öngörmüştür. Atık ısının kullanımının artmasıyla enerji verimliliğinde artacağını söylemiştir [15].

Julklang ve Golman (2015), püskürtmeli kurutucuda enerji verimliliğini etkileyen faktörleri araştırmışlardır. Bu çalışmalarında matematiksel modellerden yararlanılmıştır. İlk faktör olarak hammaddenin sıvı oranını ve akış oranını artırarak verimliliği %43,3' yükseltmiştir. Daha sonra sisteme hava-hava eşanjöründen geçirilmiş olan temiz havayı dahil ederek %52,4 oranında enerji geri kazanımı sağlamıştır [16].

Bu çalışmada Uşak Organize Sanayisinde yer alan Umpaş Seramik Sanayi ve Ticaret A.Ş.' kurulu olan atık ısı geri kazanım projesi incelenmiştir.. Firmada öncelikle enerji etütleri yapıp, tüm bölümler ayrıntılı olarak incelenmiştir. Özellikle doğalgaz tüketiminin fazla olduğu bölümlerin enerji maliyetine olan etkisinin büyük olduğu gözlemlenmiştir. Bu gözlemler sonucunda işletmede yer alan püskürtmeli kurutuculara atık ısı geri kazanım projesi uygulanması gerektiği anlaşılmış ve uygulamaya konulmuştur.

Literatürde, seramik sektöründe başka bir ısı kaynağından faydalanılarak enerji tasarrufunu sağlamaya yönelik bir çalışmaya rastlanılmamıştır. Bu çalışmada fırınlardan dış ortama atılan atık ısının püskürtmeli kurutucuda da ön ısıtma yapması sağlanarak atık ısı geri kazanımlı püskürtmeli kurutucunun enerji, ekserji ve doğalgaz tüketimine etkisi araştırılmıştır. Diğer çalışmalarda püskürtmeli kurutucunun kendi baca gazından atılan ısı yine kendi sistemine dahil edilmiştir. Fakat püskürtmeli kurutucudan atılan baca gazının sıcaklığının düşük olması tasarruf miktarının da düşük olmasına sebep olmaktadır. Yüksek sıcaklıktaki fırın baca gazları ön ısıtması kullanılması aynı zamanda kurutucunun kapasitesini ve verimliliğini arttırmıştır. Sistemin enerji verimliliği atık

ısıdan önce %52,97 iken atık ısıdan sonra %53,4' e, ekserji verimliliği ise %39,46' dan %41,24' e yükselmiştir.

Çalışma sadece enerji yoğun sektör olan seramik firmalarında değil, kurutma prosesleri içeren bir çok farklı sektörde atık ısı geri kazanımının uygulanabileceğini göstermektedir. Bu uygulama işletmelerin enerji maliyetlerinin düşürmenin yanında kapasitelerinde artıracaklarını göstermektedir. Uygulama seramik firmalarının dışında süt, çerez, sebze vb. sektörlerde de uygulanabilmektedir. Ayrıca bu çalışma atık ısıyı sadece su ısıtmak için kullanılmaması gerektiğini kurutma proseslerinde de kullanabileceğini vurgulamaktadır.

Bu tür çalışmalar ile firmaların sağlayacağı doğalgaz tasarrufu, sadece işletme bazında değil ülke ekonomisine de katkı sağlamaktadır. Çünkü, ithal edilen her enerji ülke ekonomisinde cari açığa sebep olmaktadır. Ayrıca bu tür çalışmalar küresel pazar anlamında firmaların rekabet gücünü artırıcı bir unsur olmaktadır.

Fırınlardan atılan kirli ve temiz sıcak havanın toplanıp püskürtmeli kurutucu sistemine dahil edilmesi literatürde çok az görülen hatta tek diyebileceğimiz bir çalışmadır. Atık ısı kontrolünün PLC yazılımı ile yapılması bize sistemin tamamen kontrolünü sağlamakta olup enerji verimliliğini optimum noktada tutmamıza yardımcı olmaktadır. Böylelikle rahatlıkla sistemden önceki durum ile sistemden sonraki durum arasında kıyaslama yapabilmemizi sağlamaktadır.

Bu çalışmada atık ısının püskürtmeli kurutucuda kullanılması durumunda, doğalgaz tüketimine, enerji ve ekserji verimliliklerine olan etkisi araştırılmıştır. Çalışmada hesaplamaları daha kolay ve pratik hale getirebilmek için Excel-Visual Basic' de bir yazılım geliştirilmiştir. Çıkan sonuçlar Excel'e aktarılma özelliği olduğu için raporlamalar daha kolay hale getirilmiştir.

3. SERAMİK KAPLAMA MALZEME SEKTÖRÜ VE ÜRETİM AŞAMALARI

3.1. Seramiğin Tarihi, Tanımı ve Bileşenleri

Çamur, bilinen ilk yaşam izlerinden bu yana insanoğlunun kutsal yaşamına ve gündelik hayatına girmiştir. İlk çömlüklerin yüksek ateşte pişirilerek sızdırmazlık özelliği keşfedildiği düşünülmektedir. Daha sonra bunlara şekiller, izler ve renkler verilerek çeşitlendirilmiştir. Sözlükte keramik adı verilen sertleşmiş boynuz anlamına gelen Yunancaya ait bir kelimedenden türetilmiştir. Türkçeye ise Fransızca da yer alan 'ceramique' kelimesinden türetilmiştir.

Üretime başlaması insanoğlunun yerleşik hayata geçmesiyle direk ilişkilidir. Tarihte bilinen ilk seramikler Anadolu'da bulunmuştur. Su, toprak, ateş bu topraklarda 8000 yıl önce birleşmiş ve birçok uygarlığa tanıklık etmiştir. M.Ö. 6000 yılına ait seramikler Anadolu'nun Hacılar ve Alacahöyük'de bulunmuş ve Anadolu tarihinin vazgeçilmez bir unsuru haline gelmiştir. Daha sonra M.Ö. 4000 yıllarında Çin'de ve daha sonra Anadolu uygarlıklarında görülmeye başlanmıştır [17-18].

Seramik, bir şekle sahip, farklı boyutta ametalik inorganik hammaddelerden (mineral ya da yapay) yapılmış ve değişik preslerden geçirilip, yarı bitmiş ürün haline gelen, daha sonra fırınlanan ve sonunda bir kısmı kristalin ve bir kısmı da vitrifiye yapıda bulunan sert maddelerdir [19].

Hemen hemen her dönüşümler fırınlama sonrası devamlı hale gelirler. İnorganik maddeleri kullanmamızın nedeni yeryüzünde çok fazla olmalıdır. Bu yüzden seramik yapımında bu inorganik maddeleri kullanmamız ekonomik açıdan daha faydalı olacaktır. Seramik yapımında bu maddelerden en çok Fe, Ca, Mg, Na ve K içeriklerine sahip silisyum ve alüminyum oksitler gösterilmektedir. Bu maddeler doğada çok fazladır ve seramiğin ana bünyesinin vazgeçilmezleridir.

Doğal oksitlerden oluşmuş ürünlerin çalışma alanı aşağıdaki gibidir:

- Karolar

- Sağlık Gereçleri
- Sofra Gereçleri
- Tuğla
- Bazı Refrakter Ürünler

Diğer bir yaklaşımla, oksit olmayan ama özel oksitlerden oluşmuş seramik malzemelerdir. Bunlar biyoseramikler, elektrik ve teknik porselenler, endüstriyel seramikler, katalizörler, özer refraktör ürünler vb.[19]

3.2. Türkiye' de Seramik Sanayisi

M.Ö. 6000 yılına dayanan Anadolu seramiği, Türkiye'de 1950 yılından itibaren seramik sanayisi haline gelmiştir. Bu sektörde Türkiye, bilim adamları ve teknisyenlerin innovasyon çalışmaları ile dünyada 9. sırada yer almayı başarmıştır. 1950 yılında başında başlayan üretim 1980 yılı ile Türkiye'de büyük bir hız kazanmıştır. En yeni teknolojiler ve üretim teknikleri ülkemizde uygulanmaktadır.

2,0 milyar Euro'ya ulaşan seramik üretim sektörün 1 milyar Euro'su ihracattır. Bu yüzden seramik sektörü ülkemiz sanayisi için önemli bir yer tutmaktadır. Türkiye, 2009 yılında, Seramik kaplama malzemelerinde 360 milyon m²'ye, Seramik Sağlık Gereçlerinde 21 milyon parçaya ulaşan kurulu kapasitesi ile üretim yapılmaktadır. Bu üretim miktarlarına karşın seramik kaplama malzemelerinde 100 milyon m² ve sağlık gereçlerinde 8 milyon parçaya ulaşan ihracat rakamıyla dünyada sayılı üreticiler arasına girebilmiştir.

Seramik Kaplama Malzemelerinde üretimin %35-40'ı, Sağlık Gereçlerinde üretiminin %40-60'ı ihraç edilmektedir. Kaplama malzemelerinde, Çin, Brezilya, İtalya, İspanya, Hindistan, İran, Endonezya ve Vietnam'ın ardından dünya dokuzunculuğuna, ihracatta ise 4. sırada yer almaktadır. Sağlık gereçlerinde ise Avrupa'nın en büyük üreticisi ve ihracatçısı konumuna ulaşmıştır.

Seramik sektörü katma değer açısından ülkemizde önde gelen sektörlerdendir. Üretim için gerekli olan hammaddenin tamamına yakın miktarı yurt içinden karşılandığı için ihracatta 90% oranında katkı sağlamaktadır.

Seramik sektöründe satış-pazarlama, yan sanayi, tasarım, işçilik, doğrudan veya dolaylı olarak yaklaşık olarak 220 000'in üzerinde kişi çalışmaktadır. Türk seramiği her geçen gün yeni tasarımları ile sektörün önde gelen üreticilerinden olmaya devam etmektedir. Yurt içi ve yurtdışı fuarlarda ülkemizi başarılı bir şekilde temsil etmeyi başarmaktadırlar [20].

3.3. Seramik Kaplama Malzemelerinin Sektörel Bazda İncelenmesi

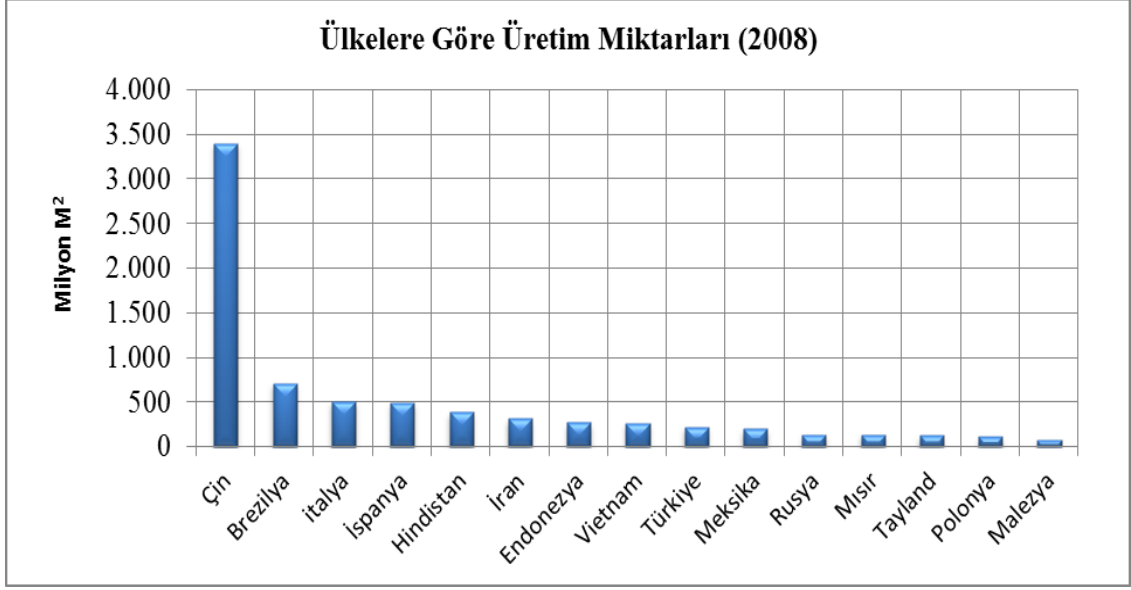
SKM üretimi ülkemizde önemli bir yere sahiptir. Büyük oranda yerli hammadde kullanan sektör, 1 milyar dolar katma değerinde ürünler üretip bunun yaklaşık 400 milyon dolarını ihraç etmektedir. SKM sektöründe doğrudan 13 500 kişi çalışmakta, dolaylı olarak da 51 000 kişi çalışmaktadır.

SKM üretiminde ülkemiz Avrupa'da 3. sırada yer alırken dünya klasmanında 7. sıradadır. 100 farklı ülkeye gerçekleşen ihracatta İtalya ve İspanya dan sonra Avrupa'da 3. sırada olup, dünyada ise 5. sırada yer almaktadır.

SKM üretiminde kullanılan hammadde, yardımcı malzeme ve diğer işletme malzemelerinin ithal oranı çok düşüktür. 400 milyon USD ihracata karşılık yaklaşık olarak 40 milyon USD civarında ithalatımız vardır. Dolayısıyla 360 milyon USD' lik bir katma değer görülmektedir [20].

3.3.1. Dünya ve Ülke Çapında Seramik Kaplama Malzemeleri Üretim Dağılımları

SKM üretimini dünyanın her bölgesinde görebilir. Özellikle Asya bölgesinin nüfus yoğunluğu, üretim kapasitesini o bölgelerde arttırılmasına neden olmuştur. 2008 yılı ülkelere göre üretim kapasitesi Şekil 3.1'de gösterilmiştir.



Şekil 3.1. Ülkere göre Seramik Kaplama Malzemeleri üretim miktarları [20]

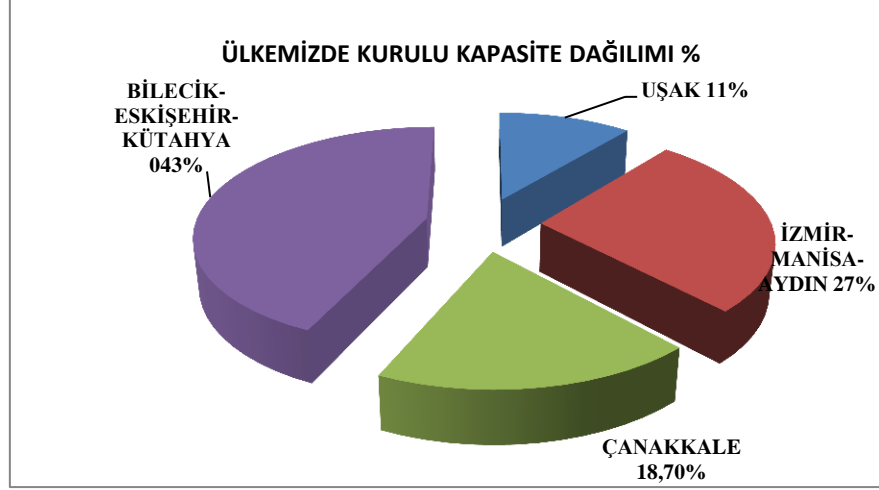
Grafikte görüldüğü üzere Türkiye SKM üretiminde önde gelen ülkelerdendir. Bu üretim değerleri ülkemizdeki işletmelerin kapasite değerlerini artırılmasıyla sıralamalarda bazı değişiklik olmuş olabilir.

Ülkemize baktığımızda SKM üretimi bölgeler halinde kümelendiğini görebiliriz. Yaklaşık 30 ayrı tesiste üretim yapılmakta olup bu sayı her geçen gün yükselmektedir. Kapasitelerine göre ülkemizdeki fabrikaların dağılımı Çizelge 3.1’ de verilmiştir.

Çizelge 3.1. İllere göre Seramik Kaplama Malzemeleri üretimi kapasite değerleri [21]

ÜRETİCİ FİRMALAR	BULUNDUKLARI İLLER	KAPASİTEx1000 (m ²)
KALESERAMİK	ÇANAKKALE	72000
SÖĞÜT	SÖĞÜT	35000
TOPRAK	ESKİŞEHİR	28000
EGE	İZMİR	24500
SERAMİKSAN	TURGUTLU	23000
GRANİSER	AKHİSAR	21500
EKS	İSTANBUL	21000
YURTBA Y	ESKİŞEHİR	20700
TAMSA	İZMİR	20500
TERMAL	SÖĞÜT	19000
KUTAHYA	KÜTAHYA	17700
HİTİT	UŞAK	15500
ERCAN Bilecik	BİLECİK	12500
UŞAK	UŞAK	12400
UMPAŞ	UŞAK	10500
SERANIT	BİLECİK	8000
ANKARA SERAMİK	ANKARA	8000
HA&NA	İZMİR	7500
BKT	ESKİŞEHİR	
YÜKSEL	AYDIN	6200
ANATOLIA	SÖĞÜT	6100
AKGUN	BİLECİK	5775
EFES	İZMİR	4000
PERA	ÇANAKKALE	3000
ERCAN	BİLECİK	1800
ALTIN ÇİNİ	KÜTAHYA	1700
İST.SERAMİK	İSTANBUL	1500
TOPLAM KAPASİTE		407375

Çizelge 3.1’de de görüldüğü gibi Türkiye’de üretim Eskişehir-Bilecik-Kütahya bölgesinde bir yığılma vardır. Yukarıdaki çizelgeye bağlı olarak bu yığılmaları Şekil 3.2 ile ifade edebiliriz.



Şekil 3.2. Bölgelere göre kurulu kapasite dağılımları [21]

Yaşadığımız bölge olan Uşak'ta da seramik sektörü açısından potansiyeli yüksek bir bölgedir. Şehir ekonomisi açısından seramik önemli bir yer teşkil etmektedir. Bu yüzden böylesi katma değeri yüksek bir üretimin ülkemiz ve şehrimiz açısından yoğunluğu yüksek olması büyük bir şans olarak görülebilir.

3.3.2. Seramik Kaplama Malzemeleri Sektöründe Maliyet Unsurları

SKM üretiminin ana hammaddesi olan inorganik maddeler doğada oldukça fazladır. Türkiye'de bu yönden zengin olması sektör için büyük bir şans diyebiliriz. Hammaddenin fazla olması üretimi ucuz mal edilecek anlamında da değildir. Çünkü gerek yardımcı malzeme olsun, gerek makine teçhizat olsun ithal oranları oldukça yüksektir. Ayrıca SKM üretimi ağır sanayi olduğu için işçilik maliyetleri de öne çıkmaktadır. Nihai ürün ağır ve kırılabilir olduğu için nakliye önemli bir maliyet unsuru olarak gözükmektedir. En önemlisi ise enerji maliyetidir. Gerek doğalgaz gerekse elektrik tüketimleri oldukça yüksektir. Çünkü bir seramiğin pişme derecesi yaklaşık olarak 1100 °C 'dir. Çizelge 3.2'de 1 m² yer ve duvar karosu üretimi için maliyet dağılımı verilmiştir.

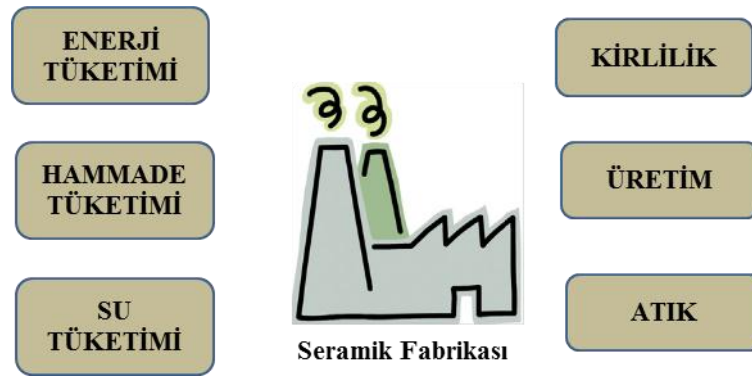
Çizelge 3.2. 1 m² seramik üretiminin maliyet dağılımı [6]

Girdiler	Yer karosu (%)	Duvar karosu (%)
Hammadde	11	9
Yardımcı Malzeme	15	13
Elektrik (kWh)	10	9
Doğalgaz (m ³)	21	20
İşçilik (saat)	20	20
İşletme Malzemesi	10	10
Diğer+Nakliye+Bakım+Onarım	13	19
Toplam	100	100

Çizelge 3.2' de görüldüğü gibi 1 m² seramik üretebilmek için gerekli olan enerji maliyeti, toplam maliyetin %30'unu oluşturmaktadır. Bu nedenle, SKM üretim süreçlerinde enerjinin tüketimine dikkat edilmesi ve enerjinin verimli kullanılması gerekmektedir.

3.4. Seramik Kaplama Malzemeleri Üretim Yöntemi ve Aşamaları

SKM üretimi kompleks ve sürekli(continue) bir sistemi barındırmaktadır. Tüm üretim aşamaları birbirine bağlı olduğu için herhangi bir prosesinde ki hata diğer bölümlere yansımaktadır. Temel olarak SKM üretiminde Şekil 3.3' de ki gibi girdi ve çıktılar yer almaktadır.

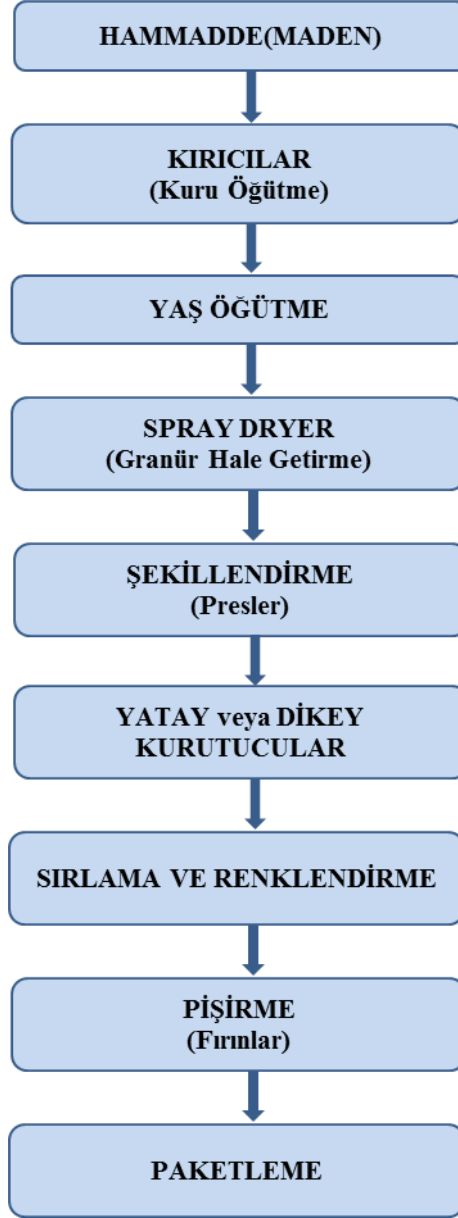


Şekil 3.3. Seramik fabrikasının başlıca girdi ve çıktıları [22]

Özellikle inorganik maddelerden oluşan seramik belli oranlarda harmanladığı için hassas bir yapıya sahiptir. Üretimin her aşamasında proses kontrol saat başı numuneleriyle orantısal hataları önlemektedir.

SKM üretiminde ana gövdeyi oluşturan ham karonun hammaddesinin tamamına yakını yurtiçinden temin edilmektedir. Kil, kaolen, pegmatit vb. kaynaklarına yakın kurulan tesisleri oldukça çok görmekteyiz. Frit, zirkon, çinkooksit, korund, alüminyum oksit, kuvars gibi inorganik maddelerin bir kısmı yurtiçinden temin edilirken bir kısmı yurtdışından gelmektedir. Renklendirici pigmentlerin tamamına yakını yurt dışından ithal olarak gelmektedir. Seramik üretiminin en önemli aşamalarından biri olan pişirmede doğalgaz kullanıldığı için dışa bağımlılık sürmektedir.

Yeni üretim teknikleri ve yeni teknoloji ile katma değeri daha yüksek seramik üretme imkanı her geçen gün fazlaşmıştır. Örneğin dijital baskı makineleri daha ucuz ve daha hızlı bir şekilde istediğimiz tasarımı karonun üzerine basma şansı veriyor. Diğer bir örnek ise nano teknolojisi ile seramiğin üzerindeki sürtünme katsayısını azaltarak daha parlak seramikler üretmemizi sağlıyor. Ayrıca robotik sistemlerin sayısı artırılmasıyla kapasite miktarı her geçen gün artmaktadır. SKM 'nin temel üretim aşamaları Şekil 3.4' de verilmiştir:



Şekil 3.4. Seramik Kaplama Malzemelerinin temel üretim aşamaları [23]

Yer karosunda ise kurutucu kullanılmakta olup, duvar karosunda ise kurutucu yerine fırın kullanılmaktadır. Yukarıdaki tüm üretim aşamaları sırasıyla ayrıntılı olarak açıklanmıştır.

a. Hammadde

Doğadan çıkarılan pegmatit, kuvars, kil gibi inorganik maddeler hammadde sahasında stoklanmaktadır. Çıkarımı ve taşınımı zor olduğu için belli miktarda stok her

zaman bulunmak zorundadır. Ayrıca su emmesi yüksek olan hammaddelerin kışın taşınımı ve maliyeti yüksek olacağı için yaz boyu stoklanması gerekmektedir.

b. Kırıcılar(Kuru Öğütme)

Doğada bulunan hammaddeler, direk prosese sokulamayacak kadar büyük yapıya sahiptir. Bu hammaddeler belli bir çapa küçültülmesi gerekmektedir. Bir anlamda kuru öğütme işlemine tabi tutulmaktadır. Resim 3.1’de hammadde sahasından genel bir görünüm yer almaktadır.



Resim 3.1. Kırıcı sahası

Kuru öğütmeden sonra hammaddeler fabrikanın içerisinde yer alan stok sahasına taşınır. Odalar halinde bulunan stok sahası hammaddenin cinsine göre ayrılmıştır. Resim 3.2’ de hammadde stok sahasından bir görünüme yer verilmiştir.



Resim 3.2. Hammadde stok sahası

c. Yaş Öğütme

Stok sahasında yer alan hammaddeler AR-GE bölümü tarafından hazırlanan reçeteye göre silolara¹ doldurulur. Silolarda da bir kere daha kuru öğütmeye giren hammaddeler değirmenlere gönderilir. Değirmenlerde belli süre alüminyum bilyeler ile birlikte öğütülür ve çap küçültülür. Böylelikle masse çamuru hazırlanmış olur. Resim 3.3’de masse hazırlama değirmenlerine ait bir görünüm yer almaktadır.



Resim 3.3. Hammadde değirmenleri

d. Püskürtmeli Kurutucu (Granür Hale Getirme)

Değirmenlerde homojen haline getirilen çamur, havuzlarda bekletilir. Yaklaşık %40’ı su olan çamur, pompalar yardımı ile püskürtmeli kurutucuya aktarılır. Püskürtmeli kurutucu da çamur 650 °C sıcak hava ile karşılaştırılarak belli boyutlarda granül haline getirilir. Resim 3.4’ de işletmede yer alan püskürtmeli kurutucudan bir görünümü yer verilmiştir.

¹ Silo, malzemelerin depolandığı, saklandığı ve korunduğu yapılardır.



Resim 3.4. Püskürtmeli kurutucu

e. Presleme (Şekillendirme)

Granül haline gelen hammaddeler %4 nem ile silolarda stoklanır. Burada bir süre dinlendirilen masse² preslere aktarılarak sabit basınç ile sıkıştırılıp şekillendirilir. Duvar Karosu preslerine ait bir görünüm, Resim 3.5' de gösterilmiştir.



Resim 3.5. Presler

f. Yatay ve Dikey Kurutucular

Preslenen masse belli ebatlarda bisküvi³ halini alır. Burada ham karonun bantlarda yürütülebilmesi için mukavemet kazandırılır. Bir anlamda üzerindeki fazla nem alınır ve sertleştirilir. YK'da bu sıcaklık 120 °C olup DK'da 1100 °C dir. Dikey kurutucuya ait görünüm Resim 3.6' da gösterilmiştir.

² Masse belli oranda karıştırılmış olan hammaddelerin granül haline gelmiş haline denir.

³ Bisküvi, belli basınçlarda ve kalıpta sıkıştırılan massenin şekil alma halidir.



Resim 3.6. Dikey kurutucular

g. Sırlama ve Renklendirme

Presden çıkmış ve kurutulmuş bisküvilerin üzerine sır ve pasta eklenerek pişmeye hazır hale getirilir. Sır ve pastalar sır hazırlama bölümünde hazırlanır. İçeriğinin %90'ı frit olan sırlar %40 oranında su katılarak değirmenlerde öğütme işlemi gerçekleştirir. Uygun viskozite ve elek bakiyesi elde edilinceye kadar değirmenler 10 000 ile 12000 tur arası döndürülür. Sır hazırlama için Resim 3.7.'de ki değirmenler kullanılmaktadır.



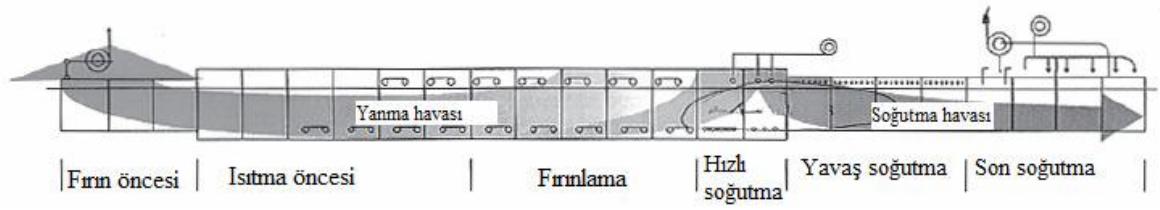
Resim 3.7. Sır değirmenler

h. Pişirme (Fırınlama)

Seramiğin üretimin en önemli ve zor aşamalarından biride pişirmedir. Yaklaşık 1200 °C çalışma sıcaklığı olup 6 ana bölümden oluşmaktadır.

- Fırın öncesi
- Isıtma öncesi
- Fırınlama
- Hızlı soğutma
- Yavaş Soğutma
- Son soğutma

Şekil 3.5’ de bu bölümlerin fırınlardaki yerleri gösterilmiştir.



Şekil 3.5. Farklı fırın bölgelerinin hava sirkülasyonu [24]

Fırın girişinden başlayarak sıcaklığı yüksek bölgeye doğru ilerler ve maksimum sıcaklık bölgesine ulaşır. Sıcaklığın en yüksek olduğu bölge olduğu için kimyasal reaksiyonlar gerçekleşmektedir. Yani karodaki hammaddelerden kızdırma kayıpları oluşur. Son soğutma bölgesinden sonra karolar 40 °C -60 °C arasında dışarı çıkar ve toplanır. Resim 3.8’ de işletmede yer alan bir fırın gösterilmiştir.



Resim 3.8. Fırınlar

i. Paketleme

Fabrikada üretilen karoların kontrol edilip sınıflandırılmalarının yapıldığı ve paketlenip satışa hazırlandığı bölümdür. Her ebattaki karolar belli standartlar ölçüsünde dizilir ve kutulanır. Bundan önce 3 çeşit ana kontrol mekanizmasından geçirilir. Bunlar:

- Kalite ayrımı (göz ile)
- Renk tonu (göz ile)
- Ebat kontrol (makine ile)

Tüm bu kontroller TSE standartlarına bağlı kalma koşulu ile yapılır. Kontrollerden sonra otomatik paketleme makineleri ile paketlenip dizilir. Tam bir palet halinde çıkan karolar shrinklemeden⁴ sonra satışa hazır halde müşteriye sunulur.

⁴ Shrink kutular halinde dizilen karoların plastik bir malzeme ile sıkıştırma işlemidir.

4. SERAMİK SEKTÖRÜNDE ATIK ISI KAZANIMLARI

Atık ısı, proseslerde oluşan kimyasal ve fiziksel reaksiyonlar sonucunda dış ortama verilen ısılardır. Atık ısı sadece enerji kaybı değil aynı zamanda CO₂ salınımı açısından önemli bir unsurdur. Azalan ve değeri artan enerji kaynakları ile birlikte sanayide atık ısıların sisteme geri kazanımının her geçen gün önemi artmaktadır. Atık ısının hepsini sisteme geri kazandırmamız mümkün olmasa da, gerçekleşen herhangi bir geri kazanım enerji kullanımında verimliliği artıracaktır.. Atık ısı projelerinin yapım maliyetleri düşünüldüğünde sağladığı tasarruflar ile kendini kısa sürede amorti etmektedir [25].

Isı geri kazanım için ısı kaynaklarının potansiyel enerji miktarlarını değerlendirdiğimizde; bütün ısı kaynaklarından geri kazanım olabileceğini fakat atık ısının kalitesinin kaynağa göre değiştiğini görmekteyiz. Çizelge 4.1’de atık ısı kaynaklarının, atık ısı kaynaklarına göre değerlendirilmesi yapılmıştır.

Çizelge 4.1. Atık ısı kaynaklarının kalitesine göre dağılımı [26]

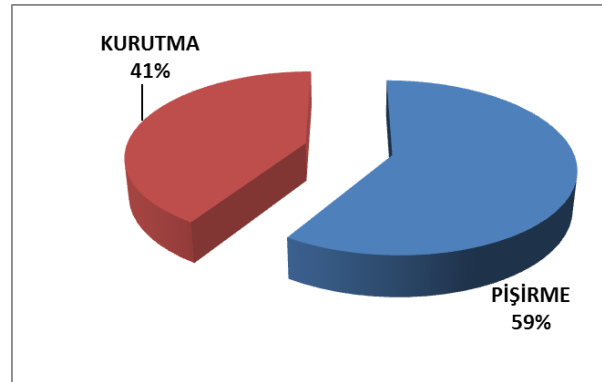
NO.	ATIK ISI KAYNAKLARI	ATIK ISI KALİTESİ
1	Akışkan Gazın Isısı	Yüksek sıcaklıklarda geri kazanım artmaktadır.
2	Buharın Isısı	Yoğunlaşma ile geri kazanımı sağlanabilir.
3	Ekipman Çevresindeki İletim ve Işınım Isıları	Kalite düşüktür, kazanım olursa ön ısıtmada kullanılabilir.
4	Su Soğutma Sistemlerindeki Isı Kaybı	Kalite düşüktür, az miktarda fayda sağlanabilir.
5	Soğutma Sistemlerindeki Isı Kaybı	a) Kalite yüksektir, yüksek miktarda ısı kaybı önlenerek soğutma miktarı azaltılır. b) Kalite düşüktür, soğutma için pompa kullanımı devam eder.
6	Prosesten çıkan ürünün ısısı	Yüksek sıcaklıklarda kalite artar.
7	Prosesten çıkan sıvı veya gazların ısısı	Eğer atık akışkan kirli ise düşüktür, ancak ısı değiştirici kullanılarak yararlanılabilir

Atık ısının yararlarını iki kategoride sıralayabiliriz:

- a) Direkt Yararları: Atık ısının geri kazanımı sisteme direk olarak dahil edilir. Enerji tüketimini azaltarak enerji maliyeti ve proses maliyeti düşer.
- b) İndirekt Yararları:
 - Çevre kirliliğini azaltır.
 - Kullanılan enerji kaynağının kapasitesi yönünden küçülmesini sağlar, kullanılan fan, boru hattı, brülör vb. sayısı azalır
 - Enerjinin üretiminde kullanılan kaynağa yardımcı malzemelerin sayısı azalır. Örneğin pompa, fan vb. [26]

4.1. Seramik Sektöründe Atık Isı Kaynakları ve Kullanım Alanları

Seramik fabrikalarının hemen hemen bütün ana proseslerinde yüksek miktarda enerji kullanımı gerektirir. Özellikle kurutma ve pişirme proseslerinde ısı enerjisine ihtiyaç duyan sektör, bunu genel anlamda doğalgazdan sağlamaktadır. Şekil 4.1’de tez kapsamında incelenen Umpaş Seramik’ e ait kurutma ve pişirme proseslerinde ki doğalgaz kullanımı gösterilmiştir.



Şekil 4.1. Seramik üretiminde kurutma ve pişirme proseslerinde doğalgaz kullanımı

Son yıllarda artan enerji maliyetinin en önemli faktörü artan doğalgaz fiyatlarıdır. Şekil 4.2’ de Türkiye’de son 3 yılda birim doğalgaz fiyat değişimi gösterilmiştir. Şirketler rekabet ortamında maliyetlerini sabit tutabilmek için çeşitli tasarruf yöntemlerini girişmiş ve enerji maliyetlerinin yükselmesini önlemek

istenilmiştir. Bu yüzden yüksek enerji kullanım alanlarının üzerinde durulmuş, çeşitli verimlilik çalışmaları yapılmıştır. Şekil 4.2’de Umpaş Seramik’ e gelen aylık doğalgaz faturalarından yararlanılarak son 3 yılda birim doğalgaz fiyat değişimi gösterilmiştir.



Şekil 4.2. Son 3 yılda doğalgaz birim m³ fiyat değişimi

2012-Ocak ayı itibari ile doğalgazın m³ fiyatı 0,584 TL iken, 2014 sonunda 0,87 TL' ye yükselerek %49 artmıştır.

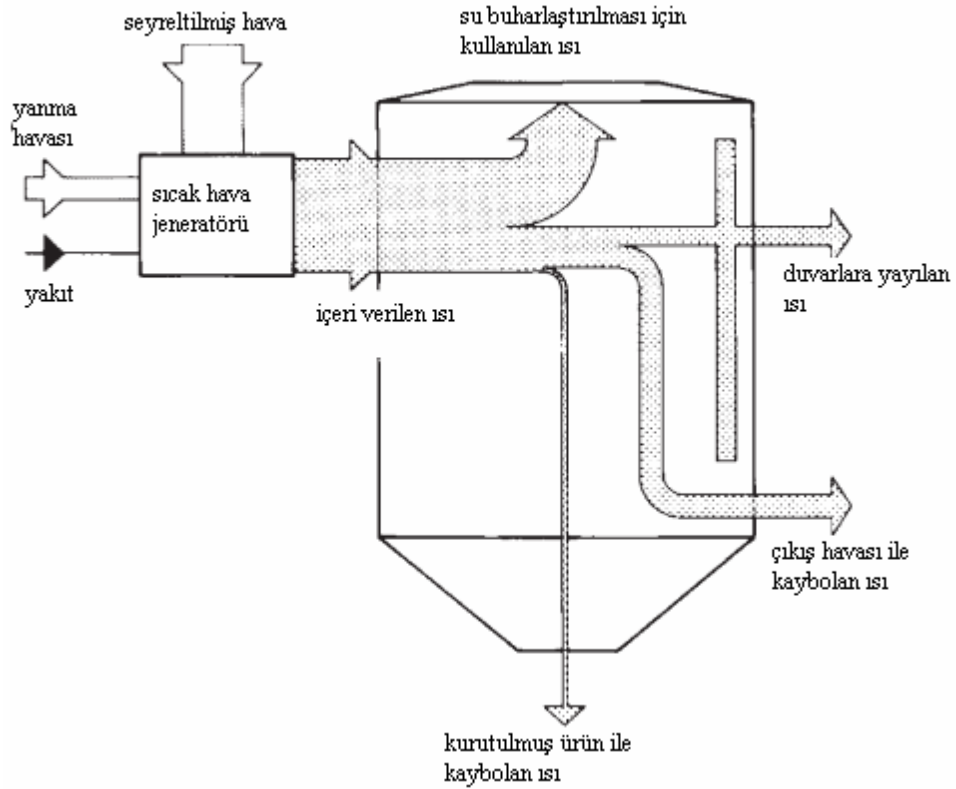
4.1.1. Püskürtmeli Kurutucu ve Atık Isı

Seramik fabrikalarında çamurun kurutulup granül haline getirilmesinde kullanılan püskürtmeli kurutucu, enerji yoğun bir kurutucudur. Yaklaşık olarak 1 546 kcal/kg enerji harcayan bir kurutucuda atık ısının olması kaçınılmazdır.



Resim 4.1. Püskürtmeli kurutucudan bir görünüm

Resim 4.1’ de de gösterilen, seramik fabrikalarının vazgeçilmezi olan bu kurutucular orta büyüklükteki bir fabrikada yaklaşık 15 000 kg/h debide çevreye sıcak kuru hava bırakmaktadırlar. Bu hava sıcaklığı 100 °C ile 130 °C arasındadır. İçerisinde doğalgazın yanması sonucu oluşan havayı da barındırdığı için baca gazı olarak adlandırılabilir. Şekil 4.3’ de püskürtmeli kurutucuya giren ve çıkan ısı enerjileri ayrıntılı olarak gösterilmiştir.

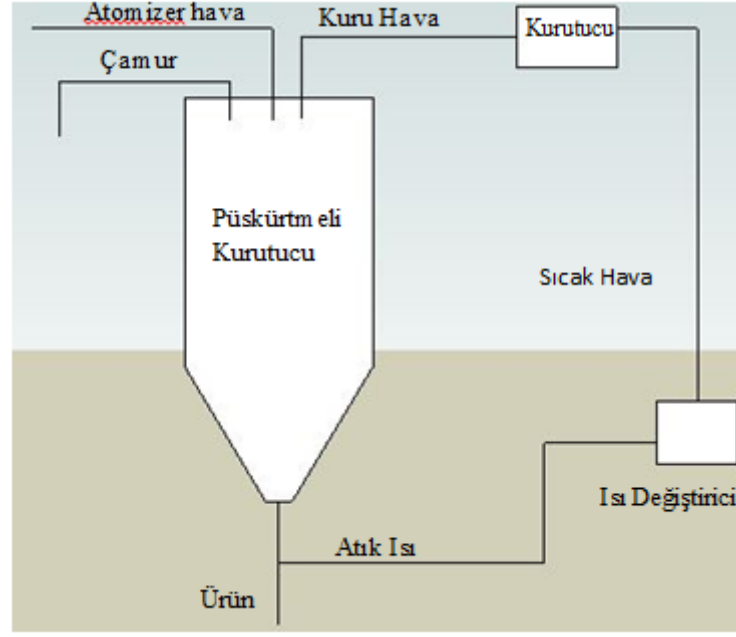


Şekil 4.3. Püskürtmeli kurutucudaki ısı dengesi [24]

Sanayide bu atık ısıyı çeşitli şekillerde değerlendiren firmalar vardır. Bunların içinde;

a) Kurutucudan atılan atık ısının sisteme dahil edilmesi

Sistemden çıkan sıcak baca gazını hava-hava eşanjörleri ile temiz sıcak hava elde edip, sisteme geri kazandırma işlemidir. Yani 25 °C havayı 650 °C çıkarmak yerine sistemden kazanılan ısıyla 80 °C havayı 650 °C'ye çıkarmaktır. Böylece atık ısı geri kazanımı sağlanıp doğalgaz tüketimi azaltılmış olur [15]. Sistemin genel olarak akış şeması Şekil 4.4' de verilmiştir.



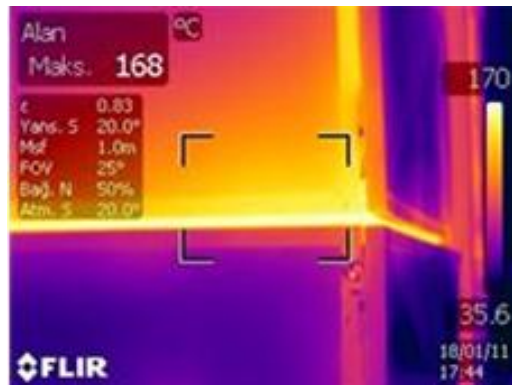
Şekil 4.4. Püskürtmeli kurutucudaki atık ısı geri kazanımı [15]

b) Atık ısı ile sıcak su elde etmek

Sistemden elde edilen sıcak havayı hava-su boru tipli eşanjörden geçirerek sıcak su elde etmek için kullanılan sistemlerdir. Ek-1’de ayrıntılı bir çizimi yer almaktadır.

c) Şofben yüzeyinde ısı yalıtım yapılması

Püskürtmeli kurutucuda doğalgazın yandığı şofben kısmında genellikle ısı kaybı gözlenmektedir. Hem ısı kaybı hem de sistemin ısı korozyonunu önlemek için ısı yalıtım yapılması gerekmektedir. Resim 4.2’ de Umpaş Seramik firmasında bulunan püskürtmeli kurutucunun şofben yüzeyinin termal kamera ile çekilmiş bir resmi verilmiştir.

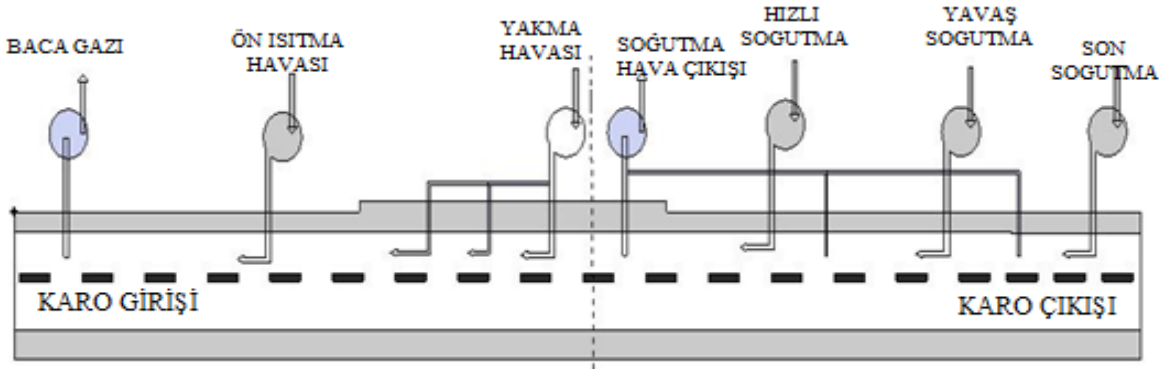


Resim 4.2. Püskürtmeli kurutucu şofbeninin termal görüntüsü

4.1.2. Fırınlara ve Atık Isı

Piştirme, fırınlarda seramiği istenilen özelliğın verilebilmesi için uygulanan yöntemdir. Seramik işletmelerinde, en fazla doğalgaz kullanımını fırınlamada gerçekleştirilmektedir. Böylesi önemli ısı kaynağındaki atık ısının değerlendirilmesi çok önemlidir.

Fırınlara genel anlamda 2 bölüme ayrılır, bunlar sırasıyla ısıtma ve soğutma bölgeleridir. Isıtma ve soğutma bölgelerindeki ısı giriş ve çıkışlar Şekil 4.5' de gösterilmiştir.



Şekil 4.5. Fırınlara giriş ve çıkış bacaları [13]

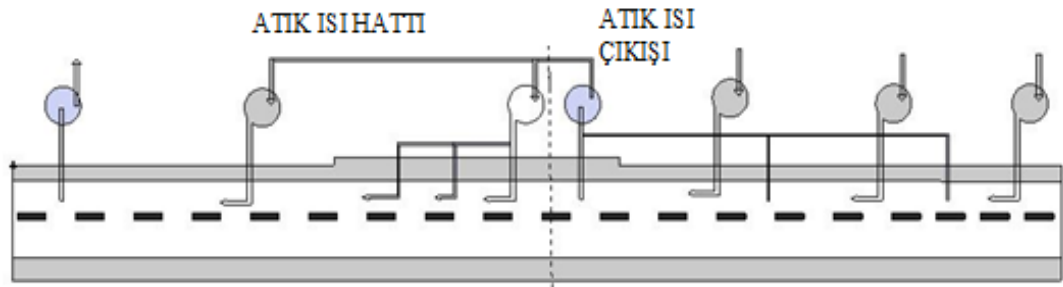
Şekil 4.5.' de görüldüğü gibi ilk kurutma ve yanma için dış ortam havası ve yanma sonucu oluşan gazın dışarı atılması için baca fanları yer almaktadır. Bu baca fanlarındaki sıcak havanın sebebi, cehennem bölgesindeki yanma sonucu oluşan 1200 °C ortam sıcaklığıdır. Baca gazlarının sıcaklıkları yaklaşık olarak 200 °C -250 °C arasında değişmektedir.

Soğutma bölgesindeki ise pişen karo aniden soğutulamayacağı için belli bir süre ısısı alınarak dışarı çıkartılır. Bu soğutma esnasında ortamdaki alınan hava ile sirkülasyon sağlanır. Yani 25 °C ortam havası alınıp sisteme dahil edilir. Sistemdeki bu hava yüksek sıcaklıktaki karonun sıcaklığını düşürür ve ısınan hava dışarı atılır. Böylelikle iç basınç dengesi sağlanır. 150 °C -200 °C arasındaki hava herhangi bir reaksiyon sonucu oluşan ürün taşımamaktadır. Yani ortam havası ısıtılıp dışarı atılmıştır. Bu anlamda soğutma havasına temiz havada diyebiliriz. Böylesi yüksek

sıcaklık ve debideki havayı yine ısı ile çalışan sistemlerde kullanımı birçok seramik fabrikasında görebilir. Bunlara örnek olarak aşağıdaki yöntemleri sıralayabiliriz:

a) Temiz soğutma havasının sisteme dahil edilmesi:

Sistemden çıkan temiz soğutma havasını yine sisteme dahil edip ön ısıtma için gerekli olan ısı sağlanmış olur. Ayrıca yakma havası için gerekli olan ortam havası yerine soğutma havası kullanılarak atık ısıdan yararlanılabilir [27]. Şekil 4.6’da atık ısı hattı ayrıntılı olarak gösterilmiştir.



Şekil 4.6. Soğutma havasının sisteme dahil edilmesi

Umpaş Seramik firmasında yer alan bir fırının ön ısıtma bölgesine gönderilen atık ısı hattından bir örnek, Resim 4.3’ de gösterilmiştir.



Resim 4.3. Soğutma havasının değerlendirmesine bir örnek

b) Kirlili ve temiz havanın diğer ısı kaynaklarında kullanılması:

Mevcut temiz havayı yine diğer ısı kaynağı olan püskürtmeli kurutucuda veya pres çıkışı kurutucularda değerlendirilmektedir. Baca gazı burada hava-hava boru tipli

ısı değiştiricilerden geçirilip sisteme dahil edilebilir. Çünkü bu ısı daha çok yakma havası olarak kullanılmaktadır.

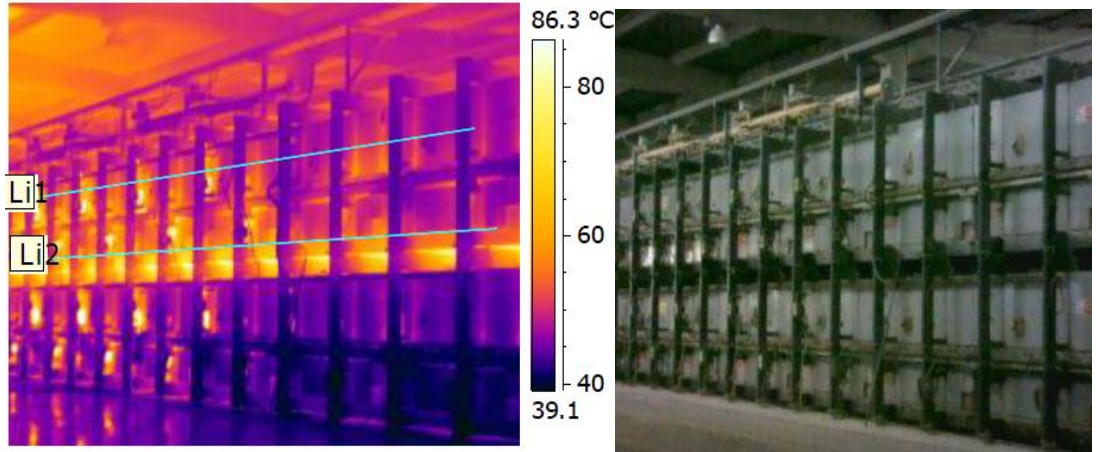
c) Atık ısının sıcak su elde edilmesinde kullanımı:

Püskürtmeli kurutucuda olduğu gibi burada da sıcak hava, hava-su eşanjörlerinden geçirilerek sıcak su elde edilebilir. Tozlu ortamda çalışan işçilerin için sıcak su ihtiyaçları bu yöntemle karşılanabilir. Ayrıca bu sıcak su bina ısıtmasında da kullanılabilir. Sıcak su şohben için ön ısıtma olarak sisteme dahil edilir.

d) Fırın yüzeyinde ısı yalıtım yapılması

Ortalama 80 m uzunluğundaki fırının çeşitli bölümlerinde ısı kayıpları gerçekleşir. Bunlardan en önemlisi, karonun ilerlemesinde kullanılan rulolar arasındaki boşluklarda gerçekleşir. Ayrıca fırın yüzeyindeki ısı yalıtımlarının kötü olması başka bir etkindir.

Resim 4.4.' de Umpaş Seramik firmasına ait bir fırının termal görüntüsü yer almaktadır. Görüldüğü gibi rulo bölgesinde ısı kaybı çok yüksektir. Bu bölgelerde ısı yalıtımına dikkat edilmesi ısı kaybını önemli miktarda engelleyecektir.

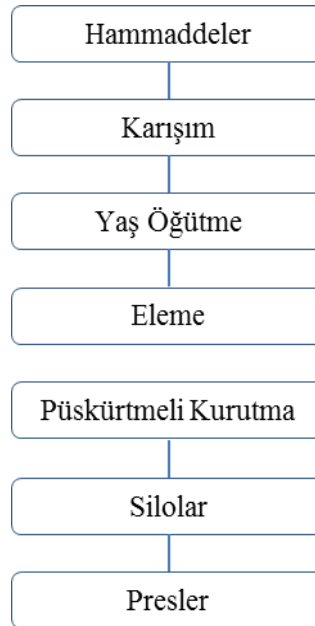


Resim 4.4. Fırınların termal ısı görüntüsü

5. SERAMİK SEKTÖRÜNDE KULLANILAN PÜSKÜRTMELİ KURUTUCULARIN İNCELENMESİ

Püskürtmeli kurutucular birçok üretim sektöründe kullanılmaktadır. Özellikle yiyecek, içecek ve seramik üretimi gibi sektörlerin önemli bir unsurudur. Hammaddelerin partikül hale getirilmesinde kullanılan bu kurutucular, üretim prosesini kolaylaştırmış aynı zamanda işçilik maliyetini düşürmüştür.

Temel olarak püskürtmeli kurutucular sıcak hava ile homojen sıvı karışımı ürünün karşılaştırılması sonucu üründen sıvının alımı yada buharlaştırma işlemidir. Başka bir anlamda dehidrasyon olayı da denilebilir. Üründeki sıvının alınması için gerekli olan ısı buradaki en önemli faktördür. Ortalama bir püskürtmeli kurutucunun üretimi 9000 kg/h ve enerji tüketimi 1500 kJ/kg' dır. Böylesi bir enerji tüketen sistemin enerji verimliliği yüksek olması işletmeler için çok önemlidir. Püskürtmeli kurutucu sistemlerinde enerji tüketiminin minimize etmek için, atık ısı geri kazanım, ısı değiştiriciler ve ısı pompaları gibi yöntemler kullanılmaktadır [14]. Püskürtmeli kurutucuların proses aşamaları Şekil 5.1' deki gibidir:



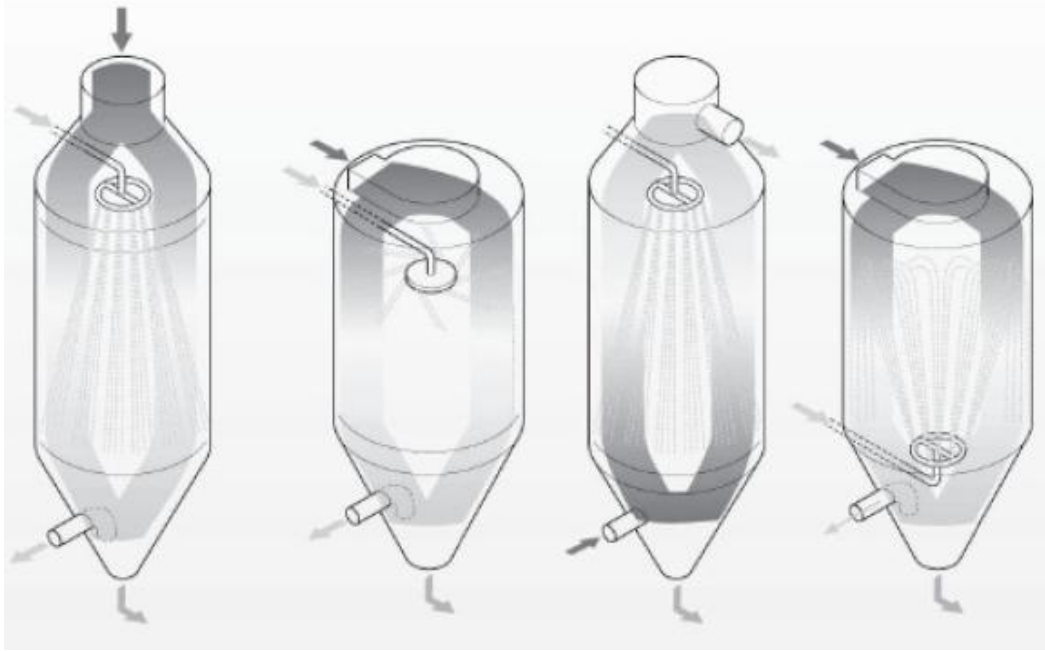
Şekil 5.1. Püskürtmeli kurutucu proses aşamaları

5.1. Püskürtmeli Kurutucuların Sınıflandırılması

Temel olarak kurutucular iki ana sınıfa ayrılır:

a) Direkt ısıtmalı püskürtmeli kurutucular

Çamur içinde suyun buharlaşması için gerekli olan ısı, yanmış gaz veya ısıtılmış hava formundadır. Burada ısı su tanecikleri ile temas ederek taşınım yoluyla buharlaşma olur. Şekil 5.2' de bu kurutuculardan örnekler verilmiştir.



Şekil 5.2. Püskürtmeli kurutucu çeşitleri [24]

Seramik sektöründe en çok direkt ısıtmalı püskürtmeli kurutucular kullanılmaktadır. Üstteki şekilde de bunların dört farklı tipi görülmektedir.

- Akışın aşağıya doğru olduğu, granülün püskürtmeli uçlarlar (nozzle⁵) sağlandığı tip
- Akışın aşağıya olduğu, granülün türbinle sağlandığı tip
- Granül, püskürtücü memelerle (nozzle) yukarı doğru, havanın aşağıya doğru olduğu tip

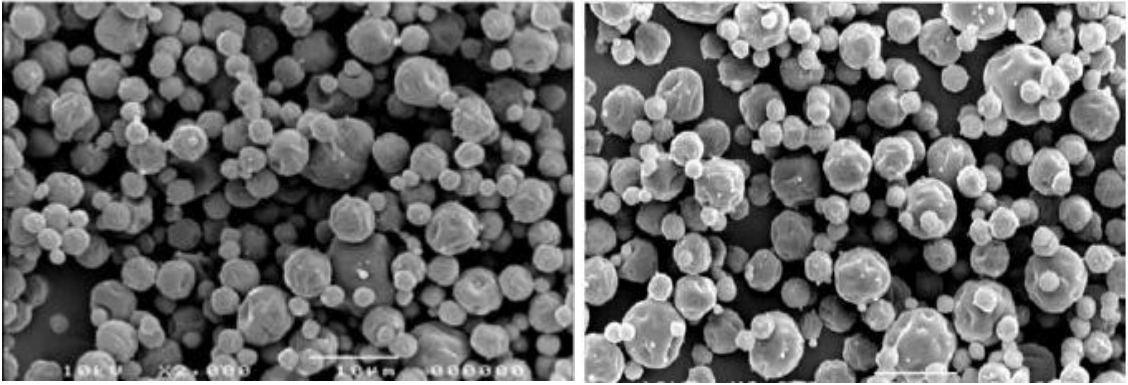
⁵ Nozzle, çamurun belli bir basınçta püskürtmeye yarayan, hortum ucuna bezeyen geometrik nesnelere dir.

- Granül, püskürtücü memelerle (nozzle) yukarı doğru, havanın aşağı doğru olduğu tip [24]

b) Endirekt ısıtmalı püskürtmeli kurutucular

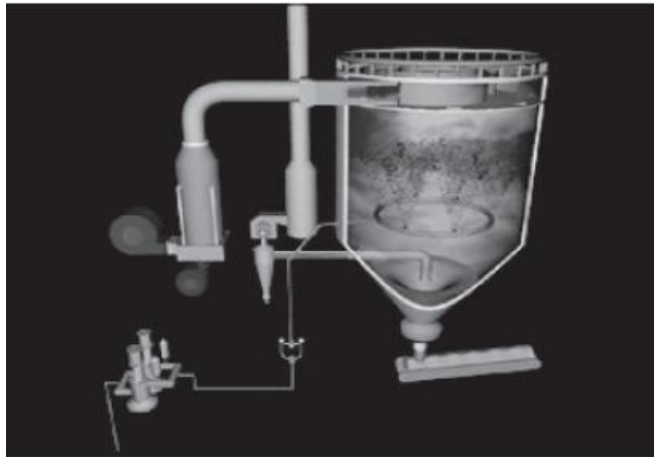
Bu kurutucularda ısı malzemeye iletim yolu ile iletmektedir. Buharlaşmanın olduğu yüzeye bağlı olarak buharlaştırma hızı artmaktadır.

Oluşan granül taneciklerinin mikro düzeydeki görüntüleri Resim 5.1' de gösterilmiştir.



Resim 5.1. Granül tanecik görünümü [28]

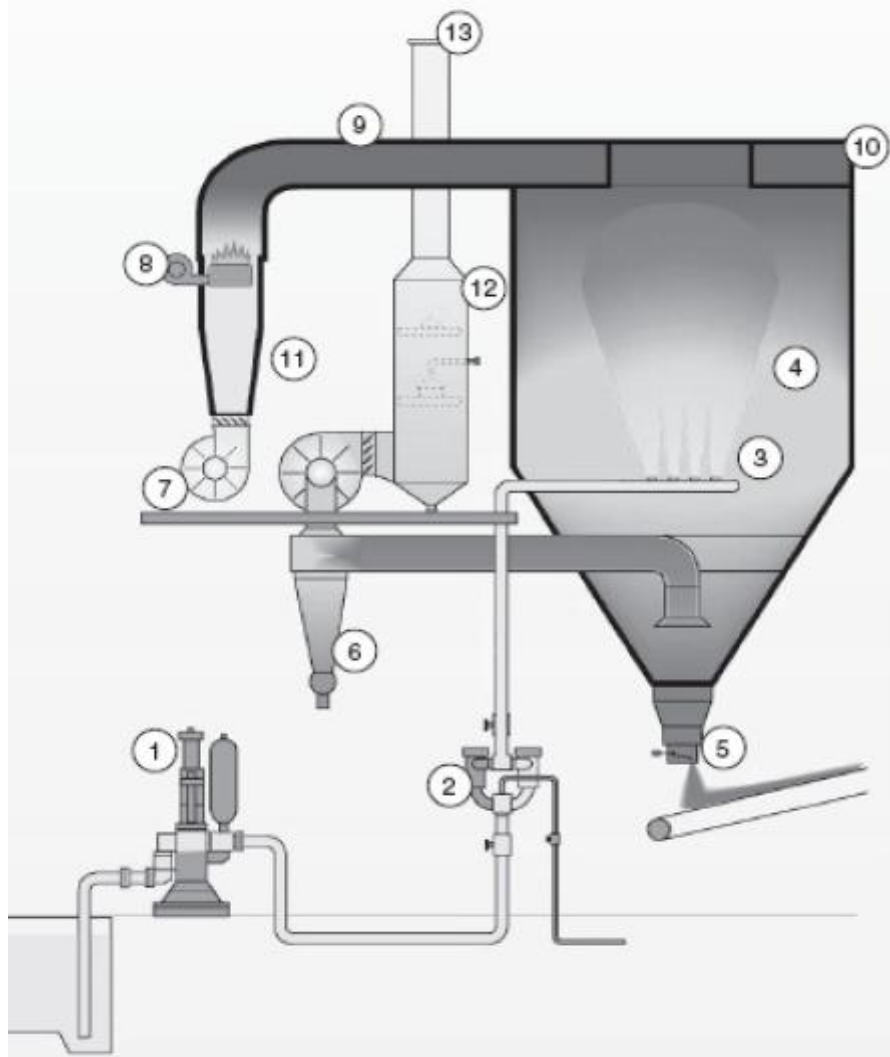
Seramik fabrikalarında, havanın aşağıya doğru, püskürtücünün yukarıya doğru olduğu tip kullanılır. Çözeltinin granül hale gelmesi için basınçlı santrifüj ile basınç sağlanır. Burada granülün kalitesi katının kalitesi, yoğunluğu, viskozitesi, basıncı vb. faktörlere bağlıdır. Püskürtmeli kurutucuda oluşan hava ve hammadde karışımı Şekil 5.2' de gösterilmiştir.



Şekil 5.3. Püskürtmeli kurutucudaki hava-hammadde karışımı [24]

5.2. Püskürtmeli Kurutucuların Genel Yapısı ve Kurutma Döngüsü

Kurutucu yüzeyi genel anlamda silindiriktir. Sıcak hava üst kısımdan girer ve hazne ile dağıtılır. Nozzlar yardımı ile basınçlı çamur püskürtülür ve sıcak hava ile karşılaştırılır. Şekil 5.4' de püskürtmeli kurutucunun genel bir görünümü verilmiş olup her bir bölümün ayrıntılı açıklaması yapılmıştır. Hava ile su arasında ısı alışverişi olur ve kurutma işlemi gerçekleştirilir. Basit anlamda filtreden(2) geçen çamur pompalar(1) yardımı ile kule içine aktarılır(3). Yanma odasında(11) doğalgazın yanması ile sıcak hava üst kısma(10) ulaşır. Burada çamur ile hava karşılaştırılır ve kurutma işlemi gerçekleşir. Püskürtmeli kurutucular 13 ana bölümden oluşmaktadır. Şekil 5.4' de gösterildiği gibi bu bölümlerin ayrı ayrı açıklaması aşağıdaki gibidir:



Şekil 5.4. Püskürtmeli Kurutucunun genel görünümü [24]

a) Çamur besleme pompası (1)

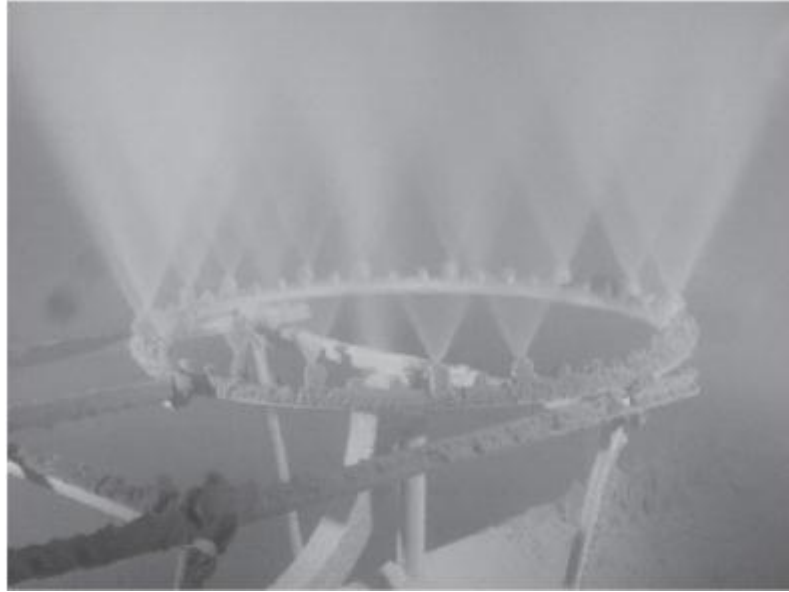
Hazırlanan çamuru belli bir basınçta pompalayarak sisteme dahil edilmesini sağlar. Böylelikle nozllara basınçlı çamur gelerek atomizasyon sağlanmış olur. Burada basınç 20 ile 25 bar arası değişmektedir.

b) Çamur filtreleri(2)

Çamur havuzlarından gelen çamurda öğünmemiş madde, metal, plastik vb. malzemelerin sisteme iletilmesini önler. Filtreleme işlemi çok önemlidir. Çünkü filtreden geçecek herhangi bir madde nozlle tıkanmasına neden olacaktır.

c) Dağıtıcı halka(3)

Basınçlı gelen çamurun atomize olması için kullanılan nozlle halkalarıdır. Resim 5.4' de ayrıntılı olarak gösterilmiştir.



Resim 5.4. Dağıtıcı halka [24]

d) Kurutma kulesi(4)

Kurutmanın gerçekleştiği kısımdır. Burası kurutucunun ana gövdesini kapsamaktadır. Kulenin iç tarafı paslanmaz çeliktir. Dış gövdesi parlatılmış alüminyumdur. Ayrıca izolasyonda barındırmaktadır. Püskürtmeli Kurutucunun ana gövde görüntüsü Şekil 5.5' de gösterilmiştir.



Şekil 5.5. Ana gövde görünümü [24]

e) Toz çıkış bölümü(5)

Kurutma sonucu oluşan tozun(masse) dışarı tahliyesinin sağlandığı bölümdür.

f) Seperatör siklonları(6)

Yanma ve buharlaşma sonucu oluşan gazların dışarı tahliyesi sırasında, içinde barındırdıkları tozların ayrışmasını sağlarlar.

g) Sekonder hava fanı(7)

Sistem için gerekli olan ısının hava ile taşınabilmesi için gerekli olan havayı sağlarlar. Burada bacı gazı fanı ile sekonder hava fanları belli bir dengede çalışırlar. Çünkü içerideki hava sirkülasyonunu sabit tutulması temel amaçtır.

h) Primer hava fanı(8)

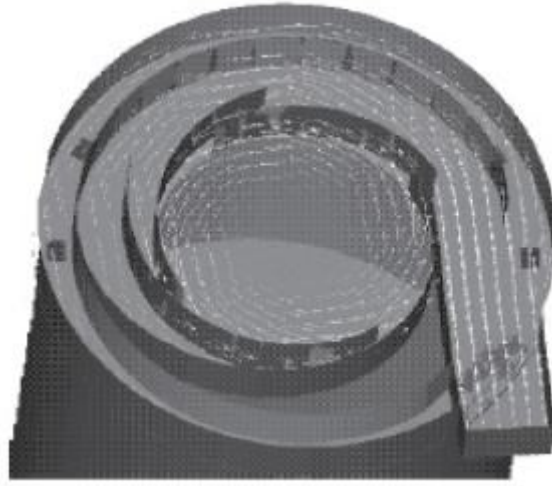
Yanma için gerekli olan havayı sağlayan fanıdır. Burada zengin yanma oluşması için yakıt-hava oranının doğru bir seviyede tutma çok önemlidir.

i) Sıcak hava borusu(9)

Primer ve sekonder havanın birleşimi sonucu oluşan toplam havanın taşındığı bölümdür.

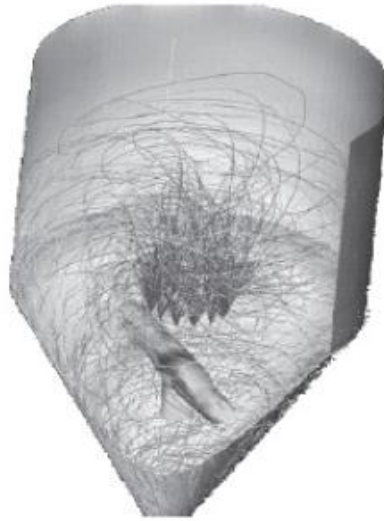
j) Sıcak hava dağıtıcısı(10)

Yanma sonucu elde edilen ısının sisteme aktarılmadan önce hava dağıtıcısından geçmektedir. Burada yer alan çevresel, teğetsel borular ve spirall bacalar ile hava sisteme yani iç kısma doğru aktarılır. Hava iç kısma aktarılırken girdap oluşur ve taneciklerin daha çok ısı ile karşılaşması sağlanır. Şekil 5.6' de gösterildiği gibi hava dağıtıcısı girdap oluşumunu sağlamaktadır.



Şekil 5.6. Sıcak hava dağıtıcısının kesit diyagramı [24]

Şekil 5.7' de ise oluşan girdap içerisindeki taneciklerin dağılımı gösterilmiştir.



Şekil 5.7. Püskürtmeli kurutucu içinde girdap oluşumu [24]

k) Atık gaz çıkış bölümleri(11-12-13)

Sistemde oluşan yanmış gazların ve atık ısıların dışarıya tahliyesinin sağlandığı bölümlerdir. Tahliyenin diğer bir amacı da sistemin iç basıncını sabit tutup sağlıklı çalışmasını sağlamaktır.

5.3. Püskürtmeli Kurutucularda Enerji Tüketimini Etkileyen Faktörler

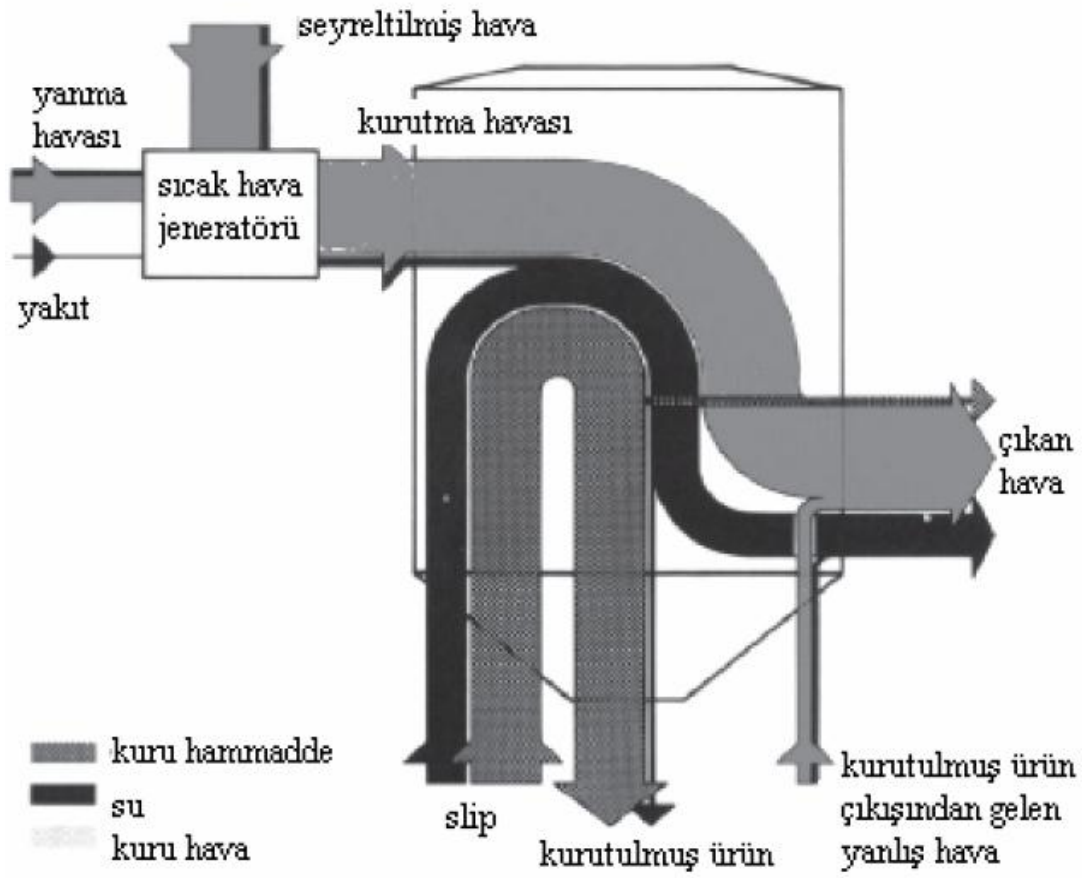
Seramik işletmelerinde en fazla enerji tüketimi püskürtmeli kurutucularda gerçekleşmektedir. Bu yüzden püskürtmeli kurutucularda enerji verimliliği çalışmaları enerji yöneticisi açısından ilk sırada yer alır.

Püskürtmeli kurutuculardaki enerji tüketimini etkileyen faktörlere baktığımızda;

- Kurutucun tipi, boyutu, kapasitesi
- Çalışma sürekliliği
- Kurutucuya bağlı fanların, boruların, yanma odalarının ve ana gövdenin izolasyonu
- Çalışılan çamurun viskozitesi, yoğunluğu, elek bakiyesi vb. faktörler
- Kurutucuya giren havanın sıcaklığı
- Kurutucudan çıkan havanın sıcaklığı
- Çamur basıncının optimizasyonu
- Çamurda yer alan su-hava karışım oranı

gibi faktörler en önemlileridir.

Genel anlamda enerji dengesini sağlayan unsurların optimizasyonu sistemin verimliliği için en önemlisidir. Şekil 5.8' de sisteme giren ve çıkan maddelerin enerji dengesi verilmiştir.



Şekil 5.8. Kurutucuya giren maddelerin ısı dengesi [24]

6. ATIK ISI GERİ KAZANIM PROJESİ

Uygulamanın yapıldığı Umpaş Seramik A.Ş., Umpaş Holding bünyesindeki, Uşak Organize Sanayii Bölgesi'nde yer alan Seranova Seramik markalı bir işletmedir. 55 000 m² si kapalı alan olmak üzere 530 000 m² lik bir alana kurulan tesis her geçen yatırımlarıyla büyümektedir. Bünyesinde yaklaşık olarak 450 kişi çalışmakta olup. kurulu kapasitesi 12 milyon olan fabrika toplam 5 hane sahiptir. Fabrikada temel olarak duvar, yer ve sırlı granit üretimleri yapılmaktadır. İlk iki hane duvar karosu üretimi yapmakta olup, diğer 3 hane yer ve sırlı granit üretilmektedir.

Firmada duvar karosu fırınlarından atılan atık ısılar, ön ısıtmada kullanılmak üzere püskürtmeli kurutucuya borular yardımı ile taşınmıştır. Böylesi önemli bir projenin her aşaması takip edilmiş ve ayrıntılı olarak incelenmiştir. Sistemin enerji verimliliği, ekserji verimliliği araştırılmış olup ekonomik analizi yapılmıştır.

6.1. Doğalgaz Tüketiminin Belirlenmesinde Kullanılan Programlar ve Yöntemler

Firmada doğalgaz tüketimlerinin saatlik değerlerini gösteren bir enerji izleme programı yer almaktadır. İstenilen ünitelerden istenilen anda saatlik, günlük ve aylık bilgiler alınabilmektedir. Bu bilgiler bir veri tabanında toplanmakta olup geçmiş yılların verilerine de ulaşılabilir. Program sadece doğalgaz verilerini değil elektrik ve günlük üretim değerlerini de gösterebilmektedir. Program aynı zamanda maliyet muhasebe ile entegre çalışıp bölümlerin enerji maliyetini hesaplamada kolaylık sağlamaktadır. Umpaş Seramik firmasında kullanılan enerji takip programına ait bir görüntü Resim 6.1' de gösterilmiştir.

DOĞALGAZ SAYAÇLARININ TÜKETİMLERİNİ LİSTELE

- TÜMÜNÜ SEÇ
- DUVAR 1. FIRIN SIRLI
- DUVAR 1. FIRIN BISKUVI
- DUVAR 2. FIRIN SIRLI
- DUVAR 2. FIRIN BISKUVI
- YER 4. FIRIN
- YER 5. FIRIN
- YER 3. FIRIN
- 3. PISIRIM
- YER_KAROSU_SPREYDREY_1
- DUVAR_KAROSU_SPREYDREY_2
- 3_HOL_KURUTMA_1
- 3_HOL_KURUTMA_2
- 4_HOL_1_KURUTMA
- 4_HOL_2_KURUTMA
- 5_HOL_1_KURUTMA
- 5_HOL_2_KURUTMA

TARİH **SAAT**

BAŞLANGIÇ 29.05.2015 00:00

BİTİŞ 29.05.2015 00:00

Tüm Kayıtlar Toplam Kayıtlar

AKTAR

Resim 6.1. Enerji izleme programı

Programda gösterilen değerler, sayaç değerleri ile aynıdır yani Nm^3 'dür. Firmaya fatura edilen doğalgaz miktarı ise standart m^3 'dür. Bu yüzden Nm^3 değerleri bütün ünitelerde standart m^3 'e çevrilmiştir. Standart m^3 değeri aşağıdaki;

- Ortam basıncı
- Ortam sıcaklığı
- Doğalgaz basıncı gibi unsurlara bağlıdır.

Yukarıdaki unsurlar sürekli değişken olduğu için her defasında hesaplamak zor olmaktadır. Bundan dolayı bu hesabı kolaylaştırmak için bir program tasarlanmıştır. Programa girilen veriler ile hızlı bir şekilde standart m^3 bulunabilmektedir. Resim 6.2' de Umpaş Seramik firmasında kullanılan yazılımın veri giriş bölümleri ve çıkan sonuçlar gösterilmiştir.

STANDART M3 GİREN-MADDELER

SABİT DEĞERLER		ÖLÇÜLEN DEĞERLER			
A	REFERANS SICAKLIK (K):	296	E	ÖLÇÜLEN SICAKLIK (C):	30
B	REFERANS BASINÇ (ATM):	1.013	F	ÖLÇÜLEN BASINÇ (ATM):	1.6
C	SIKIŞTIRILABİLİRLİK FAKTÖRÜ:	1.032	G	DEBİ (m ³ /h)	300
	ŞEHİR:	UŞAK			
D	ORTAM BASINCI (ATM):				

HESAPLA

UŞAK
KÜTAHYA
AYDIN
DENİZLİ
İZMİR
İSTANBUL
YALOVA
KOCAELİ

Standart m³ KATSAYI FORMÜLÜ = $\frac{(D+F) \times C \times A}{D \times (273 + E)}$

BİRİM KATSAYI:	2.584
STD (M ³ /H)	775.303
GEREKLİ HAVA (M ³ /H)	8024.386

Resim 6.2. Standart m³ hesaplama programı

Programın diğer bir özelliği hesaplama yapılan ili seçerek ortam basıncını otomatik olarak hesaplamaktadır.

6.2. Duvar Karosu Püskürtmeli Kurutucuların Aylara Göre Doğalgaz Tüketimi

Uygulama yapılan duvar karosu püskürtmeli kurutucunun atık ısı geri kazanım projesinden önceki doğalgaz tüketimi her ay boyunca izlenmiştir. Yapılan uygulamanın doğalgaz tüketimine etkisi bu veriler ışığında yorumlanmış ve olumlu sonuçları tespit edilmiştir. Çizelge 6.1' de, 13 ay boyunca (atık ısıdan önce) Umpaş Seramik firmasında yer alan duvar karosu püskürtmeli kurutucu takip edilmiş, aylık üretim ve tüketim değerleri yazılmıştır.

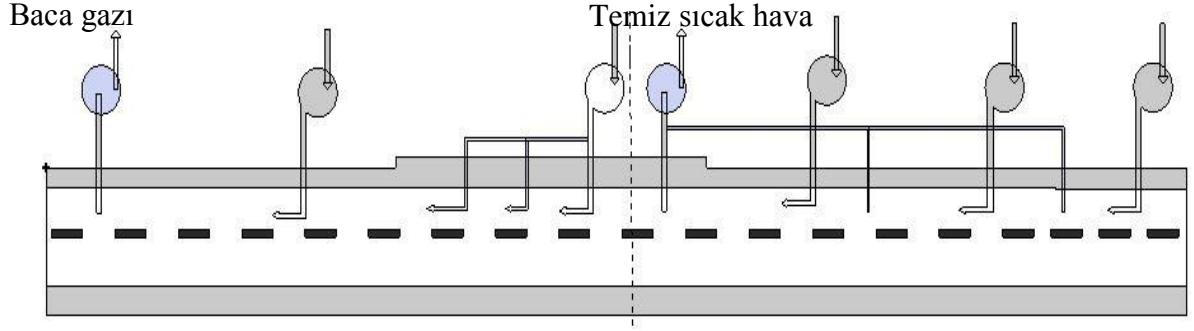
Çizelge 6.1. Püskürtmeli kurutucununun masse üretimleri ve doğalgaz tüketimleri

YILLAR	AYLAR	MASSE ÜRETİMİ (kg)	DOĞALGAZ TÜKETİMİ (m ³)	m ³ /kg
2012	NİSAN	6 440 700	291 000	0,0452
2012	MAYIS	6 440 700	306 470	0,0476
2012	HAZİRAN	5 860 000	290 000	0,0495
2012	TEMMUZ	6.300.000	300 000	0,0476
2012	AĞUSTOS	5 579 058	265 859	0,0477
2012	EYLÜL	5 725 000	288 130	0,0503
2012	EKİM	5 725 000	276 623	0,0483
2012	KASIM	6.000 000	285 912	0,0477
2012	ARALIK	5 771 524	270 619	0,0469
2013	OCAK	3 091 062	156 462	0,0506
2013	ŞUBAT	5 307 000	260 030	0,0490
2013	MART	6 416 909	322 271	0,0502
2013	NİSAN	6 099 072	300 458	0,0493
Ortalama	Toplam	74 756 025	3 613 834	0,0483

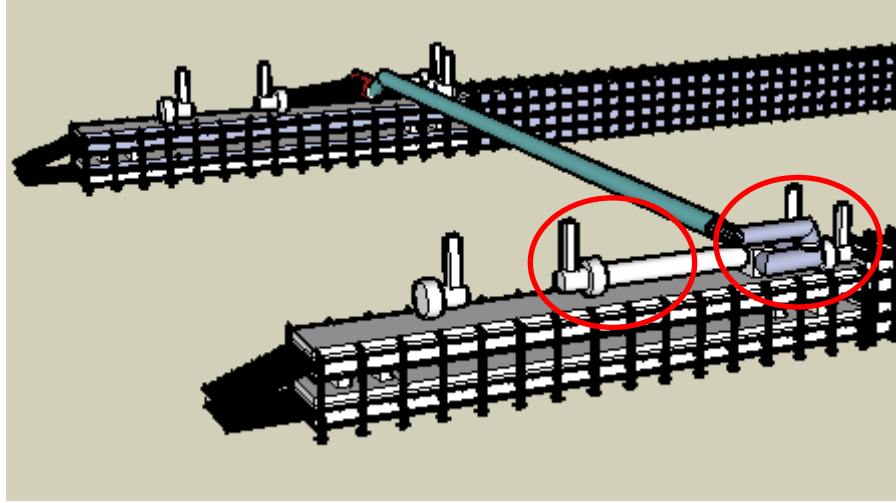
Çizelgede de görüldüğü gibi ortalama 0,0483 m³/kg ile çalışan bir püskürtmeli kurutucu görülmektedir.

6.3. Atık Isı Geri Kazanım Sisteminin Kurulum Aşamaları

DK' da alt ve üst fırın olarak iki ayrı hat veya holden oluşmaktadır. Bu iki ayrı fırın hattından temiz hava ve baca gazları atılmaktadır. Baca gazı hattı doğalgazın fırınlarda yakımı sonucu oluşmaktadır. Temiz hava hattı ise fırınların soğutulması için dış ortamdan alınan havanın fırın içinde sirkülasyonu ile dışarı atılımı sonucu oluşmaktadır. Şekil 6.1' de ve Şekil 6.2' de kirli sıcak hava ve temiz sıcak hava çıkışlarının yerleri gösterilmiştir.



Şekil 6.1. Duvar Karosu fırınındaki atık ısı bacaları [22]



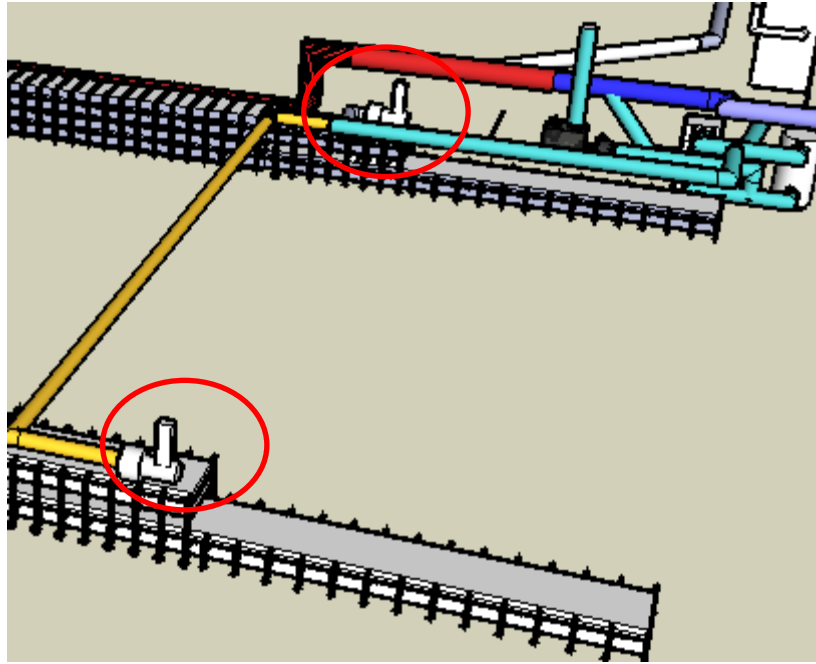
Şekil 6.2. Duvar Karosu fırınındaki temiz sıcak hava bacaları

Şekil 6.2.' de Umpaş Seramik'de yer alan DK fırınında iki adet temiz sıcak hava bacası yer almaktadır. Temiz hava bacaları birleştirilip tek hatta bağlanmış ve sisteme gönderilmiştir. Fırınlarda yer alan temiz hava bacalarının her birinin teknik bilgileri Çizelge 6.2'deki tabloda gösterilmiştir.

Çizelge 6.2. Temiz sıcak hava baca gazı bilgileri

Sıcak (Temiz) Hava Bacaları				
Bacanın bulunduğu yer	Hız	Baca çapı	Debi	Sıcaklık
	m/s	m	Sm ³ /h	°C
Velko 1 nolu çift katlı fırın ilk soğutma bacası	8,64	0,70	12 175	263
Velko 1 nolu çift katlı fırın son soğutma bacası	12,00	0,95	31 146	131
Velko 2 nolu çift katlı fırın ilk soğutma bacası	7,30	0,70	10 287	183
Velko 2 nolu çift katlı fırın son soğutma bacası	17,20	0,70	23 817	155

Baca gazı her fırında bir adet bulunup iki farklı fırının baca gazları ile birleştirilmiştir. Şekil 6.3’de iki fırına ait baca gazlarının yerleri gösterilmiştir.



Şekil 6.3. Duvar Karosu fırınındaki baca gazları

Bu baca gazları bir ısı değiştirici ile sıcak su elde etmede veya hava ısıtmada kullanılmaktadır. Baca gazı debi ve sıcaklık değerleri Çizelge 6.3’de gösterilmiştir.

Çizelge 6.3. Baca gazı bilgileri

Sıcak (Kirli) Hava Bacaları				
Bacanın bulunduğu yer	Hız	Baca çapı	Debi	Sıcaklık
	m/s	m	Sm ³ /h	°C
Velko 1 nolu çift katlı fırın atık hava bacası	22,61	0,50	8 450	240
Velko 2 nolu çift katlı fırın atık hava bacası	24,16	0,50	8 589	265

Fırında yer alan iki adet baca gazını ayrı ayrı taşımak hem boru maliyetini hem de işçilik maliyetini arttırdığı gibi ısı kaybına da yol açacaktır. Bunları önlemek amacıyla iki ayrı baca gazı ilk olarak tek boru sistemine 75 cm çaplı borular ile birleştirilmiştir. Resim 6.3' de ve Resim 6.4' de Umpaş Seramik' te kurulan atık ısı geri kazanım sisteminin boru hattı görüntüleri yer almaktadır.



Resim 6.3. Temiz sıcak hava bacasından alınan havanın ilk boru hattı



Resim 6.4. Temiz sıcak hava bacası çıkış hattı



Resim 6.5. İki temiz sıcak hava bacasının birleşimi

Bir araya getirilen temiz sıcak havalar 80 cm çaplı boru yardımı ile yine 2.hol sıcak havası ile birleştirilmek üzere ana boru hattına taşınmıştır. Resim 6.5’de iki boru hattının birleşim aşaması görülmektedir. Resim 6.6’ da ise birleştirilen sıcak temiz boru hattının görüntüleri yer almaktadır.



Resim 6.6. Temiz sıcak hava hatlarının birleşmesiyle oluşan boru hattı

Boru hattında oluşacak herhangi bir basınç artışı absorbe etmek için kompensatör sistemi kurulmuş ve genişleme durumunda esneme payları düşünülerek boru hattı bölünmüştür. Resim 6.7' de kompensatör sistemine ait bir görüntü yer almaktadır.



Resim 6.6. Kompansatör sistemi

1.hol fırınına uygulanan boru hattı sistemi aynı şekilde 2.hol fırınına da uygulanmıştır. 1. hol ve 2. hol hava hattı basınç artışı düşünülerek 120 cm çaplı boruda bir araya getirilmiştir. Resim 6.8' de ana boru hattına ait bir görüntü yer almaktadır.



Resim 6.8. Ana boru hattının oluşumu

Temiz sıcak hava için uygulanan boru hattının aynısı baca gazı hattı içinde uygulanmıştır. Resim 6.9’ da da gösterildiği gibi baca gazının kullanılmasının temel sebebi diğer hatlardan daha yüksek sıcaklıkta olmasıdır. 200 °C üzerinde bir sıcaklığa sahip olan baca gazı sıcak su elde etmede de kullanılmaktadır.



Resim 6.9. Baca gazı hattı

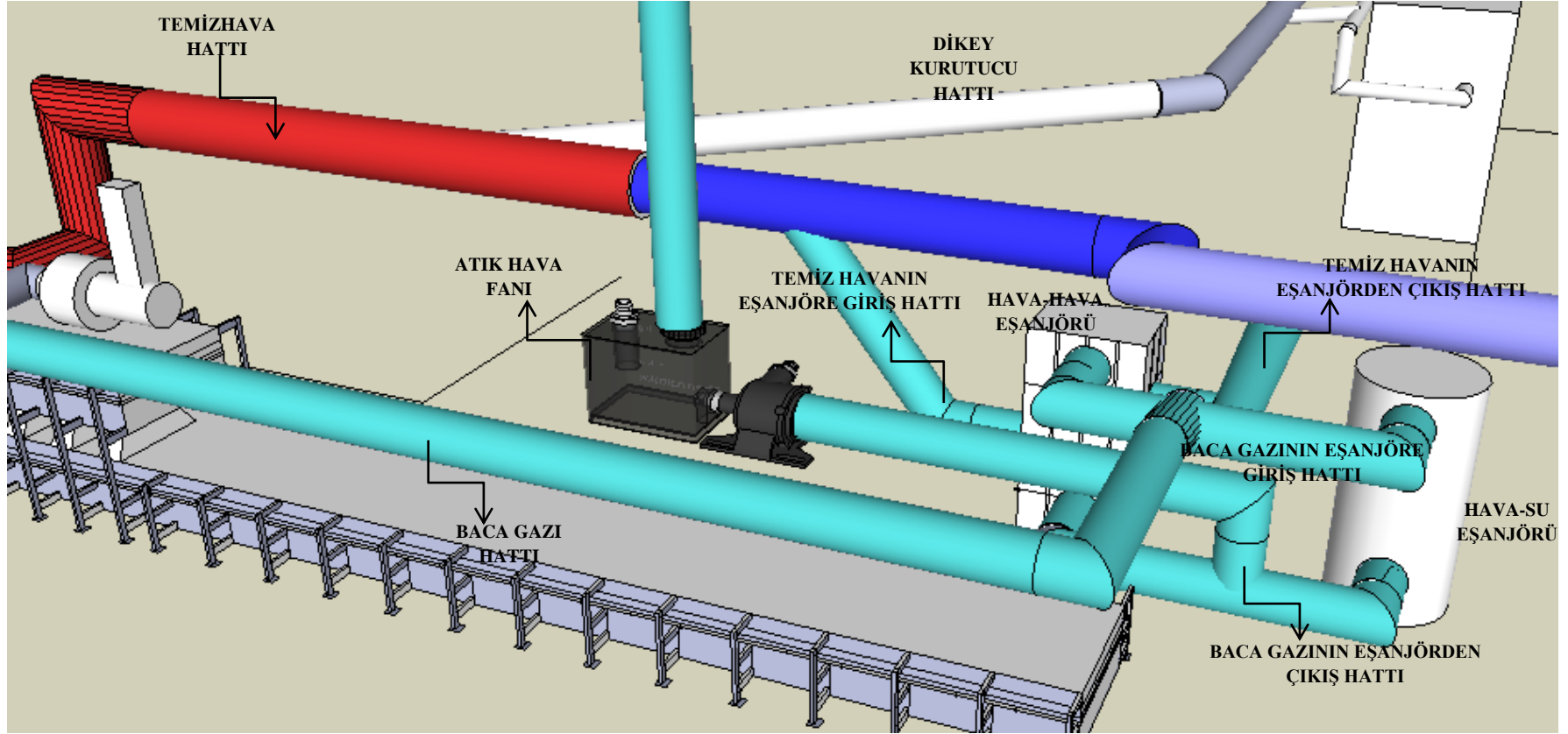
Baca gazı, sistemde iki farklı yerde değerlendirilmektedir. Bu havanın bir kısmı Resim 6.10'da gösterilen hava-su eşanjöründen geçirilerek idari bina ısıtması ve sıcak su ihtiyacı için kullanılmaktadır. Baca gazının diğer kısmı hava-hava eşanjöründen geçirilerek havanın ısıtmasında kullanılmaktadır. Resim 6.11' de gösterilen hava-hava eşanjörü ile temiz sıcak hava 150 °C civarından 170 °C' ye çıkarılmaktadır.



Resim 6.10. Hava-hava eşanjörü



Resim 6.11. Hava-hava eşanjörü



Şekil 6.4. Temiz hava ve baca gazının eşanjörlere giriş ve çıkışları

Temiz hava ve baca gazının eşanjörlere giriş ve çıkışları şekil 6.4' de ayrıntılı olarak gösterilmiştir.

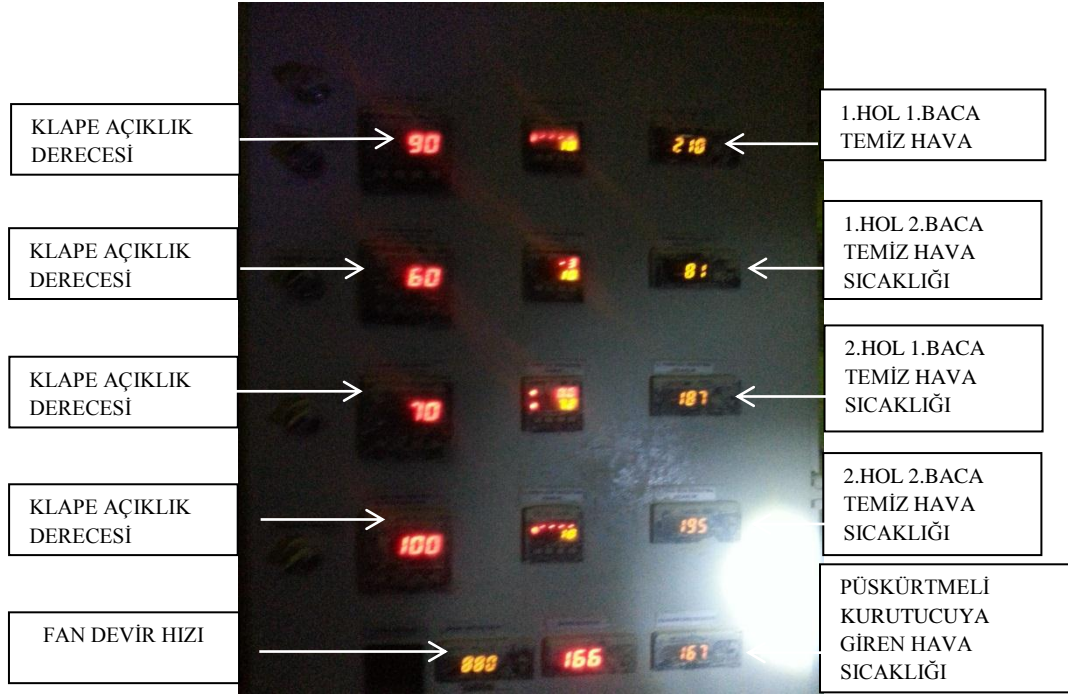
Tüm bu eşanjör sisteminden elde edilen 168 °C' deki sıcak hava yine püskürtmeli kurutucuya gönderilmek üzere borular yardımı ile taşınmıştır. Püskürtmeli kurutucu yanma odasına giden ve dış ortamdan alınan yakma havası ve sızıntı hava girişine ayrı bir bölüm yapılmıştır.



Resim 6.12. Püskürtmeli kurutucu atık ısı giriş bölümü

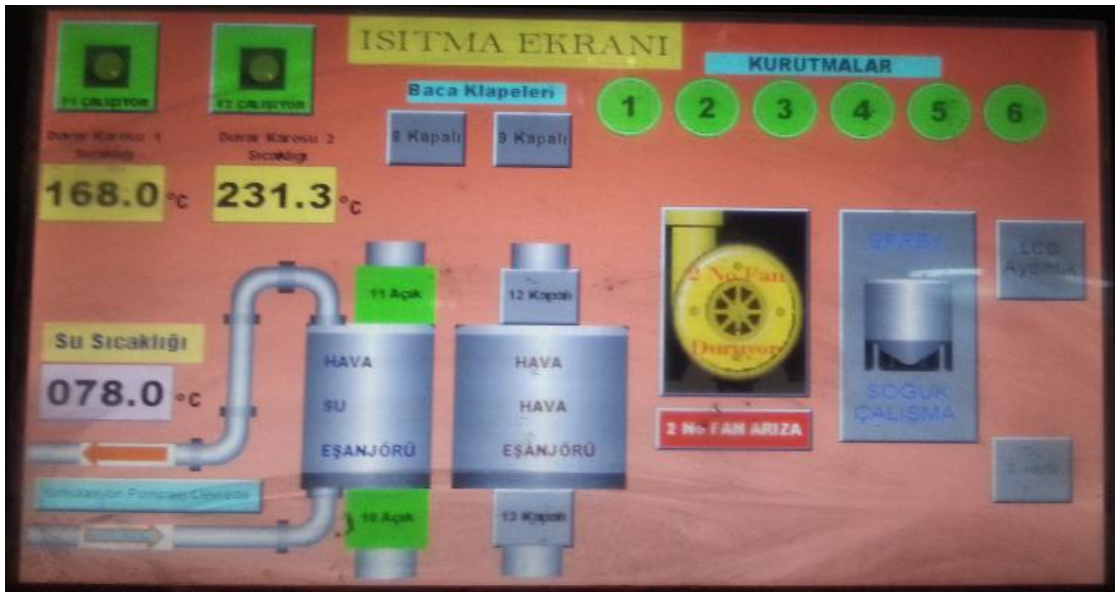
Sisteme giren hava sıcaklığını elektrikli klapeler yardımı ile dış ortamdan hava alınarak ayarlanabilmektedir. Resim 6.12'de sekonder hava yani sızıntı hava girişi bu bölümden sağlanmaktadır. Atık ısının temel amacı 25 °C'deki havayı 600 °C' ye çıkarmak yerine 165-170 °C'deki havayı 600 °C' ye çıkarmaktır. Ayrıca yakma havası için gerekli hava yani primer hava, yine sıcak hava ile sağlanarak enerji tasarrufu sağlanması hedeflenmektedir.

Sistemdeki her sıcak hava hattı elektrikli veya hava basınçlı klapeler yardımı ile Resim 6.13' de gösterilen elektrik panolarıyla kontrol edilmektedir. İstenilen basınç veya sıcaklıkta hava gönderilmesi için sistem sürekli izlenmektedir. Ayrıca eşanjör ve su ısıtma sistemi PLC' ler ile elektronik ortamda kontrol edilmektedir.



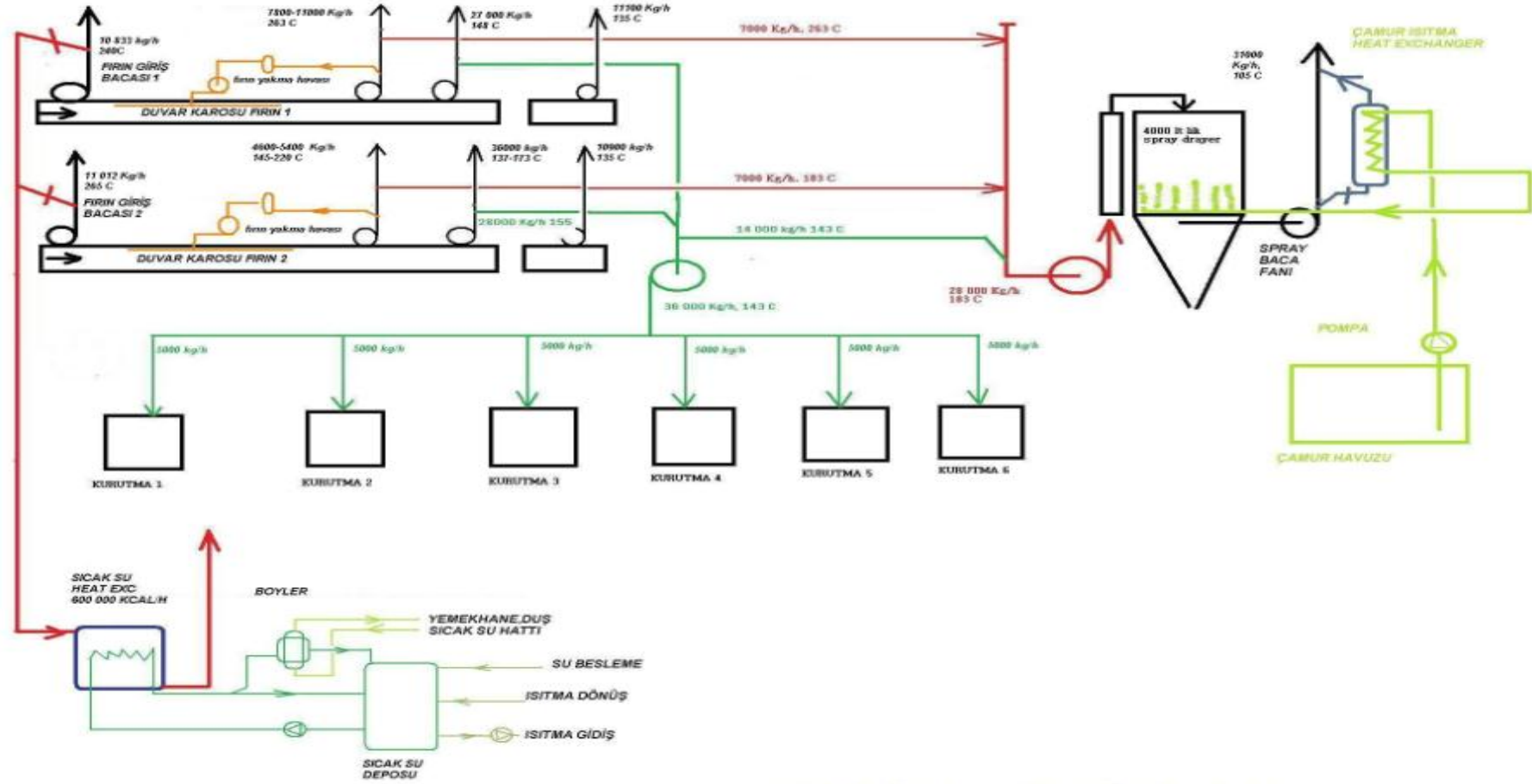
Resim 6.13. Baca sıcaklıkları kontrol paneli

Sistemde yer alan eşanjör ve su ısıtma sistemi PLC'ler ile elektronik ortamda kontrol edilmektedir. Bunların kontrolü aşağıdaki Resim 6.14. 'deki panel ile olmaktadır.



Resim 6.14. Baca gazı ve su ısıtma eşanjörü kontrol paneli

Tüm atık ısı geri kazanım sisteminin genel olarak akış şeması Şekil 6.5' da ayrıntılı olarak verilmiştir:



Şekil 6.5. Atık ısı geri kazanım sisteminin genel akış şeması

6.4. Enerji ve Ekserji Hesaplamaları İçin Hazırlanan Programın Tanıtılması

Hesaplamalar daha hızlı ve kolay yapılabilmesi için Excel Visual Basic'den yararlanılarak enerji ve ekserji hesaplama programı geliştirilmiştir. Böylelikle istenilen sıcaklık değerinde hesaplamalar yapılabilmekte ve raporlamaların yapılabilmesi için veriler kolaylıkla Excele aktarılabilmektedir. Fiziksel ekserji için gerekli olan;

- Farklı sıcaklık, sabit basınç (katı-sıvı-gaz)
- Farklı sıcaklık, farklı basınç (gaz)
- Farklı sıcaklık, farklı basınç (katı-sıvı)
- Sabit sıcaklık, farklı basınç (gaz)
- Sabit sıcaklık, farklı basınç (katı-sıvı), koşul bilgilerinden biri seçilerek hesaplamalar yapılmaktadır.

Ekserji değerlerini hesaplamasını istediğimizde herhangi bir koşul seçilmesine gerekmektedir. Resim 6.15' de bu koşulların yer aldığı bir görüntü bulunmaktadır.

The screenshot shows a software interface for selecting conditions. At the top, there are five radio button options for different conditions: 'FARKLI SICAKLIK, SABİT BASINÇ (KATI-SIVI-GAZ)', 'FARKLI SICAKLIK, FARKLI BASINÇ (GAZ)', 'FARKLI SICAKLIK, FARKLI BASINÇ (KATI-SIVI)', 'SABİT SICAKLIK, FARKLI BASINÇ (GAZ)', and 'SABİT SICAKLIK, FARKLI BASINÇ (KATI-SIVI)'. Below these options is a table with columns for various physical properties and a row for 'MADDELER' (Substances). The table has 18 columns: SIRA, MADDE, DEBI, cp,v, M, e, R, Vm, To, T, ΔT, Ln, Po, P, ΔP, Ln, Entropi, Entalpi, Qh, and Fiziksel Ekserji. The first three rows of the table are empty, with dropdown menus for 'MADDE' and input fields for the other properties.

SIRA	MADDE	DEBI (kg/h)	cp,v (kJ/kgK)	M (kg/mol)	e (kJ/kmol)	R (kJ/kgK)	Vm (m ³ /kg)	To (K)	T (K)	ΔT	Ln (T1/To)	Po (bar)	P (bar)	ΔP	Ln (P/Po)	Entropi (kJ/kg)	Entalpi (kJ/kg)	Qh (kJ)	Fiziksel Ekserji (kJ/h)
1																			
2																			
3																			

Resim 6.15. Koşul bilgilerinin seçilmesi

Program 10 farklı maddenin aynı anda hesaplamalarını yapabilmektedir. Seçilen maddenin standart koşullardaki c değeri (kJ/kgK), birim mol değerini (kg/kmol), birim kimyasal ekserjisi (kJ/kmol), universal gaz sabiti R (kJ/kgK) değerlerini hesaplamaktadır. Girilen sıcaklık değerine göre c değerini güncellenmektedir. Buna örnek olarak Resim 6.16' da bir maddenin iki farklı sıcaklıktaki c değerinin farklılıkları gösterilmeye çalışılmıştır.

MADDELER									
SIRA	MADDE	DEBİ (kg/h)	cp,v (kJ/kgK)	M (kg/mol)	e (kJ/kmol)	R (kJ/kgK)	Vm (m3/kg)	To (K)	T (K)
1	CH4		2,232	0,016	831,2	0,518		298	310
2	CH4		2,272	0,016	831,2	0,518		298	320
3	C2H6		1,81	0,030	1495	0,276		298	310
4	C2H6		1,853	0,030	1495	0,276		298	320
5	C3H8		1,746	0,044	2152	0,188		298	310
6	C3H8		1,79	0,044	2152	0,188		298	320
7	H2O(S)		4,196	0,018	0,9	0,462		298	310
8	H2O(S)		4,201	0,018	0,9	0,462		298	320
9	H2O(G)		1,869	0,018	9,5	0,462		298	310
10	H2O(G)		1,867	0,018	9,5	0,462		298	320

Resim 6.16. Farklı sıcaklıktaki ürünlerin özellikleri

İstenilen hesaplamının yapılabilmesi için gerekli olan değerlerin eksikliğinde program o eksiklikle ilgili hata vermektedir. Resim 6.17 ve Resim 6.18’de eksik girilen veriler sonucu ortaya çıkmış uyarılardan örnekler gösterilmiştir.

MADDELER										
SIRA	MADDE	DEBİ (kg/h)	cp,v (kJ/kgK)	M (kg/mol)	e (kJ/kmol)	R (kJ/kgK)	Vm (m3/kg)	To (K)	T (K)	ΔT
1	CH4		2,232	0,016	831,2	0,518		298	310	
2	CH4		2,272	0,016	831,2	0,518		298	320	
3	C2H6									
4	C2H6									
5	C3H8									
6	C3H8									
7	H2O(S)									
8	H2O(S)									

Microsoft Excel

LÜTFEN 1.SIRADAKİ DEBİ DEĞERİNİ GİRİNİZ.

Tamam

Resim 6.17. Debi boş bırakıldı uyarısı

MADDELER												
SIRA	MADDE	DEBİ (kg/h)	cp,v (kJ/kgK)	M (kg/mol)	e (kJ/kmol)	R (kJ/kgK)	Vm (m3/kg)	To (K)	T (K)	ΔT	Ln (T1/To)	
1	CH4	10	2,232	0,016	831,2	0,518		298	310			
2	CH4	10	2,272	0,016	831,2	0,518		298	320			
3	C2H6	10										
4	C2H6	10										
5	C3H8	10										
6	C3H8	10										
7	H2O(SI)	10										
8	H2O(SI)	10										

Resim 6.18. Basınç boş bırakıldı uyarısı

Gerekli bilgiler ve koşullar girildiğinde fiziksel veya kimyasal ekserji hesapla tuşları ile hesaplamalar hızlı bir şekilde yapılabilmektedir. Ayrıca seçilen maddenin bulunduğu koşullardaki entalpisi ve enerjisi hesaplanabilmektedir. Toplam ekserji hesapla tuşu ile fiziksel ve kimyasal ekserji toplanıp Resim 6.19'daki gibi alt satırda gösterilmektedir.

Qh (kJ)	Fiziksel Ekserji (kJ/h)	Kimyasal Ekserji (kJ/h)	Toplam Ekserji (kJ/h)	SİL
6919,2	5,244	518106,61	518111,861	SİL
7270,4	17,573	518106,61	518124,19	SİL
5611	4,253	497171,60	497175,862	SİL
5929,6	14,332	497171,60	497185,941	SİL
5412,6	4,102	487367,56	487371,665	SİL
5728	13,845	487367,56	487381,408	SİL
13007,6	9,859	500	509,859	SİL
13443,2	32,493	500	532,493	SİL
5793,9	4,391	5277,778	5282,169	SİL
5990,4	14,479	5277,778	5292,257	SİL
75102	116	3016842	3016967,70	
TOPLAM ENERJİ (kJ/h)	FİZİKSEL EKSERJİ (kJ/h)	KİMYASAL EKSERJİ (kJ/h)	TOPLAM EKSERJİ (kJ/h)	

Resim 6.19. Toplam ekserji ve enerji hesapları

Programda yer alan verileri Excel'e aktar tuşu ile aynı sıra ve satır düzeni ile Excele aktarılabilmektedir. Böylelikle istenilen analizleri Excel üzerinden yapılmasına olanak sağlamaktadır. Çizelge 6.4' de aktarımı yapılmış hesaplamalardan bir tablo örnek olarak gösterilmiştir.

Çizelge 6.4. Programdan verilerin Excel'e aktarılmış hali

SIRA	MADDE	DEBİ (kg/h)	$c_{p,v}$ (kJ/kgK)	M (kg/mol)	$\epsilon_{\chi_k}^0$ (kJ/mol) (Standart)	R (kJ/kgK)
1	CH ₄	100	2,232	0,0160	831,2	0,518
2	CH ₄	100	2,272	0,0160	831,2	0,518
3	C ₂ H ₆	100	1,81	0,0300701	1495	0,276
4	C ₂ H ₆	100	1,853	0,0301	1495	0,276
5	C ₃ H ₈	100	1,746	0,0442	2152,8	0,188
6	C ₃ H ₈	100	1,79	0,0442	2152,8	0,188
7	H ₂ O(SIVI)	100	4,196	0,0180	0,9	0,462
8	H ₂ O(SIVI)	100	4,201	0,0180	0,9	0,462
9	H ₂ O(GAZ)	100	1,869	0,0180	9,5	0,462
10	H ₂ O(GAZ)	100	1,872	0,0180	9,5	0,462

7. ENERJİ, EKSERJİ VE EKONOMİK ANALİZ

Duvar karosu püskürtmeli kurutucu da, atık ısı geri kazanım projesi uygulanmadan önceki ve uygulandıktan sonra ki termodinamik analizler, performanslar ve sağlanan tasarruflar bu bölümde açıklanmıştır. Genel anlamda duvar karosu püskürtmeli kurutucu için, her iki koşulda da:

- Kütle denge analizi
- Enerji analizi
 - Fiziksel enerji
 - Kimyasal enerji
- Ekserji analizi
 - Fiziksel ekserji
 - Kimyasal ekserji
- Enerji verimliliği
- Ekserji verimliliği hesaplanmıştır.

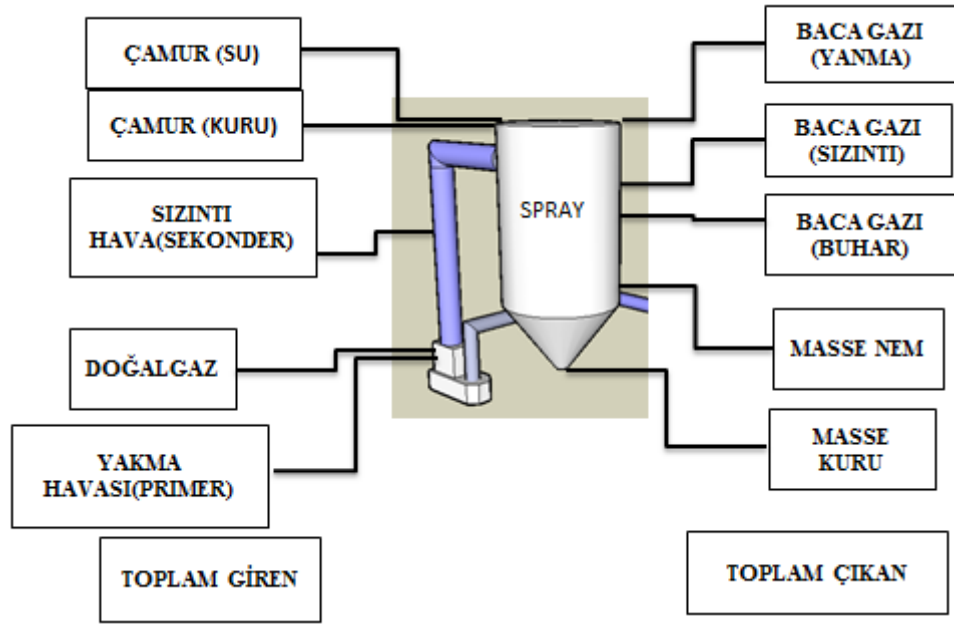
Birim masse için tüketilen doğalgaz miktarları izlenmiş ve rapor haline getirilerek tasarruf miktarları aylık olarak tespit edilmiştir.

Sistemde yanma olduğu için çeşitli kimyasal reaksiyonlar ve fiziksel tepkimeler meydana gelmiş ve denklemler halinde gösterilmiştir. Sisteme giren ve çıkan tüm hammaddeler bileşen halinde ele alınıp hesaplamalar yapılmıştır. Farklı sıcaklık da farklı c değerleri ve yoğunluklar dikkate alınmıştır.

7.1. Kütle Denge Analizi

Sisteme çamurlaştırılmış hammadde karışımı belli bir basınç ile girmektedir. Bu hammadde karışımı AR-GE departmanı tarafından hazırlanan reçetelere göre uygulanmaktadır. Çamurda yer alan su miktarı yine AR-GE tarafından konulmuş olan standartlara göre ayarlanmaktadır. Bu standartların içinde en önemlileri viskozite ve elek bakiyelerini belli sınırlar içinde tutmaktır.

Temel olarak sisteme giren ve çıkan maddeler Şekil 7.1’ de gösterilmiştir.



Şekil 7.1. Püskürtmeli kurutucuya giren-çıkan maddeler

Kütle dengesi denklemi aşağıdaki şekilde ifade edilebilir [30].

$$\sum \dot{m}_{giren} = \sum \dot{m}_{çikan} \quad (7.1)$$

Şekil 7.1’e dayanarak, Eşitlik 7.1’den aşağıdaki eşitlik elde edilebilir.

$$\dot{m}_{çs} + \dot{m}_{çk} + \dot{m}_{sh} + \dot{m}_d + \dot{m}_{yh} = \dot{m}_{mk} + \dot{m}_{mn} + \dot{m}_{bb} + \dot{m}_{bs} + \dot{m}_{bg} \quad (7.2)$$

Duvar karosu massesi üretiminde kullanılan hammaddelerin karışım oranları ve element dağılımları Çizelge 7.1’ de verilmiştir. Hammaddeler kil, pegmatit ve kaolen gruplarına ayrılmıştır. Sisteme giren hammadde oranı değişmediği için, atık ısı ve atık ısısız kütledebiler bu oranlar üzerinden değerlendirilmiştir.

Bu bölümde püskürtmeli kurutucuya giren ve çıkan maddelerin saatlik debi miktarları ele alınmıştır. Giren hammaddelerin kuru ağırlıkları ayrı ve kullanılan su ağırlıkları ayrı kategorize edilmiştir. Ayrıca harcanan doğalgaz miktarı programdan saatlik olarak Nm³ olarak alınmıştır.

Sisteme giren doğalgazın kütle olarak element dağılımı ve kimyasal denklemleri ise Çizelge 7.2’ de verilmiştir.

Çizelge 7.1. Hammadde kütle ve element dağılımı

MASSELİK HAMMADDE KÜTLESEL DAĞILIMI					
BİLEŞENLER	KİL GRUBU	PEGMATİT	KAOLEN GRUBU	MERMER TOZU	TOPLAM
	8,00%	26,67%	4,00%	10,00%	100,00%
Oxide	% DAĞILIM	% DAĞILIM	% DAĞILIM	% DAĞILIM	% DAĞILIM
Na ₂ O	0,84	5,5	0,36%	0,53	1,71%
CaO	0,85	2,2	1,05%	92,82	10,29%
K ₂ O	11,02	0,6	2,52%	0,26	1,86%
MgO	3,03	0,75	1,19%	0,88	0,95%
Fe ₂ O	12,88	1	0,99%	0,18	1,50%
TiO ₂	5,59	0,25	0,41%	0,09	0,66%
Al ₂ O ₃	75,25	12,5	14,01%	3,50	15,19%
SO ₃	28,94	0,2	0,41%	0,00	1,09%
SiO ₂	261,60	77	79,05%	1,75	66,75%

Çizelge 7.2. Doğalgazın element ve kütle dağılımı [29]

DOĞALGAZ(GİRDİ)				DOĞALGAZ(ÇIKTI)
BİLEŞEN	KİMYASAL FORMÜL	MOL %	KÜTLE %	REAKSİYONLAR
METHAN	CH ₄	91,94%	84,441%	CH ₄ + 2O ₂ = CO ₂ + 2H ₂ O + ISI
ETHAN	C ₂ H ₆	3,53%	6,079%	C ₂ H ₆ + 7/2O ₂ = 2CO ₂ + 3H ₂ O + ISI
PROPAN	C ₃ H ₈	0,90%	2,273%	C ₃ H ₈ + 5O ₂ = 3CO ₂ + 4H ₂ O + ISI
BUTAN	C ₄ H ₁₀	0,38%	1,265%	C ₄ H ₁₀ + 13/2O ₂ = 4CO ₂ + 5H ₂ O + ISI
PENTAN	C ₅ H ₁₂	0,11%	0,455%	C ₅ H ₁₂ + 8O ₂ = 5CO ₂ + 6H ₂ O + ISI
NİTROJEN	N ₂	2,66%	4,275%	N ₂ + O ₂ + ISI
KARBONDİOKSİT	CO ₂	0,48%	1,212%	CO ₂ + O ₂ + ISI

Referans ortamının yani havanın molar dağılımı Çizelge 7.3' de belirtilmiştir.

Çizelge 7.3. Havanın element ve kütle dağılımı

Hava	Elementler	Kütle %	Mol %
	N ₂	74,75%	77,37%
	O ₂	23,93%	21,67%
	CO ₂	0,05%	0,03%
	Ar	1,27%	0,92%
	H ₂ O	0,01%	0,01%

Çevre basıncı P₀: 1 bar

Sisteme giren ve çıkan tüm maddeler genel ve ayrıntılı olmak üzere ayrı ayrı ele alınmıştır. Çizelge 7.4'de, giren ve çıkan ana maddeler verilmiştir. Çizelge 7.5 ve 7.8'de sırasıyla bu ana maddelerin giren bileşen dağılımları ve çıkan bileşen dağılımları verilmiştir

Çizelge 7.4. Sisteme giren ve çıkan maddelerin kütle dağılımı

Giren Maddeler	Atık Isıdan Önce	Atık Isıdan Sonra	Çıkan Maddeler	Atık Isıdan Önce	Atık Isıdan Sonra
	Debi (kg/h)	Debi (kg/h)		Debi (kg/h)	Debi (kg/h)
Çamur(Kuru Madde)	7802,00	9400,00	Masse(Kuru)	7802,00	9400,00
Çamur(Sulu Madde)	4388,63	5287,50	Massenin nemi	498,00	600,00
Doğalgaz	324,32	273,87	Baca gazı(su Buharı)	3890,63	4687,50
Yakma havası	5160,85	4358,05	Baca gazı(Yanma)	5496,22	4633,30
Sızıntı hava	24720,17	33141,11	Baca gazı(Sızıntı)	24709,12	33139,73
	42395,96	52460,53		42395,96	52460,53

Çizelge 7.4'de görüldüğü gibi, atık ısı kullanımından sızıntı hava debi miktarı artarken kullanılan doğalgaz miktarı azalmıştır.

Çizelge 7.5. Sisteme giren maddelerin element, mol ve kütle dağılımı

ÜRÜN	Bileşen	ATIK ISIDAN ÖNCE				Bileşen	ATIK ISIDAN ÖNCE			
		Sıcaklık	%ORAN (Mol)	%ORAN (kütle)	Kütlesel Debi (kg/h)		Sıcaklık	%ORAN (Mol)	%ORAN (kütle)	Kütlesel Debi (kg/h)
Çamur Kuru Madde	Na ₂ O	316,30	-	1,71%	133,79	Na ₂ O	316,30	-	1,71%	161,19
	CaO	316,30	-	10,29%	802,80	CaO	316,30	-	10,29%	967,23
	K ₂ O	316,30	-	1,86%	145,03	K ₂ O	316,30	-	1,86%	174,73
	MgO	316,30	-	0,95%	74,09	MgO	316,30	-	0,95%	89,26
	Fe ₂ O	316,30	-	1,50%	117,19	Fe ₂ O	316,30	-	1,50%	141,19
	TiO ₂	316,30	-	0,66%	51,15	TiO ₂	316,30	-	0,66%	61,63
	Al ₂ O ₃	316,30	-	15,19%	1185,06	Al ₂ O ₃	316,30	-	15,19%	1427,78
	SO ₃	316,30	-	1,09%	85,23	SO ₃	316,30	-	1,09%	102,69
	SiO ₂	316,30	-	66,75%	5207,66	SiO ₂	316,30	-	66,75%	6274,29
TOPLAM					7802,00	9400,00				
Çamur sulu madde (H ₂ O)	H ₂ O	316,30	-	100	4388,63	H ₂ O	316,30	-	100	5287,50
TOPLAM					4388,63	5287,50				
Yanıcı gaz (Doğalgaz)	CH ₄	303	91,94%	84,44%	273,86	CH ₄	303	91,94%	84,44%	231,26
	C ₂ H ₆	303	3,53%	6,08%	19,72	C ₂ H ₆	303	3,53%	6,08%	16,65
	C ₃ H ₈	303	0,90%	2,27%	7,37	C ₃ H ₈	303	0,90%	2,27%	6,23
	C ₄ H ₁₀	303	0,38%	1,26%	4,10	C ₄ H ₁₀	303	0,38%	1,26%	3,46
	C ₅ H ₁₂	303	0,11%	0,45%	1,47	C ₅ H ₁₂	303	0,11%	0,45%	1,25
	N ₂	303	2,66%	4,27%	13,87	N ₂	303	2,66%	4,27%	11,71
	CO ₂	303	0,48%	1,21%	3,93	CO ₂	303	0,48%	1,21%	3,32
	TOPLAM					324,32	273,87			
Yakma havası	N ₂	303	77,37%	74,75%	3857,79	N ₂	441	77,37%	74,75%	3257,69
	O ₂	303	21,67%	23,93%	1234,86	O ₂	441	21,67%	23,93%	1042,77
	CO ₂	303	0,03%	0,05%	2,35	CO ₂	441	0,03%	0,05%	1,98
	Ar	303	0,92%	1,27%	65,53	Ar	441	0,92%	1,27%	55,34
	H ₂ O	303	0,01%	0,01%	0,32	H ₂ O	441	0,01%	0,01%	0,27
TOPLAM					5160,85	4358,05				
Sızıntı hava	N ₂	303	77,37%	74,75%	18478,58	N ₂	441	77,37%	74,75%	24773,32
	O ₂	303	21,67%	23,93%	5914,89	O ₂	441	21,67%	23,93%	7929,81
	CO ₂	303	0,03%	0,05%	11,26	CO ₂	441	0,03%	0,05%	15,09
	Ar	303	0,92%	1,27%	313,90	Ar	441	0,92%	1,27%	420,82
	H ₂ O	303	0,01%	0,01%	1,54	H ₂ O	441	0,01%	0,01%	2,06
TOPLAM					24720,17	33141,11				
GENEL TOPLAM					42395,96	52460,53				

Çizelge 7.5’de görüldüğü gibi, sisteme giren atık ısı ile birlikte sızıntı ve yakma havası sıcaklıkları 441 °C’ ye yükselmiştir

Sistemden atılan baca gazı belli periyotlarda çevre denetim şirketi tarafından ölçülmektedir. Atık ısı kullanımından önceki ve sonraki baca gazının element ve kütle dağılımı sırasıyla Çizelge 7.6 ve 7.7’de verilmiştir.

Çizelge 7.6. Atık ısı kullanımından önceki baca gazı analizi

Markası	Üretim Yılı	Seri No	Kazan Tipi		
WELKO	2000	-	BRULÖRLÜ		
Yakıt Tipi	Yakıt Alt Isıl Değeri (kcal/m ³)	Yakıt Isıl Gücü (kW)	Yakıt Sarfıyatı (m ³ /h)		
DOĞALGAZ	8250	960	100,7		
ÜNİTE HAKKINDA BİLGİ					
Çamurdan suyun uzaklaştırılarak granül hale getirilmesi amacıyla kullanılmaktadır.					
Çatı Özelliği	Eğik				SINIR DEĞER
Baca Yüksekliği (Yerden) (m)	27,2				
Baca Yüksekliği (Çatıdan) (m)	3,2				
Ölçüm Tarihi	12.07.2012	12.07.2012	12.07.2012	ORTALAMA	
Atmosfer Basıncı (mbar)	927,5	927,5	927,5	927,5	
Gaz Sıcaklığı (°C)	100	99	100	100	
Gaz Hızı (m/sn)	19,44	25,59	19,32	21,45	
Baca Kesiti (m ²)	0,785	0,785	0,785	0,785	
Gaz Debisi (m ³ /dk)	54 917,44	72 317,34	54 598,32	60 617,7	
Gaz Debisi (Nm ³ /dk)	28 032	36 990	27 927,01	30 983,13	
CO Emisyonu (kg/h)	1,482	1,96	1,45	1,631	
SO ₂ Emisyonu (kg/h)	6,775	8,957	6,68	7,47	
NO Emisyonu (kg/h)	0	0	0	0	
NO ₂ Emisyonu (kg/h)	0,054	0,72	0,054	0,06	
Flor Emisyonu (kg/h)	0,0003		0,0007	0,0004	
Klor Emisyonu (kg/h)	0,00074	0,0006	0,00027	0,00054	
O ₂ Konsantrasyonu (%)	15,93%	15,92%	15,88%	15,91%	
CO ₂ Konsantrasyonu (%)	2,80%	2,81%	2,83%	2,81%	

Çizelge 7.7. Atık ısı kullanımından sonraki baca gazı analizi

Markası	Üretim Yılı	Seri No	Kazan Tipi		
WELKO	2000	-	BRULÖRLÜ		
Yakıt Tipi	Yakıt Alt Isıl Değeri (kcal/m ³)	Yakıt Isıl Gücü (kW)	Yakıt Sarfıyatı (m ³ /h)		
DOĞALGAZ	8250	960	100,7		
ÜNİTE HAKKINDA BİLGİ					
Çamurdan suyun uzaklaştırılarak granül hale getirilmesi amacıyla kullanılmaktadır.					
Çatı Özelliği	Eğik				SINIR DEĞER
Baca Yüksekliği (Yerden) (m)	27,2				
Baca Yüksekliği (Çatıdan) (m)	3,2				
Ölçüm Tarihi	28.08.2014	28.08.2014	28.08.2014	ORTALAMA	
Atmosfer Basıncı (mbar)	990,95	990,91	927,5	991,01	
Gaz Sıcaklığı (°C)	92,95	92,1	92,34	92,46	
Gaz Hızı (m/sn)	22,55	22,66	22,59	22,6	
Baca Kesiti (m ²)	0,785	0,785	0,785	0,785	
Gaz Debisi (m ³ /dk)	63 726,4	64 037,16	63 839,34	63 867,6	
Gaz Debisi (Nm ³ /dk)	44 645,03	44 965,44	44 801,61	44 804,03	
CO Emisyonu (kg/h)	0,3348	0,3934	0,28	0,3361	
SO ₂ Emisyonu (kg/h)	-	-	0,2566	0, 863	
NO Emisyonu (kg/h)	0,3588	0,3613	0,42	0,38	
NO ₂ Emisyonu (kg/h)	0,5501	0,554	0,644	0,5827	
Flor Emisyonu (kg/h)	0,0007	0,0006	0,0007	0,0007	
Klor Emisyonu (kg/h)	0,0507	0,0532	0,0529	0,0533	
O ₂ Konsantrasyonu (%)	18,77%	18,61%	18,88%	18,75%	
CO ₂ Konsantrasyonu (%)	1,22%	1,31%	1,36%	1,23%	

Sistemden çıkan maddelerin element ve kütle dağılımı Çizelge 7.8’de ayrıntılı olarak gösterilmiştir.

Çizelge 7.8. Sistemden çıkan maddelerin element, mol ve kütle dağılımı

ÜRÜN	Bileşen	ATIK ISIDAN ÖNCE				ATIK ISIDAN SONRA			
		Sıcaklık	%ORAN (Mol)	%ORAN (kütle)	Kütlesel Debi (kg/h)	Sıcaklık	%ORAN (Mol)	%ORAN (kütle)	Kütlesel Debi (kg/h)
Masse Kuru Madde	Na ₂ O	323,20	-	1,71%	133,79	323,20	-	1,71%	161,19
	CaO	323,20	-	10,29%	802,80	323,20	-	10,29%	967,23
	K ₂ O	323,20	-	1,86%	145,03	323,20	-	1,86%	174,73
	MgO	323,20	-	0,95%	74,09	323,20	-	0,95%	89,26
	Fe ₂ O	323,20	-	1,50%	117,19	323,20	-	1,50%	141,19
	TiO ₂	323,20	-	0,66%	51,15	323,20	-	0,66%	61,63
	Al ₂ O ₃	323,20	-	15,19%	1185,06	323,20	-	15,19%	1427,78
	SO ₃	323,20	-	1,09%	85,23	323,20	-	1,09%	102,69
SiO ₂	323,20	-	66,75%	5207,66	323,20	-	66,75%	6274,29	
TOPLAM					7802,00	9400,00			
Masse Nemi	H ₂ O	323	-	100	498,00	323	-	100%	600,00
TOPLAM					498,00	600,00			
Baca gazı(Çamur Su Buharı)	H ₂ O	373	-	100	3890,63	366	-	100%	4687,50
TOPLAM					3890,63	4687,50			
Baca gazı (Yanma havası)	CO ₂	373	9,85%	15,58%	856,30	366	9,860%	15,61%	723,10
	CO	373	0,03%	0,03%	1,63	366	0,007%	0,01%	0,34
	SO ₂	373	0,06%	0,14%	7,47	366	0,001%	0,00%	0,09
	NO					366	0,008%	0,01%	0,38
	NO ₂	373	0,02%	0,04%	1,94	366	0,008%	0,01%	0,58
	N ₂	373	69,99%	70,44%	3871,65	366	70,053%	70,56%	3269,40
	Ar	373	0,83%	1,19%	65,53	366	0,830%	1,19%	55,34
	H ₂ O	373	18,92%	12,24%	672,63	366	18,932%	12,26%	568,00
	O ₂	373	0,30%	0,35%	19,06	366	0,302%	0,35%	16,10
TOPLAM					5496,22	4633,31			
Baca Gazı(Sızıntı)	N ₂	373	77,37%	74,75%	18470,33	366	77,37%	74,75%	24772,29
	O ₂	373	21,67%	23,93%	5912,25	366	21,67%	23,93%	7929,48
	CO ₂	373	0,03%	0,05%	11,25	366	0,03%	0,05%	15,09
	Ar	373	0,92%	1,27%	313,76	366	0,92%	1,27%	420,81
	H ₂ O	373	0,01%	0,01%	1,53	366	0,01%	0,01%	2,06
TOPLAM					24709,12	33139,73			
GENEL TOPLAM					42395,97	52460,54			

7.2. Enerji Analizi

Tüm enerji analizi hesaplamalarında primer, sekonder, ve baca gazları mükemmel gaz ve çevre sıcaklığı 30 °C olarak kabul edilmiştir

Genel enerji dengesi, aşağıdaki eşitlik ile ifade edilir [30]:

$$\sum \dot{E}_{giren} = \sum \dot{E}_{çıkan} \quad (7.3)$$

Giren ve çıkan maddeler için enerji eşitlikleri sırasıyla Eşitlik 7.4 ve 7.5 ile ifade edilir:

$$\dot{E}_{giren} = \dot{E}_{ph(\check{c}k)} + \dot{E}_{ph(\check{c}s)} + \dot{E}_{ph(d)} + \dot{E}_{ch(d)} + \dot{E}_{ph(yh)} + \dot{E}_{ph(sh)} \quad (7.4)$$

$$\dot{E}_{\check{c}ikan} = \dot{E}_{ph(mk)} + \dot{E}_{ph(mn)} + \dot{E}_{ph(bb)} + \dot{E}_{ph(bs)} + \dot{E}_{ph(bg)} \quad (7.5)$$

Eşitlik 7.4 ve 7.5’de kullanılan fiziksel enerji \dot{E}_{ph} aşağıdaki gibi tanımlanır [30]:

$$\dot{E}_{ph} = \dot{m}cT \quad (7.6)$$

Eşitlik 7.6’da her bir elementin özgül ısı c değeri sıcaklığın fonksiyonu olarak Eşitlik 7.7’den hesaplanır [30].

$$c/R_x = a + bT + cT^2 + dT^{-2} \quad (7.7)$$

Eşitlik 7.7’de kullanılan sabitler Çizelge 7.9’da verilmiştir.

Çizelge 7.9. Bazı elementlerin özgül ısı hesabında kullanılan sabitleri

Element	R	T _{max}	A	10 ³ B	10 ⁶ C	10 ⁻⁵ D
CaO	0,148	1500	6,104	0,443	0,000	-1,047
Fe ₂ O ₃	0,052	1500	11,812	9,697	0,000	-1,976
SiO ₂	0,138	1500	4,871	5,365	0,000	-1,001
CH ₄	0,518	1500	1,702	9,081	-2,164	0,000
C ₂ H ₆	0,276	1500	1,131	19,225	-5,561	0,000
C ₃ H ₈	0,188	1500	1,213	28,785	-8,824	0,000
C ₄ H ₁₀	0,143	1500	1,935	36,915	-11,402	0,000
C ₅ H ₁₂	0,115	1500	2,464	45,351	-14,111	0,000
CO ₂	0,189	1500	5,457	1,045	0,000	-1,157
N ₂	0,297	1500	3,280	0,593	0,000	0,040
O ₂	0,260	1500	3,639	0,506	0,000	-0,227
H ₂ O(GAZ)	0,462	1500	3,470	1,450	0,000	0,121
H ₂ O(SIVI)	0,462	1500	8,712	1,250	-0,180	0,000
CO	0,297	1500	3,376	0,557	0,000	-0,031
SO ₂	0,130	1500	5,699	0,801	0,000	-1,012
NO ₂	0,181	1500	4,982	1,195	0,000	0,792
NO	0,277	1500	3,387	0,629	0,000	0,014

Eşitlik 7.4’de kullanılan kimyasal enerji \dot{E}_{ch} aşağıdaki gibi tanımlanır [30]:

$$\dot{E}_{ch} = \dot{m}LHV \quad (7.8)$$

Giren ve çıkan maddeler için toplam enerji, fiziksel ve kimyasal enerjilerin toplamına eşittir ve aşağıdaki gibi tanımlanır [30]:

$$\dot{Q}_h = \dot{E}_{ph} + \dot{E}_{ch} \quad (7.9)$$

Giren ve çıkan tüm maddelerin enerji hesaplamaları Çizelge 7.10. ve Çizelge 7.11.’de verilmiştir.

Çizelge 7.10. Atık ısıdan önce sisteme giren maddelerin enerji değerleri

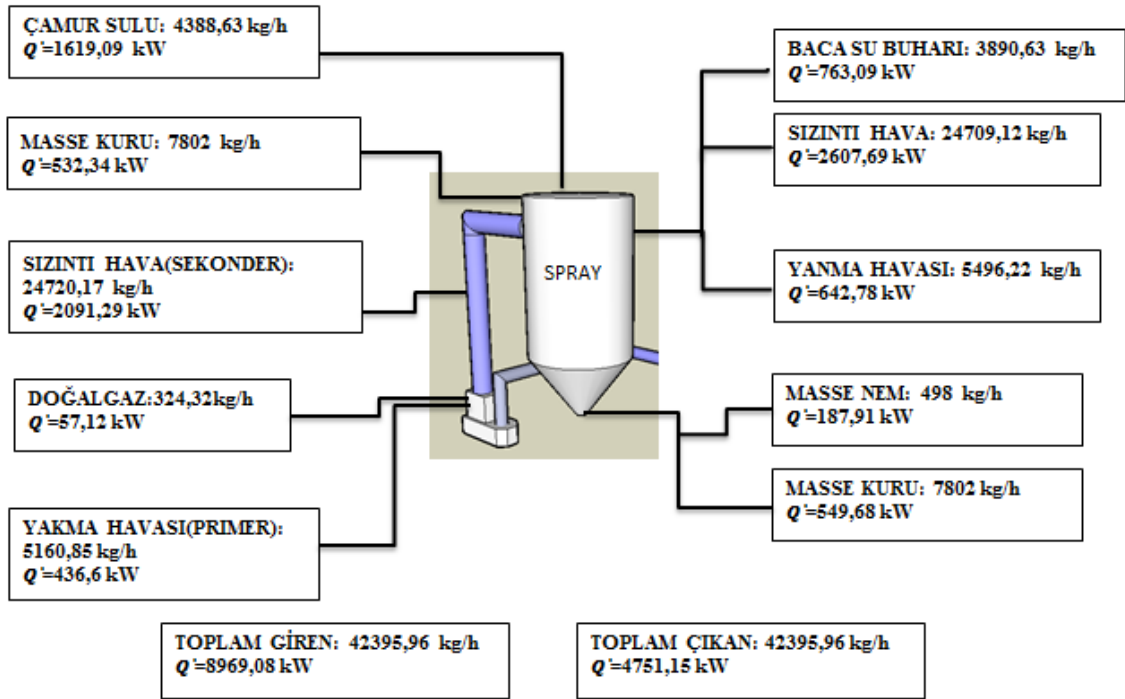
ÜRÜN	BİLEŞEN	c (kJ/kgK)	LHV (kJ/kg)	T (K)	ṁ (kg/h)	E _{ph} (kJ/h)	E _{ph} (kW)	E _{ch} (kJ/h)	E _{ch} (kW)
Çamur Kuru Madde	Na ₂ O	1,115		316,30	133,79	47162,05	13,10	0,00	0,00
	CaO	0,769		316,30	802,80	195270,00	54,24	0,00	0,00
	K ₂ O	0,890		316,30	145,03	40804,02	11,33	0,00	0,00
	MgO	0,950		316,30	74,09	22261,65	6,18	0,00	0,00
	Fe ₂ O ₃	0,671		316,30	117,19	24872,32	6,91	0,00	0,00
	TiO ₂	0,715		316,30	51,15	11567,81	3,21	0,00	0,00
	Al ₂ O ₃	0,780		316,30	1185,06	292370,37	81,21	0,00	0,00
	SO ₃	0,633		316,30	85,23	17062,72	4,74	0,00	0,00
SiO ₂	0,768		316,30	5207,66	1265036,28	351,40	0,00	0,00	
GENEL TOPLAM(Masse)					7802,00	1916407,22	532,34	0,00	0,00
Çamur sulu madde (H ₂ O)	H ₂ O	4,199		316,30	4388,63	5828724,65	1619,09	0,00	0,00
Yanıcı gaz(Doğalgaz)	CH ₄	2,204	50050	303,00	273,86	182886,67	50,80	13706668,82	3807,41
	C ₂ H ₆	1,779	47520	303,00	19,72	10627,18	2,95	936862,27	260,24
	C ₃ H ₈	1,715	46340	303,00	7,37	3830,94	1,06	341628,88	94,90
	C ₄ H ₁₀	1,727	45370	303,00	4,10	2147,09	0,60	186158,87	51,71
	C ₅ H ₁₂	1,715	44910	303,00	1,47	766,19	0,21	66217,32	18,39
	N ₂	1,040		303,00	13,87	4369,37	1,21	0,00	0,00
	CO ₂	0,853		303,00	3,93	1016,22	0,28	0,00	0,00
GENEL TOPLAM(Doğalgaz)					324,32	205643,66	57,12	15237536,15	4232,65
Yakma havası	N ₂	1,040		303,00	3857,79	1215665,97	337,68	0,00	0,00
	O ₂	0,922		303,00	1234,86	344976,97	95,83	0,00	0,00
	CO ₂	0,853		303,00	2,35	607,54	0,17	0,00	0,00
	Ar	0,520		303,00	65,53	10325,27	2,87	0,00	0,00
	H ₂ O	1,867		303,00	0,32	181,33	0,05	0,00	0,00
GENEL TOPLAM(Yakma Havası)					5160,85	1571757,08	436,60	0,00	0,00
Sızıntı hava	N ₂	1,040		303,00	18478,58	5822970,65	1617,49	0,00	0,00
	O ₂	0,922		303,00	5914,89	1652420,01	459,01	0,00	0,00
	CO ₂	0,853		303,00	11,26	2910,07	0,81	0,00	0,00
	Ar	0,520		303,00	313,90	49457,46	13,74	0,00	0,00
	H ₂ O	1,867		303,00	1,54	868,56	0,24	0,00	0,00
GENEL TOPLAM(Sızıntı Havası)					24720,17	7528626,75	2091,29	0,00	0,00
TOPLAM					42395,96	17051159,35	4736,43	15237536,15	4232,65
GENEL TOPLAM (kW)						8969,08			

Sistemden çıkan maddelerde kimyasal reaksiyon olmadığı için kimyasal enerji değerleri hepsinde sıfırdır.

Çizelge 7.11. Atık ısıdan önce sistemden çıkan maddelerin enerji değerleri

ÜRÜN	BİLEŞEN	c (kJ/kgK)	T(K)	ṁ (kg/h)	E _{ph} (kJ/h)	E _{ph} (kJ/h)
Masse Kuru Madde	Na ₂ O	1,115	323,20	133,79	48190,88	13,39
	CaO	0,776	323,20	802,80	201346,02	55,93
	K ₂ O	0,890	323,20	145,03	41694,15	11,58
	MgO	0,950	323,20	74,09	22747,28	6,32
	Fe ₂ O ₃	0,679	323,20	117,19	25717,91	7,14
	TiO ₂	0,715	323,20	51,15	11820,16	3,28
	Al ₂ O ₃	0,780	323,20	1185,06	298748,36	82,99
	SO ₃	0,633	323,20	85,23	17434,94	4,84
	SiO ₂	0,779	323,20	5207,66	1311146,98	364,21
GENEL TOPLAM(Masse)				7802,00	1978846,68	549,68
Masse Nemi (H ₂ O)	H ₂ O	4,203	323,20	498,00	676487,98	187,91
Baca gazı(Çamur Su Buharı)	H ₂ O	1,893	373,00	3890,63	2747127,52	763,09
Baca gazı(Yanma havası)	CO ₂	0,948	373,00	856,30	302790,70	84,11
	CO	1,058	373,00	1,63	643,65	0,18
	SO ₂	0,685	373,00	7,47	1908,62	0,53
	NO ₂	1,085	373,00	1,94	785,13	0,22
	N ₂	1,048	373,00	3871,65	1513444,71	420,40
	Ar	0,520	373,00	65,53	12710,65	3,53
	H ₂ O	1,893	373,00	672,63	474936,64	131,93
	O ₂	0,953	373,00	19,06	6775,96	1,88
GENEL TOPLAM (Yanma Havası)				5496,22	2313996,06	642,78
Baca gazı(Sızıntı hava)	N ₂	1,048	373,00	18470,33	7220125,25	2005,59
	O ₂	0,953	373,00	5912,25	2101622,02	583,78
	CO ₂	0,948	373,00	11,25	3979,56	1,11
	Ar	0,520	373,00	313,76	60856,08	16,90
	H ₂ O	1,893	373,00	1,53	1083,62	0,30
GENEL TOPLAM(Sızıntı Havası)				24709,12	9387666,54	2607,69
TOPLAM				42395,97	17104124,77	4751,15
GENEL TOPLAM (kW)					4751,15	

Çizelge 7.10 ve Çizelge 7.11’de hesaplanan değerler, şematik olarak Şekil 7.2’de verilmiştir.



Şekil 7.2. Atık ısı kullanımından önce sisteme giren-çıkan kütle ve enerji miktarları

Genel olarak sistem ortamdan aldığı 30 °C'deki havayı 600 °C'ye çıkarmaktadır. Atık ısı ile ortamdan aldığı hava yerine yaklaşık 168 °C' deki atık havayı ısıtmaya çalışmaktadır. Böylelikle sistem daha az doğalgaz tüketerek enerji tasarrufu sağlamaktadır. Atık ısının debisi yüksek olduğu için birim zamanda daha fazla çamur kurutulmuş ve kapasitede artmıştır. Çizelge 7.12. ve Çizelge 7.13.' de atık ısı kullanımından sonraki giren ve çıkan tüm maddelerin enerji hesaplamaları verilmiştir.

Çizelge 7.12. Atık ısıdan sonra sisteme giren maddelerin enerji değerleri

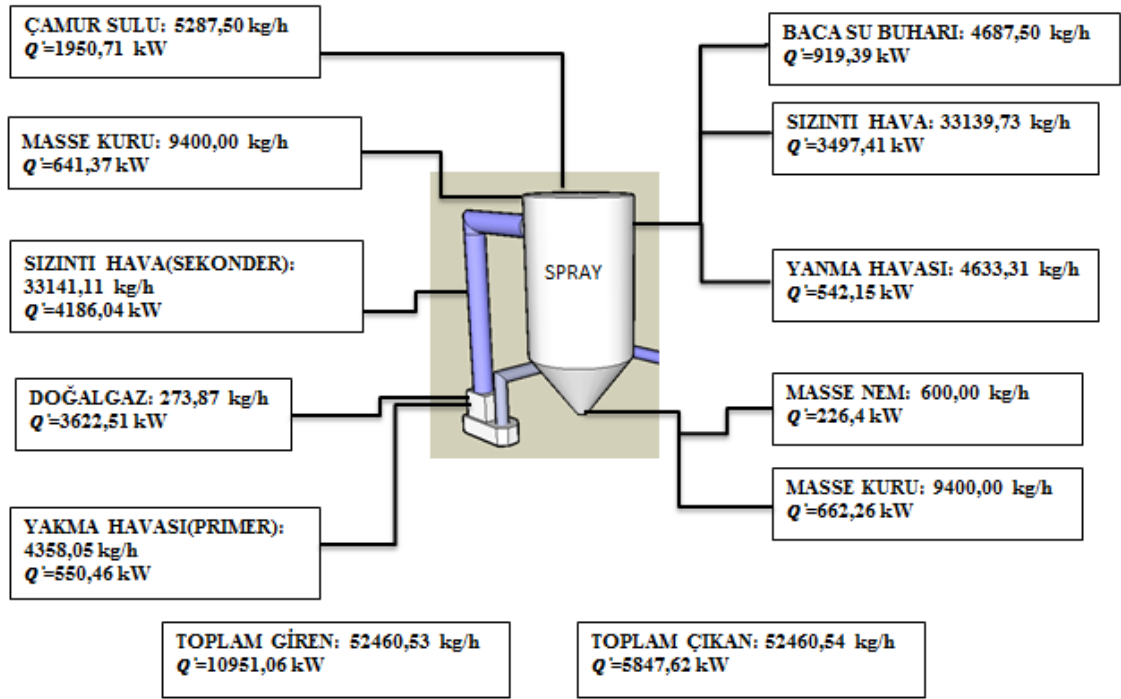
ÜRÜN	BİLEŞEN	c (kJ/kgK)	LHV (kJ/kg)	T(K)	ṁ (kg/h)	Ė _{ph} (kJ/h)	E _{ph} (kW)	Ė _{ch} (kJ/h)	E _{ch} (kW)
Çamur Kuru Madde	Na ₂ O	1,115		316,30	161,19	56821,75	15,78	0,00	0,00
	CaO	0,769		316,30	967,23	235265,06	65,35	0,00	0,00
	K ₂ O	0,890		316,30	174,73	49161,47	13,66	0,00	0,00
	MgO	0,950		316,30	89,26	26821,27	7,45	0,00	0,00
	Fe ₂ O ₃	0,671		316,30	141,19	29966,65	8,32	0,00	0,00
	TiO ₂	0,715		316,30	61,63	13937,12	3,87	0,00	0,00
	Al ₂ O ₃	0,780		316,30	1427,78	352253,46	97,85	0,00	0,00
	SO ₃	0,633		316,30	102,69	20557,50	5,71	0,00	0,00
SiO ₂	0,768		316,30	6274,29	1524140,09	423,37	0,00	0,00	
GENEL TOPLAM(Masse)					9400,00	2308924,36	641,37	0,00	0,00
Çamur sulu madde (H ₂ O)	H ₂ O	4,199		316,30	5287,50	7022559,81	1950,71	0,00	0,00
Yanıcı gaz(Doğalgaz)	CH ₄	2,204	50050	303,00	231,26	154437,63	42,90	11574520,34	3215,14
	C ₂ H ₆	1,779	47520	303,00	16,65	8974,06	2,49	791128,14	219,76
	C ₃ H ₈	1,715	46340	303,00	6,23	3235,02	0,90	288486,61	80,14
	C ₄ H ₁₀	1,727	45370	303,00	3,46	1813,10	0,50	157200,82	43,67
	C ₅ H ₁₂	1,715	44910	303,00	1,25	647,00	0,18	55916,85	15,53
	N ₂	1,040		303,00	11,71	3689,69	1,02	0,00	0,00
	CO ₂	0,853		303,00	3,32	858,14	0,24	0,00	0,00
GENEL TOPLAM(Doğalgaz)					273,87	173654,64	48,24	12867252,74	3574,24
Yakma havası	N ₂	1,058		441,00	3257,69	1519965,16	422,21	0,00	0,00
	O ₂	0,974		441,00	1042,77	447904,25	124,42	0,00	0,00
	CO ₂	1,006		441,00	1,98	880,62	0,24	0,00	0,00
	Ar	0,520		441,00	55,34	12690,20	3,53	0,00	0,00
	H ₂ O	1,927		441,00	0,27	230,02	0,06	0,00	0,00
GENEL TOPLAM(Yakma Havası)					4358,05	1981670,26	550,46	0,00	0,00
Sızıntı hava	N ₂	1,058		441,00	24773,32	11558688,39	3210,75	0,00	0,00
	O ₂	0,974		441,00	7929,81	3406121,27	946,14	0,00	0,00
	CO ₂	1,006		441,00	15,09	6696,75	1,86	0,00	0,00
	Ar	0,520		441,00	420,82	96503,58	26,81	0,00	0,00
	H ₂ O	1,927		441,00	2,06	1749,23	0,49	0,00	0,00
GENEL TOPLAM(Sızıntı Havası)					33141,11	15069759,22	4186,04	0,00	0,00
TOPLAM					52460,53	26556568,29	7376,82	12867252,74	3574,24
GENEL TOPLAM (kW)						10951,06			

Atık ısı kullanımından sonra sistemden çıkan maddelerde kimyasal reaksiyon olmadığı için kimyasal enerji değerleri hepsinde sıfırdır.

Çizelge 7.13. Atık ısıdan sonra sistemden çıkan maddelerin enerji değerleri

ÜRÜN	BİLEŞEN	c (kJ/kgK)	T(K)	ṁ (kg/h)	E _{ph} (kJ/h)	Ė _{ph} (kW)
Masse Kuru Madde	Na ₂ O	1,115	323,20	161,19	58061,30	16,13
	CaO	0,776	323,20	967,23	242585,57	67,38
	K ₂ O	0,890	323,20	174,73	50233,92	13,95
	MgO	0,950	323,20	89,26	27406,36	7,61
	Fe ₂ O	0,679	323,20	141,19	30985,44	8,61
	TiO ₂	0,715	323,20	61,63	14241,15	3,96
	Al ₂ O ₃	0,780	323,20	1427,78	359937,78	99,98
	SO ₃	0,633	323,20	102,69	21005,95	5,83
	SiO ₂	0,779	323,20	6274,29	1579695,15	438,80
GENEL TOPLAM(Masse)				9400,00	2384152,62	662,26
Masse Nemi (H ₂ O)	H ₂ O	4,203	323,20	600,00	815045,76	226,40
Baca gazı(Çamur Su Buharı)	H ₂ O	1,893	373,00	4687,50	3309792,19	919,39
Baca gazı(Yanma havası)	CO ₂	0,948	373,00	723,10	255689,92	71,02
	CO	1,058	373,00	0,34	132,64	0,04
	SO ₂	0,685	373,00	0,09	21,79	0,01
	NO	1,006	373,00	0,38	142,59	0,04
	NO ₂	1,085	373,00	0,58	235,82	0,07
	N ₂	1,048	373,00	3269,40	1278019,98	355,01
	Ar	0,520	373,00	55,34	10733,44	2,98
	H ₂ O	1,893	373,00	568,00	401058,55	111,41
	O ₂	0,953	373,00	16,10	5721,92	1,59
GENEL TOPLAM (Yanma Havası)				4633,31	1951756,65	542,15
Baca gazı(Sızıntı hava)	N ₂	1,048	373,00	24772,29	9683588,56	2689,89
	O ₂	0,953	373,00	7929,48	2818682,82	782,97
	CO ₂	0,948	373,00	15,09	5337,36	1,48
	Ar	0,520	373,00	420,81	81619,81	22,67
	H ₂ O	1,893	373,00	2,06	1453,34	0,40
GENEL TOPLAM(Sızıntı Havası)				33139,73	12590681,89	3497,41
TOPLAM				52460,54	21051429,11	5847,62
GENEL TOPLAM (kW)					5847,62	

Çizelge 7.12 ve 7.13’da hesaplanan değerler, şematik olarak Şekil 7.3’de verilmiştir.



Şekil 7.3. Atık ısı kullanımından sonra sisteme giren-çıkan kütle ve enerji miktarları

Enerji verimi, sistemden çıkan enerji miktarının sisteme giren enerji miktarına oranı olarak ifade edilir [30];

$$\eta_1 = \frac{\sum \dot{Q}_{\text{çıkan}}}{\dot{Q}_{\text{giren}}} \quad (7.10)$$

Atık ısı kullanımından önce ve sonraki enerji verim değerleri sırasıyla %52,97 ve %53,4 olarak hesaplanmıştır.

Atık ısı kullanımından önceki sistemin kg başına harcadığı doğalgaz miktarı 0,0415 kg veya 0,0591 m³ iken atık ısı kullanımından sonraki sistemin kg başına harcadığı doğalgaz miktarı 0,02913 kg veya 0,04144 m³ olarak hesaplanmıştır.

Sonuç olarak, atık ısı geri kazanımı sistemde %0,43' lik bir verimlilik artışı sağlanmış ayrıca doğalgaz tüketiminde %30'luk bir tasarruf meydana gelmiştir.

7.3. Ekserji Analizi

Isıl sistemlerde harcanan enerji değil, enerjinin iş yapabilme yeteneği olarak tanımlanan kalitesidir. Enerjinin iş yapabilme yeteneğinin ölçüsü de ekserji olarak tanımlanır.

Genel ekserji dengesi aşağıdaki eşitlik ile ifade edilir [30]:

$$\sum \dot{E}_{X_{giren}} = \sum \dot{E}_{X_{çıkan}} + \sum \dot{E}_{X_{yıkım}} \quad (7.11)$$

Bir sistemin toplam ekserjisi [30]:

$$E_X = E_X^{PH} + E_X^{KE} + E_X^{PE} + E_X^{CH} \quad (7.12)$$

Şekil 7.1'e bağlı olarak fiziksel ve kimyasal ekserji eşitlikleri aşağıda tanımlanmıştır:

Sistemde potansiyel ekserji ve kinetik ekserji ihmal edilmiştir. Çamur kuru ve çamur sulu maddelerin farklı basınçta ki fiziksel ekserji [31];

$$\dot{E}_{X^{PE}}_{(çk,çs)} = \left\{ \dot{m}(c(T - T_0)) - \dot{m}T_0 \left(\ln \left(\frac{T}{T_0} \right) \right) \right\} + \dot{m}V(P - P_0) \quad (7.13)$$

Doğalgaz, yakma havası, sızıntı hava, masse kuru madde, masse nemi, baca gazı buharı, baca gazı ve baca gazı sızıntı hava için fiziksel ekserji [32];

$$\dot{E}_{X^{PE}}_{(d,yh,sh,mk,mn,bb,bs,bg)} = \left\{ \dot{m}(c(T - T_0)) - \dot{m}T_0 \left(\ln \left(\frac{T}{T_0} \right) \right) \right\} \quad (7.14)$$

ile hesaplanır. Burada ortam sıcaklığı (T_0) ile giren madde sıcaklığı (T) aynı olduğu için $\dot{E}_{X^{PE}}_{(d,yh,sh)}$ değeri sıfır çıkmaktadır.

Çamur kuru maddeler ve masse kuru maddeler için kimyasal ekserji denklemi aşağıdaki gibidir [30].

$$\begin{aligned} \dot{E}X_{(çk,mk)}^{CH} = & \left[\dot{m}_{(Na_2O)} \left(\frac{\varepsilon_{\chi_k, (Na_2O)}^0}{M_{(Na_2O)}} \right) \right] + \left[\dot{m}_{(CaO)} \left(\frac{\varepsilon_{\chi_k, (CaO)}^0}{M_{(CaO)}} \right) \right] + \left[\dot{m}_{(K_2O)} \left(\frac{\varepsilon_{\chi_k, (K_2O)}^0}{M_{(K_2O)}} \right) \right] + \\ & \left[\dot{m}_{(MgO)} \left(\frac{\varepsilon_{\chi_k, (MgO)}^0}{M_{(MgO)}} \right) \right] + \left[\dot{m}_{(Fe_2O_3)} \left(\frac{\varepsilon_{\chi_k, (Fe_2O_3)}^0}{M_{(Fe_2O_3)}} \right) \right] + \left[\dot{m}_{(TiO_2)} \left(\frac{\varepsilon_{\chi_k, (TiO_2)}^0}{M_{(TiO_2)}} \right) \right] + \\ & \left[\dot{m}_{(Al_2O_3)} \left(\frac{\varepsilon_{\chi_k, (Al_2O_3)}^0}{M_{(Al_2O_3)}} \right) \right] + \left[\dot{m}_{(SO_3)} \left(\frac{\varepsilon_{\chi_k, (SO_3)}^0}{M_{(SO_3)}} \right) \right] + \left[\dot{m}_{(SiO_2)} \left(\frac{\varepsilon_{\chi_k, (SiO_2)}^0}{M_{(SiO_2)}} \right) \right] \end{aligned} \quad (7.15)$$

Çamur suyu, masse nemi ve baca gazı buharı için kimyasal ekserji denklemleri aşağıdaki gibidir [30].

$$\dot{E}X_{(çs,mn,bs)}^{CH} = \left[\dot{m}_{(H_2O)} \left(\frac{\varepsilon_{\chi_k, (H_2O)}^0}{M_{(H_2O)}} \right) \right] \quad (7.16)$$

Doğalgaz için kimyasal ekserji denklemleri aşağıda gösterilmiştir [30]:

$$\begin{aligned} \dot{E}X_{(d)}^{CH} = & \left[\dot{m}_{(CH_4)} \left(\frac{\varepsilon_{\chi_k, (CH_4)}^0}{M_{(CH_4)}} \right) \right] + \left[\dot{m}_{(C_2H_6)} \left(\frac{\varepsilon_{\chi_k, (C_2H_6)}^0}{M_{(C_2H_6)}} \right) \right] + \left[\dot{m}_{(C_3H_8)} \left(\frac{\varepsilon_{\chi_k, (C_3H_8)}^0}{M_{(C_3H_8)}} \right) \right] + \\ & \left[\dot{m}_{(C_4H_{10})} \left(\frac{\varepsilon_{\chi_k, (C_4H_{10})}^0}{M_{(C_4H_{10})}} \right) \right] + \left[\dot{m}_{(C_5H_{12})} \left(\frac{\varepsilon_{\chi_k, (C_5H_{12})}^0}{M_{(C_5H_{12})}} \right) \right] + \left[\dot{m}_{(N_2)} \left(\frac{\varepsilon_{\chi_k, (N_2)}^0}{M_{(N_2)}} \right) \right] + \\ & \left[\dot{m}_{(CO_2)} \left(\frac{\varepsilon_{\chi_k, (CO_2)}^0}{M_{(CO_2)}} \right) \right] \end{aligned} \quad (7.17)$$

N adet gaz karışımının molar kimyasal ekserjisini ise aşağıdaki denklemlerle açıklayabiliriz [33]:

$$\varepsilon_{\chi_k}^{-ch} = \sum_{k=1}^N \chi_k \varepsilon_{\chi_k}^0 + \bar{R}T_0 \sum_{k=1}^N \chi_k \ln \chi_k \quad (7.18)$$

Buna bağlı olarak yakma havası, sızıntı hava ve baca sızıntı havası için kimyasal ekserji denklemleri aşağıdaki gibidir [33]:

$$\begin{aligned} \dot{E}X_{(yh,sh,bs)}^{CH} = & \left[\dot{m}_{(CO_2)} \left(\frac{\varepsilon_{\chi_k}^{-ch}}{M_{(CO_2)}} \right) \right] + \left[\dot{m}_{(N_2)} \left(\frac{\varepsilon_{\chi_k}^{-ch}}{M_{(N_2)}} \right) \right] + \left[\dot{m}_{(H_2O)} \left(\frac{\varepsilon_{\chi_k}^{-ch}}{M_{(H_2O)}} \right) \right] + \\ & \left[\dot{m}_{(H_2O)} \left(\frac{\varepsilon_{\chi_k}^{-ch}}{M_{(H_2O)}} \right) \right] + \left[\dot{m}_{(Ar)} \left(\frac{\varepsilon_{\chi_k}^{-ch}}{M_{(Ar)}} \right) \right] + \left[\dot{m}_{(O_2)} \left(\frac{\varepsilon_{\chi_k}^{-ch}}{M_{(O_2)}} \right) \right] \end{aligned} \quad (7.19)$$

$$\begin{aligned}
\dot{E}X^{CH}(\text{bg,atık ısıdan önce}) = & \left[\dot{m}_{(CO_2)} \left(\frac{\varepsilon_{\chi_k}^{-ch}}{M_{(CO_2)}} \right) \right] + \left[\dot{m}_{(CO)} \left(\frac{\varepsilon_{\chi_k}^{-ch}}{M_{(CO)}} \right) \right] + \left[\dot{m}_{(SO_2)} \left(\frac{\varepsilon_{\chi_k}^{-ch}}{M_{(SO_2)}} \right) \right] + \\
& \left[\dot{m}_{(NO_2)} \left(\frac{\varepsilon_{\chi_k}^{-ch}}{M_{(NO_2)}} \right) \right] + \left[\dot{m}_{(N_2)} \left(\frac{\varepsilon_{\chi_k}^{-ch}}{M_{(N_2)}} \right) \right] + \left[\dot{m}_{(H_2O)} \left(\frac{\varepsilon_{\chi_k}^{-ch}}{M_{(H_2O)}} \right) \right] + \left[\dot{m}_{(Ar)} \left(\frac{\varepsilon_{\chi_k}^{-ch}}{M_{(Ar)}} \right) \right] + \\
& \left[\dot{m}_{(O_2)} \left(\frac{\varepsilon_{\chi_k}^{-ch}}{M_{(O_2)}} \right) \right] \tag{7.20}
\end{aligned}$$

Püskürtmeli kurutucu, sürekli akış halinde kapalı bir sistem olarak değerlendirilmiştir. Ayrıca $T_0=303$ K, $P_0=1$ bar olarak alınmıştır.

Sisteme giren ve çıkan maddelerin ekserji hesaplamaları Çizelge 7.14 ve Çizelge 7.15' da verilmiştir.

Çizelge 7.14. Atık ısıdan önce sisteme giren maddelerin ekserji değerleri

ÜRÜN	BİLEŞEN	c (kJ/kgK)	% Mol Oranı	ϵ_0^0 (kJ/mol) (Standart)	T ₀ (K)	T (K)	ΔT	$\ln(T/T_0)$	m (kg/h)	M (kg/mol)	Vm (m ³ /kg)	P ₀ (bar)	P (bar)	ΔP	E_X^{PE} (kJ/h)	E_X^{FE} (kW)	ϵ_x^{ch} (kJ/mol) (Gaz karışımı)	E_X^H (kJ/h)	E_X^H (kW)	Toplam Ekserji (kW)
Çamur Kuru Madde	Na ₂ O	1,115	-	296,20	303,00	316,30	13,30	0,043	133,79	0,062	0,00044	1,00	20,00	19,00	43,41	0,01		639372,40	177,60	177,62
	CaO	0,769	-	127,30	303,00	316,30	13,30	0,043	802,80	0,056	0,00030	1,00	20,00	19,00	179,68	0,05		1822344,10	506,21	506,26
	K ₂ O	0,890	-	413,10	303,00	316,30	13,30	0,043	145,03	0,094	0,00043	1,00	20,00	19,00	37,77	0,01		635987,10	176,66	176,67
	MgO	0,950	-	59,10	303,00	316,30	13,30	0,043	74,09	0,040	0,00028	1,00	20,00	19,00	20,36	0,01		108617,17	30,17	30,18
	Fe ₂ O ₃	0,671	-	12,40	303,00	316,30	13,30	0,043	117,19	0,160	0,00019	1,00	20,00	19,00	22,73	0,01		9099,83	2,53	2,53
	TiO ₂	0,715	-	21,70	303,00	316,30	13,30	0,043	51,15	0,080	0,00024	1,00	20,00	19,00	10,61	0,00		13891,81	3,86	3,86
	Al ₂ O ₃	0,780	-	15,00	303,00	316,30	13,30	0,043	1185,06	0,102	0,00025	1,00	20,00	19,00	267,80	0,07		174339,54	48,43	48,50
	SO ₃	0,633	-	249,10	303,00	316,30	13,30	0,043	85,23	0,080	0,00052	1,00	20,00	19,00	16,14	0,00		265191,87	73,66	73,67
SiO ₂	0,768	-	8,20	303,00	316,30	13,30	0,043	5207,66	0,060	0,00038	1,00	20,00	19,00	1171,96	0,33		710706,61	197,42	197,74	
GENEL TOPLAM(Masse)									7802,00						1770,45	0,49		4379550,42	1216,54	1217,03
Çamur sulu madde (H ₂ O)	H ₂ O	4,199	-	0,9	303,00	316,30	13,30	0,043	4388,63	0,018	0,001	1,00	20,00	19,00	5310,03	1,48		219431,25	60,95	62,43
Yanıcı gaz(Doğalgaz)	CH ₄	2,204	91,94%	831,2	303,00	303,00	0,00	0,000	273,86	0,016				0,00	0,00	0,00		14188842,78	3941,35	3941,35
	C ₂ H ₆	1,779	3,53%	1495	303,00	303,00	0,00	0,000	19,72	0,030				0,00	0,00	0,00		980179,55	272,27	272,27
	C ₃ H ₈	1,715	0,90%	2152,8	303,00	303,00	0,00	0,000	7,37	0,044				0,00	0,00	0,00		359298,30	99,81	99,81
	C ₄ H ₁₀	1,727	0,38%	2804,2	303,00	303,00	0,00	0,000	4,10	0,058				0,00	0,00	0,00		197954,87	54,99	54,99
	C ₅ H ₁₂	1,715	0,11%	3461,3	303,00	303,00	0,00	0,000	1,47	0,072				0,00	0,00	0,00		70733,15	19,65	19,65
	N ₂	1,040	2,66%	0,69	303,00	303,00	0,00	0,000	13,87	0,028				0,00	0,00	0,00		341,69	0,09	0,09
CO ₂	0,853	0,48%	19,48	303,00	303,00	0,00	0,000	3,93	0,044				0,00	0,00	0,00		1740,74	0,48	0,48	
GENEL TOPLAM(Doğalgaz)									324,32						0,00	0,00		15799091,08	4388,64	4388,64
Yakma havası	N ₂	1,040	77,37%	0,69	303,00	303,00	0,00	0,000	3857,79	0,028				0,00	0,00	0,00	0,0338	4654,22	1,29	1,29
	O ₂	0,922	21,67%	3,97	303,00	303,00	0,00	0,000	1234,86	0,032				0,00	0,00	0,00	0,0255	983,61	0,27	0,27
	CO ₂	0,853	0,03%	19,48	303,00	303,00	0,00	0,000	2,35	0,044				0,00	0,00	0,00	-0,0003	-0,02	0,00	0,00
	Ar	0,520	0,92%	11,69	303,00	303,00	0,00	0,000	65,53	0,040				0,00	0,00	0,00	-0,0011	-1,83	0,00	0,00
	H ₂ O	1,867	0,01%	9,5	303,00	303,00	0,00	0,000	0,32	0,018				0,00	0,00	0,00	-0,0014	-0,02	0,00	0,00
GENEL TOPLAM(Yakma Havası)									5160,85						0,00	0,00	0,0565	5635,96	1,57	1,57
Sızıntı hava	N ₂	1,040	77,37%	0,69	303,00	303,00	0,00	0,000	18478,58	0,028				0,00	0,00	0,00	0,0338	22293,44	6,19	6,19
	O ₂	0,922	21,67%	3,97	303,00	303,00	0,00	0,000	5914,89	0,032				0,00	0,00	0,00	0,0255	4711,41	1,31	1,31
	CO ₂	0,853	0,03%	19,48	303,00	303,00	0,00	0,000	11,26	0,044				0,00	0,00	0,00	-0,0003	-0,07	0,00	0,00
	Ar	0,520	0,92%	11,69	303,00	303,00	0,00	0,000	313,90	0,040				0,00	0,00	0,00	-0,0011	-8,74	0,00	0,00
	H ₂ O	1,867	0,01%	9,5	303,00	303,00	0,00	0,000	1,54	0,018				0,00	0,00	0,00	-0,0014	-0,12	0,00	0,00
GENEL TOPLAM(Sızıntı Havası)									24720,17						0,00	0,00		26995,92	7,50	7,50
GENEL TOPLAM									42395,96						7080,48	1,97		20430704,63	5675,20	5677,16
GENEL TOPLAM (kW)																	5677,16			

Çizelge 7.15. Atık ısıdan önce sistemden çıkan maddelerin ekserji değerleri

ÜRÜN	BİLEŞEN	c (kJ/kgK)	% Mol Oranı	ϵ_{Xk}^0 (kJ/mol) (Standart)	T ₀ (K)	T (K)	ΔT	ln (T/T ₀)	ṁ (kg/h)	M (kg/mol)	R _x (kJ/kgK)	\dot{E}_X^{PE} (kJ/h)	\dot{E}_X^{PE} (kW)	ϵ_{Xk}^{-ch} (kJ/mol) (Gaz karışımı)	\dot{E}_X^{GH} (kJ/h)	\dot{E}_X^{GH} (kW)	Toplam Ekserji (kW)
Masse Kuru Madde	Na ₂ O	1,115	-	296,20	303,00	323,20	20,20	0,065	133,79	0,062	0,134	96,15	0,03		639372,40	177,60	177,63
	CaO	0,776	-	127,30	303,00	323,20	20,20	0,065	802,80	0,056	0,148	401,71	0,11		1822344,10	506,21	506,32
	K ₂ O	0,890	-	413,10	303,00	323,20	20,20	0,065	145,03	0,094	0,088	83,19	0,02		635987,10	176,66	176,69
	MgO	0,950	-	59,10	303,00	323,20	20,20	0,065	74,09	0,040	0,206	45,38	0,01		108617,17	30,17	30,18
	Fe ₂ O ₃	0,679	-	12,40	303,00	323,20	20,20	0,065	117,19	0,160	0,052	51,31	0,01		9099,83	2,53	2,54
	TiO ₂	0,715	-	21,70	303,00	323,20	20,20	0,065	51,15	0,080	0,104	23,58	0,01		13891,81	3,86	3,87
	Al ₂ O ₃	0,780	-	15,00	303,00	323,20	20,20	0,065	1185,06	0,102	0,082	596,04	0,17		174339,54	48,43	48,59
	SO ₃	0,633	-	249,10	303,00	323,20	20,20	0,065	85,23	0,080	0,104	34,79	0,01		265191,87	73,66	73,67
SiO ₂	0,779	-	8,20	303,00	323,20	20,20	0,065	5207,66	0,060	0,138	2615,92	0,73		710706,61	197,42	198,15	
GENEL TOPLAM(Masse)									7802,00			3948,07	1,10		4379550,42	1216,54	1217,64
Masse Nemi (H ₂ O)	H ₂ O	4,203	-	0,9	303,00	323,20	20,20	0,065	498,00	0,018	0,462	1349,69	0,37		24900,00	6,92	7,29
Baca gazı(Çamur Su Buharı)	H ₂ O	1,893	-	9,5	303,00	373,00	70,00	0,208	3890,63	0,018	0,462	51722,44	14,37		2053385,42	570,38	584,75
Baca gazı (Yanma havası)	CO ₂	0,948	9,85%	19,48	303,00	373,00	70,00	0,208	856,30	0,044	0,189	5700,89	1,58	1,3437	26149,75	7,26	8,85
	CO	1,058	0,03%	274,71	303,00	373,00	70,00	0,208	1,63	0,028	0,297	12,12	0,00	0,0763	4,44	0,00	0,00
	SO ₂	0,685	0,06%	313,4	303,00	373,00	70,00	0,208	7,47	0,064	0,130	35,94	0,01	0,1768	20,64	0,01	0,02
	NO ₂	1,085	0,02%	55,6	303,00	373,00	70,00	0,208	1,94	0,046	0,181	14,78	0,00	0,0068	0,29	0,00	0,00
	N ₂	1,048	69,99%	0,69	303,00	373,00	70,00	0,208	3871,65	0,028	0,297	28494,87	7,92	-0,1462	-20214,38	-5,62	2,30
	Ar	0,520	0,83%	11,69	303,00	373,00	70,00	0,208	65,53	0,040	0,208	239,31	0,07	-0,0032	-5,17	0,00	0,07
	H ₂ O	1,893	18,92%	9,5	303,00	373,00	70,00	0,208	672,63	0,018	0,462	8942,02	2,48	1,0038	37512,14	10,42	12,90
O ₂	0,953	0,30%	3,97	303,00	373,00	70,00	0,208	19,06	1,018	0,008	127,58	0,04	-0,0320	-0,60	0,00	0,04	
GENEL TOPLAM (Yakma Havası)									5496,22			43567,51	12,10	2,4261	43467,11	12,07	24,18
Baca gazı (Sızıntı hava)	N ₂	1,048	77,37%	0,69	303,00	373,00	70,00	0,208	18470,33	0,028	0,297	135939,26	37,76	0,0338	455161,66	126,43	164,19
	O ₂	0,953	21,67%	3,97	303,00	373,00	70,00	0,208	5912,25	0,032	0,260	39568,97	10,99	0,0255	733488,67	203,75	214,74
	CO ₂	0,948	0,03%	19,48	303,00	373,00	70,00	0,208	11,25	0,044	0,189	74,93	0,02	-0,0003	4982,58	1,38	1,40
	Ar	0,520	0,92%	11,69	303,00	373,00	70,00	0,208	313,76	0,040	0,208	1145,79	0,32	-0,0011	91695,14	25,47	25,79
H ₂ O	1,893	0,01%	9,5	303,00	373,00	70,00	0,208	1,53	0,018	0,462	20,40	0,01	-0,0014	809,97	0,22	0,23	
GENEL TOPLAM(Sızıntı Hava)									24709,12			176749,35	49,10	3,4545	1286138,02	357,26	406,36
GENEL TOPLAM									42395,97			277337,05	77,04		7787440,97	2163,18	2240,22
GENEL TOPLAM (kW)												2240,22					

Atık ısı kullanımından önce uygulanan fiziksel ve kimyasal ekserji denklemleri aynı şekilde atık ısı kullanımından sonrada uygulanmıştır. Atık ısıdan sonra yanma sonucu oluşan baca gazına NO eklenmiş ve aşağıdaki formülde gösterilmiştir [33]:

$$\begin{aligned} \dot{E}X^{CH}_{(bg,atık\ ısıdan\ sonra)} = & \left[\dot{m}_{(CO_2)} \left(\frac{\varepsilon_{Xk}^{-ch}}{M_{(CO_2)}} \right) \right] + \left[\dot{m}_{(CO)} \left(\frac{\varepsilon_{Xk}^{-ch}}{M_{(CO)}} \right) \right] + \left[\dot{m}_{(SO_2)} \left(\frac{\varepsilon_{Xk}^{-ch}}{M_{(SO_2)}} \right) \right] + \\ & \left[\dot{m}_{(NO_2)} \left(\frac{\varepsilon_{Xk}^{-ch}}{M_{(NO_2)}} \right) \right] + \left[\dot{m}_{(NO)} \left(\frac{\varepsilon_{Xk}^{-ch}}{M_{(NO_2)}} \right) \right] + \left[\dot{m}_{(N_2)} \left(\frac{\varepsilon_{Xk}^{-ch}}{M_{(N_2)}} \right) \right] + \left[\dot{m}_{(H_2O)} \left(\frac{\varepsilon_{Xk}^{-ch}}{M_{(H_2O)}} \right) \right] + \\ & \left[\dot{m}_{(Ar)} \left(\frac{\varepsilon_{Xk}^{-ch}}{M_{(Ar)}} \right) \right] + \left[\dot{m}_{(O_2)} \left(\frac{\varepsilon_{Xk}^{-ch}}{M_{(O_2)}} \right) \right] \end{aligned} \quad (7.21)$$

Sisteme giren ve çıkan maddelerin fiziksel ve kimyasal ekserjileri Çizelge 7.16 ve Çizelge 7.17' de verilmiştir.

Çizelge 7.17. Atık ısıdan sonra sistemden çıkan maddelerin ekserji değerleri

ÜRÜN	BİLEŞEN	c (kJ/kgK)	% Mol Oranı	ϵ_{k}^0 (kJ/mol) (Standart)	T ₀ (K)	T (K)	ΔT	ln (T/T ₀)	m (kg/h)	M (kg/mol)	E_X^{PE} (kJ/h)	E_X^{PE} (kW)	ϵ_{k}^{-ch} (kJ/mol) (Gaz karşımı)	E_X^{CH} (kJ/h)	E_X^{CH} (kW)	Toplam Ekserji (kW)
Masse Kuru Madde	Na ₂ O	1,115	-	296,20	303,00	323,20	20,20	0,065	161,19	0,062	115,84	0,03		770328,19	213,98	214,01
	CaO	0,776	-	127,30	303,00	323,20	20,20	0,065	967,23	0,056	483,99	0,13		2195595,30	609,89	610,02
	K ₂ O	0,890	-	413,10	303,00	323,20	20,20	0,065	174,73	0,094	100,22	0,03		766249,52	212,85	212,87
	MgO	0,950	-	59,10	303,00	323,20	20,20	0,065	89,26	0,040	54,68	0,02		130864,06	36,35	36,37
	Fe ₂ O	0,679	-	12,40	303,00	323,20	20,20	0,065	141,19	0,160	61,82	0,02		10963,65	3,05	3,06
	TiO ₂	0,715	-	21,70	303,00	323,20	20,20	0,065	61,63	0,080	28,41	0,01		16737,12	4,65	4,66
	Al ₂ O ₃	0,780	-	15,00	303,00	323,20	20,20	0,065	1427,78	0,102	718,12	0,20		210047,64	58,35	58,55
	SO ₃	0,633	-	249,10	303,00	323,20	20,20	0,065	102,69	0,080	41,91	0,01		319508,28	88,75	88,76
SiO ₂	0,779	-	8,20	303,00	323,20	20,20	0,065	6274,29	0,060	3151,71	0,88		856273,02	237,85	238,73	
GENEL TOPLAM(Masse)									9400,00		4756,71	1,32		5276566,78	1465,71	1467,03
Masse Nemi (H ₂ O)	H ₂ O	4,203	-	0,9	303,00	323,20	20,20	0,065	600,00	0,018	1626,13	0,45		30000,00	8,33	8,79
Baca gazı(Çamur Su Buharı)	H ₂ O	1,893	-	9,5	303,00	373,00	70,00	0,208	4687,50	0,018	62316,19	17,31		2473958,33	687,21	704,52
Baca gazı(Yanma havası)	CO ₂	0,948	9,860%	19,48	303,00	373,00	70,00	0,208	723,10	0,044	4814,09	1,34	1,3453	22108,57	6,14	7,48
	CO	1,058	0,007%	274,71	303,00	373,00	70,00	0,208	0,34	0,028	2,50	0,00	0,0175	0,21	0,00	0,00
	SO ₂	0,685	0,001%	313,4	303,00	373,00	70,00	0,208	0,09	0,064	0,41	0,00	0,0028	0,00	0,00	0,00
	NO	1,006	0,008%	88,9	303,00	373,00	70,00	0,208	0,38	0,03	2,68	0,00	0,0052	0,07	0,00	0,00
	NO ₂	1,085	0,008%	55,6	303,00	373,00	70,00	0,208	0,58	0,046	4,44	0,00	0,0025	0,03	0,00	0,00
	N ₂	1,048	70,053%	0,69	303,00	373,00	70,00	0,208	3269,40	0,028	24062,34	6,68	-0,1447	-16899,89	-4,69	1,99
	Ar	0,520	0,830%	11,69	303,00	373,00	70,00	0,208	55,34	0,040	202,09	0,06	-0,0032	-4,37	0,00	0,05
	H ₂ O	1,893	18,932%	9,5	303,00	373,00	70,00	0,208	568,00	0,018	7551,06	2,10	1,0048	31706,63	8,81	10,90
O ₂	0,953	0,302%	3,97	303,00	373,00	70,00	0,208	16,10	1,018	107,73	0,03	-0,0322	-0,51	0,00	0,03	
GENEL TOPLAM (Yakma Havası)									4633,31		36747,33	10,21	2,20	36910,75	10,25	20,46
Baca gazı(Sızıntı hava)	N ₂	1,048	77,370%	0,69	303,00	373,00	70,00	0,208	24772,29	0,028	182320,92	50,64	0,0338	29886,47	8,30	58,95
	O ₂	0,953	21,670%	3,97	303,00	373,00	70,00	0,208	7929,48	0,032	53069,67	14,74	0,0255	6316,10	1,75	16,50
	CO ₂	0,948	0,030%	19,48	303,00	373,00	70,00	0,208	15,09	0,044	100,49	0,03	-0,0003	-0,10	0,00	0,03
	Ar	0,520	0,920%	11,69	303,00	373,00	70,00	0,208	420,81	0,040	1536,72	0,43	-0,0011	-11,72	0,00	0,42
	H ₂ O	1,893	0,010%	9,5	303,00	373,00	70,00	0,208	2,06	0,018	27,36	0,01	-0,0014	-0,16	0,00	0,01
GENEL TOPLAM(Sızıntı hava)									33139,73		237055,16	65,85	0,06	36190,59	10,05	75,90
GENEL TOPLAM									52460,54		342501,52	95,14		7853626,45	2181,56	2276,70
GENEL TOPLAM (kW)														2276,70		

Ekserji verim hesabında, sistemden çıkan ekserji miktarının sisteme giren ekserji miktarına oranı olarak ifade edilir [33];

$$\eta_{II} = \sum \frac{\dot{E}x_{\text{çıkan}}}{\dot{E}x_{\text{giren}}} \quad (7.22)$$

Atık ısı kullanımından önce ve sonraki ekserji verim değerleri sırasıyla %39,46 ve %41,24 olarak hesaplanmıştır. Atık ısı geri kazanımı ile sistemin ekserji verimliliğinde % 1,78' lik bir artış olmuştur.

Literatüre baktığımızda Apak (2007) çalışmasında püskürtmeli kurutucu için enerji verimliliğini %65,3, ekserji verimliliğini ise %29,9 bulmuştur [6]. Afşar (2011) yaptığı çalışmada enerji verimliliğini %79, ekserji verimliliğini ise %85,7 bulmuştur [9]. Turan (2009) tezinde yine püskürtmeli kurutucuyu incelemiş enerji verimliliğini %65,5 bulurken, ekserji verimliliğini %53,7 bulmuştur [8]. Bu çalışmada ise enerji verimliliği %52,97' den %58,4' e yükselmiştir. Ekserji verimliliği ise %39,46' dan %41,24' e yükselmiştir.

7.4. Ekonomik Analiz

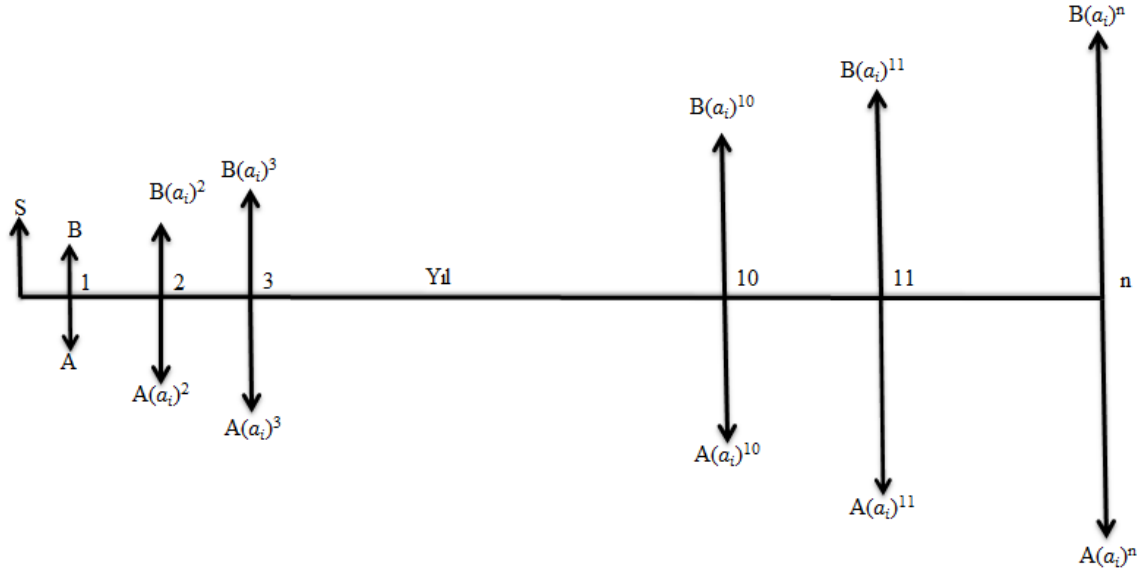
Yatırım projelerinde birçok ekonomik analiz çeşiti vardır. Bunların içinde en çok kullanılan Net Şimdiki Değer (NPV)'dir. Bu yöntem yatırımın ekonomik ömrü boyunca gerektirdiği parasal miktarın iskonto miktarı ile geri kazanç sağlayacağı gelirin iskonto miktarını karşılaştırarak, bugünkü değer üzerinden farkını ortaya koyar. Bu iskonto oranı o ülkedeki faiz oranı ile açıklanmaktadır. Ayrıca NPV yöntemi ile kurulan tesisin kazanç sağladığı dönem rahatlıkla bulunabilmektedir [34].

$$NPV = \sum_{i=1}^N (A - B) a_i \quad (7.23)$$

$$a_i = \frac{1}{(1 + i)^p} \quad (7.24)$$

Formülde yer alan “A” kazanç, “B” maliyet, “p” periyot, “ i” indirim oranıdır.

Net Şimdiki Değer Yöntemi Şekil 7.4' de gösterilmiştir. Şekilde S yatırım bedeli olup “n” ise sistem ömrüdür.



Şekil 7.4. Net Şimdiki Değer akış diyagramı [33]

Uygulamaya alınan atık ısı projesinin ekonomik analizi Net Şimdiki Değer (NPV) yöntemi ile yapılmıştır. Sistemde üretilen DK masse miktarı ortalama 6 200 000 kg/ay olarak alınmıştır. Atık ısı sisteminin 24 saat, 30 gün çalıştığı düşünülmüştür. Sistemde kullanılan fan motorlarının elektrik tüketimi 15 kWh'dir. Yapılan hesaplamalarda doğalgaz ve elektrik fiyatları Uşak Organize Sanayi Bölgesi 2013 yılı tarifelerinden alınmıştır. Doğalgazın birim m^3 fiyatı 0,473 \$, elektrik birim fiyatı ise 0,12 \$, olarak kabul edilmiştir.

Çizelge 7.18. Atık ısı geri kazanım ile sağlanan tasarruf miktarları

1 kg masse üretimi için tasarruf edilen doğalgaz (m^3)	0,01766
Aylık masse üretimi (kg)	6 200 000
Tasarruf edilecek doğalgaz miktarı (m^3)	109 492
Doğalgazın birim fiyatı ($\$/m^3$)	0,473
Aylık tasarruf miktarı (\$)	51 789,72

Projenin toplam bedeli 315 000 \$ dır. Bu bedel, yüklenici firma tarafından işçilik, malzeme, yalıtım, yazılım vb. unsurların toplam maliyeti dikkate alarak fiyatlandırılmıştır. Ayrıca aylık klape bakımları, sensör bakımları, filtre bakımları için 400 \$ bir masraf ön görülmüştür. Sistemin elektrik giderleri, bakım masrafları karşılandıktan sonraki kazancı 50 093 \$ 'dır. Toplam giderler ve faiz oranı Eşitlik 7.24' de ve Eşitlik 7.23' de yerine konularak Net Şimdiki Değere ulaşılmıştır. NPV pozitif olduğu dönem sistemin kara geçtiği dönem olarak kabul edilmiştir. Çizelge 7.19' da aylara göre dağılımı yapılarak 11. ayda kara geçtiği görülmüştür.

Çizelge 7.19. Atık ısı geri kazanım ile sağlanan tasarruf miktarları

AYLAR	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Toplam Yatırım Bedeli (\$)	-315000											
Aylık Getiri (\$)		51789,72	51789,72	51789,72	51789,72	51789,72	51789,72	51789,72	51789,72	51789,72	51789,72	51789,7
Elektrik Tüketimi (\$)		-1296	-1296	-1296	-1296	-1296	-1296	-1296	-1296	-1296	-1296	-1296
Bakım, Onarım, İşçilik (\$)		-400	-400	-400	-400	-400	-400	-400	-400	-400	-400	-400
Yıllık Faiz Oranı	0,92%	0,0092	0,0092	0,0092	0,0092	0,0092	0,0092	0,0092	0,0092	0,0092	0,0092	0,0092
Net Akış Oranı (\$)	-315000	50093,72	50093,72	50093,72	50093,72	50093,72	50093,72	50093,72	50093,72	50093,72	50093,72	50093,7
İndirim Oranı	1	0,9909	0,9819	0,9729	0,9640	0,9552	0,9465	0,9379	0,9294	0,9209	0,9125	0,9042
Faiz İndirimi Sonra Maliyet	-521000	49637,06	49184,56	48736,19	48291,90	47851,67	47415,45	46983,20	46554,89	46130,49	45709,96	45293,26
NPV (\$)		-471362,94	-422178,38	-373442,19	-325150,29	-277298,62	-229883,18	-182899,98	-136345,08	-90214,59	-44504,63	788,64

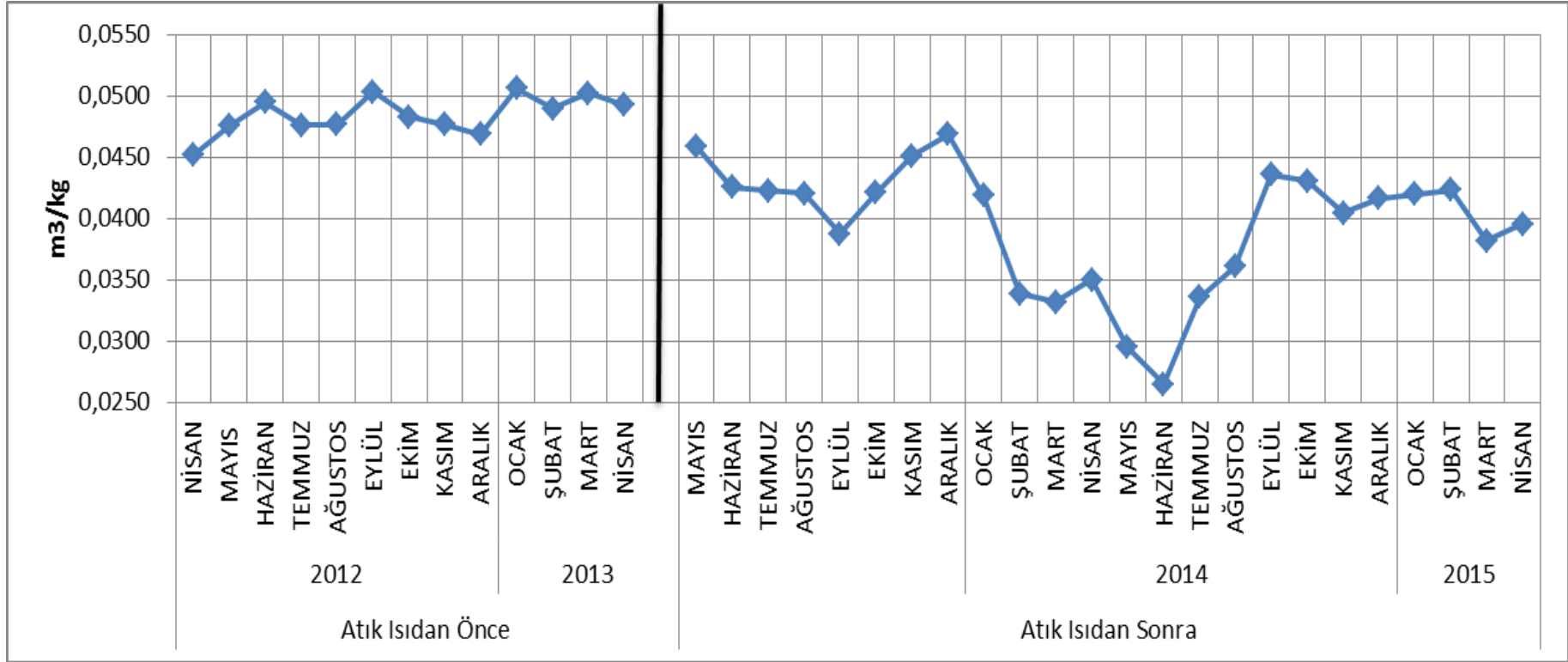
Atık ısı geri kazanım ile birlikte günde %30'luk bir oranla ortalama 3650 m³ doğalgaz tasarrufu sağlanmaktadır. Tasarrufla birlikte CO₂ emisyonu da bu oranda azaltığı tahmin edilmektedir.

7.5. Atık Isı Geri Kazanım Projesinin Kapasiteye ve Enerji Tasarrufuna Olan Etkileri

Atık ısı geri kazanım projesinin uygulanmasından sonra enerji tasarrufunda ve kapasite artışında önemli bir fark oluşturmuştur. Ayrıca enerji ve ekserji verimliliğinde bir artış gözlenmiştir. Sürekli üretim prosesine sahip olan seramik kaplama sektöründe ilk aşama olan masse hazırlamadaki kapasite artışı ile birlikte stoklu üretim yapılarak prosesi rahatlatmış ve esnek üretim şansıda vermiştir.

Atık ısı geri kazanım projesinden önce püskürtmeli kurutucunun saatlik kapasitesi ortalama 7 802 kg iken, projeden sonra 9 400 kg'a çıkmıştır. 1 kg masse üretebilmek için gerekli olan enerji miktarı değişmemiş, doğalgazdan elde edilen enerji yerine atık ısı kullanılmıştır. Böylelikle 1 kg masse üretebilmek için gerekli olan doğalgaz miktarı 0,0591 m³' den 0,04144 m³' e düşmüştür. Yakılan doğalgaz miktarının azalmasıyla birlikte DK püskürtmeli kurutucudaki baca gazında CO₂ emisyonu da bu oranda azaldığı düşünülebilir.

Şekil 7.5' de görüldüğü gibi 2012 Nisan ile 2015 Nisan aylarında ki m³/kg değerleri verilmiştir. Uygulamaya 2013 Mayıs ayı itibari ile geçilmiş olup tüketimde azalan bir ivme gözlemlenmiştir. Atık ısıdan önce ortalama doğalgaz tüketimi 0,0484 m³/kg olarak gözlenirken, atık ısı geri kazanımdan sonra bu rakam 0,0394 m³/kg' a düşmüştür. Bazı aylarda dalgalanmaların sebebi o ay içerisindeki yapılan bakım veya arızadan dolayı yaşanan kapasite kayıplarıdır.



Şekil 7.5. Püskürtmeli kurutucunun aylara göre ortalama doğalgaz tüketim değerleri (m³/kg)

8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Seramik sektöründe ısı geri kazanımlı bir püskürtmeli kurutucudan elde edilen veriler doğrultusunda yapılmış olan enerji, ekserji ve ekonomik analiz sonuçları değerlendirilmiş, sistemin iyileştirilmesi veya yeni bir sistemin kurulumu için öneriler verilmiştir.

8.1. Sonuçlar

Enerjiyi etkin kullanabilmek için sistemde yer alan tersinmezlikler belirlenmeli ve enerji kaybına olan etkisi hesaplanmalıdır. Bu çalışmada püskürtmeli kurutucuya giren ve çıkan tüm maddeler belirlenmiş, enerji ve ekserji hesapları yapılmıştır. Atık ısı geri kazanımdan önceki ve sonraki enerji ve ekserji verimleri hesaplanarak sonuçlar çizelgeler ve grafikler halinde verilmiştir. Ayrıca atık ısı geri kazanım projesinin ekonomik analizi yapılarak geri ödeme süresi bulunmuştur.

Sistem atık ısı geri kazanımdan önce ve sonra incelenmiş elde edilen veriler karşılaştırılmıştır.

- Atık ısıdan önce kapasite 7 802 kg iken, atık ısıdan sonra bu rakam 9 400 kg.' a çıkmıştır. Çizelge 7.4' de sistemin kapasite artışı görülmektedir.
- Çizelge 7.4' de atık ısıdan önce sisteme giren primer ve sekonder hava debileri sırasıyla; 5 160 kg ile 24 720 kg iken, atık ısıdan sonra primer hava azalarak 4 358 kg'a sekonder hava artarak 52 460 kg'a yükseldiği görülmektedir.
- Çizelge 7.4' de kullanılan doğalgaz debileri 324 kg'dan 274 kg'a düştüğü görülmektedir.
- Çizelge 7.10 ve 7.11'den elde edilen sonuçlar ile atık ısı kullanımından önce enerji verimi %52,97 hesaplanmıştır. Çizelge 7.12 ve Çizelge 7.13' den elde edilen sonuçlar ile atık ısı kullanımından sonra enerji veriminin %53,4 hesaplanmıştır. Atık ısı kullanımından sonra %0,43' lük enerji verim artışı gözlenmiştir.

- Çizelge 7.14 ve 7.15' den elde edilen veriler doğrultusunda atık ısı kullanımından önce ekserji verimliliği %39,46 olarak hesaplanmıştır. Çizel 7.16 ve Çizelge 7.17'den elde edilen veriler sonucunda atık ısı kullanımından sonra ekserji verimliliği %41,24 olarak hesaplanmıştır. Ekserji verimliliğinde %1,78' lik artış olmuştur.
- Çizelge 7.18 ve Çizelge 7.19' da verilen bilgiler doğrultusunda NPV yöntemi ile ekonomik analiz yapılarak sistemin geri ödeme süresi 11 ay bulunmuştur. Böylesi büyük bir projenin kısa sürede kendi bedelini geri ödemesi çok önemli bir avantajdır.
- Şekil 7.15' de püskürtmeli kurutucunun aylara göre ortalama doğalgaz tüketimi grafik halinde verilmiştir. Atık ısı geri kazanım projesinden önce 1 kg masse üretebilmek için ortalama 0,0591 m³ doğalgaz gerekirken, projeden sonra bu rakam 0,04144 m³ e düşmüştür.
- Tüketilen doğalgaz miktarının azalmasıyla birlikte DK püskürtmeli kurutucu bacasındaki CO₂ emisyonu da düşerek, çevre kirliliğini azaltacaktır.

Tüm bunlarla birlikte atık ısı geri kazanım projesinin en büyük avantajı birim maliyetleri düşürerek şirketin karlılık oranını yükseltmesidir. Artan enerji maliyetlerinin karşısında ve uluslararası rekabet ortamında firmaların bir adım öne geçmesini sağlayarak ülke ekonomisine katkıda bulunmuş olacaktır.

8.2. Öneriler

Atık ısı geri kazanım projesinde, üzerinde durulması gereken hususlardan biri kapasitenin artırılması diğeri de, tüketilen doğalgaz miktarının azaltılmasıdır. Bunlar için;

- Püskürtmeli kurutucunun optimum hava debileri ve üretim kapasitelerini bulabilmek için anlık üretim miktarlarını gösteren bir program entegre edilmelidir.

- Çalışandan veya makineden kaynaklanan verim düşüklüğünü anında fark edilebilmesi için sistemin anlık olarak enerji girişi ve enerji çıkışını gösteren bir yazılım yapılabilir.
- Sisteme giren hava debisi artırılarak birim zamanda üretilen masse miktarı artırılabilir.
- Sisteme giren çamurun sıcaklığı artırılarak tüketilen doğalgaz miktarı azaltılabilir.
- Elde edilen atık ısı belli bir filtreden geçilerek atık maddelerin püskürtmeli kurutucuya girmesi engellenebilir.
- Püskürtmeli kurutucunun bacasından çıkan 100 °C 'deki hava, hava-su eşanjöründen geçirilerek sıcak su elde edilebilir. Bu sıcak su hammadde öğütme ve sır hazırlama değirmenlerinde kullanılarak öğünme süresi kısaltılabilir.
- DK püskürtmeli kurutucu baca gazı analizi belli periyotlarda yapılarak birim CO₂ miktarı ölçülmelidir. Olası artışlarda doğalgaz yanma verimi kontrol edilmeli ve zengin yanma gerçekleşmesi sağlanmalıdır.

Artan enerji fiyatlarına karşı enerji verimliliğini bir şirket politikası haline getirilmelidir. Bu yüzden atık ısı geri kazanım projesi sadece püskürtmeli kurutucularda değil, seramik üretim tesislerinde yer alan diğer kurutucularda da uygulanabilir. Özellikle fırınlarda ve dikey kurutuculara ön ısıtma sağlayarak atık ısıdan yararlanılabilir. Ayrıca püskürtmeli kurutucu kullanan diğer proseslerde, örneğin süt kurutma sektöründe, peynir kurutma tesislerinde, balık yağı emülsiyonunda vb. atık ısıdan yararlanılabilir. Bu çalışma, yapılacak olan diğer projeler için bir örnek teşkil etmesi ve enerji tasarrufu sağlanmasında yararlı olması beklenmektedir.

KAYNAKLAR

1. Koç, E., Şenel, M. C., 2013, “Dünyada ve Türkiye’de Enerji Durumu - Genel Değerlendirme”, *Mühendis ve Makina*, 54 (639): 32-44.
2. Velic, D., Mate, B., Srecko T., Mirela P., 2003, “Simulation, calculation and possibilities of energy saving in spray drying process”, *Applied Thermal Engineering*, 23: 2119-2131.
3. Monte, D. M., Padoano, E., Pozzetto, D., 2003, “Waste heat recovery in a coffee roasting plant”, *Applied Thermal Engineering*, 23: 1033-1044.
4. Oğulata, R. T., 2004, “Utilization of waste-heat recovery in textile drying”, *Applied Energy*, 79: 41-49.
5. Engin, T., Arı, E., 2004, “Energy auditing and recovery for dry type cement rotary kiln systems—A case study”, *Energy Conversion and Management*, 46: 551-562.
6. Apak, E., 2007, “Bir seramik fabrikasında enerji ekserji analizi”, Yüksek lisans tezi, *Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kütahya.
7. Yörü, Y., 2008, “Kojenerasyon sistemlerinde yapay sinir ağları uygulaması ve ekserji analizi”, Doktora tezi, *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Eskişehir.
8. Turan, M., 2009, “Bir endüstriyel kurutucunun performansının enerji ve ekserji yöntemleri kullanarak belirlenmesi”, Yüksek lisans tezi, *Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İzmir.
9. Afşar, H., 2011, “Seramik fabrikası enerji ekserji analizi”, Yüksek lisans tezi, *Bozok Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Yozgat.
10. Karellas, S., Leontaritis, A. D., Panousis, G., Bellos, E., Kakaras, E., 2013, “Energetic and exergetic analysis of waste heat recovery systems in the cement industry”, *Energy*, 58: 147-156.
11. Aghbashlo, M., Mobli, H., Rafiee, S., Madadlou, A., 2013, “A review on exergy analysis of drying processes and systems”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 22: 1-22.
12. Utlu, Z., Hepbaşlı, A., 2014, “Exergoeconomic analysis of energy utilization of drying process in a ceramic production”, *Applied Thermal Engineering*, 70: 748-762.
13. Mezquita, A., Boix, J., Monfort E., Mallol G., 2014, “Energy saving in ceramic tile kilns: Cooling gas heat recovery”, *Applied Thermal Engineering*, 65: 102-110.

14. Golman, B., Julklang, W., 2014, "Analysis of heat recovery from a spray dryer by recirculation of exhaust air", *Applied Thermal Engineering*, 88: 641-649.
15. Golman, B., Julklang, W., 2014, "Simulation of exhaust gas heat recovery from a spray dryer", *Applied Thermal Engineering*, 73: 899-913.
16. Julklang, W., Golman, B., 2015, "Effect of process parameters on energy performance of spray drying with exhaust air heat recovery for production of high value particles", *Applied Thermal Engineering*, 151: 285-295.
17. İnternet: Türk Seramik Federasyonu, 2015, "Türk seramikleri tarihi"
http://www.serfed.com/tr/content.php?content_id=117.
18. Sümer, G., Seramik Sanayiinde Üretim Teknolojisi, İzmir, Cilt: XV, Sayı: 3.
19. Sacmi, Uygulamalı Seramik Teknolojisi-I, , Özkan, İ., 13-15 ve 298-314
20. Saatçioğlu, G., 2007, "Türk Seramik Sanayi", *SERFED*, İstanbul, 4-5.
21. Devlet Planlama Teşkilatı Müsteşarlığı, 2007, "Seramik Kaplama Malzemeleri Sektörü Dokuzuncu Kalkınma Planı (2007-2013) İstanbul, 5-6.
22. Gabaldon D., Estevan D., Criado E., Monfort E., 2014, "The green factor in European manufacturing: a case study of the Spanish ceramic tile industry", *Journal of Cleaner Production*, 70: 242-250.
23. Agrafiotis, C., Tsoutsos, T., 2001, "Energy saving technologies in European ceramic sector: a systematic review", *Applied Thermal Engineering*, 21: 1231-1249.
24. Sacmi, Uygulamalı Seramik Teknolojisi-II, , Özkan, İ., s.88-228, Sacmi.
25. Elektrik İşleri Etüt İdaresi Ulusal Enerji Tasarrufu Merkezi "Sanayide Enerji Yönetim Esasları IV", *EİE*, 2004, Ankara, 1-3.
26. Ezzeddine, A. M., 2012, "Recovery of waste heat by the production of cooling effect", Bitirme Tezi, *Lebanese University, Mechanical Engineering Department*, Beyrut, 10-13.
27. Pekin, H. B., 2002, "Sanayide enerji verimliliği forumu seramik sektörü", 21. Enerji Tasarrufu Haftası Etkinlikleri", 1-8, Ankara.
28. Thybo, P., Hovgaard, L., Lindelov, J. S., Brask, A., Andersen, S. K., 2008, "Scaling Up the Spray Drying Process from Pilot to Production Scale Using an Atomized Droplet Size Criterion", *Pharmaceutical Research*, 25 (7), 1610-1615.
29. Makine Mühendisleri Odası, 2008, "Yanma gaz analizleri ve doğalgaz uygulamalarındaki önemi"
http://www.mmo.org.tr/resimler/dosya_ekler/7af4fb322bb5c89_ek.pdf?dergi=156

30. Gürtürk M., ztop H. F., 2014, "Energy and exergy analysis of a rotary kiln used for plaster production", *Applied Thermal Engineering*, 67: 554-565.
31. Andelkovic B., Krstic I., 2007, "Application of exergetic analysis in the risk analysis of technological systems and environmental protection", *Working and Living Environmental Protection*, 4: 31-39.
32. Kotas, T., 1995, "The exergy method of thermal plant analysis", *Malabar*, Florida, 38-50
33. Yüncü, H., 2010, "Ekserji Analizi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi", Ankara, 109-189.
34. Yıldız, A., Gürlek G., Güngör A., zbalta, N., 2007, "Güneş enerjisi destekli su ısıtma sisteminin tasarımı ve ekonomik analizi", *Tesisat*, 140, 142-144.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, isim : ÇAĞLAYAN, Hasan
Uyruğu : T.C.
Doğum tarihi ve yeri : 06.06.1987 Uşak
Medeni hali : Bekar
Telefon : 0 (530) 575 73 21
e-mail : hasan6619@gmail.com

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Yüksek Lisans	Uşak Üniversitesi /Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı	2015
Yüksek Lisans	Uşak Üniversitesi /Sosyal Bilimleri Enstitüsü İşletme Anabilim Dalı	2014
Lisans	Balıkesir Üniversitesi, Endüstri Mühendisliği	2009
Lise	Uşak İzzettin Çalışlar Lisesi	2005

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2010-Devam	Umpaş Seramik Sanayi A.Ş.	Endüstri Mühendisi
2010-2010	GES Elektrik A.Ş.	Endüstri Mühendisi

Yabancı Dil

İngilizce

Yayımlar

-

Hobiler

Kitap okuma, Sinema, Gitar