



**İSKENDERUN TEKNİK**

ÜNİVERSİTESİ

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**YÜKSEK  
LİSANS  
TEZİ**

**YÜKSEK FIRINLARDA  
DÖNER PLAKA KULLANILARAK  
CÜRUF ELDE EDİLMESİ  
VE ATIK ISI KAZANIMINA  
ETKİLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

**Ökkeş CİĞERLİ**

**MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ  
ANABİLİM DALI**

**TEMMUZ 2021**





**İSKENDERUN TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**

Versiyon 01.01



**YÜKSEK FIRINLARDA DÖNER PLAKA KULLANILARAK CÜRUF ELDE  
EDİLMESİ VE ATIK ISI KAZANIMINA ETKİLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

**Ökkeş CİĞERLİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**İSKENDERUN TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**TEMMUZ 2021**

YÜKSEK FIRINLARDA DÖNER PLAKA KULLANILARAK CÜRUF ELDE EDİLMESİ  
VE ATIK ISI KAZANIMINA ETKİLERİNİN ARAŞTIRILMASI  
(Yüksek Lisans Tezi)

Ökkeş CİĞERLİ

İSKENDERUN TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

Temmuz 2021  
ÖZET

Demir-çelik sektörü, dünyada birçok alanda kullandığımız çeliği üreten en önemli üretim sektörü alanlarından biridir. Demir-çelik sektöründe elde edilecek nihai ürün birçok aşamadan geçmekte ve üretim sırasında da yüksek miktarlarda enerji tüketilmektedir. Nihai ürün üretimi için harcanan bu enerjiye karşı sektörde üretim sırasında da birçok yan ürün elde edilmektedir. Çıktı olarak geri dönen bu yan ürünler maliyete olumlu katkı sağlamaktadır. Entegre bir demir-çelik fabrikasında üretim sırasında yüksek fırın gazı, kok gazı, yüksek fırın cürufu, çelikhane cürufu gibi yan ürünler geri kazanılır. Kimyasal yapı bakımından yüksek fırın cürufu çimento endüstrisine uygun olduğundan, elde edilen cüruf çimento endüstrisinde kullanılmaktadır.

Yüksek fırın cürufu, yüksek fırınların nihai ürünü olan sıvı ham demirden yüksek fırın cürufu ayrıştırılarak cüruf elde edilmektedir. Yan ürün olan yüksek fırın cürufu sulu granülasyon ile istenilen tanecik boyutlarına getirilir. Sektörde yüksek fırın cürufunun granülasyon işlemi su kullanılarak yapılmakta ancak bu yöntem ek olarak kuru cüruf granülasyon tekniği içinde araştırma ve çalışmalar yapılmaktadır.

Bu tez çalışmasında, yüksek fırın cürufunu granülasyon teknikleri, mevcut sulu granülasyon tekniği ile elde edilen yüksek fırın cürufunun analizleri, atık ısı enerjisi miktarı ve kuru granülasyon tekniğinin atık ısı geri kazanımı ile yapılan çalışmalar incelenmiştir. Bunlara ek olarak kuru granülasyon yöntemi ile yapılan çalışmalar ve kuru granülasyon yönteminin detayları incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler : Demir-Çelik, cüruf, granüle, kuru granüle

Sayfa Adedi : 58

Danışman : Doç. Dr. Hüseyin Turan ARAT

USING ROTATING PLATE IN BLAST FURNACES FOR OBTAINING SLAG AND  
INVESTIGATING THE EFFECTS ON WASTE HEAT RECOVERY

(M. Sc. Thesis)

Ökkeş CİĞERLİ

ISKENDERUN TECHNICAL UNIVERSITY  
ENGINEERING AND SCIENCE INSTITUTE

July 2021

ABSTRACT

The iron and steel industry are one of the important steels and steel production sectors in many areas of the world. It goes through the final product stage to be obtained in the iron and steel industry and high amounts of energy are consumed during production. Against this energy spent for the production of the final product, many products are produced in the sector during production. These by-products, which are returned as output, make a positive contribution to the cost. During production in an integrated iron and steel factory, by-products such as blast furnace gas, coke oven gas, blast furnace slag, steel mill slag are recovered. In terms of chemical structure, it is suitable for the blast furnace industry and the resulting slag is used in the industry.

The blast furnace slag is obtained by separating blast furnace slag from liquid crude iron, which is the final product of blast furnaces. The by-product blast furnace slag is brought to the desired particle size by aqueous granulation. In the sector, the granulation process of blast furnace slag is water treated, but in addition to this method, research is carried out in dry slag granulation.

In this thesis study, the granulation style of blast furnace slag, the analysis of the blast furnace slag obtained by aqueous granulation, the amount of waste heat energy and the studies conducted with the waste heat recovery of the dry granulation technique were examined. In addition to these, articles on dry granulation method and dry granulation information were reviewed.

Key Words : Iron-Steel, Slag, Granulation, dry granulation

Page Number : 58

Supervisor : Assoc. Prof. Dr. Hüseyin Turan ARAT

## TEŞEKKÜR

Bu çalışmada bana verdiği desteği her zaman hissettiren başta Doç. Dr. Hüseyin Turan ARAT, olmak üzere İSKENDERUN TEKNİK ÜNİVERSİTESİ mensubu tüm değerli hocalarıma teşekkür ederim.

Çalışmalarım sırasında kendi alanlarında bana destek veren Elektrik ve Otomasyon Mühendisi Yavuz BARUTCU ve Metalurji Malzeme Mühendisi Ali Şadi İLERİ' ye teşekkür ederim.

Çalışmamda kullandığım analizler ve birçok kıymetli verileri bana sağlayan aynı zamanda çalışanlarına, kendine değer katması yolunda birçok destek veren İSKENDERUN DEMİR ÇELİK A.Ş'ye sonsuz teşekkür ederim.

Yaptığım bu çalışma süresince yanımda olan aileme ve arkadaşlarıma teşekkür ederim.

## İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET .....	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER .....	vii
TABLoların LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xiv
RESİMLERİN LİSTESİ.....	xv
SİMGELER VE KISALTMALAR .....	xv
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Demir Çelik Sektörü .....	1
1.2. Yüksek Fırın Prosesi.....	5
1.3. Yüksek Fırın Cürufu .....	11
1.3.1. Havuz Tipi Sulu Cüruf Granülasyon Yöntemi .....	12
1.3.2. INBA Sistemi Cüruf Granülasyon Yöntemi .....	13
1.3.3. Kuru Cüruf Granülasyonu (DSG Teknolojisi) .....	15
1.4. Yüksek Fırın Cürufunun Kullanım Alanları.....	17
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR.....	18
2.1. Demir Çelik Sektöründe Cüruf.....	19
2.1.1. Alüminyum Cürufu .....	20
2.1.2. Çelik Cürufu.....	21
2.1.3. Yüksek Fırın Cürufu .....	22
2.2. Yüksek Fırın Cürufunun Granülasyon Yöntemleri .....	23

**Sayfa**

2.2.1. Sulu Cüruf Granülasyon Yöntemi.....	27
2.2.2. Kuru Cüruf Granülasyon Yöntemi.....	29
3. MATERYAL VE METOD.....	38
3.1. Materyal.....	38
3.2. Metod.....	40
4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA.....	42
4.1. Sulu Cüruf Granülasyon Yöntemi .....	42
4.2. Sulu Cüruf Granülasyon Yönteminde Atık Isının Geri Kazanımı.....	47
5. SONUÇLAR.....	53
KAYNAKLAR.....	56



**ÇİZELGELERİN LİSTESİ**

<b>Çizelge</b>	<b>Sayfa</b>
Çizelge 1.1 Ülke bazında çelik üretimleri 2017-2018.....	2
Çizelge 2.1. İncelenen plaka (atomizer) değerleri .....	34
Çizelge 2.2. Granülasyon işlemi parametreleri.....	35
Çizelge 2.3. Kuru granülasyon yöntemi için kütle ve enerji değişimleri.....	36
Çizelge 4.1 Cüruf kimyasal analizi.....	45
Çizelge 4.2. Cüruf Öz ısı değişimleri.....	48
Çizelge 4.3. Suyun fiziksel özellikleri .....	49
Çizelge 4.4. Araştırma için kullanılacak değerler.....	50
Çizelge 4.5. Sulu granülasyon yöntemi için kütle ve enerji değişimleri .....	50
Çizelge 4.6. Sulu cüruf granülasyon işleminde yıllık bazda ki değerler .....	51
Çizelge 4.7. Kuru cüruf granülasyon işleminde yıllık bazda ki değerler.....	52
Çizelge 4.8. Sulu cüruf granülasyon işlemi kuru cüruf granülasyon işlemi son sıcaklık karşılaştırması .....	52
Çizelge 4.9. Sulu cüruf granülasyon işlemi kuru cüruf granülasyon işlemi camsı içerik oranı karşılaştırması .....	52

## ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 1.1. 2017 yılı dünya çelik üretiminin ülkelere göre dağılımı .....	3
Şekil 1.2. 2018 yılı dünya çelik üretiminin ülkelere göre dağılımı .....	4
Şekil 1.3. Yüksek Fırın kesiti.....	6
Şekil 1.4. BLT şarj sistemi.....	9
Şekil 1.5. Havuz Tipi Sulu Cüruf Granülasyon .....	12
Şekil 1.6. İnba Sistemi .....	14
Şekil 1.7. Kuru cüruf granülasyonu atomizer (plaka) gösterimi.....	16
Şekil 2.1 .Almanya’ da ki ilk kok yüksek fırını .....	19
Şekil 2.2. Yüksek Fırın döküm kanalı görünümü .....	23
Şekil 2.3. Yüksek Fırın döküm kanalı 3 boyutlu görünüm.....	24
Şekil 2.4. Sulu cüruf granüle işleminin örnek gösterimi .....	27
Şekil 2.5. Kuru granüle sistemi.....	32
Şekil 2.6. Döner plaka (atomizer) gösterimi .....	33
Şekil 2.7. Geri kazanılan cüruf atık ısısından üretilen buharın yıllık miktarı ve değeri.....	37
Şekil 2.8. Geri kazanılan cüruf atık ısısından üretilen elektriğin yıllık miktarı ve değeri.....	37
Şekil 3.1. Sulu granülasyon pompa değerleri .....	39
Şekil 3.2. Sulu granülasyon sistemi genel görünüş.....	41
Şekil 4.1. Sulu granülasyon basınç grafiği.....	43
Şekil 4.2. Sulu granülasyon debi grafiği.....	44
Şekil 4.3. Sulu granülasyon tank seviye grafiği.....	45

<b>Şekil</b>	<b>Sayfa</b>
Şekil 4.4. Granüle cüruf sıcaklık grafiği.....	46
Şekil 4.5. Sulu cüruf granülasyon işlemi yıllık bazda kayıp ve sarfiyatları .....	51



**RESİMLERİN LİSTESİ**

<b>Resim</b>	<b>Sayfa</b>
Resim 1.1. Yüksek Fırın sobalar sistemi.....	7
Resim 1.2. Skip (geçiş) arabası.....	8
Resim 1.3. Yüksek Fırın Döküm açma matkabı .....	10
Resim 1.4. Su ile granüle edilmiş cüruf görüntüsü .....	15
Resim 2.1. Geçmişte demir üretimi .....	18
Resim 2.2. Havada soğutulmuş cüruf.....	25
Resim 2.3. Su ile granüle edilmiş cüruf .....	26
Resim 2.4. Yüksek fırın cürufunun genel yapısı.....	28
Resim 2.5. Yüksek fırın cürufunun boşluk yapısı.....	28
Resim 2.6. Döner plaka üzerinden kuru cüruf granülasyonu.....	31
Resim 2.7. Kuru granülasyon ile granüle edilmiş cüruf.....	35
Resim 3.1. Su ile granüle edilmiş cüruf görüntüsü .....	40

## SİMGELER VE KISALTMALAR

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

<b>Simgeler</b>	<b>Açıklamalar</b>
<b>m<sup>3</sup></b>	Metreküp
<b>kg</b>	Kilogram
<b>kWh</b>	Kilowatt saat
<b>mm</b>	Milimetre
<b>min</b>	Dakika
<b>°C</b>	Celcius
<b>C</b>	Karbon
<b>S</b>	Kükürt
<b>FeO</b>	Demir oksit
<b>CaO</b>	Kalsiyum oksit
<b>SiO<sub>2</sub></b>	Silisyum dioksit (silika)
<b>MgO</b>	Magnezyum oksit
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	Alüminyum oksit
<b>MnO</b>	Mangan Oksit
<b>NaCl</b>	Sodyum klorür
<b>KCl</b>	Potasyum klorür
<b>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b>	Fosfor pentoksit
<b>CaF<sub>2</sub></b>	Kalsiyum florid
<b>CO<sub>2</sub></b>	Karbon dioksit

**Kısaltmalar****BLT****BOF****EAF****OHF****PCI****WSA****Açıklamalar**

Yüksek Fırın tepe teçhizat sistemi

Bazik oksijen fırını

Elektrikli Ark Fırını

Siemens-Martin ocakları

Pulverize enjeksiyon kömürü

Dünya Çelik Birliği



# 1. GİRİŞ

## 1.1. Demir Çelik Sektörü

Demir çelik sektöründe üretimi sağlanan çelik ürünleri dayanımlarından dolayı tüketim ürünlerinin başlıca bir ihtiyacı olup aynı zamanda uzun vadede sanayilerin ana girdileridir. Demir çelik sektörünün ülkelerde ki diğer endüstrilere göre daha büyük bir üretim payına sahip olması bu ülkelerde ki gelişmişlik seviyesine etki eder. Pazar payının büyüklüğü, sektörde ki sanayilerin istihdam oranları, satış sonrası ülkeye yabancı kaynaklı döviz girdisi ve diğer çelik ihtiyacı olan sanayilerin doğrudan çeliğe kolaylıkla ulaşabilmesi gibi birçok neden ülkelerin demir çelik sektörüne önem vermesini sağlar. Büyük ve güçlü ekonomilere sahip ülkelerde çelik üretimi, çelik tüketimi ile birlikte artmakta olup bu ülkelerin daha güçlü ekonomilere sahip olmasının yolunu açmaktadır. Demir çelik sektöründe en büyük katma değeri oluşturan ürün olan yassı çelik üretimi ülkelerin ekonomik ve gelişim açısından diğer çelik üreticisi ülkelere göre daha önde olmasını sağlamaktadır. Gelişen ve büyük ekonomilere sahip olan ülkelerin demir çelik sektörünü, gelişmekte olan ülkelerin demir çelik sektörü ile kıyasladığımızda yassı çelik üretimleri arasında ki fark görülebilmektedir. Gelişmiş ekonomilere sahip ülkelerde yassı çelik üretiminin yüksek olması büyük bir pazara hitap etmesinin önünü açmakta ve ekonomilerine katma değer sağlamaktadır [1].

Dünyada birçok ülkede demir çelik sektörü bulunmakta ve faaliyetlerini göstermektedir. Dünya genelinde Dünya Çelik Birliği'nin paylaştığı 2017-2018 yılı çelik üretim verilerinin paylaşıldığı Çizelge 1.1 incelendiğinde Çin'in dünya demir-çelik pazarında en büyük paya sahip olduğu görülmektedir. Türkiye ise Avrupa'da çelik üretimi bazında üst sıralarda bulunmaktadır. Çizelge 1.1' verildiği üzere Türkiye 2017 yılında 37,5 milyon çelik üretimi gerçekleştirirken, 2018 yılında 37,3 milyon ton çelik üretimi gerçekleştirerek dünya çelik üreticileri arasında 8. Sırada yerini almıştır.

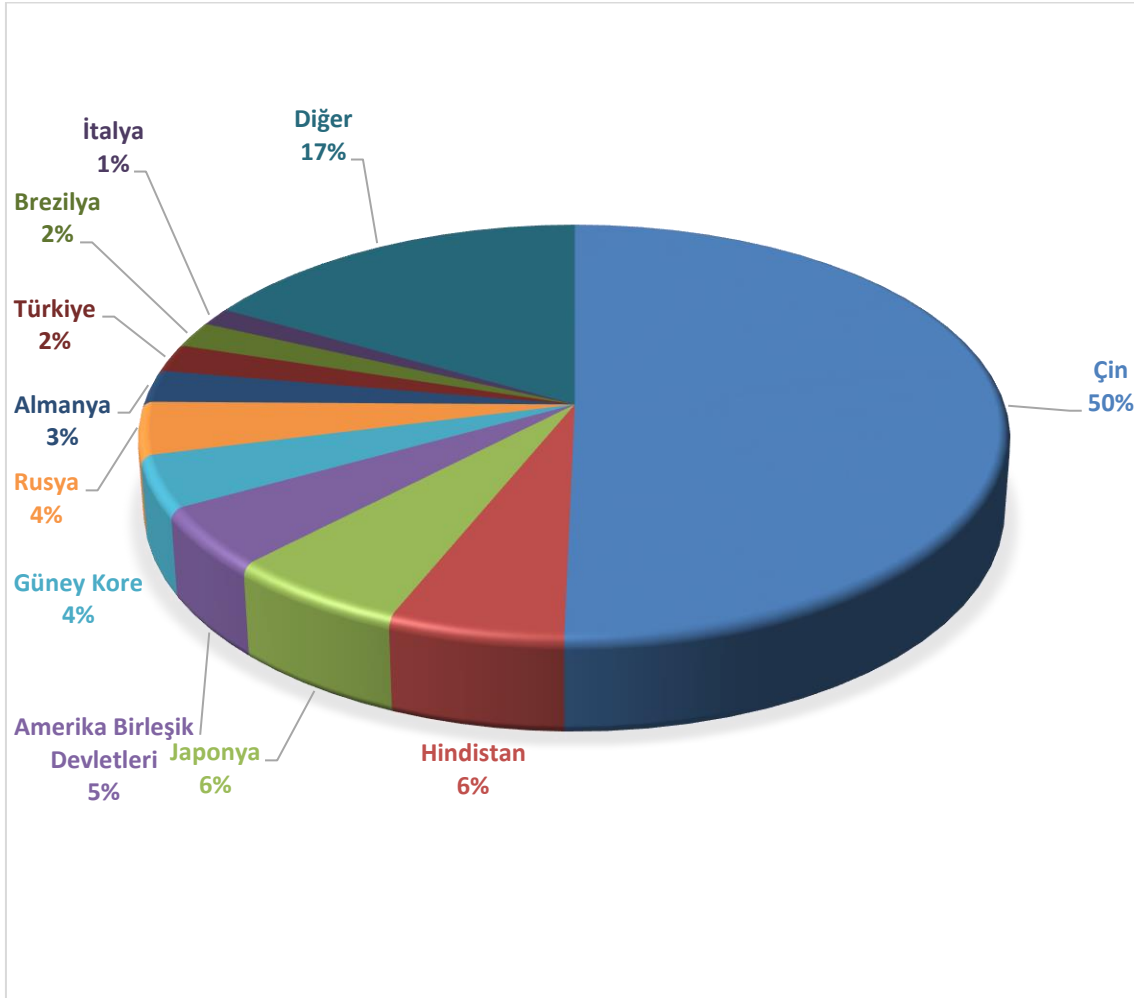
Çizelge 1.1. Ülke bazında çelik üretimleri 2017-2018 (milyon ton) [2]

ÜLKE	2018		2017	
	Sıralama	Tonaj	Sıralama	Tonaj
Çin	1	928,3	1	870,9
Hindistan	2	106,5	3	101,5
Japonya	3	104,3	2	104,7
Amerika Birleşik Devletleri	4	86,6	4	81,6
Güney Kore	5	72,5	6	71,0
Rusya	6	71,7	5	71,5
Almanya	7	42,4	7	43,3
Türkiye	8	37,3	8	37,5
Brezilya	9	34,9	9	34,5
İtalya	10	24,5	10	24,1
İran	11	24,5	13	21,2
Tayvan	12	23,2	11	22,4
Ukrayna	13	21,1	12	21,4
Meksika	14	20,2	14	20,0
Fransa	15	15,4	15	15,5
İspanya	16	14,3	16	14,4
Vietnam	17	14,1	18	11,5
Kanada	18	12,9	17	13,6
Polonya	19	10,2	19	10,3
Belçika	20	8,0	21	7,8
Mısır	21	7,8	23	6,9
Birleşik Krallık	22	7,3	22	7,5
Avusturya	23	6,9	20	8,1
Hollanda	24	6,8	24	6,8
Güney Afrika	25	6,3	25	6,3
Avustralya	26	5,7	26	5,3
Endonezya	27	5,5	27	5,2
Suudi Arabistan	28	5,2	31	4,8
Slovakya	29	5,2	28	5,0
Arjantin	30	5,2	32	4,6
Çek Cumhuriyeti	31	4,9	33	4,6
Pakistan	32	4,7	29	5,0
İsveç	33	4,7	30	4,9
Kazakistan	34	4,6	35	4,5
Tayland	35	4,3	34	4,5
Finlandiya	36	4,1	36	4,0
Romanya	37	3,5	37	3,4
Malezya	38	3,5	39	3,2
Birleşik Arap Emirlikleri	39	3,2	38	3,3
Katar	40	2,6	40	2,6
Belarus	41	2,5	41	2,3
Lüksemburg	42	2,2	42	2,2
Portekiz	43	2,2	43	2,1
Umman	44	2,0	44	2,0
Cezayir	45	2,0	66	0,4
Macaristan	46	2,0	45	1,9
Sırbistan	47	2,0	46	1,5
İsviçre	48	1,5	47	1,5
Filipinler	49	1,5	48	1,4
Yunanistan	50	1,5	49	1,4
Diğerleri		14,0		14,1
Dünya		1 808 400		1 729 800

Dünya çelik birliğinin yayınlandığı bilgilerden hazırlanan [2] Şekil 1.1’de verildiği üzere 2017 yılında dünya çelik üretiminde Çin %50’lik üretim ile dünyada ki üretilen çeliğin yarısını sadece kendisi üretmiş olup bu pazarda liderdir. Çin, 2017 yılında yaklaşık 871 milyon ton çelik üretimi yapmıştır. Dünya çelik birliğinin yayınlandığı bilgilerden hazırlanan [2] Şekil 1.2 incelendiğinde ise 2018 yılında dünyada üretilen çeliğin %51’ini Çin yine tek başına üretmiş olup çelik üretiminde liderliğini sürdürmüştür.



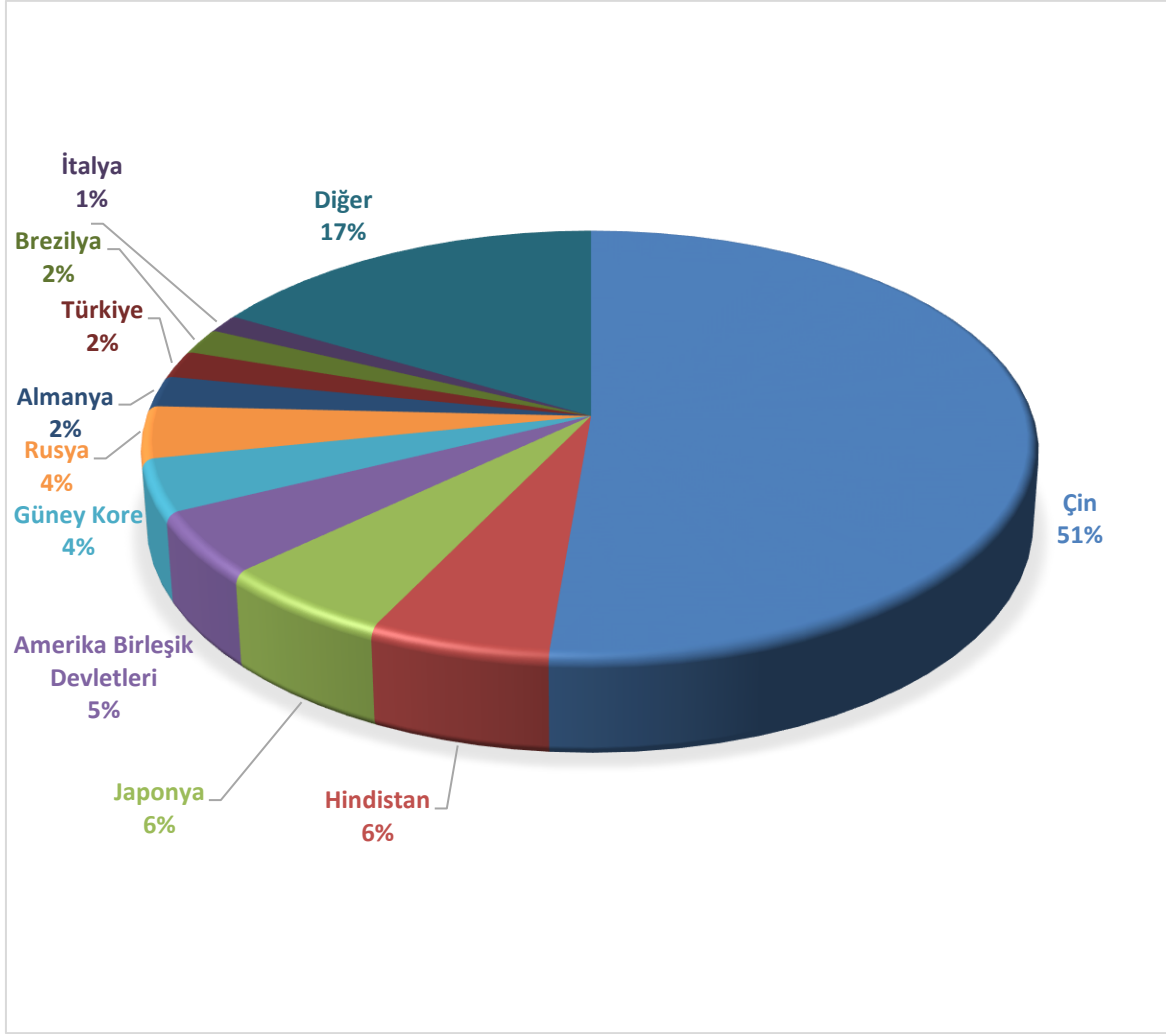
Bu verilere bakıldığında demir çelik sektörünün varlığı ve büyüklüğü ülkelerin refah, ekonomik, sosyal ve gelişim açısında çok büyük bir öneme sahip olmaktadır.



Şekil 1.1. 2017 yılı dünya çelik üretiminin ülkelere göre dağılımı

Dünya genelinde artan çelik ihtiyacı birçok gelişmiş ve gelişmekte olan ülkelerin bu sektöre yatırımlar yapmasına neden olmaktadır. 2017 yılında gerçekleşen çelik üretiminde Çin dünya geneli üretim değerlerinde ki üstünlüğü ekonomik alanda dünya da ki en büyük iki ekonomiden biri olmasında büyük rol oynamaktadır.

Çelik üretiminin artması talep ile doğru orantılı olup artan talep miktarı ise diğer sektörlerinde büyüdüğüne işaret edebilmektedir. Beyaz eşya, otomotiv, inşaat, sağlık gibi birçok sektörde büyüme yaşandığı ve dünyanın artan nüfusuna paralel üretim ve hizmet sektörünün de büyüdüğü görülebilmektedir.



Şekil 1.2. 2018 yılı dünya çelik üretiminin ülkelere göre dağılımı

Türkiye çelik sektörü, 2018 yılında dünya genelinde ki 65 adet çelik üreten ülke arasında 8.sırada yer almaktadır. Avrupa’da yer alan çelik üreticilerine bakıldığında ise Türkiye çelik üretiminde 2.sırada yer almakta olup Avrupa’nın en büyük çelik üreticilerinden biri konumundadır. Türkiye’nin 2018 verileri baz alındığında bulunduğu bu pozisyonu 2016 yılından itibaren korumaktadır. 2016 yılı son 6 ayından itibaren geçerli olmak üzere küresel ekonomi ve tüketim olarak gerçekleşen canlanma 2016 yılından sonra da devam etmiştir. 2018 yılında demir çelik sektörü için gerileme olmuş ve sektörde %0,6’lık bir daralma meydana gelmiştir.

Hammadde olan demir cevheri veya hurda metallerin yüksek sıcaklıklarda ergitilip karbon(C) oranını göre çelik elde eden sektöre demir-çelik sektörü denir. Dünyada ve Türkiye’de ham çelik üretimi için demir cevheri kullanan Entegre Demir Çelik (BOF) tesisleri ile hurdadan üretim yapan İndüksiyon ve Elektrik Ark Ocaklı (EAF) tesisleri bulunmaktadır. Demir çelik sektörünün üretimin çoğunluğu hurda metal kullanılarak elde

edilmektedir.

Türkiye’de 2018 yılı itibariyle, demir cevherinden üretim yapan 3 adet Entegre Demir Çelik tesisi ile hurdadan üretim yapan 31 adet İndüksiyon ve Elektrik Ark Ocaklı tesis bulunmaktadır. 2018 yılı itibarıyla, 51,8 milyon tonluk ham çelik kapasitesinin 39,4 milyon tonu hurdadan, 12,4 milyon tonu ise demir cevherinden üretim yapan tesislere aittir [3].

Çelik dünyada otomotiv, beyaz eşya, sağlık, inşaat gibi birçok alanda kullanılmaktadır. Kullanım alanının geniş olduğu bu sektörde arz miktarda buna göre gelişmektedir. Bu yüzden ülkemizde ve dünyada bulunan çelik üreticileri birçok alana hizmet vermektedir.

Demir-Çelik Sektöründe çelik üretimi üç ana metotla yapılmaktadır:

1) Bazik Oksijen Konvertörleri (BOF) , 2) Siemens- Martin ocakları (OHF), 3) Elektrik Ark Ocakları (EAO) ile çelik üretimidir [4].

Demir ve çelik sektörü entegre sanayi kuruluşları, demir elde etmek için yakıt olarak kullanılacak hammadden, slab, kütük ve sac nihai ürünü elde edene kadar geçen tüm süreçlerin bulunduğu tesislerdir. Entegre demir-çelik kuruluşlarında çelik üretimi için gerekli sıvı demir malzemesinin üretimi yüksek fırınlarda gerçekleşir.

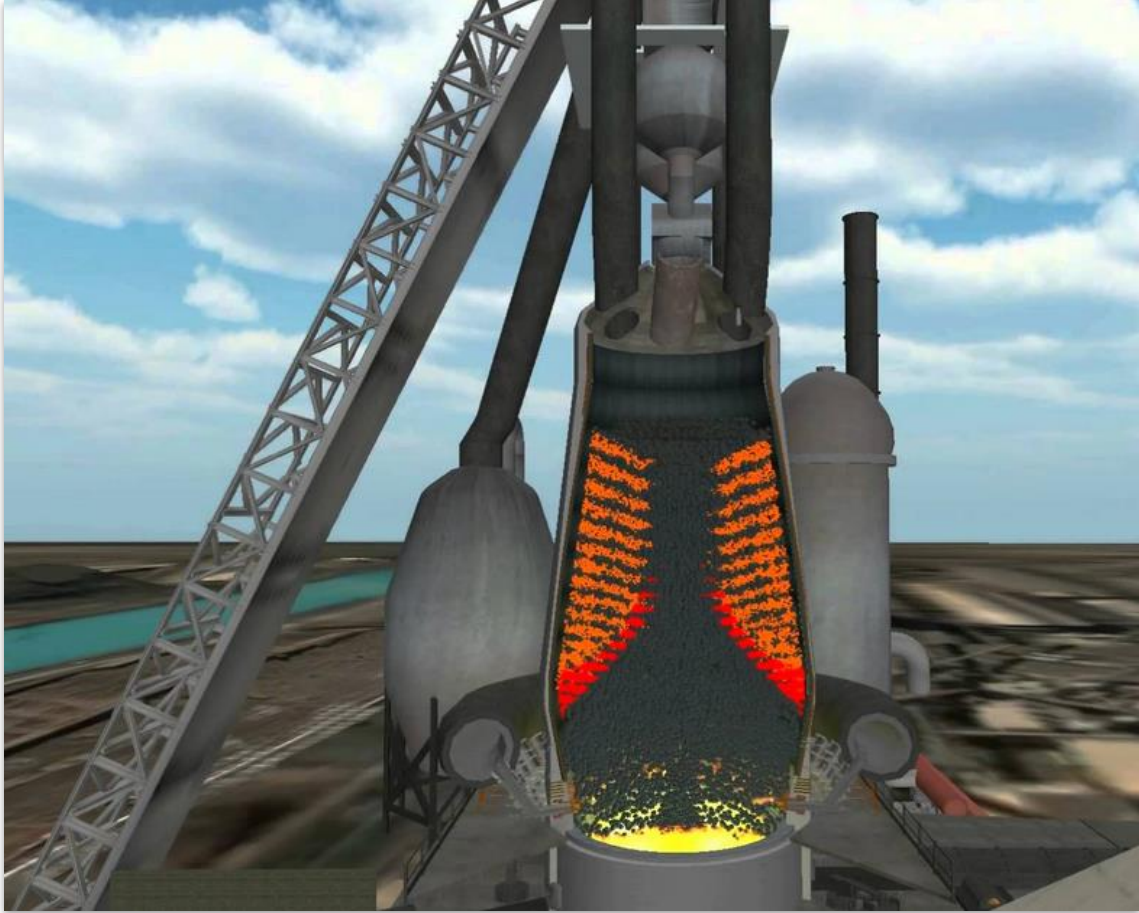
## 1.2. Yüksek Fırın Prosesi

Yüksek fırınlar, geçmişten günümüze kadar gelen sıvı ham demir üretimini sağlayan tesislerdir. Yüksek fırın prosesi sıvı ham demir elde edilene kadar birçok aşamadan geçmektedir.

Demir içerikli hammaddeler olan sinter, pelet ve cevherin, kok yakıtı ve diğer yardımcı hammaddeler ile bir arada ergitilmesinde kullanılan, içerisinde gerçekleşen kimyasal reaksiyonlar sonucu C (karbon) ve CO (karbon monoksit) demirli malzemeyi redüklemesi ile oluşan ısı ile birlikte sıvı ham demirin üretildiği fırınlara Yüksek Fırın denir.

Yüksek Fırın prosesi basınçlı bir kaba benzetilebilir. Böyle bir sistemde yüksek fırın içerisinde devam eden reaksiyonların görülmesi veya izlenilmesi alınan nihai ürün ve yan ürün parametrelerinden anlaşılmaktadır. Yüksek fırın sıcaklığı proses açısından en kritik değerdir. Sıvı ham demirin akışkanlığı ve çelikhane tarafında çelik eldesi için gereken optimum sıcaklık değerlerine göre yüksek fırın prosesi yönetilmektedir. Aynı zamanda elde edilen cürufun kimyasal ve sıcaklık değerleri yüksek fırın prosesinin ihtiyaç duyduğu müdahalelerin yapılmasında yol gösterici olabilmektedir. Proses olarak takibi yüksek fırın içerisinde göz ile gözlemlene yapılması imkânsız olduğundan girdi ve çıktı parametrelerine

göre proses yönetilmektedir. Şekil 1.3 'de görüldüğü üzere yüksek fırın içerisinde hammadde dağılımı katmanlar halinde yapılmaktadır. Her katma içeriğinde farklı oranlarda cevher, demirli malzeme, sinter ve yakıt (kömür) bulunur. Yüksek basınçlarda yüksek fırının içine verilen hava bu yakıt ve hammadde katmanları ile reaksiyona girerek yüksek fırın nihai ürünü olan sıvı ham demirin üretilmesini sağlamaktadır.



Şekil 1.3. Yüksek Fırın kesiti

Dünya genelinde şu an faaliyette olan yaklaşık 3000 adet yüksek fırın bulunmaktadır. Yüksek fırınların büyüklükleri çalışma hacimleri ve toplam hacimleri ile tanımlanmaktadır. Dünya da  $100 \text{ m}^3$  ile  $6000 \text{ m}^3$  arasında toplam kapasiteye sahip yüksek fırınlar bulunmaktadır.

Genel kabul olarak; Mini fırın:  $500 \text{ m}^3$ 'ten küçük, küçük fırın:  $500 \text{ m}^3$  ile  $2500 \text{ m}^3$  arası, orta ölçekli fırın:  $2500 \text{ m}^3$  ile  $4000 \text{ m}^3$  arası, Büyük ölçekli fırın:  $4000 \text{ m}^3$  ve üzeri şeklindedir [5].

Yüksek fırın prosesi Şekil 1.3'de görüldüğü üzere; ürün eldesi için kullanılan hammadde (sinter ürünü) ve yakıtın taşınmasını ve yüksek fırına aktarılmasını sağlayan şarj, Resim

1.1’de gösterilen yüksek fırın içine alınan hammadde ve yakıtın ergitilmesi için kullanılan ısının eldesini sağlayan sobalar, yüksek fırın içine şarj malzemesinin prosese göre aktarımını sağlayan BLT(Bell Less Top), yüksek fırın haznesi, dökümhane ve cüruf granüle sistemlerinden oluşur.



Resim 1.1. Yüksek Fırın sobalar sistemi [6]

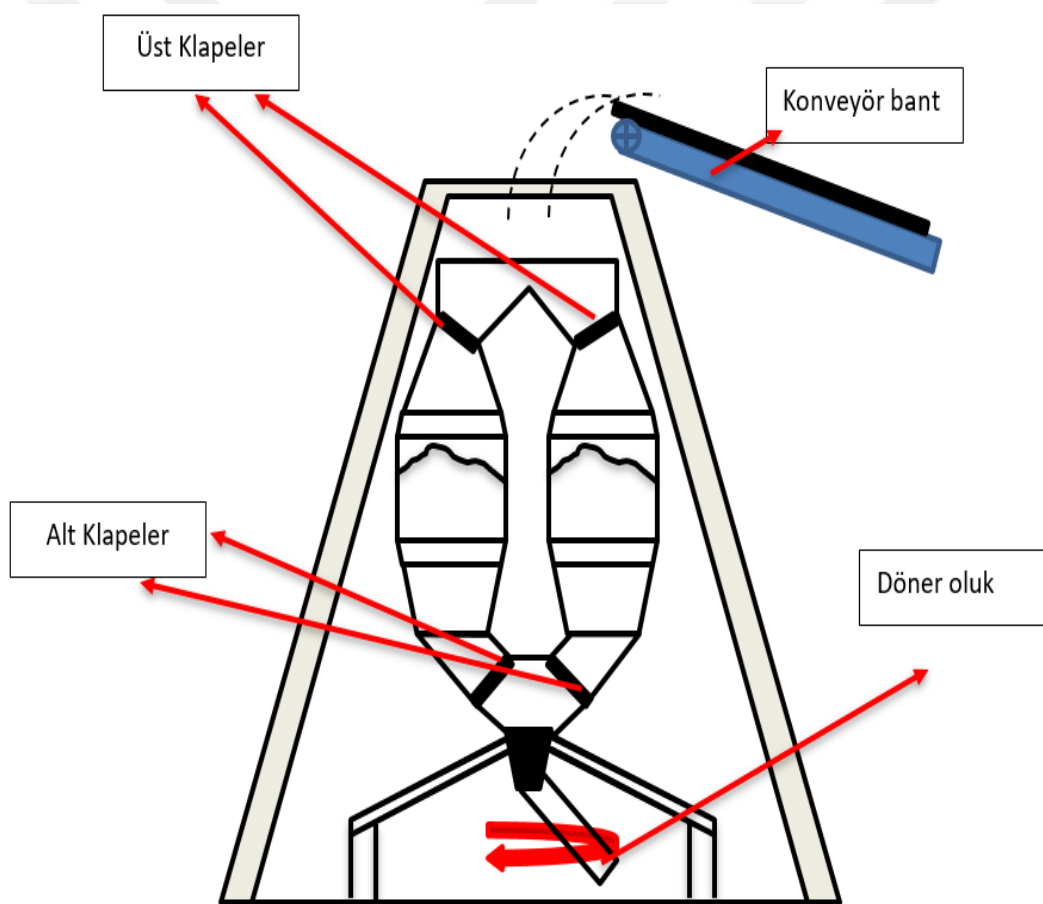
Yüksek fırın prosesinde şarj malzemelerinin yüksek fırına aktarımı bazı sistemlerde konveyör bantlar ile yapılırken Resim 1.2’de gösterilen bazı sistemlerde ise “skip (geçiş) arabası” adı verilen sistemlerle yapılır.



Resim 1.2. Skip (geçiş) arabası [7]

Konveyör sistemler uzun konveyör bantlardan oluşarak hammadde ve yakıt bunkerlerinin altından geçer, buralarda ihtiyaç olan yakıt ve cevheri bant üzerinden yüksek fırın BLT sistemine aktarır. Konveyör bant sistemleri tambur, bant ve yataklardan oluşur. Skip arabalı şarj sistemi ise konveyör bant sisteminde ki bunker mekanizması aynı olup tek farklılık aktarım şeklidir. Bu sistemde skip arabaları şarj manipülasyonu direk yüksek fırın BLT ’ye zemin kottan yüksek fırın tepe kotuna eğik düzlem ray üzerinden halatlar ile yapar. Motorlardan büyük skip redüktörlerine aktarılan güç kasnak mekanizmalarından skip arabalarının yüksek fırın tepesine hammadde ve cevher taşınmasını sağlar. Skip arabalı şarj sisteminde 2 adet skip arabası bulunur. Yüksek fırın tepe BLT sistemi fırın içerisine şarjın

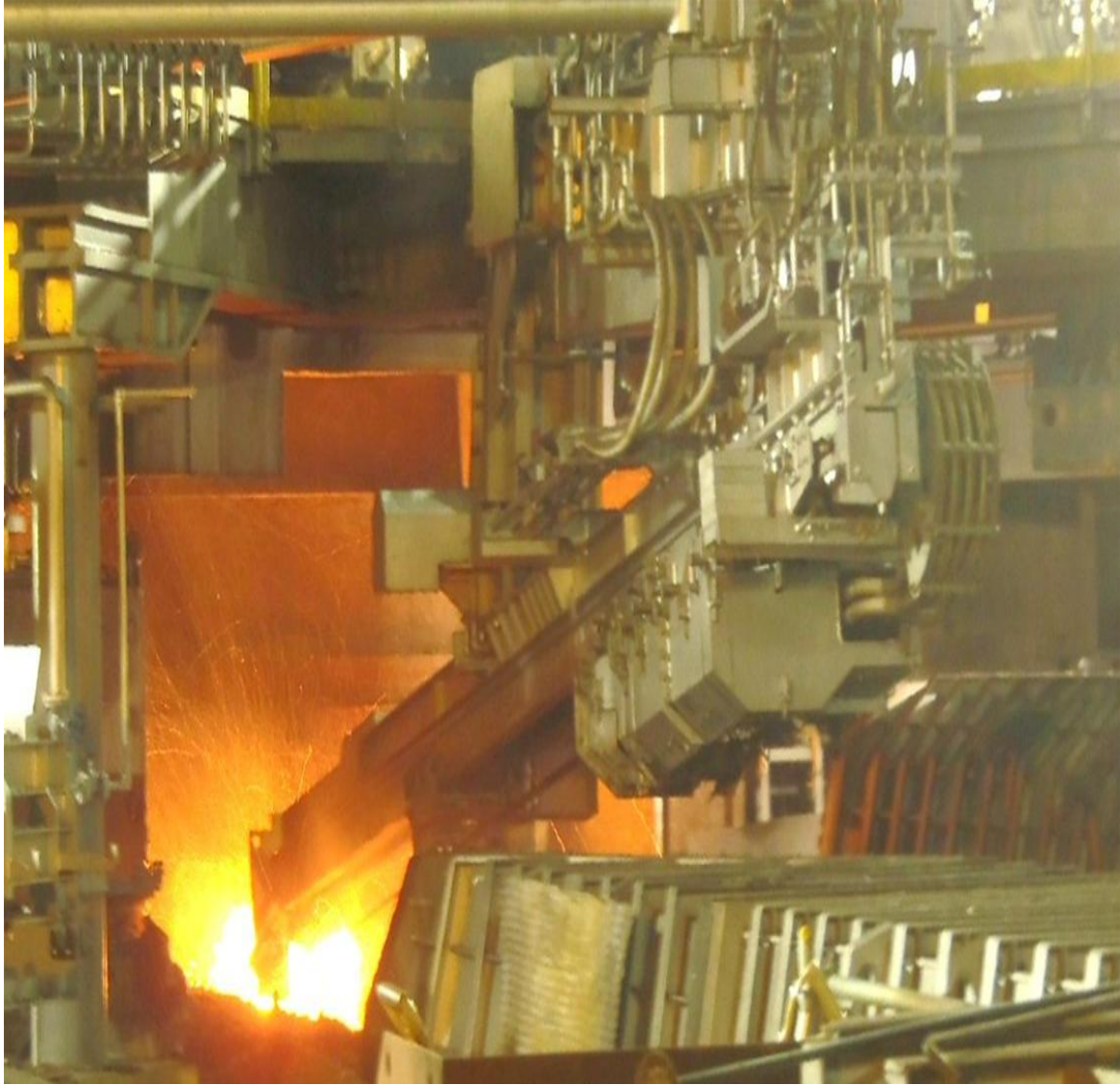
hangi aralıklarla ve proses gereği yakıt ve cevherin fırın içine gerekli şarjını düzenler. Yüksek fırın tepe BLT sistemleri kabul hunisi, hopper, dişli kutusu ve döner oluktan oluşur. Kabul hunisi skip arabalarından veya konveyör bantlar ile aktarılan şarj malzemesinin ilk döküldüğü yerdir. Burada alt hopper ile bağlantısını sızdırmazlıkları çok yüksek olan hidrolik tahrikli klapeler ile sağlanır. Üst kabul hunisi klapeleri hopper iç basıncı atmosfer basıncı ile eşitlendiğinde açılır, malzeme hopper içine alınır ve daha sonra klapeler kapatır. Hopperde bulunan malzeme daha sonra fırın içine aktarılması için yüksek fırın tepe basıncı ile hopper iç basıncı dengeleme valfleri ile eşitlenerek fırın içine aktarılır. Aktarımı yapılan şarj malzemesi fırın için belli açılarda aktarılır. Bu şekilde ki aktarımı tepe sistemine bağlı x, y, z eksenlerinde 360° dönebilen oluk vasıtası ile sağlanır.



Şekil 1.4. BLT şarj sistemi

Yüksek fırına şarjı yapılan yakıt, sobalar sisteminde ısıtılan sıcak hava yolu ile ısı enerjisi açığa çıkarılır. Soba sisteminden gelen sıcak hava, yüksek fırın içine “tüyer” adı verilen sıcak havanın fırın içine aktarımını sağlayan yüksek fırın hacmine göre sayısı değişiklik gösteren ekipmanlar ile aktarılır. Tüyerlerden aktarılan sıcak hava çıkış sıcaklığına ve proses

ihtiyacına göre ek olarak PCI (Pulverize kömür enjeksiyonu) ve doğal gazda verilerek fırın iç sıcaklığı artırılır. Yüksek fırın içerisinde ergiyen hammadde yaklaşık 1400C° olarak döküm deliğinden sıvı ham demir olarak alınır. Her döküm süresi ve döküm aralarında ki süre fırın hacmi ve hammadde çeşidine göre değişmektedir. Bu yüzden birçok parametre burada devreye girerek döküm sürelerinde belirleyici rol alır. Dökümün alınma işlemi Resim 1.3’de gösterilen “Matkap” adı verilen ekipmanlar ile yapılır.



Resim 1.3. Yüksek Fırın Döküm açma matkabı [8]

Matkap ekipmanı, döküm deliklerinde bulunan ve refrakter özellikli bölgeyi ısıya dayanıklı elmas uçlu matkap çubukları ile yaklaşık 150 bar hidrolik yağ basıncı kullanarak döndürme kuvveti ile deler ve sıvı ham demir yüksek fırın iç basıncının da etkisi ile açılan bu delikten akar. Döküm alma işleminin ardından döküm deliğinin kapatılması işlemi ise “Çamurtopu” adı verilen ekipmanlar vasıtası ile yapılır. Çamurtopu sistemi, hidrolik yağ basıncına göre



çalışmakta olup yüksek basınçlı hidrolik sistem ile yüksek fırın döküm deliğine refrakter özellikli malzeme enjeksiyonu yaparak fırının kapatma işlemini gerçekleştirir.

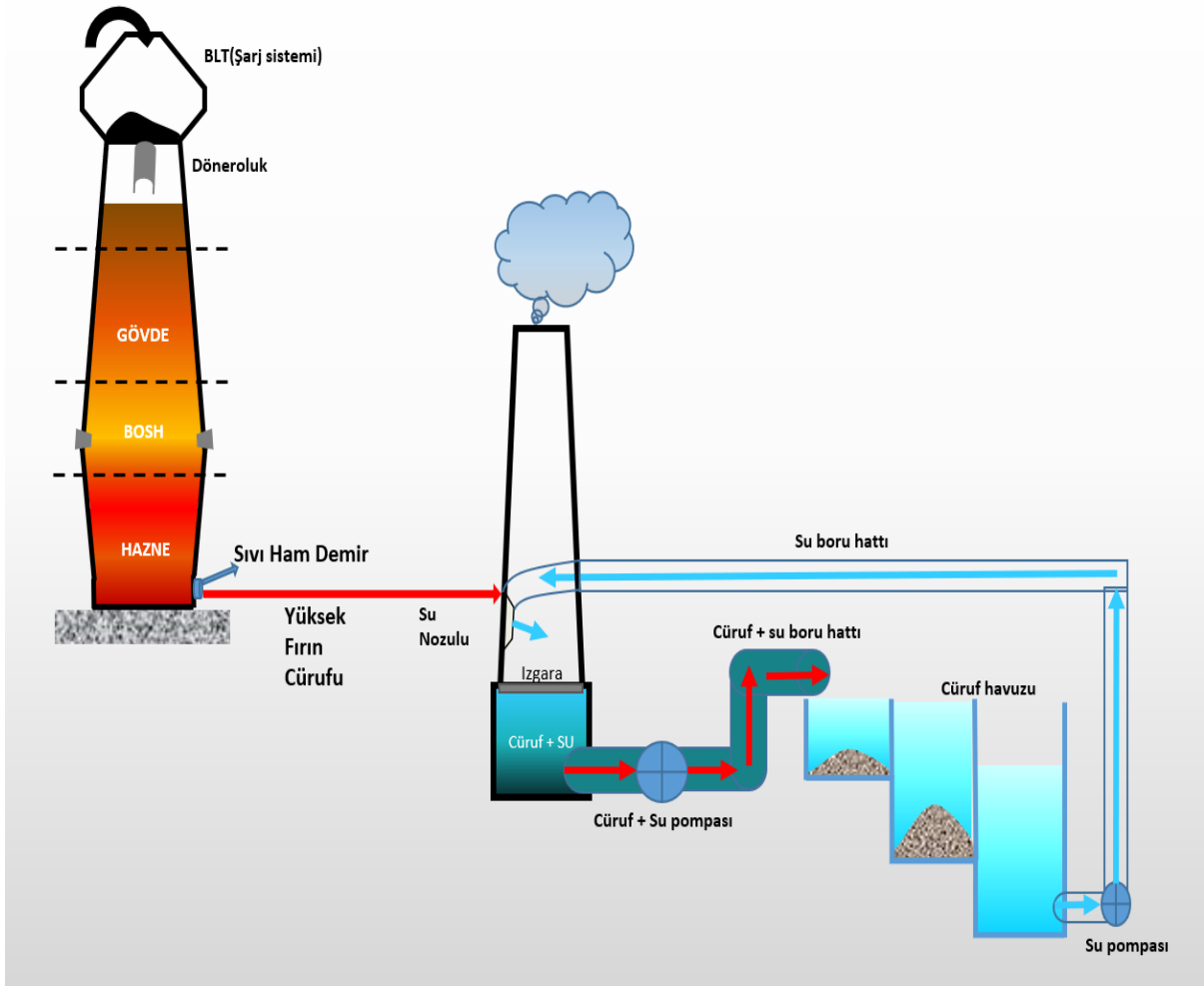
Elde edilen sıvı ham demir, dökümhanede bulunan kanallar vasıtası ile torpidolara akar. Bu kısımdan önce sıvı ham demirin içeriğinde bulunan ve çelikhane üretimini etkileyebilecek yüksek fırın cürufu sıvı ham demirden olabildiğince ayrışması yine döküm kanallarının birbirine göre olan kot farkı aracılığı ile sağlanır. Torpidolara dolan sıvı ham demir lokomotifler ile çelikhane tesisine gönderilir. Sıvı ham demirden ayrışan cüruf ise granüle sistemine aktarılarak sıcak cüruf yüksek fırın yan ürünü olarak granüle edilir. Bu çalışmada bahsedilen yüksek fırın cürufu, kimyasal içeriği ve yapısı olarak çimento endüstrisinde hammadde olarak kullanılır.

### **1.3. Yüksek Fırın Cürufu**

Yüksek Fırın sisteminde sıvı ham demir elde edilir. Elde edilen sıvı ham demir ile beraber yan ürünler de oluşur. Bu yan ürünler arasında yüksek fırın gazı ve yüksek fırın cürufu yer almaktadır. Yüksek fırın gazı üretim sonrasında scrubber (gaz temizleme) sistemlerinde sulu temizleme yapılarak temizlenir ve daha sonra yakıt olarak tekrar kullanılır.

Yüksek fırın cürufu ise sıcak ve sıvı halini koruduğunda granülasyon işlemi yapılarak soğuyarak tanecik boyutuna getirilir.

Yüksek fırınlarda elde edilen granüle cüruf kimyasal yapısından dolayı çimento endüstrisinde kullanılır. Yüksek fırın cürufu içeriğinde yüksek miktarda  $SiO_2$  ve  $CaO$  vardır. Soğuma hızına göre yüksek camsı yapıdadır ve sıvı ham demire göre kırılabilirliği fazladır. Genel olarak yüksek fırın prosesinde elde edilen cüruf Şekil 1.5’de görüldüğü üzere su ile granüle edilerek geri dönüştürülür.



Şekil 1.5. Havuz Tipi Sulu Cüruf Granülasyon

Yüksek fırınlarda cürufun su ile granüle işlemini iki farklı şekilde yapılmaktadır.

- 1) Havuz Tipi Sulu Cüruf Granülasyon Yöntemi
- 2) İnba sistemidir.

Her iki sistemde de su kullanılmakta olup cürufun taşınma işleminde farklılıklar vardır. Aynı zamanda kullanımı henüz olmayan ancak modelleme ve deney çalışmaları süren Kuru Cüruf Granülasyon işlemi de bulunmaktadır. Bu sistem DSG (Dry Slag Granulation) olarak adlandırılmaktadır. Bu tezde de konu olarak, kuru cüruf granülasyon yöntemi ve geleneksel yöntem olan sulu cüruf granülasyon yönteminin farklılıkları, iki yöntem arasında ki avantajları-dezavantajları ve yöntemler arası enerji geri kazanım boyutları incelenmiştir.

### 1.3.1. Havuz tipi sulu cüruf granülasyon yöntemi

Şekil 1.5' de gösterilen granüle bacası içinde granüle işleminin yapılp, ağır hizmet tipi pompalar ile su ve cüruf karışımının havuzlara basıldığı sistemlerdir.

Sistem, sıvı ham demir ile cürufun ayrışarak döküm kanalları yolu ile cüruf granüle tankı içerisine aktarılır, tank içerisine sıvı cüruf serbest düşme yaparak cüruf kanalı ağzında bulunan basınçlı su ile temas eder ve granüle hale gelir. Granüle cüruf tank dibinde çöker ve burada bulunan pompalar ile granüle havuzlarına basılır.

Granüle havuz bu tip sistemlerde kademeli olarak tasarlanmıştır. Her kademe boyunca cüruf çöker, su üstte kalır ve cüruf ile su ayrışır. Ayrışan su havuzun son kademesinde bulunan pompalar ile tekrar granüle işleminin başladığı tanka basılır ve bu döngü tekrarlanarak devam eder. Havuz kısmında biriken granüle cüruf ise kepçeli vinçler yolu ile havuzdan alınıp bekleme alanına aktarılır.

Bu tip yöntemlerde cüruf ani olarak soğuma gerçekleştirdiğinden kristal yapıları çok hızlı oluşmaktadır. Bu nedenle granüle cürufun belirli bir tanecik boyutu ve iç yapısında belirli bir boyutta kristal yapı bulunmaz.

Cüruf miktarı malzemeye bağlıdır. 1 ton sıcak metalden yaklaşık 200-600 kg cüruf elde edilmektedir [9]. Sulu cüruf granüle sistemlerine sahip bir yüksek fırında üretilen sıvı ham demir miktarına göre elde edilecek cüruf için yüksek oranlarda su kullanılmaktadır. Kullanılan su geri dönüşümü yapılarak kullanılmasına rağmen sıcak cüruf ile teması sırasında suyun bir bölümü buharlaşmakta ve bu buharın bazı sistemlerde geri kazanımı da yapılamamaktadır.

Sulu ile cüruf granülasyon yönteminden elde edilen granüle cürufun kimyasal yapısı incelendiğinde, %0,5-0,8 FeO, %35-42 CaO, %35-40 SiO<sub>2</sub>, %8-9 MgO, %8-15 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, %0,3-1,0 MnO ve %0,7-1,5 S içermektedir [9].

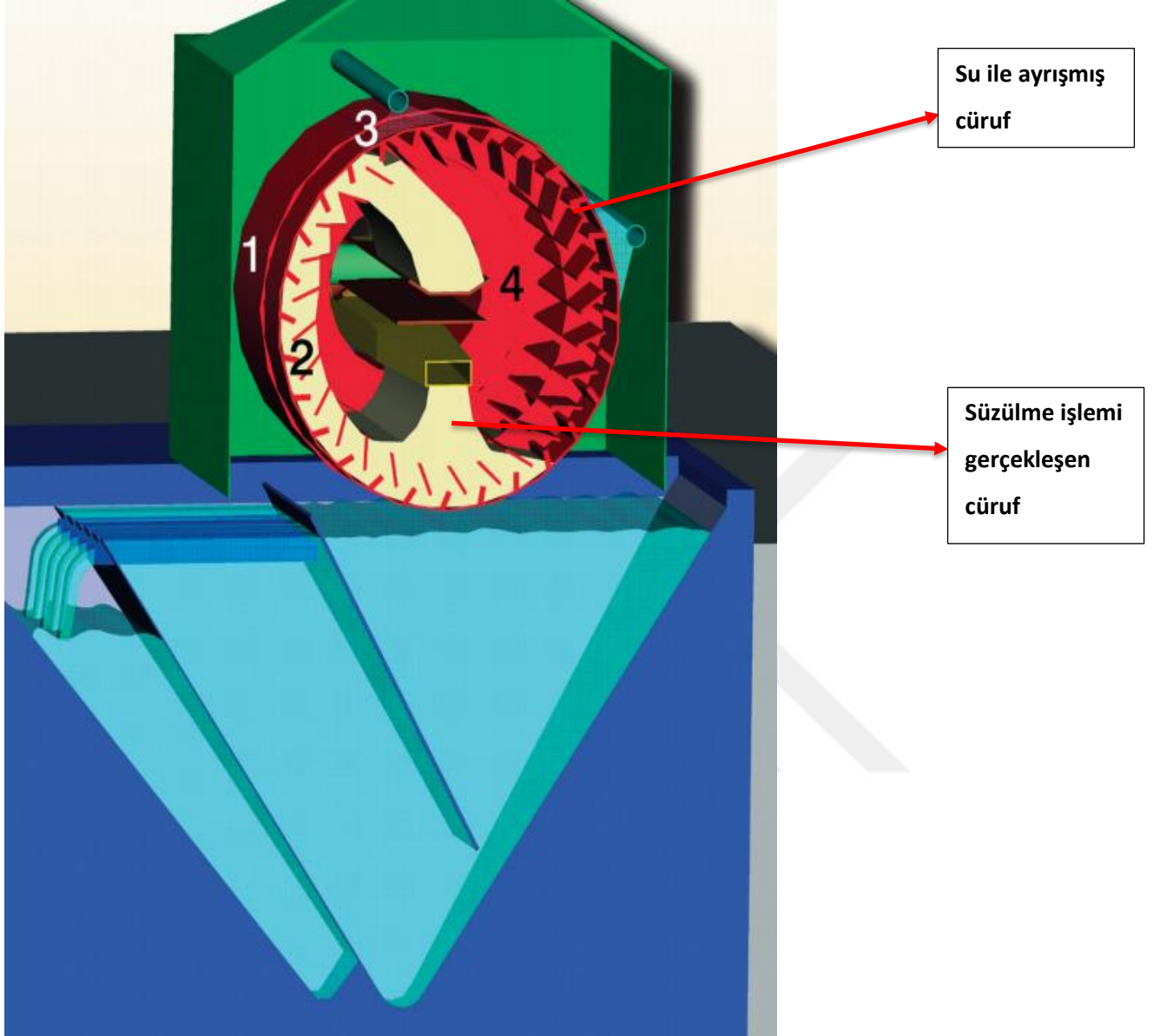
Endüstrileşmenin artmasıyla birlikte metalürjik cüruflar için düzenli depolama sahaları gerekmekte ve bertaraf maliyetleri artmaktadır. Atık malzemelerle dolan sahalar hava, toprak ve su kirliliği yaratan kirlilik kaynağı oluşturmaktadır. Bu etkenler insan sağlığını ve bitki büyümesini etkilemektedir [9]. Cürufu granüle hale getirme işleminde cüruf tonajına bağlı olarak su sarfiyatı değişmektedir.

### **1.3.2. İnba sistemi cüruf granülasyon yöntemi**

Yüksek fırınlarda sıcak cürufu baca içerisinde basınçlı su ile granüle hale getirilip daha sonra su ve granüle cüruf karışımını elekli tamburlarda konveyör bant yardımı ile süzülüp süzülen granüle cürufun yine aynı konveyör bant yolu ile cüruf sahasına taşındığı sistemlerdir.

İnba sistemlerinde su sarfiyatı diğer sulu granülasyon sistemlerine göre daha azdır. Granüle

cüruf içerisinde ki su süzülerek tekrar olarak kullanılmaktadır.



Şekil 1.6. İna Sistemi [10]

Şekil 1.6'da verilen İna sisteminde; 1 numara ile gösterilen kısım tambur, 2 numara ile belirtilen kısım tambur kanat yapısı, 3 numara ile belirtilen kısım cürufun tane boyutundan daha küçük gözeneklere sahip elek sistemidir. Bu elek sistemi sayesinde dönen tambur içinde ki cüruf süzülme işlemi gerçekleşmektedir, süzülen su ise elek gözeneklerinden geçerek tambur altında bulunan su haznesine dolmaktadır. 4 numara ile belirtilen kısım süzülen cürufun tamburun dönme kuvveti ile yukardan aşağıya düştüğü bant yoludur.

Cüruf kimyasal yapısı bakımından diğer havuz tip granüle işleminde ki kimyasal yapısı ile aynıdır. Tek farklılık granüle cürufun elekli tambur ile süzülüp konveyör sistem ile aktarımının yapılmasıdır.



Resim 1.4. Su ile granüle edilmiş cüruf görüntüsü

### 1.3.3. Kuru cüruf granülasyonu (DSG Teknolojisi)

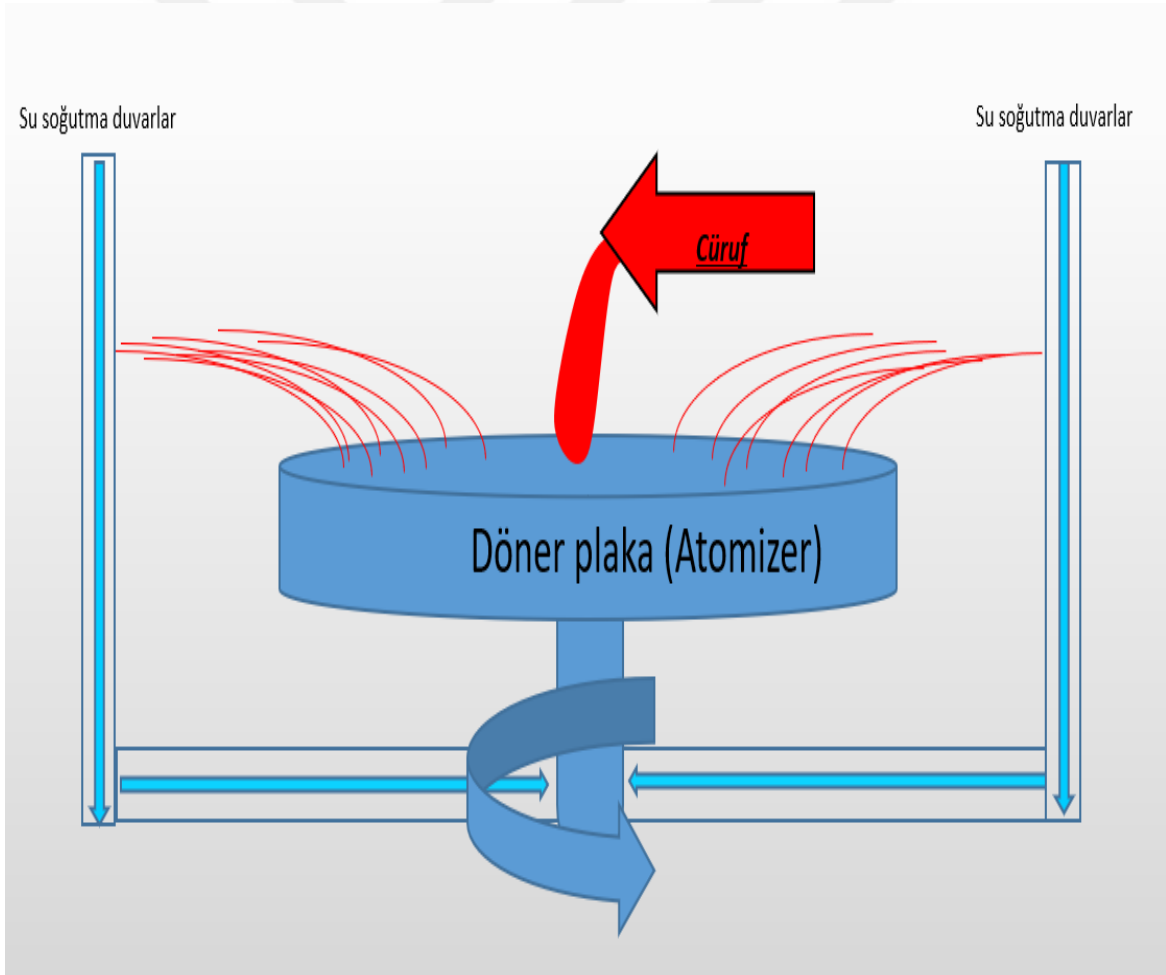
Yüksek Fırın cürufu dünya çapında su ile granüle sistemlerden elde edilir. Yüksek basınçlı su yardımı ile cüruf partikül haline gelir ve daha sonra granüle haldeki cüruf başlıca çimento fabrikalarında kullanılır. 1400 ° C sıcaklıktaki cüruf, granülasyon işlemi sonunda 100 ° C'ye düşer. Sulu granülasyon işleminde su ve enerji tüketimi yüksek olduğundan kuru granüle sistemlerde yoğunlaşmıştır. Kuru granülasyon yönetimi sıcak cürufun yüksek devirlerde dönen tambur üzerinden hava ile granüle edilme yöntemidir. Bu yöntem ile yapılan deneyler sonucunda granüle halindeki cürufun daha stabil bir boyuta sahip olduğu gözlemlenmiş ve cürufun ısı enerjisinin geri kazanılabileceği öngörülmektedir.

Kuru granülasyon işleminde sıcak cüruf yüksek devirlerde dönen bir plaka üzerine akar ve

yüksek devirde dönen plakaya teması sonrası merkezkaç kuvvetinin etkisi ile sıcak cüruf partikül halinde savrulur. Bu sırada partikül hale gelen cüruf tanecikli yapıya sahip olur ve granüle hale gelerek soğur.

Kuru granülasyon sistemi, cüruf partikülleri üretildiği gibi daha sonra arka arkaya ısı eşanjöründe hava ile soğutulurken, sıcak hava başka alanlar için de kullanılabilir. DSG teknolojisi, geleneksel sulu söndürme yöntemini mevcut ikilemden kurtarmaya yardımcı olan cüruf arıtma işlemlerinden biri olarak kabul edilmiştir, yani ekstra enerji ve su tüketimi, kirlilik emisyonları ve yüksek dereceli ısı kaybı yoktur [11].

Şekil 1.5.'de görüldüğü üzere atomizer olarak adlandırılan plakaya sıcak cüruf serbest düşme yapar. Atomizer plaka açışal hızın etkisinden dolayı sıcak cüruf merkezkaç kuvveti ile partikül haline gelemektedir. Partikül cüruf sistem içerisinde bulunan soğutma suyu geçen yan duvarlara çarparak soğur.



Şekil 1.7. Kuru cüruf granülasyonu atomizer (plaka) gösterimi

#### 1.4. Yüksek Fırın Cürufunun Kullanım Alanları

Yüksek fırın cürufu çimento endüstrisinde hammadde olarak kullanılmaktadır. Çimento endüstrisinden kullanılan granüle cüruf hem çimento kalitesine pozitif yönde etki etmekte hem de çevre konusunda geri dönüştürülüp hammadde olarak kullanıldığından ve çimento üretimi sırasında oluşan emisyon oranını azalttığından çevreye de olumlu bir katkı sağlamaktadır.

Yapılarda kullanılacak betonların içeriğinde ki granüle yüksek fırın cürufu betonun işlenebilirliğini arttırmakta ve kullanımını kolaylaştırmaktadır. Yüksek fırın cürufu sertleşmemiş betonun katılma süresini uzatmaktadır, bu durum hazır beton çimentolarının nakliyesinde verim sağlamaktadır. Cürufun camsı yapısından kaynaklı olarak sertleşmiş betonun su geçirme oranını ve terlemeyi azaltmaktadır [12].

Yüksek fırın cürufunda üretilen çimentolar; Baraj inşaatlarında, altyapı inşaatlarında (kanalizasyon, kuyu vb.) ve yollarda ( otoyol, havaalanları vb.) kullanılmaktadır.

Bu çalışmada, yüksek fırın prosesi incelenmiş, cüruf granülasyon sistemleri ve atık ısının geri kazanımı üzerine çalışmalar yapılmıştır ayrıca cüruf granülasyon sistemleri ile ilgili makaleler ve literatür çalışmaları derlenmiştir. Elde edilen bilgiler ışığında; kuru cüruf granülasyon yöntemi ile yapılan çalışmaların, sulu cüruf granülasyon yöntemi ile yapılan çalışmaların sonucu ile karşılaştırılmadığı görülmüştür. Bu çalışmada bu yüzden iki yöntem arasında ki farklılıklar incelenecek olup sulu granülasyon işleminin deney sonuçları ile kuru granülasyon yönteminin incelendiği literatür çalışmalarından faydalanılarak her iki yöntem arasında karşılaştırmalar yapılmıştır.

## 2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Yüksek fırın çelik için gerekli olan demirin elde edildiği kompleks sistemlerdir. Bu sistemler geçmişten günümüze cevherden demir üretimini sağlamaktadır. Destanlarda veya arkeolojik çalışmalarda geçmişten beri demirin kullanımını ve yüksek fırıncılığı desteklemektedir. Demirin ve yüksek fırınların tarihi incelenecek olursa; demirin kullanımının ilk olarak arkeolojik keşiflere bakıldığında Demir Çağı ile başladığı görülmektedir. Bu dönem MÖ 800 yıllarına dayanmakta olup demirin kullanımı bu dönemden itibaren başladığı düşünülmektedir. Türk toplumunda da demir kullanımı ve demirin ergitilme işlemi destanlarda konu edilmektedir. Günümüzde elde edilen verilere göre ise demirin üretimi Anadolu ve Kafkaslarda başlanıldığı düşünülmektedir [13].



Resim 2.1. Geçmişte demir üretimi [13]

Dünyada ilk yüksek fırınlarda odun kömürü kullanılarak demirin ergitilmesi sağlanmıştır. Odun kömürünün zaman içinde bulunabilirliğinin azalması ve bu neden artan maliyeti yüksek fırınlarda kok kömürünün yakıt olarak kullanılmasının 1709'da ilk kez önünü açmıştır. Dünyada ilk kok kömürü ile üretim yapan yüksek fırın Almanya'da 1796 yılında gerçekleşmiştir [13].





Şekil 2.1 .Almanya’da ki ilk kok yüksek fırını [13]

### 2.1. Demir Çelik Sektöründe Cüruf

Metal ürünlerinin ve metal bazlı cevherlerin ergitilmesi ile oluşan ve ana ergiyen malzeme içinde istenmeyen yoğunluk farkından dolayı ile de ana ergiyen malzemenin yüzeyinde oluşan genel olarak katılaşınca kırılkan ve camsı yapıda bulunan malzemelere cüruf denir [14].

Demir çelik sektöründe sıvı ham demir üretimi akabinde gerçekleşen sıvı ham çelik üretimi ve son ürün olan yassı ürüne kadar tüm aşamalarda cüruf oluşmaktadır. Üretimi yapılacak nihai ürünün kimyasal yapısında cüruf istenmeyen bir bileşimdir. Cüruf genel itibari ile yüksek miktarda CaO ve SiO<sub>2</sub> içeren bir bileşimdir. Düşük dayanımı, kırılkan ve camsı yapısından dolayı nihai ürünlerde istenen fiziksel ve kimyasal özellikleri olumsuz olarak etki

etmektedir. Bu yüzden demir çelik sektöründe üretim aşamalarında elde edilen ürünlerden cüruf ayrıştırılır. Cürufun yan ürün olarak elde edildiği sistemler;

- Alüminyum cürufu
- Çelik cürufu
- Yüksek Fırın cürufu, şeklindedir.

### 2.1.1. Alüminyum cürufu

Metalik alüminyum iki yol ile üretilmektedir;

- 1- Boksit cevherinden “Birincil alüminyum üretimi”,
- 2- Hurda metallere “İkincil alüminyum üretimi” [15].

Birincil ve ikincil alüminyum üretiminde tüm demir çelik sektöründen olduğu gibi üretim sırasında atık malzemeler oluşmaktadır. Bu atıklar alüminyum cürufları için beyaz ve siyah cüruf olarak bilinmektedir. Bu atık malzemeler içeriğinde bulunan alüminyum metalinin miktarına göre ayrıştırılmaktadır. Beyaz cüruf daha fazla alüminyum metali içeren cüruf tipi olup içeriğinde metal miktarı %15-%70 arasında değişmektedir. Kara cüruf ise %12 ile %18 arasında alüminyum metali ve alüminyum oksit karışımı içermektedir. Bu cürufun içerisinde yüksek miktarda (%40’ dan daha fazla) tuz bulunmaktadır [16].

Birincil alüminyum tesisleri; ergitme, alaşım yapma ve döküm proseslerinden oluşmaktadır. Birincil üretim ile açığa çıkan cüruflar atık olarak değil, içeriğinde ki metalik alüminyum değeri olarak ekonomik bir değere sahip yarı ürün olduğu görülmektedir. Bu cürufların ekonomik değerinin yanı sıra mevcut üretildiği tesislerde işlenmesi gerekmekte olup işlenmemesi durumunda ise çevreye zarar veren bir yapıya sahip olmaktadır [17]. Cürufun değerlendirilmesinde istenen ve beklenen en önemli konu, cürufun içeriğindeki metalik alüminyumu geri dönüştürmek ve cürufun daha tehlikesiz bir yapıya dönüştürülmesini sağlamaktır [18].

Cürufun değerlendirilmesinde uygulanan yöntemler şu şekilde sıralanabilir:

- 1-Demir-çelik sektöründe sentetik cüruf yapıcı malzemelerin (alüminyum esaslı flaks) kullanılması,
- 2-Alüminyum üretimi yapan endüstrilerin cürufun değerlendirilmesinde tuz flaksları kullanması
- 3-İkincil alümina üretiminde birincil üretimde açığa çıkan cüruflarında kullanılması,
- 4-Çimento endüstrisinde cürufların kullanılması

İkincil alüminyum yöntemi ile üretim yapan endüstriler Türkiye ‘de her geçen gün

artmaktadır. İkincil alüminyum üretiminde ergitme işleminden sonra cüruf yapıcı flaks ve gazların etkisi ile cüruf oluşumu sağlanmaktadır. İşlemlerin sonunda oluşan cüruf ise siyah alüminyum cürufu olarak adlandırılmaktadır [17].

Siyah alüminyum cürufundan metalik alüminyum geri kazanma işlemi sırasında tuzlu oranı yüksek alüminyum cürufu oluşmaktadır. Bu cürufun yapısını %5 – %10 tuz (NaCl, KCl, CaF<sub>2</sub>), %10 – %20 metalik alüminyum, %30 – %60 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve %5 – %10 diğer metal oksit ve diğer bileşikler oluşturmaktadır. Tuz oranı yüksek bu alüminyum cürufunun geri dönüşümü yapılmadan veya bertaraf edilmeden saklanması Dünya'nın birçok ülkesinde yasaklanmıştır. Birçok devlet kurumu ve çevreci sivil toplu örgütleri de bu konularda gerekli baskıları oluşturmuş ve bu konuda çevreci anlayışa göre kritik yasalar çıkarılmıştır. Dönüştürülmeden veya bertaraf edilemeden saklanan ve çevreye zarar veren bu atık gelişmiş ülkelerde geri dönüştürülerek hammadde olarak kullanmak ve ekonomik kazançlar sağlamaktadır. Bu konuda gelişmiş ülkeler sektörün kapasitesi ve ihtiyaçlarından dolayı dünyada birçok şirket kurmaktadır ve bu konu üzerine faaliyet göstermektedir [15].

### 2.1.2. Çelik cürufu

Çelik sektörü ve çelik, dünyada birçok alanda ve birçok sektörde kullanılan, dünyada finansal getiri olarak en büyük pasta dilimlerinden birine sahip olan bir sektördür. Çelik sektörü yaygın olarak bulunmakta ve üretilen çelik ise birçok alanda kullanılmaktadır. Çelik üretimi ise dünyada iki farklı şekilde yapılmaktadır :

- 1) Yüksek fırınlarda üretilen sıvı ham demirden çelik eldesi,
- 2) Hurda metallerin elektrik arkı ile ergitilerek elde edilen çelik eldesi, şeklindedir.

Bu iki farklı yöntem ile çelik ve yan ürünleri oluşur. Yüksek fırın ile sıvı ham demirden çelik üretiminde yüksek fırın cürufu ve çelikhane cürufu, elektrikli ark fırını ile hurda ile çelik üretiminde bu yönteme özel olarak çelik cürufu oluşur [14,19].

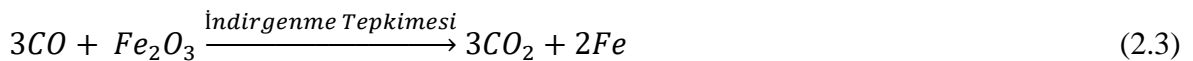
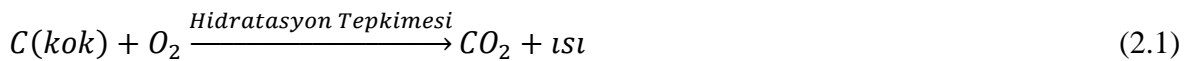
Çelik üretimi ile oluşan çelik cürufu kullanılan hammadde ve ergitme şartları sonucunda oluşmaktadır. Oluşan çelik cürufu belli bir kimyasal ve mineral bileşim aralığında bulunan sıvı ham demirden çelik eldesi sırasında oluşan bir yan üründür. Yüksek fırın cürufu ile çelikhane kısmında çelik üretimi sırasında oluşan cüruf karşılaştırıldığından Çelikhane cürufu ve Elektrik Ark Fırını üretimi sırasında oluşan cüruflar yükseltgenme (oksidasyon) ile oluşmaktadır ve bu nedenle birçok çeşitte bileşenler içermektedir [10]. Çelik cürufu CaO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MgO, FeO, MnO, SiO<sub>2</sub>, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 'den oluşmaktadır. Yüksek fırınlardan gelen

sıvı ham demir çelikhanelerde oksijen verilerek çelik haline getirilir. Bu işlemler yapılırken aynı zamanda kimyasal reaksiyonlar sonucu cüruf oluşur.

### 2.1.3. Yüksek fırın cürufu

Yüksek fırın, demir cevherinin yüksek kalorili kok ile ergitildiği ve sonucunda ürün olarak sıvı ham demir elde edilen sistemlerdir. Yüksek fırınlarda yakıt olarak kok, pci (pulvarize enjeksiyon kömürü) kullanılmakta bunlara ek olarak fırın prosesine bağlı olarak doğalgaz da verilebilmektedir. Ortalama 1000-1200 °C sıcak hava yaklaşık 2-2,5 bar basınçta fırına tüyer sistemi denilen boşluklardan verilir. Fırın içinde ki kok kömürü verilen sıcaklık ve basınçta yanarak ısı enerjisi açığa çıkarılır. Yüksek sıcaklıklarda ergime işlemi tamamlanan sıvı ham demir fırın döküm deliklerinden 1420-1450°C aralığında fırın iç basıncının da etkisi ile alınır. Akışkan sıvı ham demir döküm kanalından geçişi sırasında kanallara verilen kot farkından ve cürufun yoğunluğunun sıvı ham demire göre düşük olmasından dolayı pik cüruftan ayrılır.

Yüksek fırın cürufu, çıkış sıcaklıkları 1400 °C ile 1600 °C arasında değişen ve yaklaşık 1,76 GJ / tonluk özgül entalpisi ile demir üretim sürecinin bir yan ürünüdür [20-23]. Yüksek fırın cürufunun kimyasal özelliği ve oluşumu aşağıda ki tepkimeler sonucunda meydana gelmektedir,



Eşitlik 2.1'de demir oksitten oksijenin ayrıştırılma tepkimesi gerçekleşmekte olup, Eşitlik 2.5'de silisin demir cevherinde ayrıştırılması gösterilmektedir.

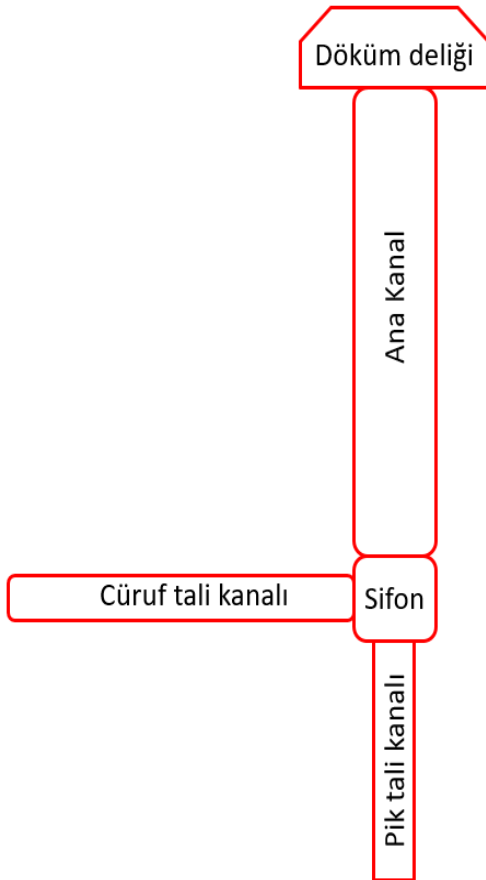
Yüksek fırın cürufu düşük miktarda demir içerip yüksek miktarda Ca ve Si içermektedir, düşük demir içerme oranından dolayı içeriğinde ki demirin geri kazanımı yapılamamaktadır [24].

Kendi halinde ortam standartlarında soğutulmuş yüksek fırın cürufunun potansiyel kullanım alanları da bulunmaktadır, bu alanlar; beton yol agregası, yol temel ve alt temel malzemesi,

kayma direnci yüksek agrega olarak kar ve buz ile mücadele, asfalt betonu agregası, demiryolu balastı, zemin iyileştirme (stabilizasyon) malzemesi, yapısal dolgularda dolgu malzemesi olarak kullanımınıdır. Yüksek fırın cürufu, tek başına bağlayıcı olmayıp ancak Portland Çimentosu ile birlikte kullanıldığında bağlayıcılık özelliği oluşan bir malzemedir. Yüksek fırın cürufunun olumlu katkılarının betonunun fiziksel ve mekanik özelliklerine neden olduğu belirtilmektedir [10].

## 2.2. Yüksek Fırın Cürufunun Granülasyon Yöntemleri

Yüksek Fırın sistemi entegre demir-çelik endüstrilerinde sıvı ham demirin cevher demir, yakıt ve diğer girdi bileşenler ile yaklaşık 1200°C ile 1500 °C aralığında bir ısı enerjisi ile ergitildiği sistemlerdir. Yüksek fırın ana ürünü olan sıvı ham demir üretimi ile beraber yan ürün olarak yüksek fırın cürufu da yan ürün olarak elde edilir. Sıvı ham demir ile cürufun ayrışma işlemi, cüruf yoğunluğunun sıvı ham demirden düşük olmasından dolayı döküm kanalı içinde ki eriyik malzeme üzerinden cüruf döküm kanallarının yükseklik farkından faydalanılarak ayrıştırılır.

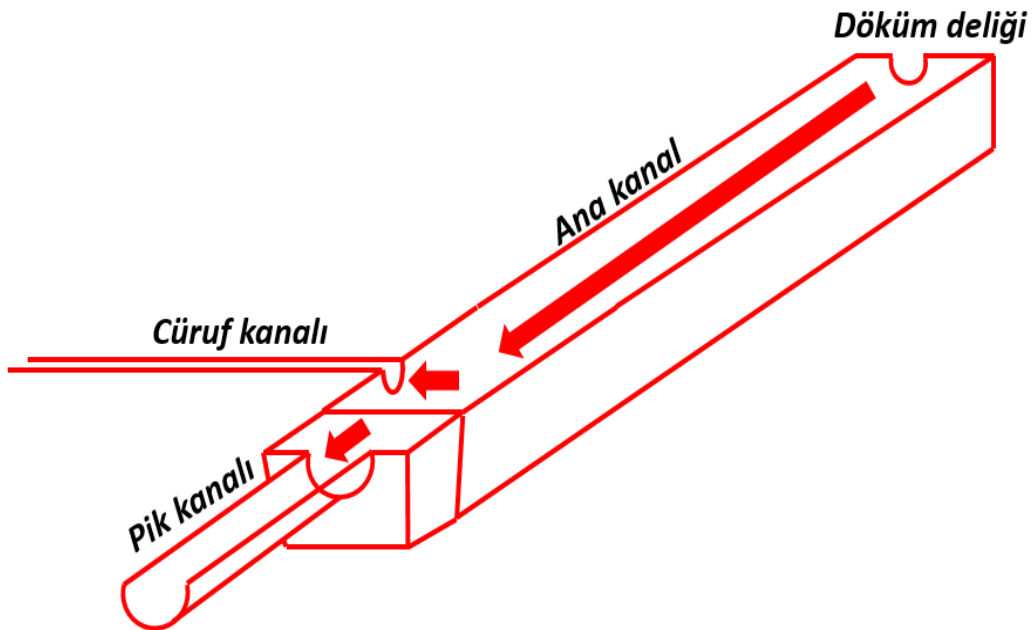


Şekil 2.2. Yüksek Fırın döküm kanalı görünümü

Şekil 2.2’de gösterilen kanallar özel refrakter beton ile dökülerek hazırlanır. Kanalların boyutu fırın hazne hacmine ve dökümhane alanına göre değişiklik göstermektedir. Genel anlamda yüksek fırın kanalları 3 ana bölgeden oluşur;

- 1) Ana Kanal
- 2) Sifon bölgesi
- 3) Tali Kanallar (cüruf, pik)

Ana kanal içerisinde geçen pik ve cüruf karışımı cürufun yoğunluk farkından dolayı cüruf kanalına ayrışır, cüruftan ayrılan pik ise sifon bölgesini doldurup pik kanalına akar. Akış devamında pik torpidolara aktarılıp çelikhaneye gönderilmektedir. Ana kanal ve diğer tali kanalların hacimleri buldukları yüksek fırının kapasitesine göre farklılık göstermektedir. Yüksek fırın kapasitesinin artması ile sahip olduğu döküm kanallarının da hacim ve boyları değişmektedir. Şekil 2.3’te yüksek fırın döküm kanallarının 3 boyutlu görünüşü gösterilmiştir.



Şekil 2.3. Yüksek Fırın döküm kanalı 3 boyutlu görünüm

Yüksek fırın cürufu bazı sistemlerde veya acil durumlarda granüle edilmeden de kullanılabilir. Burada belirtilen acil durumlar, granüle sisteminde yaşanabilecek arıza

veya duruşlar, cüruf kanallarında yaşanabilecek sorunlar ve yüksek fırın prosesinden kaynaklanan problem olarak düşünülebilir. Bu acil durumlarda cüruf granüle edilmeden yüksek fırının imdat havuzu olarak adlandırılan ve acil durumlarda cüruf için kullanılan kısımlara akmaktadır. Sonrasında ise atmosfer şartlarında soğuyan ve katılaştan cüruf kırılarak büyük kütleler halinde temizlenmektedir. Aynı zamanda suya daldırma yöntemi ile granüle, basınçlı hava kullanılarak cürufun granüle edilmesi gibi yöntemlerde bulunmaktadır. Granülasyon işlemlerinde cüruf hızlı soğur ve kristal yapı oluşturmamaktadır. Bu yüzden granüle cüruf yapısı incelendiğinde atomik olarak camsı yapıda olduğu gözlemlenmektedir.



Resim 2.2. Havada soğutulmuş cüruf [25]



Resim 2.3. Su ile granüle edilmiş cüruf

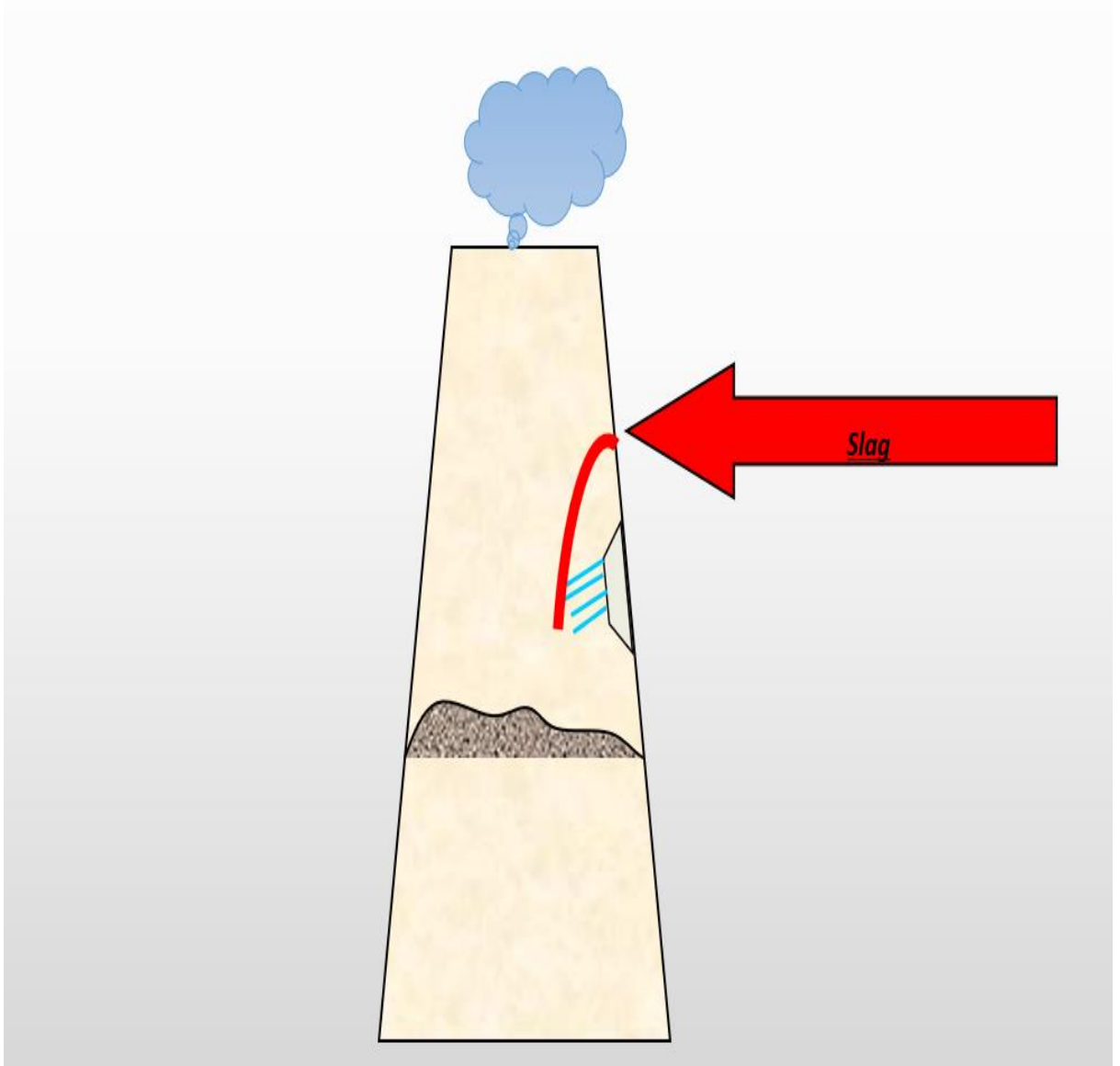
Yüksek fırın cürufu içeriği incelendiğinde oran olarak en %40 oranında oksijen içerir. Bundan dolayı yüksek fırın cürufunun yapısı oksit ve iyonik özelliğe sahiptir. Yüksek fırın prosesi birçok aşamadan oluşan ve cüruf oluşması için birçok parametre gereken bir sistemdir. Sıcaklık ve yüksek fırın prosesinin durumu oluşan cüruf ile analiz edilebileceği gibi cüruf analizine göre yüksek fırın prosesinin girdileri de değiştirilebilir [25].



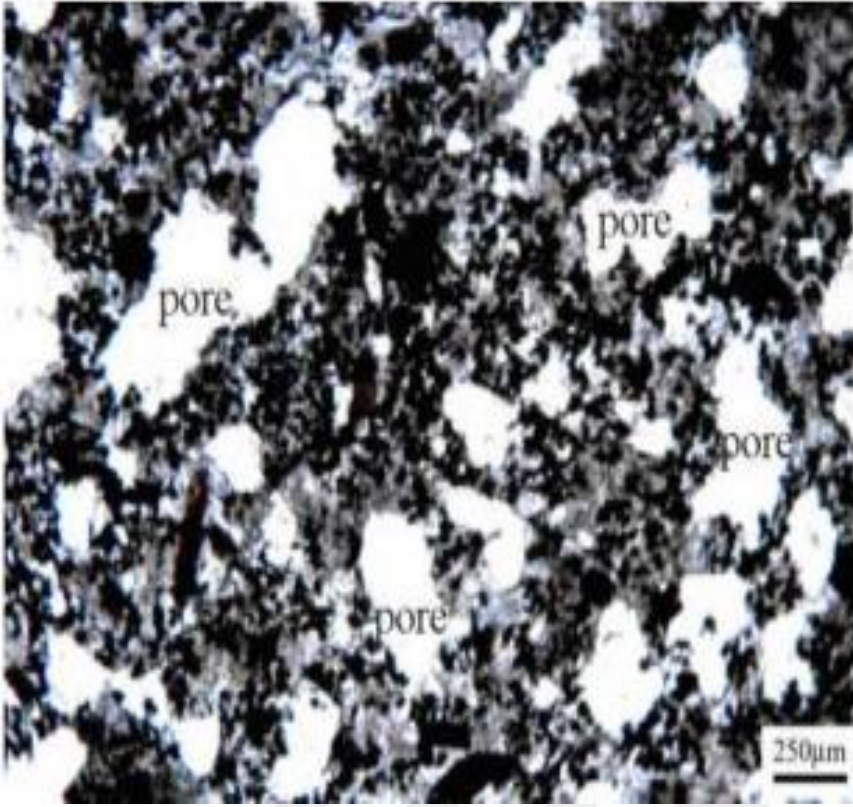
### 2.2.1. Sulu cüruf granülasyon yöntemi

Yüksek fırın cürufu dünya genelinde su ile granüle edilir. Şekil 2.3' de sulu cüruf granülasyon işleminin başlangıç aşaması gösterilmiştir. Cüruf kanalı boyunca akışkan olarak ilerleyen yüksek fırın cürufu kanal sonunda baca içerisinde bulunan basınçlı su ile granüle edilir. Granüle hale gelen cüruf ızgara üzerinde süzülüp pompalar vasıta ile havuz kısmına basılır.

Sulu cüruf granülasyon işleminde hızlı soğuma gerçekleşerek granüle hale gelen cürufün camsı yapıda olması sağlanır. Granüle cüruf camsı yapısından dolayı çimento endüstrisinde kullanılmaktadır.



Şekil 2.4. Sulu cüruf granüle işleminin örnek gösterimi



Resim 2.4. Yüksek fırın cürufunun genel yapısı [26]



Resim 2.5. Yüksek fırın cürufunun boşluk yapısı [26]

Yüksek fırın cürufu gözenekli ve katı formunda mukavemeti düşük camsı yapıda bulunmaktadır. Yüksek fırın cürufunun yoğunluğu ise  $\rho_{YFC} = 1350 \text{ kg/m}^3$  değerindedir [26].

### 2.2.2. Kuru cüruf granülasyon yöntemi

Dünyada her yıl milyonlarca ton cüruf üretimi gerçekleşir. Bu üretimin büyük bir çoğunluğu yüksek fırınlarda sıvı ham demir üretimi sırasında oluşur. Demir cevherinin ergime sıcaklığı ve buna bağlı olarak oluşan cürufun sıcaklığı düşünüldüğünde büyük bir ısı enerji kapasitesi bu alanda mevcuttur. Dünyanın birçok yerinde cüruf su ile granüle edildiğinden bu ısı enerjisinin büyük bir miktarı atmosferde kullanılmadan kaybolur. Oluşan granüle cüruf ise içeriğinde ki yüksek silika ve kireç özelliğinden dolayı çimento endüstrisinde sıklıkla kullanılmaktadır. Sulu granülasyon işleminde ısıl kaybın yanında çok miktarda su kullanımı da gerektirdiğinden su tüketimi de çok fazladır. 1 Ton cüruf başına 1000-1500 litre suyun buharlaşması sulu granüle işlemlerinde tüketilen suyun miktarını göz önüne sermektedir [27].

Kuru granülasyon işleminde sıvı cüruf hava ile soğutularak büyük miktarlarda enerji kayıpları önlenebilir. Kuru granülasyon yönteminin temel koşulu geleneksel yöntemlerde üretilen granüle cüruf yapısına göre aynı ve hatta daha iyi özelliklere sahip olması gerekliliğidir. Bu konuda ilk olarak hedef cürufun camsı yapısıdır. Geleneksel yöntem ve kuru granülasyon yöntemlerinin karşılaştırma parametresi hedef  $> \%95$  camsı içerik oranıdır. Bu kapsamda da birçok araştırma ve deneyler dünya genelinde yapılmıştır. Camsı içerik oranı, çimento ve betonların mukavemetine doğrudan etki etmektedir. Bununla birlikte, gerekli camsı içerik oranı ancak yaklaşık olarak  $900^\circ\text{C}$ 'lik dönüşüm sıcaklığının altında ani soğutma ile elde edilebilir. Kuru granülasyon işlemi daha az verimli soğutma işlemi gerçekleştirdiğinden proses olarak sulu granülasyon yöntemine göre daha zordur. Kuru granülasyon ile granüle edilen cürufun daha sonra kurutulmasına gerek duyulmaz. Bu, sulu granülasyon yöntemine kıyasla yaklaşık  $30 \text{ kg/t CO}_2$  azalımına yol açar. Yaklaşık 210 milyon ton granüle cürufun (2007) küresel üretimi göz önüne alındığında, yıllık 6,3 milyon tonun üzerinde potansiyel  $\text{CO}_2$  azalımı anlamına gelmektedir [28].

Kireçtaşı, kum, kil ve diğer bileşenlerden çimento klinker üretimi, çimento endüstrilerinde bulunan döner fırınlarda yüksek sıcaklıkta (yaklaşık  $1450^\circ\text{C}$ ) gerçekleşir. Çimento klinkerinin yüksek fırın cürufu ile elde edilmesi, çimento endüstrisi için hem ekonomik hem de çimento yapısı bakımından çok iyi bir alternatiftir, çünkü enerji maliyetlerini düşürür ve

karbon ayak izini önemli ölçüde iyileştirir. Cüruf ile elde edilen her ton klinker için yaklaşık 1 ton CO<sub>2</sub> emisyonu önlenebilir.

Sulu cüruf granülasyon işlemlerinde, granülasyon tesislerinde büyük miktarlarda su kullanılarak hızla soğutulur ve cüruf olarak bilinen ince taneli, amorf ama aynı zamanda ıslak bir ürün üretir. Amorf yapı nedeniyle, cüruf öğütüldüğünde çimento katkı maddesi ve su ile birlikte hidrasyon ürünleri oluşturur. Bu ürünler temelde Portland çimentosunun ana bileşeni olan Portland çimentosu klinkerinin hidrasyon ürünlerine karşılık gelir. Yapı malzemesi endüstrisinde bir bağlayıcı madde olarak cüruf kullanılması için temel ön koşul bu şekilde karşılanmaktadır. Bu nedenle, yüksek fırın cürufunun yaklaşık %80'i çimento katkısı olarak kullanılır. Çimento katkısı olarak katma değer genellikle cürufun yol yapımı için agrega malzemesi olarak kullanılmasından kaynaklanmaktadır.

Sulu işlemin avantajı, cürufun kütle akışında ve fiziksel / kimyasal özelliklerinde geniş dalgalanmaları kabul etmesidir.

Bununla birlikte, sulu cüruf granüle işleminin önemli dezavantajları bulunmaktadır:

- Cüruf süzme ve istiflenme alanlarında mekanik susuzlaştırma yapılmasına rağmen, cüruf kumunda yaklaşık %10 - 12 oranında artık nem kalır. Çimento üretimi için, bu nedenle önce ürünün kurutulması gerekir, bu da ton cüruf başına 100 kWh'den fazla önemli enerji girdisi gerektirir.
- Sulu granülasyon için, yoğun kokulu kükürt içeren buhar açığa çıkar ve sisteme buna uygun olarak tatlı su (yaklaşık 1 m<sup>3</sup>/t) beslenmelidir.
- Cüruf su ile söndürüldüğünde, sıcak sıvı cürufun yüksek enerji ısı potansiyeli boşa gider.
- Granülasyon için, sirküle edilen suyun soğutma kulelerinde veya diğer soğutma yöntemleriyle yeniden soğutulması gerekir. Esas olarak soğutma kuleleri elektrikle çalışan fanlar ile donatılmıştır ve ayrıca soğutma suyu sirkülasyon sistemi önemli miktarda elektrik gücü tüketmektedir [29].

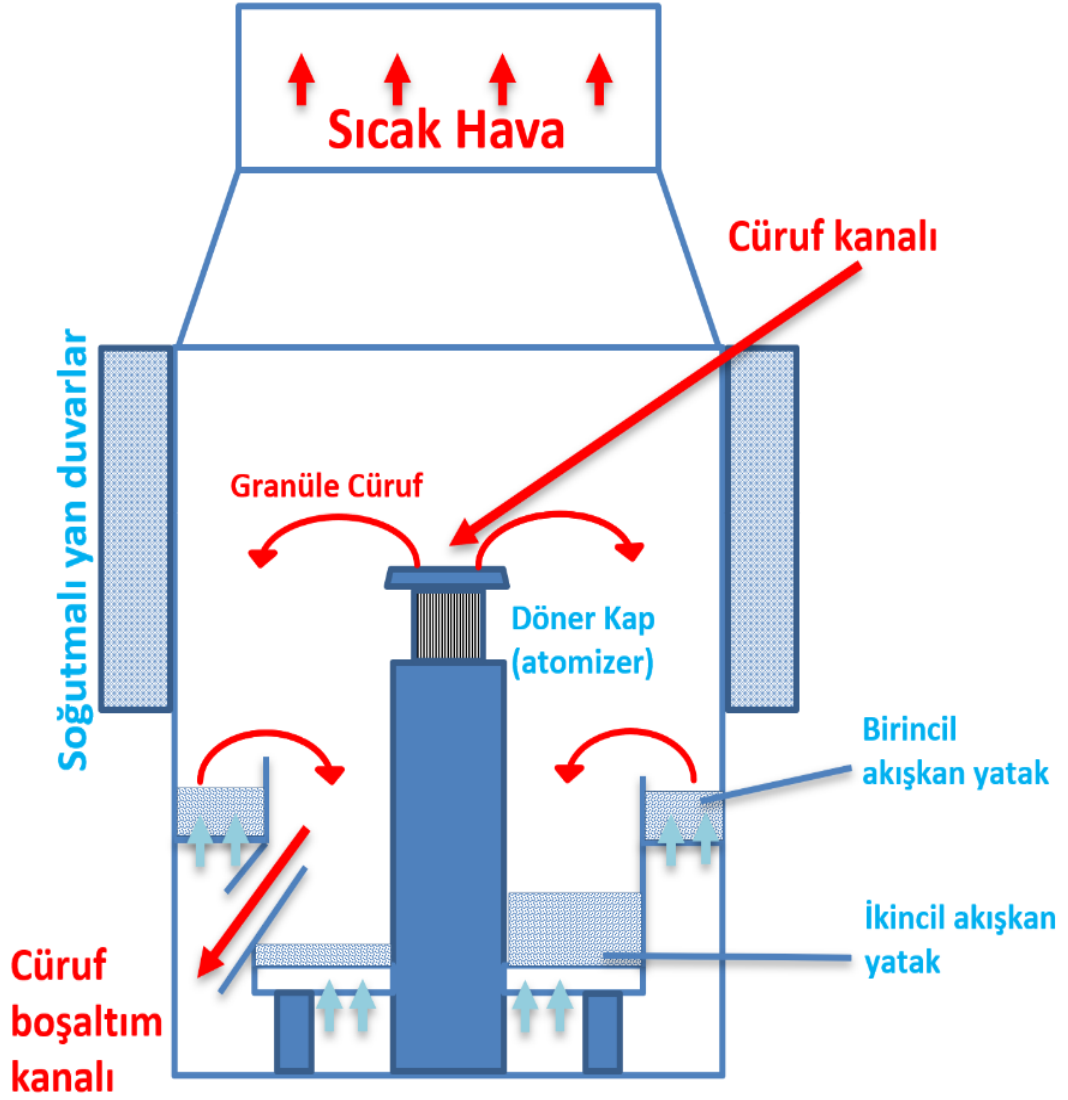
Kuru cüruf granülasyon işleminde sıvı cüruf kanal yolu ile granüle sistemine aktarılır. Burada döner plaka üzerine düşen sıvı cüruf plakanın dönme kuvveti ile ortama saçılır ve soğur.



Resim 2.6. Döner plaka üzerinden kuru cüruf granülasyonu [29]

Tank çapı ve şekli, farklı işlemlerde cüruf granülasyon işleminin işlevselliği üzerinde önemli etkiye sahiptir. Değişken hız kontrolü, dalgalanan cüruf akışını ve özelliklerini korumalıdır. Döner plakanın hızı, tutarlı bir ürün kalitesi (örneğin, tane boyutu dağılımı, camsı içeriği) ve proses stabilizesine ulaşmak için mevcut cüruf koşullarına (örneğin akış, sıcaklık) göre değiştirilir. Granüle parçacıklar, eğimli bir su soğutmalı duvar üzerinde esas olarak 0,5 ila 3 mm 'lik bir tane boyutu aralığında çarpma etkisiyle duvardan sekerek granüle yatağına düşer. Partikül soğutma etkisi, temel olarak cürufun faz değişimi sırasında soğutma havasına, suyla soğutulan duvara ve son olarak granül cüruf yatağına doğru konveksiyon ısı aktarımına bağlıdır. Isı transferinin bir kısmı su soğutmalı duvarda iletken ısı transferi ile gerçekleşir [29].

Sistem örnek gösterimi Şekil 2.5'te gösterilmiştir. Buna göre Kuru Granüle Teknolojisi (DSG), sistem üzerinde açığa çıkan ısı geri kazanımı sağlanabilmekte olup, partikül haline gelen granüle cürufun taşınmasında ve granüle hale gelmesi için su kullanılmamasından dolayı temiz bir tekniktir. Bu tip sistemlerde su kullanımı teknik olarak sadece tank duvarlarında yani sıcak cürufun döner plaka üzerinden saçılarak tank içinde çarptığı yüzeyleri soğutma amaçlı olarak kullanılmaktadır. Burada kullanılan su miktarı ise sulu granülasyon işlemine göre karşılaştırıldığında yok denecek kadar az bir miktardır.

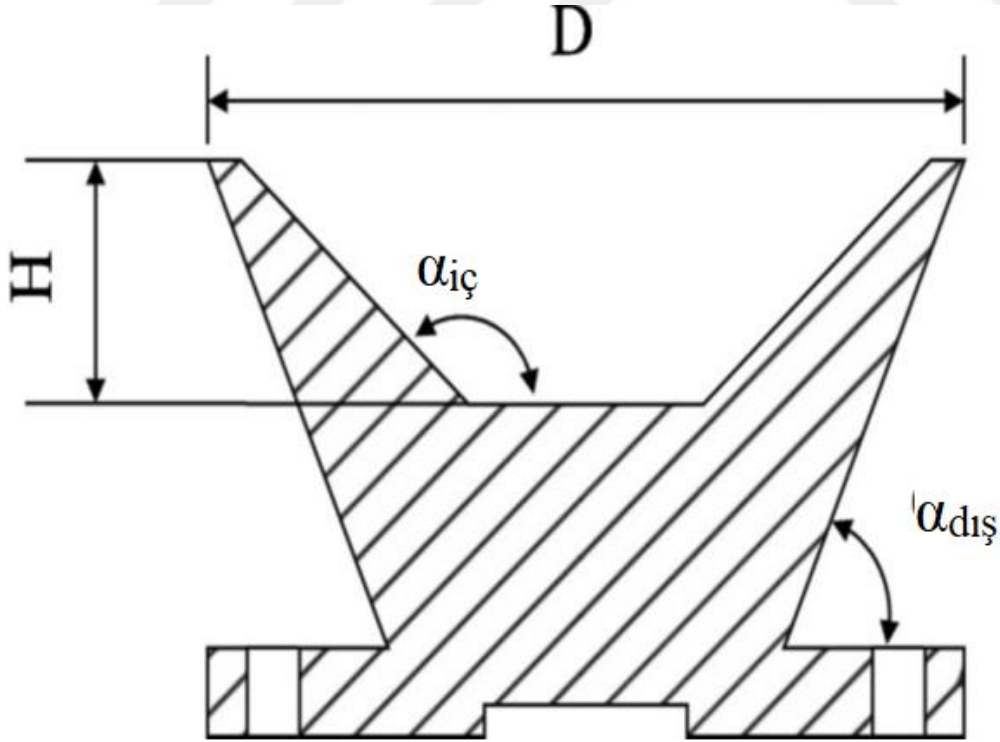


Şekil 2.5. Kuru granüle sistemi

Küçük boyutlu partiküller, su ile soğutulan duvara çarpmadan önce katı bir yüzey oluşturmuş ve deformasyon olmaksızın doğrudan su soğutmalı duvardan sekmiştir. Daha büyük boyutlu parçacıklar, ilk saçılma aşamalarında parçacık yüzeyinde sabit bir katı kabuk oluşturamazlar. Su soğutmalı duvara çarptıklarında deforme olurlar, ancak yüksek fırın cürufunun fiziksel özellikleri nedeniyle cidar çarpmasından sonra yeniden küresel bir şekil oluştururlar. Doğru vurma açısı, darbe yüzeyinin malzeme kalitesi ve su soğutmalı duvarın soğuk yüzey sıcaklığı cüruf parçacıklarının yan duvarlara yapışmasını engeller. Katılaştıran granüller, bir granül yatağına düşer. Soğutma havası kanallarına giren farklı soğutma havası akışlarının aktif kontrolü, granül yatağının stabil durumda kalmasını sağlar. Yataktaki partikülün direnç süresi, partikül ve soğutma havası arasında gerekli ısı değişim süresi ile tanımlanır. Granüle cürufunda ki ısı transferinin büyük bir kısmı granül yatağında gerçekleşir.

Granüle tankı tabanındaki boşaltma sistemi, Granüle cürufun granüle işleminden bağımsız boşaltılması şeklinde tasarlanmıştır. Soğutma havası, granül yatağı / granüle tank soğutma havasının doğrudan aşağıdan yukarıya akışına sahip olmak için boşaltma modüllerinden geçer (ters akış prensibi). Kuru granülasyon, ürünün daha sonra kurutulmasını gerektirmez. Bu, sulu granüle işlemine kıyasla ton başına yaklaşık 30 kg CO<sub>2</sub> azaltma potansiyeline yol açar [29].

Kuru granülasyon işlemi için dünya genelinde birçok araştırma ve çalışmalar yapılmıştır. Kuru granülasyon işleminde döner plaka (atomizer) yapısına göre çeşitli ölçü ve şekillerde denemeler yapılmıştır. Bu çalışmalardan biride Wu ve Jun-Jun tarafından yapılmıştır [30]. Döner plaka (atomizer) ana özellikleri Şekil 3.2'de gösterilmektedir. Bu çalışmaya döner plaka çapının dahil edilmediğine dikkat edilmelidir, çünkü döner plaka çapını artırarak parçacık boyutunun küçülmesi üzerindeki olumlu etkisi yaygın olarak kabul edilmiştir. Bu nedenle önceki çalışmalara dayanarak, atomizer konfigürasyonlarının bazı değerleri Tablo 3.1'de özetlenmiştir. Genellikle, dış açı ile birlikte iç açı 0°-90° arasındadır. Tablo 3.1'e göre iç açının granülasyon üzerinde önemli bir etkisi olduğu görülebilir. Dış açıda olduğu gibi, 15°-60° arası mevcut aralık için yalnızca küçük bir etki bulunur.



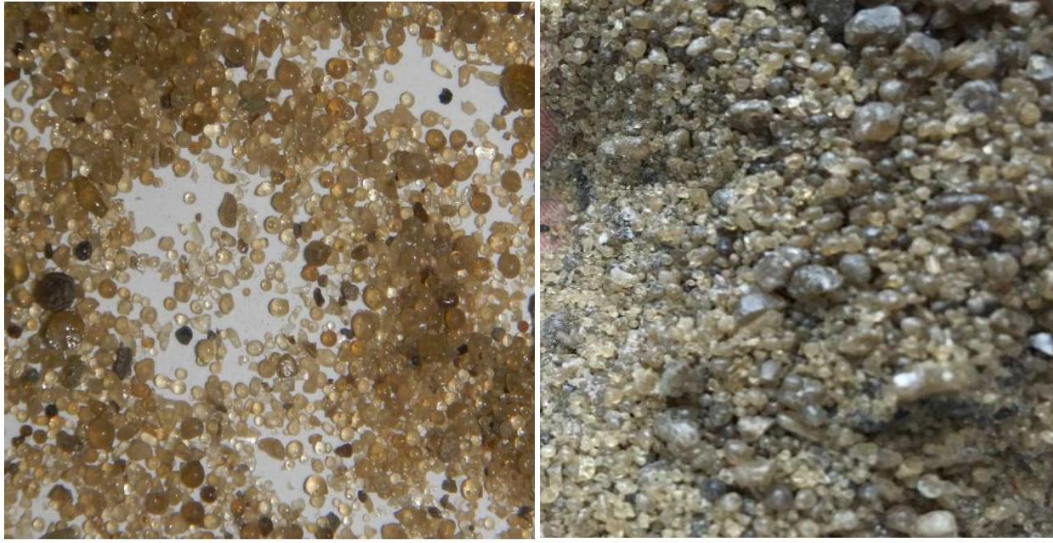
Şekil 2.6. Döner plaka (atomizer) gösterimi [30]

Çizelge 2.1. İncelenen plaka (atomizer) değerleri [30]

<i>Değişken</i>	<i>Değer Aralıkları</i>	<i>Sabit parametreler</i>		<i>Etki derecesi %</i>	<i>Ref.</i>
$\alpha_{iç}/^{\circ}$	90-135	$\alpha_{dış} = 90^{\circ}$	$H = sabit$	20,7-27,7	31
$\alpha_{iç}/^{\circ}$	120-75	$\alpha_{dış} = 90^{\circ}$	$H = sabit$	6,4	32
$\alpha_{dış}/^{\circ}$	15-60	$\alpha_{iç} = sabit$	$H = sabit$	2,2	32
$H/mm$	5-45	$\alpha_{iç} = 90^{\circ}$	$\alpha_{dış} < 90^{\circ}$	16	32
$H/mm$	10-90	$\alpha_{iç} = 104^{\circ}$	$\alpha_{dış} < 90^{\circ}$	-	33

Fleischanderl, A., T. Fenzl, ve R. Neuhold (2018) yaptıkları çalışmada kuru granülasyon ile elde edilen cüruf partiküllerinin görüntüsü Resim 2.7’de gösterilmiştir. Bu kapsamda granülasyon işleminin başlatılması için gereklilik, granüle tankı içinde sabit olarak oluşturulmuş bir akışkan kanaldır. Çalışmada cüruf yaklaşık bir saat boyunca granüle edilmiştir ve granüle cüruf, granül yatağında toplanmıştır. Granüle cürufun analizleri incelendiğinde ise, %97 ila %99 oranında camsı içeriğe sahip olduğu görülmüştür. Bu değerler, geleneksel sulu granüle edilmiş cüruf değerlerine göre aynı ve hatta daha iyi değerlerdir. Bu değerler göz önüne alınarak granüle cürufun en çok kullanıldığı çimento endüstrisinde ilk araştırmalar sonucunda elde edilen bu değerler, sulu granüle edilmiş cürufa kıyasla uygun değerleri göstermiştir[29].





Resim 2.7. Kuru granülasyon ile granüle edilmiş cüruf [29]

Fleischanderl ve diğerleri (2018) yaptıkları çalışmada elde edilen ve dikkat edilen diğer unsurlar:

Her granüle sistem bakım duruşlarında veya döküm sonlarında, sistem aşağıdakilere odaklanılarak dikkatle incelenir:

- Granülatörde aşınmanın etkileri (özellikle dönen diskte)
- Granül katılmış cüruf miktarı
- Çevresel parametreler, enerji ve kütle dengesi, çıkış gazı parametreleri vb.

Her döküm için kaydedilen tüm ölçüm verileri sistematik olarak analiz edilmiştir. Aşağıdaki tabloda, granülasyon denemesinde ki değerler gösterilmiştir. (sabit çalışma koşullarındaki parametreler):

Çizelge 2.2. Granülasyon işlemi parametreleri [29]

Ortalama cüruf akışı	30-40	[Ton/h]
Granülasyon süresi	~60	[min]
Granüle cüruf miktarı	30-40	Ton
Akışkan yatak ve Granüle sıcaklığı	~200	[°C]

Başka bir kuru granülasyon deneyi yapan ve deney sonucuna göre enerjisi geri kazanımını inceleyen Norgate, Terry, Dongsheng Xie ve Sharif Jahanshahi (2012) kuru granülasyon işlemi sonrasında elde edilen sıcak havanın kullanımı ve atık ısının geri kazanımını hesaplamıştır. Deney parametreleri olarak;

Cüruf giriş sıcaklığı 1500°C,

Cüruf son sıcaklığı 100°C,

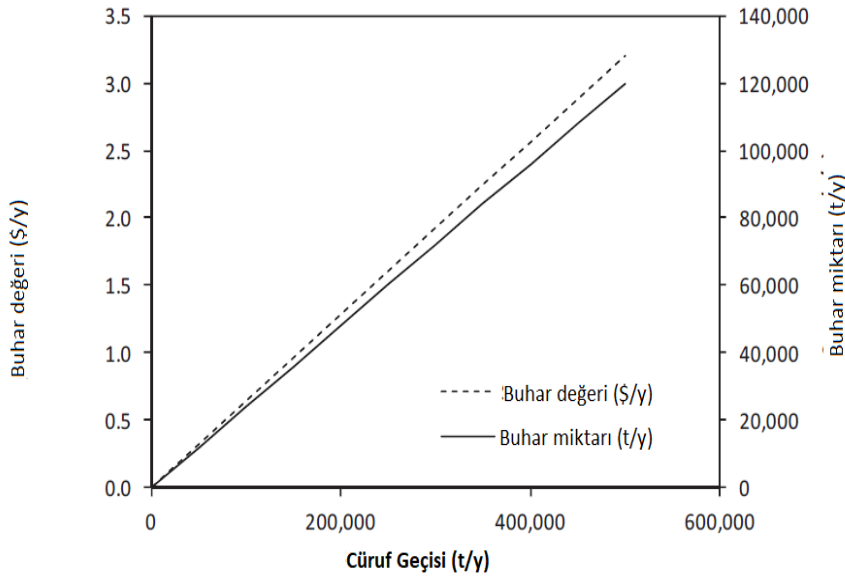
Soğutucu hava sıcaklığı 25°C,

Sıcak hava çıkış sıcaklığı 600°C'dir [35].

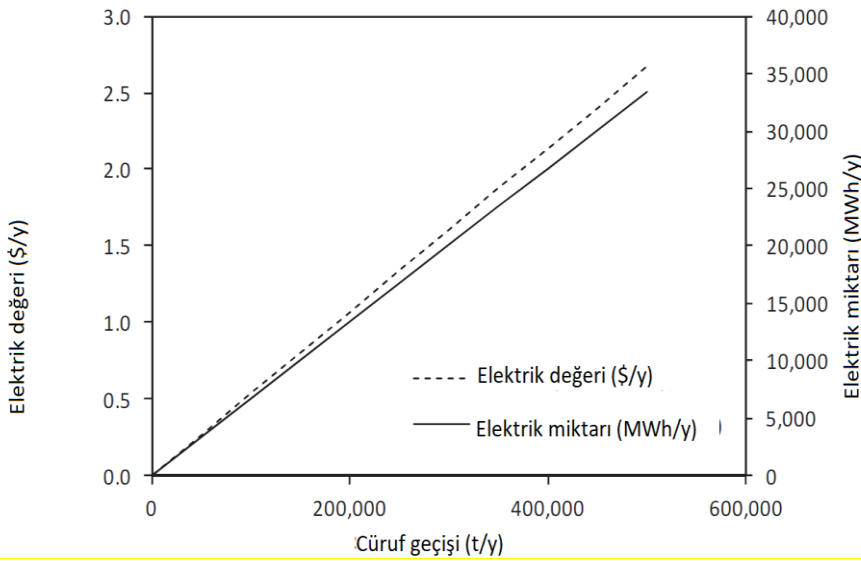
Çizelge 2.3. Kuru granülasyon yöntemi için kütle ve enerji değişimleri [35]

Kütle				Enerji				
Giriş		Çıkış		Giriş		Çıkış		
Cüruf	Hava	Cüruf	Sıcak hava	Cüruf	Hava	Cüruf	Hava	Isı kaybı
36,1 t/h	70,7 t/h	36,1 t/h	70,7 t/h	~ 63,6 GJ/h	0,0 GJ/h	2,1 GJ/h	44,5 GJ/h	17,0 GJ/h
106,8 t/h		106,8 t/h		63,6 GJ/h		63,6 GJ/h		

Yapılan hesapta giren kütle ile çıkan kütle arasında farklılık bulunmamaktadır. Sisteme giren enerji ise hava için enerjisiz kabul edilmiştir. Çıkan cüruf ve havanın sıcaklık değerlerine göre mevcut çıkış enerjileri hesaplanmış ve giriş enerji toplamı ile farkından kaybolan enerji miktarı bulunmuştur.



Şekil 2.7. Geri kazanılan cüruf atık ısısından üretilen buharın yıllık miktarı ve değeri [35]



Şekil 2.8. Geri kazanılan cüruf atık ısısından üretilen elektriğin yıllık miktarı ve değeri [35]

Norgate ve diğerleri (2012) yaptıkları bu çalışmada kuru granülasyon sürecinin sadece pilot tesis ölçeğinde olduğu ve sadece sermaye ve işletimle ilgili tahminlerin tam ölçekli bir ticari tesis için yapılabileceği belirtilmektedir.

Yapılan çalışma neticesinde Norgate ve diğerleri (2012) ulaştıkları sonuçlar; Yıllık 300 000 ton cüruf üreten bir kuru cüruf granülasyon tesisinin gereken tahmini sermayenin 9,1 M A\$ (Avustralya Doları) olduğu ve çalışmada elde edilen ısı geri kazanımı yönünde ki verilerin kuru granülasyon yönteminin daha da geliştirilebilir bir sistem olduğu bu yüzden de çalışma sırasında elde edilen verilerin yöntemin geliştirilmesi ile değişebileceği belirtilmektedir.

### 3. MATERYAL VE METOD

#### 3.1. Materyal

Çalışmada İsdemir 2.Yüksek Fırın cüruf granüle tesisinde yapılan iyileştirme çalışmalarından sonra elde edilen değerler kullanılmıştır. Sulu cüruf granülasyon işlemi kullanarak belli parametrelerde ölçümler alınmış ve buna göre sulu granülasyon yöntemi hakkında sayısal değerlere ulaşılmıştır.

İsdemir 2.Yüksek Fırın Türkiye’de bulunan 11 adet yüksek fırından bir tanesidir [34]. İsdemir 2.Yüksek Fırın sulu cüruf granülasyon yöntemi cürufun geri kazanımını sağlayan bir tesistir. Sistem, havuz tipi sulu cüruf granülasyon sistemidir. Sistem, mekanik ve elektrik ekipmanlarından oluşmaktadır. Bu ekipmanların tamamı kullanıldığı bölgeye göre özel olarak imalatı yapılmış ekipmanlardır. Buna örnek vermek gerekirse; granüle sisteminde kullanılan ve ana ekipmanlardan biri olan cüruf pompalarının akışkan temas olan tüm bölümleri aşınmaya dayanıklı olacak şekilde imalatı yapılmaktadır. Cürufun en net ve belirleyici özelliği olan aşındırıcı etkisi cürufun akışkan olarak temas ettiği tüm alanlarda aşınma direnci yüksek ekipman kullanma zorunluluğu doğurmaktadır.

Sulu cüruf granüle işleminin değerleri Şekil 3.2’de gösterilen sistemden elde edilmiştir. Sistem, cüruf havuzu, pompalar, granüle tankı, mekanik ve elektriksel ekipmanlar (vana, motor, ölçüm cihazları vb.) ve boru hatlarından oluşmaktadır.

Cüruf havuzu kademeli şekilde olup cürufun yoğunluğunun sudan fazla olmasından yararlanılarak su ve cüruf bu kısımda süzdürülür. Cüruftan ayrılan su havuz dibinde bulunan pompa yolu ile granüle tankına basılır. Yaklaşık olarak 1000 m<sup>3</sup>/h debi ve 3 bar basınç ile granüle tankına gelir. Havuzdan gelen su tank tarafında ana kollektörde toplanmaktadır. Kollektör basıncına göre su, nozul ve tank dibi hattından (karıştırıcı) granüle tankına düşer. Sistem güvenilirliği açısından havuz tarafı pompalarda yaşanabilecek arızalarda granüle tankı döküm sırasında susuz kalmaması adına acil su hattı da sistemde bulunmakta olup bu hattın basıncıda yaklaşık 3 bardır.

Sulu granüle işleminde granüle cürufun aşındırıcı özelliğinden dolayı sisteminin belli aralıklar ile kontrol edilerek aşınma durumu incelenmeli, buna göre de gerekli ise müdahale edilerek sistem ömrü korunur. Sulu granüle sistemlerinin en dezavantajları, suyun büyük kısmının buharlaşması ve geri kazanımının olmaması, yüksek sıcaklıkta ki akışkan cürufun soğutulması ile kaybettiği ısı miktarının tekrar kullanılamaması, sulu granülasyon işleminde granüle cürufun nem değerinin yükselmesi buna bağlı olarak çimento endüstrisinde kullanımı sırasında tekrardan kurutma gereksinimi duyması ve enerji sarfiyatı oluşturması

gibi dezavantajları bulunmaktadır.

Sulu granülasyon işleminde kullanılan ekipman değerleri Şekil 3.1’de gösterilmiştir.



Şekil 3.1. Sulu granülasyon pompa değerleri



Resim 3.1. Su ile granüle edilmiş cüruf görüntüsü

Bu çalışmada kullanılan cüruf kimyasal içeriği;  $\text{SiO}_2$  ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{FeO}$ ,  $\text{S}$ ,  $\text{MnO}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{TiO}_2$  şeklindedir.

### 3.2. Metod

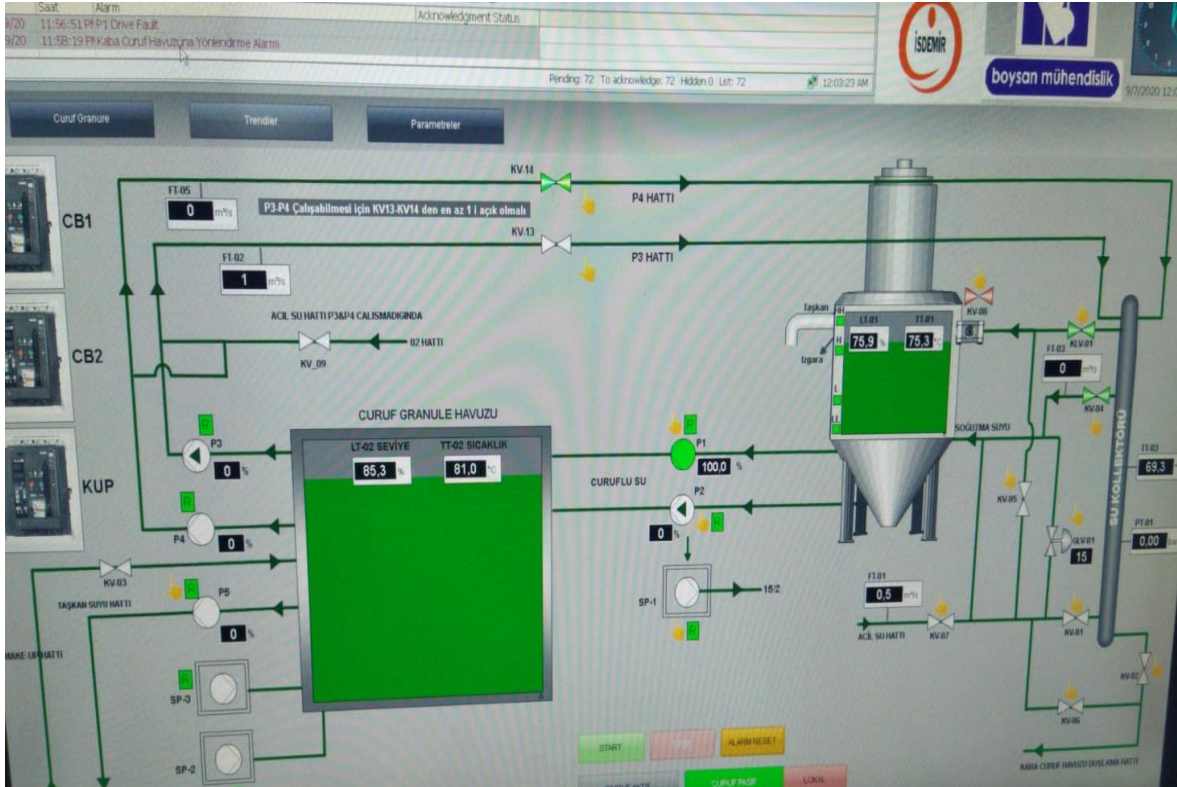
Bu çalışmada daha önceden yapılan kuru cüruf granülasyon yöntemi alanında ki çalışmalar, deneyler ve literatür çalışmaları bundan önce ki başlıkların altında detaylı olarak verilmiştir. Metod kısmında ise sulu cüruf granülasyon yönteminin detayları, sulu cüruf granülasyon yöntemi ile çalışan bir sistemde kullanılan parametrelerin detayları incelenmiştir.

Sulu cüruf granülasyon işleminde birçok parametre ve trend grafikleri sistemin kontrolünü ve sürdürülebilirliğini sağlamaktadır. Burada kullanılan parametreler; Ekipman (pompa) devir ve akım değerleri, granülasyon işlemi sırasında ki basınç grafiği, granüle işlemini gerçekleştiren suyun debi grafiği, granülasyon işleminin gerçekleştiği tankın seviye grafiği, cüruf kimyasal analizi ve sıcaklık değerleridir.

Sistemi oluşturan bölümler; cürufun granüle hale geldiği tank, cürufun granüle hale geldikten sonra tank dibinden emilip havuz kısmına basan pompalar, cürufun toplandığı ve

biriktiği havuz kısmı, ilk aşamadaki cürufu granüle hale getiren suyun tank tarafına basılmasını sağlayan pompalardan ve boru hatalarından oluşmaktadır.

Sistem çalışması otomatik olarak yapılmış, elde edilen veriler için ısı kaybı hesabı yapılırken kullanılan tonaj değerleri deney sırasında elde edilen verilerin orantısal katları şeklinde kullanılmıştır. Sulu cüruf granülasyon işleminde yaklaşık 2-3 bar arası basınç kullanılarak cüruf sistemde granüle edilmiştir. Sisteme giriş kütle ve enerji değerleri haricinde dışarıdan kütle ve enerji oluşturacak bir giriş olmamıştır. Yapılan hesaplamalar maksimum değerler için yapılmış olup elde edilen sonuçlar geliştirilmeye açıktır.



Şekil 3.2. Sulu granülasyon sistemi genel görünüş

Sulu cüruf granülasyonu yönteminde kullanılan su sıcaklıkları havuz tarafından alınıp tank tarafına basıldığından ve buna ek ayrı bir soğutma ünitesi olmadığından suyun giriş sıcaklığı 70°C, çıkış su sıcaklığı 80°C olarak alınmıştır. Çalışmadan materyal olarak kullanılan cüruf ise giriş sıcaklığı 1400°C, çıkış sıcaklığı 100°C olarak kabul edilmiştir.

## 4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

### 4.1. Sulu Cüruf Granülasyon

Bu kısımda İSDEMİR, 2.Yüksek Fırın tesisinde bulunan sulu cüruf granülasyon sisteminde yapılan araştırma ve bulgulara yer verilmiştir. Bu araştırma bulguları sonucunda elde edilen ısı kaybı değerine göre daha önce ki başlıklarda yer verilen literatür üzerinden yapılan araştırmalar sonucunda kuru cüruf granülasyon yöntemi ile oluşan ısı kaybı incelenebilecek ve kıyaslanabilecektir.

Araştırma ve çalışmanın yapıldığı sistem sulu cüruf granülasyon yöntemi ile cüruf üretimi sağlamaktadır. Sulu cüruf granülasyon yönteminde sistem granüle işlemi sırasında tam otomatik çalışabilmektedir. Çalışma sırasında sıcak cürufün miktarına bağlı olarak sistemde çalışan pompalar sürücülü sistem ile kontrol edilmiştir.

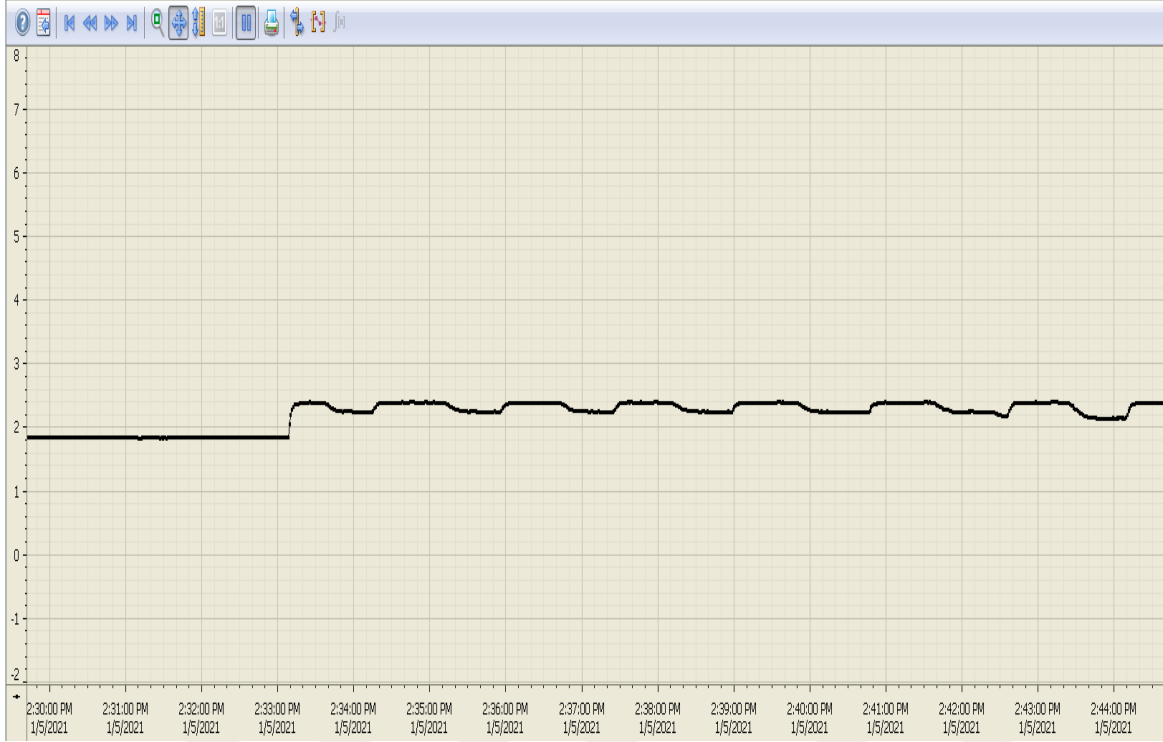
Sistem çalışması sırasında sıcak cürufü granüle etmek için kullanılan suyun basınç değerleri ortalama 2,3 bardır. Şekil 4.1’de 14 dakikalık çalışma periyodunda alınan basınç grafiği verilmiştir.

Suyun basınç değeri, sulu cüruf granülasyon sistemlerinde cürufün granüle edilebilmesi açısından önemlidir çünkü su basıncının düşmesi kilogram cüruf başına ihtiyaç duyulan su miktarını da etkileyeceğinden cüruf granüle edilemeden tank dibinde birikebilecek ve sistemsel sıkıntılara yol açabilecektir. Bu durumdan dolayı ölçüm alınan sistemde basınç kayıplarında ve ani basınç düşüşlerinde acil su hattı takviye olarak devreye otomatik olarak girmekte ve sistemin sürekliliğini sağlamaktadır. Acil su hattı yaklaşık 3-3,5 bar basınca sahip kapalı çevrim şeklinde çalışan cüruf granülasyon sisteminden bağımsız bir su hattıdır. Cürufün granüle edilmesinde su miktarı ve buna bağlı olarak basınç değeri önemli bir parametredir. Düşük basınç sıvı sıcak cürufün granüle hale getirilmesi için gerekli su debisini sağlayamayacağı için sistem çalışması sırasında ani basınç ve debi kayıpları cürufün granül hale gelmeden katılaşmasını ve büyük kütleler oluşturacağından sistemin tıkanmasına sebep olabilmektedir.

Sulu cüruf granülasyonu sistemine sahip İSDEMİR 2.Yüksek Fırın’da yapılan araştırmada elde edilen veriler ve grafikler verilmiştir. Buna göre sistemde kullanılan su miktarı, su basıncı ve cüruf miktarı gibi veriler sistemin çalışmasının yönetimi ve sürdürülebilirliği için kullanılmaktadır. Bunlara ek olarak sulu cüruf granülasyon sisteminde kullanılan su ve üretilen cürufa bağlı olarak atık olarak ayrılan ısı enerjisinin büyüklüğü ve enerji kayıplarının hesaplanabilmesi için bu parametrelere ek cürufün ilk ve son sıcaklık değeri, suyun ilk ve son sıcaklık değeri, cürufün ve suyun birim zamanda ki kullanım miktarları gibi



parametreler bu çalışmada sulu cüruf granülasyon yönteminde enerji kaybının hesabından yardımcı olmuştur.

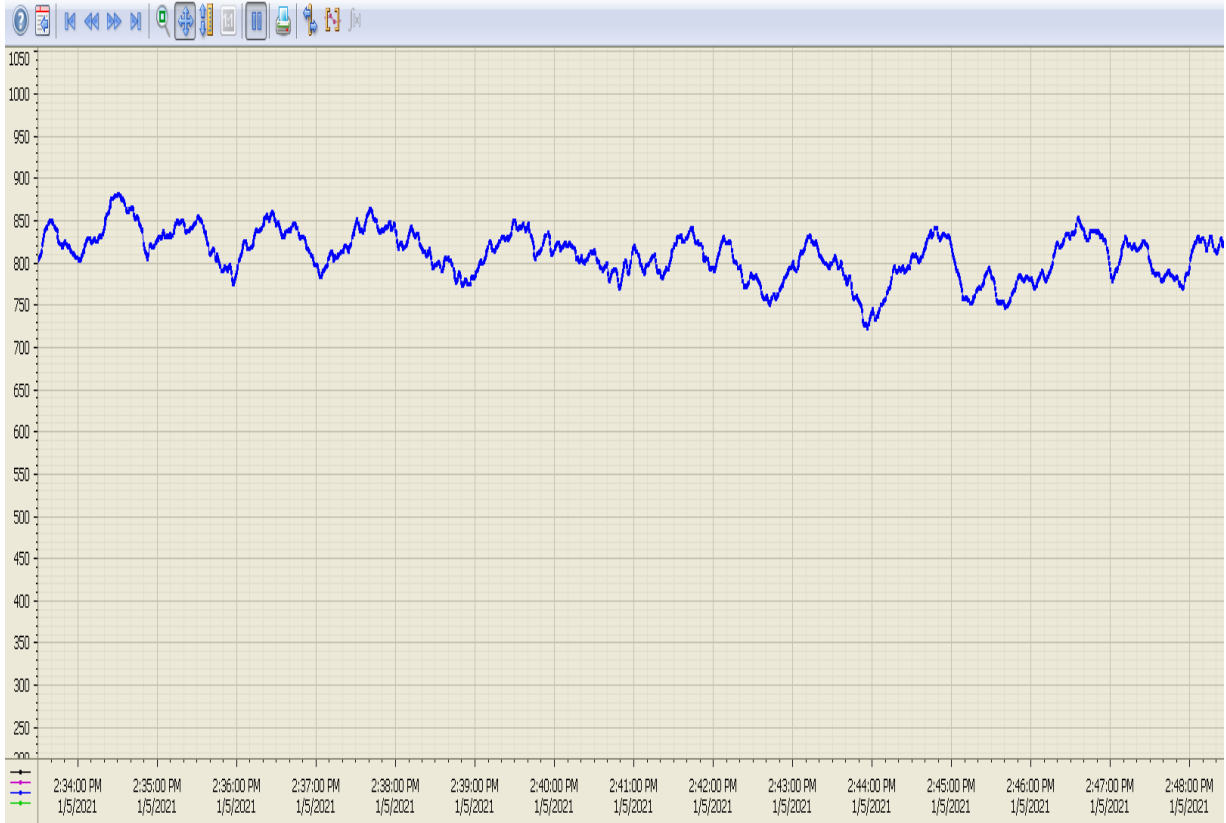


Şekil 4.1. Sulu granülasyon basınç grafiği

Çalışma sırasında doğru veri ve sonuç alabilmek adına sistem parametrelerinin trend grafikleri incelenmiş ve sistemin sabit değerlerde çalıştığı göz önünde bulundurularak çalışma yapılmıştır.

Debi miktarının grafiği Şekil 4.2’de verilmiş olup sistemin su debi grafiği incelendiğinde ise 14 dakikalık periyotta  $750 \text{ m}^3/\text{h}$  ile  $900 \text{ m}^3/\text{h}$  su şeklinde çalışılmıştır. Bu noktada ideal su miktarının optimum seviyede tutulması sistemde granüle edilemeyen cüruf oranını azaltacağı gibi aynı zamanda fazla su sarfiyatının da önüne geçecektir.

Sistemde su debisini ve basıncını sağlayan pompalar bulunmaktadır. Bu pompalar daha önce ki konu başlıklarında verilen sulu cüruf granülasyon yöntemlerinde kullanılan havuz kısmında ki granüle cüruftan süzülen suyu Şekil 4.2 ve Şekil 4.1’de verilen değerlerde granüle işleminin gerçekleştiği tank içine basar. Burada sistem üzerinden kullanılan suyun basınç ve debi değerleri ayarlanır. Kullanılan su operatör ve personellerin tecrübelerine göre ayarlanır. Dünya’da ki her yüksek fırının belli bir cüruf üretim kapasitesi olduğundan granüle sistemlerinde ki kullanacakları su debisi, basıncı ve miktarı sürekli olarak belli değerler arasında tutulmaktadır.



Şekil 4.2. Sulu granülasyon debi grafiği

Debi miktarında ki dalgalanma ise sistemin ihtiyaç duyduğu su miktarının çalışma sırasında değişkenlik gösterebildiğinden dolayıdır. Çalışma sırasında kanaldan akarak tank içine düşen sıcak cüruf anlık olarak artış gösterebilir veya anlık olarak azabilmektedir. Cüruf akışında ki bu artış ve azalmalarda tank seviyesinde yaşanan dalgalanmalara göre su basan pompalar devirlerini değiştirmektedir ve debi değerlerinde bu yüzden dalgalanmalar yaşanabilmektedir.

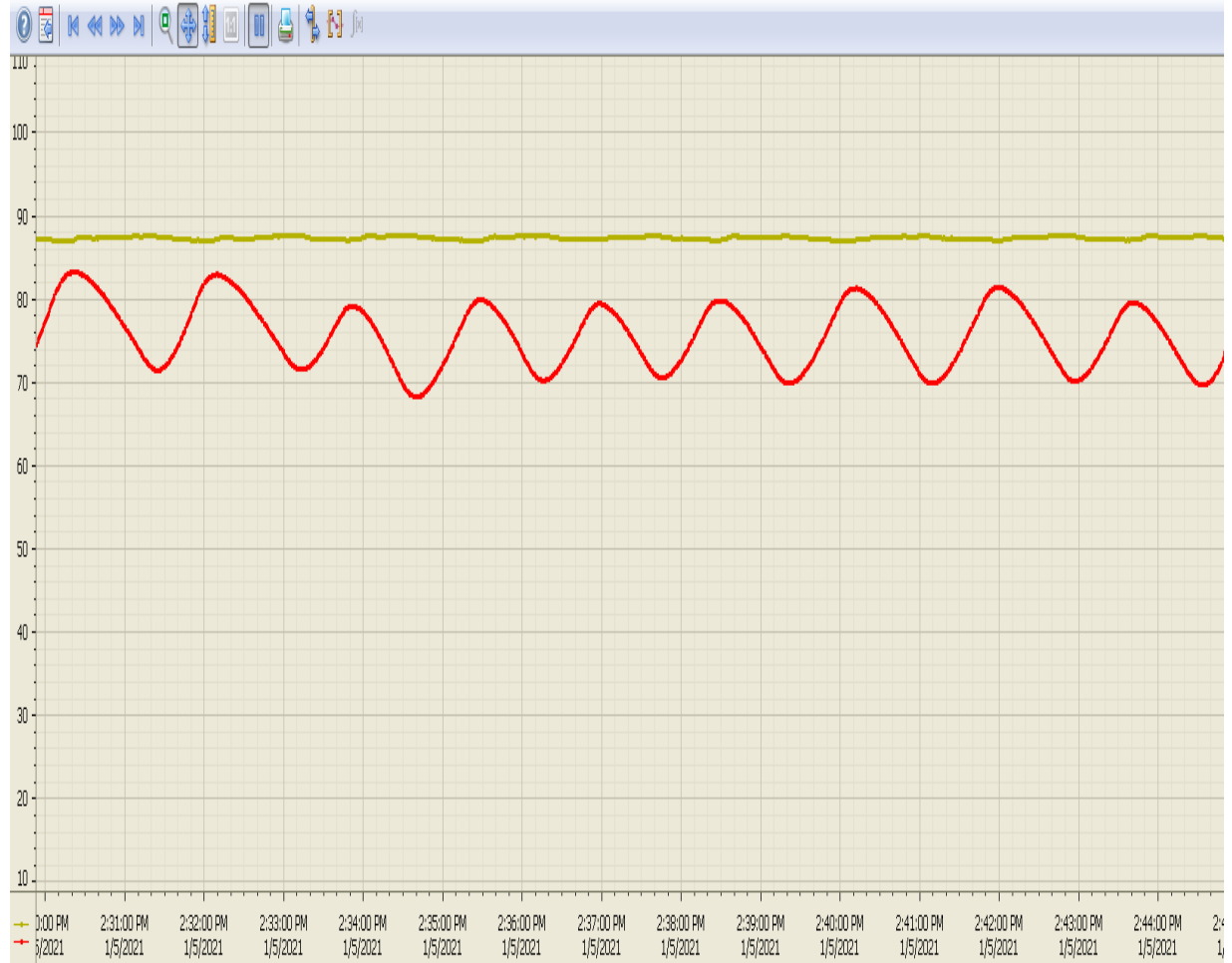
Granüle işlemi sırasında sistemde ki pompaların çalışma devirlerini belirleyen tank su seviyesi grafiği Şekil 4.3’de verilmiştir. Bu grafik incelendiğinde sistem seviyesinin 70 ile 90 arasında dalgalandığı görülmektedir.

Sistem seviye trendinin dalgalanmasının nedeni cürufun kanaldan ani olarak hacimsel anlamda fazla gelebilmesi ve anlık cüruf hacminde ki artışlarda tank seviyesinde anlık yükseliş ve düşüşlerde neden olmaktadır. Fakat sistem üzerinde seviye trendinde ki belli sınır değerlerin üzerinde ki yükseliş ve düşüşlerde sistem alarm vererek müdahale gerektiğini belirtir.

Tank seviyesinin sınırlanan değerin üzerine çıkması tank içinden bir emiş olmadığını veya çok az olduğunu gösterir. Bu durumda tank emiş pompalarında arızaların olabilmesi, emiş

kısımları granüle olmayan büyük boyutlu cüruf ile tıkanmış olabilmesi gibi tank seviyesinin belirlenmiş sınır değerin üzerine çıkmasının nedenleri olarak çıkartılabilmektedir.

Sulu cüruf granülasyon sisteminde ki yapılan bu çalışmada herhangi bir sorun veya trend grafiklerinde olumsuz bir durum ile karşılaşılmamıştır.



Şekil 4.3. Sulu granülasyon tank seviye grafiği

Yapılan sulu cüruf granüle işleminde granüle cürufun kimyasal analizi Çizelge 4.1’de verilmiştir.

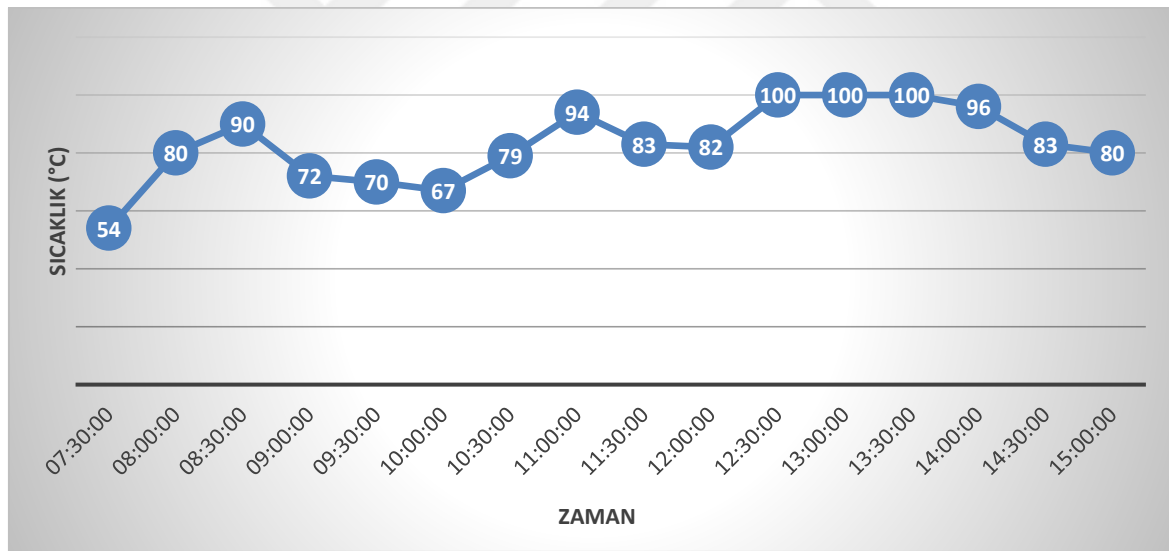
Çizelge 4.1. Cüruf kimyasal analizi

CÜRUF KİMYASAL ANALİZİ												
SiO <sub>2</sub>	CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	FeO	S	MnO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	P	K.B.	B.B.
40,057	35,295	10,941	6,28	0,498	0,584	1,651	0,947	0,35	1,222	0	0,881	0,815

Bu çalışmada elde edilen veriler ve hesaplamalar bu kimyasal analiz içeriğine göre elde edilmiştir.

Elde edilen granüle cürufun sıcaklığında yaklaşık olarak 70 °C ile 100°C arasında dalgalanmalar yaşanmıştır. Bu dalgalanma, sistem çalışması sırasında cürufun su ile temas ettiği anda ki miktarı, cüruf kanalında birikebilen cürufun döküm alma işlemi sırasında optimum bir değerde akışının olmaması ve sıcak cürufun su ile temas ettiği anda suyun bir kısmının anında buharlaşması ile su seviyesinde ki dalgalanma olarak görebiliriz. Elde edilen sıcaklık değerleri Şekil 4.4'te verilmiştir. Granüle hale gelen cüruftan elde edilen bu sıcaklık değerleri cürufun granüle yönteminin son kısmı olan havuz kısmından alınan değerlerdir. Bu değerler incelendiğinde havuz kısmında su içinde bekleyen cürufun sıcaklık değişkenliği görülebilmektedir.

Bu çalışma sırasında cürufun tank içinde granüle hale geldikten sonra ki değeri olan ve literatürde de bu şekilde kabul edilen 100°C son sıcaklığı kabul edilmiştir.



Şekil 4.4. Granüle cüruf sıcaklık grafiği

Sulu cüruf granüle işlemi harcanan su miktarı düşünüldüğünde ekonomik olmayan bir yöntemdir. Suyun sıcak cürufa teması ve devamında gerçekleşen granülasyon işleminde suyun bir bölümü yine buhara dönüşmektedir. Su ile cüruf granülasyon sistemi her ne kadar kapalı çevrim bir sistem olarak görülse de sistem çalışması sırasında kayıplardan dolayı %100 suyun tekrarlı kullanıldığı bir sistem değildir. Deney yapılan sistem üzerinden harcanan su miktarına bakıldığında saatte yaklaşık 1000 m<sup>3</sup>/h su tüketimi söz konusudur. 24 saat çalışan bir sistem için düşünüldüğünde bu değer 24.000 m<sup>3</sup> su olarak hesaplanabilir.

Standartlara göre olimpik bir havuzun alacağı minimum su miktarı  $2.500 \text{ m}^3$ 'tür. Cürufun granüle işlemleri için harcanan su miktarına bu göz ile bakıldığında yaklaşık 10 olimpik havuz hacminde suyu sistem bir günde kullanmaktadır. Bu su miktarının çoğu havuz sisteminde soğutulmuş olarak geri kullanımı sağlansa da su kayıpları azımsanmamaktadır. Günümüz şartlarında su gibi önemli bir kaynağın sürekliliğini sağlayabilmek adına cüruf granülasyon işlemlerinde farklı metotlarda düşünülme bu yüzden başlanılmıştır.

#### **4.2. Sulu Cüruf Granülasyon Yönteminde Atık Isının Hesabı**

Tezin ana konularından biri olan sulu cüruf granülasyon işlemlerinde açığa çıkan atık ısının geri kazanımı konusunda da Şekil 4.4'te verilen sıcaklık grafiğinden faydalanılmıştır. Bu grafiğe göre girdi ve çıktı sıcaklık farkından ısı kaybı hesaplanmış buna göre kaybolan ısının miktar ve kullanılabilmesi alanları, ekonomik boyutu hesaplanmaya çalışılmıştır.

Atık ısının kullanımı birçok sektörde ve sanayi kuruluşunda sürekli gündem maddesi olan ve günümüzde artık yaşam alanlarımızda da atık ısıdan tekrar kullanım için dönüştürülen çalışmalar mevcuttur. Enerjini korunumu kanunu gereği hiçbir enerji yoktan var edilmez iken var olan hiçbir enerjide yok edilemez. Mevcut ekosistemimizde bulunan tüm enerji çeşitleri her geçen gün değişmekte ve dönüşmektedir. Elektrik enerjisinden ısı enerjisi üretimi, rüzgâr enerjisinden elektrik enerjisi üretimi vb. birçok enerji dönüşümü insan hayatının her alanında karşısına çıkmaktadır.

Enerji dönüşümü ile maliyet oluşturarak elde edilen bir enerjinin atık olarak atmosfere atıldığı cüruf granülasyon sistemleri yüksek enerji potansiyeline sahip olmaktadır. Sıvı sıcak cürufun ortalama  $1400 \text{ }^\circ\text{C}$  ile granülasyon sistemine girip yaklaşık ortalama  $100 \text{ }^\circ\text{C}$  ile granüle halde çıkmaktadır. Bakıldığında yaklaşık olarak  $1300 \text{ }^\circ\text{C}$  bir sıcaklık farkı oluşmaktadır. Kaybolan bu ısı miktarı büyük çoğunluğu sistemde kullanılan suyun buharlaşmasına etken olmaktadır. Bu durum su tüketimine neden olmakta artan su sarfiyatı yıllık bazlarda yüksek değerlere ulaşabilmektedir.

Bu çalışmada atık ısı miktarının hesabı için kullanılan ortalama cüruf tonajı  $70 \text{ t/h}$  olarak varsayılmış olup, granülasyon işleminde ki literatür değerlerine göre gerekli su miktarı cüruf tonajının 10 katı şeklinde hesaplanmıştır.

Sistemde kullanılan cürufun  $1400^\circ\text{C}$  ile girip  $100^\circ\text{C}$  olarak çıkış sıcaklığına sahip şekilde olduğu varsayılmıştır. Buna göre Çizelge 4.1'de verilen cüruf sıcaklıklarına göre öz ısı değerleri  $1,65 \text{ GJ/t}$  olarak alınmıştır.

Çizelge 4.2. Cüruf Öz ısı değışimleri [35]

Cürufun ilk sıcaklığı °C	Cürufun son sıcaklığı °C	Cürufun Öz Isısı (GJ/t)
1350	100	~1,6
	200	~1,5
	300	~ 1,4
	400	~ 1,3
1400	100	~ 1,65
	200	~ 1,55
	300	~ 1,5
	400	~ 1,4
1450	100	~ 1,73
	200	~ 1,65
	300	~ 1,55
	400	~ 1,45
1500	100	~ 1,78
	200	~ 1,7
	300	~ 1,65
	400	~ 1,55
1550	100	~ 1,85
	200	~ 1,75
	300	~ 1,7
	400	~ 1,6

Deney sisteminde granüle cüruf ve su karışımını havuza basan pompalar %51- %52 verim aralığında çalıştırılmıştır. 1500 m<sup>3</sup>/h olan bu pompaların çalışma verimi ile granüle sisteminde havuz kısmına basacağı ortalama granüle cüruf ve su karışımı debi miktarı ise 765 m<sup>3</sup>/h'dir.

Deney sisteminde cürufu granüle etmek için kullanılan suyu basan pompalar ise ortalama %90 verim aralığında çalıştırılmış olup 1000 m<sup>3</sup>/h debi üretebilme kapasitesine sahip bu pompalar ortalama %90 verim ile 900 m<sup>3</sup>/h su üretmiştir.

Sistemde ve bu çalışma kapsamında kullanılan suyun giriş sıcaklığı 70°C, çıkış sıcaklığı ise yaklaşık 80°C'dir. Su sıcaklıkları arasında ki az bir sıcaklık farkı olduğu görülebilmektedir bunun nedeni suyun sürekli çalışacak şekilde kullanılması ve ayrı bir soğutma işleminden geçmemesidir.

Çizelge 4.3. Suyun fiziksel özellikleri [36]

Sıcaklık	Hacim	Sıvı suyun özgül entalpisi
° C	m <sup>3</sup> /kg	kJ / kg
70	5,042	292,9
80	3,407	334,96

Kullanılacak suyun giriş değeri olan ortalama 70 °C sıcaklıkta ki özgül entalpisi 292,9 kJ/kg olduğu Çizelge 4.2'de görülmektedir.

Sistemde kullanılan suyu çıkış ortalama sıcaklık değeri olan ortalama 80 °C sıcaklıkta ki özgül entalpisi ise 334,96 kJ/kg olduğu Çizelge 4.2' de görülmektedir.

Kullanılan cürufun giriş sıcaklık değerlerine göre özgül entalpisi 1,65 GJ/t olduğu Çizelge 4.1'de görülmektedir.

Granüle hale gelen cürufun özgül entalpisi 0,05817 GJ/t 'dur [35].

Buna göre sistemde ki parametrelerin değerleri;

Çizelge 4.4. Araştırma için kullanılacak değerler

Cüruf sıcaklığı °C	ilk Cüruf son sıcaklığı °C	Su ilk sıcaklığı °C	Su son sıcaklığı °C	Kullanılan cüruf tonajı (Ton)	Kullanılan su tonajı (Ton)
1400	100	~70°C	~80°C	70	700

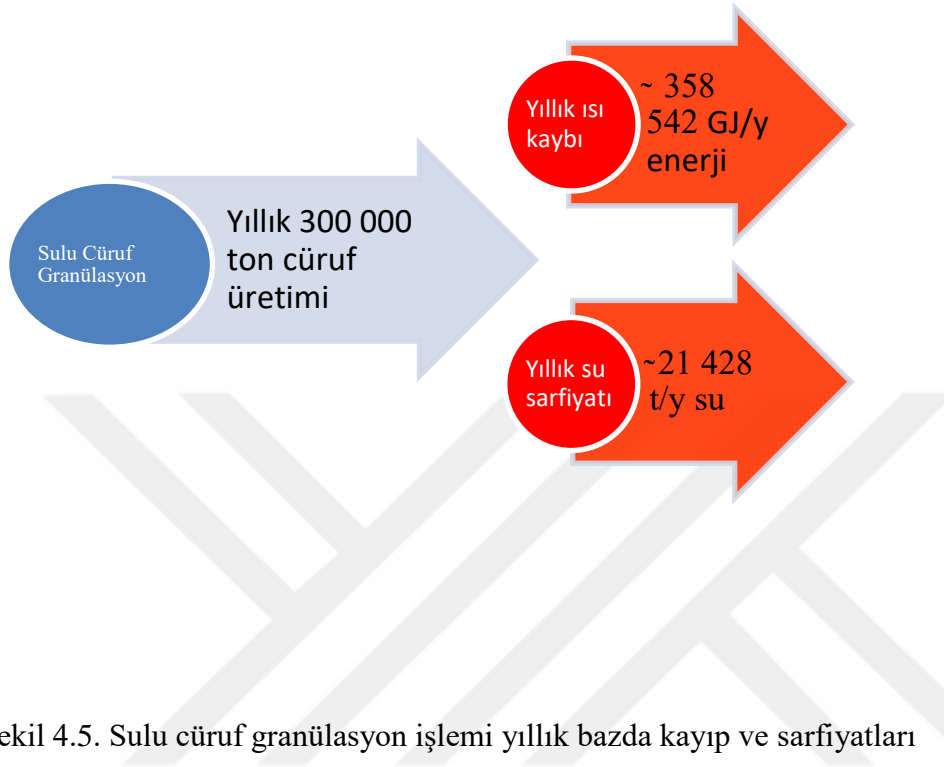
Çizelge 4.5. Sulu granülasyon yöntemi için kütle ve enerji değişimleri

Kütle				Enerji				
Giriş		Çıkış		Giriş		Çıkış		
Cüruf	Su	Cüruf	Su	Cüruf	Su	Cüruf	Su	Isı Kaybı
70 t	700 t	70 t	695 t	~ 115,5 GJ	205,03 GJ	4,07 GJ	232,8 GJ	83,66 GJ
770 t		765 t		320,53 GJ		320,53 GJ		

Çalışmada kullanılan su için hatlarda yaşanan basınç ve debi kayıpları göz ardı edilmiştir. Düzgün akış şeklinde cürufun sisteme ulaştığı ve anlık yoğun veya normalden az cüruf şeklinde olmadığı ideal sistem şartlarında çalışma yapılmıştır.

Çıkış su kütlesi pompa debi ve havuz hacminden hesaplanmış olup yaklaşık 700 tonluk su kullanımında 5 ton suyun buharlaşıp bacadan atıldığı hesaplanmıştır. Buna göre girdi ve çıktı enerji hesabı yaptığımızda sulu granülasyon işleminde yaklaşık olarak 70 tonluk bir cüruf üretimi gerçekleştiğinde 83,66 GJ enerji kaybı yaşanmaktadır. Şekil 4.5'te görüldüğü üzere yıllık bazda 300 000 ton cüruf üretimi yapan bir ticari kuruluşun yıl bazında 358 542 GJ değerinde ki bir enerji kullanmadığı görülmektedir. Bunun yanı sıra gerçekleşen yıllık bazda ki su sarfiyatı ise 21 428 tondur.





Norgate, Terry, Dongsheng Xie ve Sharif Jahanshahi [35] yaptıkları kuru cüruf granülasyon işleminin sonuçları ile bu tez çalışmasında elde edilen sulu cüruf granülasyon işleminin sonuçları karşılaştırması Çizelge 4.6 ve Çizelge 4.7’de verilmiştir;

Çizelge 4.6. Sulu cüruf granülasyon işleminde yıllık bazda ki değerler

Yıllık cüruf üretim tonajı	Yıllık Su Tüketimi tonajı	Yıllık enerji kaybı
300 000 t/y	21 428 t/y	358 542 GJ/y

Çizelge 4.7. Kuru cüruf granülasyon işleminde yıllık bazda ki değerler

Yıllık cüruf üretim tonajı	Yıllık Su Tüketimi tonajı	Yıllık enerji kaybı
300 000 t/y	0	141 274 GJ/y

Yapılan karşılaştırma sonucunda sulu cüruf granülasyon işleminde kaybolan enerji miktarı ile kuru granülasyon işleminde ki kaybolan enerji miktarlarının değerleri Çizelge 4.6 ve Çizelge 4.7’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.8. Sulu cüruf granülasyon işlemi kuru cüruf granülasyon işlemi son sıcaklık karşılaştırması

Akışkan yatak ve Granüle sıcaklığı	Kuru cüruf granülasyonu	Sulu cüruf granülasyonu
	~200°C	~70-80°C

Çizelge 4.9. Sulu cüruf granülasyon işlemi kuru cüruf granülasyon işlemi camsı içerik oranı karşılaştırması

Camsı içerik	Kuru cüruf granülasyonu	Sulu cüruf granülasyonu
	~%98-99	~%95-98

## 5. SONUÇLAR

Çelik, kullanım itibari ile dünyada hemen hemen tüm sektörlerde kullanılan ve ihtiyaç duyulan bir ürün olmuştur. Yıllara göre dünyada ki çelik üretiminde ki artış çelik talebinin her geçen yıl arttığını da göstermektedir.

Çeliğin üretimi zor ve zahmetli bir süreçte olsa da çeliğin oluşturduğu katma değer ve kullanım alanının genişliği çelik üreticilerini ve aynı zamanda üretimde ki tüm çalışanları böyle bir alanda hizmet verdikleri için motive edebilmektedir.

Çelik genel itibari ile dünyada ve ülkemizde iki şekilde üretilmektedir. Bunlardan biri elektrik ark ocakları ile hurda metallere çelik üretimi, bir diğeri ise demir cevherinden çelik üretimidir. Demir cevherinden çelik üretimi, yüksek fırın prosesine dayanmaktadır.

Yüksek Fırın, demir cevherini girdi olarak kullanan ve bunu kömür gibi yakıtlar ile redüklemesini sağlayan sonuç olarak sıvı ham demir nihai ürünü elde edilen sistemlerdir. Yüksek fırınlarda üretilen sıvı ham demir çelikhaneler de oksijen ile karbon miktarı düşürülüp çeliğe dönüştürülür.

Yüksek fırınlarda sıvı ham demir üretiminin sırasında yan ürünlerde oluşmaktadır. Bunlardan başlıca olanları ve geri dönüştürülerek kullanılanları yüksek fırın gazı ve yüksek fırın cürufudur. Yüksek fırın gazı, yüksek fırında soba ısıtma sisteminde yakıt olarak kullanılarak geri dönüşümü sağlanmaktadır. Yüksek fırın cürufu ise granüle hale getirilip çimento endüstrisinde hammadde olarak kullanılmaktadır.

Bu çalışmada yüksek fırın cürufunun genel özellikleri, granüle cüruf sistemleri, deneysel olarak sulu granülasyon ile elde edilen cüruf sisteminin verileri ve kimyasal-fiziksel özellikleri incelenmiş olup geleneksel sulu cüruf granülasyon yönteminden farklı olarak geliştirilmiş kuru cüruf granülasyon (DSG) teknolojisi konusunda yapılan çalışmaların derlemesi yapıp sulu cüruf granülasyon ile edilen değerler ile karşılaştırması yapılmıştır.

Sulu cüruf granülasyon yöntemi, sıvı sıcak cürufun yüksek basınçlı su püskürtülerek granüle haline getirildiği sistemlerdir. Sulu cüruf granülasyon işleminde edilen camsı içerik oranından dolayı çimento endüstrisinde sıklıkla kullanılmaktadır. Su ile yapılan granülasyon işleminde cüruf tanecik yapıya kavuştuğundan işlemin gerçekleştiği tank dibinde su ile birlikte çöker ve tank dibinde bulunan pompalar vasıtası ile taşınarak manipülasyonu sağlanır. Bir diğeri sulu granülasyon sistemi tipinde ise granüle cüruf su ile döner bir merdane içerisinden geçirilerek burada bulunan eleklerin üzerinden fazla su ile ayrıştırılır ve manipülasyonu konveyör bant yolları ile sağlanır.

Kuru granülasyon işleminde cürufun tanecik yapıya kavuşması ise hava yardımı ile olmaktadır. Sıvı sıcak cüruf cüruf sisteminde bulunan tanka düşey hareket ile dökülür. Cürufun döküldüğü noktada yüksek devirlerde dönen plaka (atomizer) ile cüruf tank içerisinde merkezkaç kuvvetinin de etkisi ile etrafa saçılarak soğur. Tank yüzeylerinde bulunan içten su soğutmalı sistem ile yüzeye çarpan cüruf yapışmadan daha da soğuyarak tank dibinde toplanır. Mevcut ısını havaya verdiğinden ısınan hava bölgeden tahliye edilerek geri dönüştürülerek sıcak havaya ihtiyaç olan bölgelerde kullanımı da sağlanabilir. Sulu granülasyon işleminde sarfiyat olan su, kuru granülasyon sisteminde olmadığından daha temiz ve çevreci bir sistem olarak görülmektedir.

Kuru granülasyon sistemi için yapılan çalışmalarda sulu granülasyon işleminde elde edilen cüruf ile yakın özelliklerde olduğu görülmüştür.

Kuru granülasyon işleminin dezavantajları, işlem sırasında tank yüzeylerinde, döner plaka (atomizer) yüzeylerinde zamanla cürufun aşındırıcı özelliğine bağlı olarak hasarlanmalar görülmesi muhtemel olacaktır. Aynı zamanda granülasyon işleminin ekipman veya proses kaynaklı durması durumunda tank içinde yüksek sıcaklıklar görülebileceği için biriken cürufun temizlenmesi vs. gibi durumlarda iş güvenliği ve işçi sağlığı açısından risk oluşturabilecektir.

Kuru cüruf granülasyon işleminin avantajları, Su tüketimi olmadığından çevreci ve temiz bir üretim sistemidir. Geri dönüştürülebilir sıcak hava ile tüketim değerlerine işletme tarafına kazanç sağlayabilecektir. Yapılmış deneyler ve birçok çalışma atık ısının geri kazanımını göstermektedir. Bu kapsamda Norgate ve diğerleri (2012) kuru cüruf granülasyon işleminde 36,1 t/h cüruf üretimi için 63,6 GJ/h enerji kazancı hesaplamıştır. 300 000 ton yıllık cüruf üretim kapasitesine sahip bir işletme için bu kazanç yıl bazında 141 274 GJ/y olarak hesaplanmıştır. Üretilen granüle cüruf nem değeri düşük olacağından çimento endüstrisinde tekrar ısıtılıp neminden uzaklaştırma gibi bir durum olmayacağından nemini atmasında harcanan enerji kazanç olarak geri dönecektir. Döner plaka yapısından ve devrinden dolayı daha homojen bir tanecik yapısı olacaktır.

Sulu cüruf granülasyon işleminin dezavantajları, en büyük dezavantajı su sarfiyatı olan bir yöntem olmasıdır. Enerji geri kazanımı sistemsal olarak çok az olup, sıcak cürufun sahip olduğu ısı enerjisi su ile teması sonrası buhar oluşturarak atmosfere karışır. Bu durum yüksek miktarda enerjinin kullanılmamasına neden olur. Yapılan araştırma ve bulgularına göre yıllık 300 000 t cürufu sulu granülasyon işlemi ile üreten bir işletme için yıllık enerji kaybı 358 542 GJ/y değerindedir. Ayrıca su ile granüle işleminde cürufun granüle hale geldikten sonra sahip olduğu nem değerinden dolayı çimento endüstrisinde de tekrardan ısı işlem

uygulanarak mevcut yapısından nem uzaklaştırılmak istenir ve bu durumda fazladan bir enerji sarfiyatı oluşturur. Kullanılan su miktarına göre buharlaşarak kaybolan su miktarı ise 300 000 t/y cüruf üretimi yapan bir işletme için yıllık olarak 21 428 t değerindedir.

Sulu granülasyon işleminin avantajları, yöntem geleneksel ve kullanılan bir yöntem olduğundan üretim olarak risk teşkil etmez. Belli standartta ve birçok endüstride kullanılabilir granüle cüruf üretimini sağlar. Cürufun bu yöntem ile camsı yapı olarak yüksek camsı orana sahip olması ve ani soğuma yaparak amorf yapıya sahip olması çimento endüstrisinde kullanımı kolaylaştıran ve tercih edilmesinde büyük etkisi olan özelliklerdir.

Bu çalışmada geleneksel cüruf elde edilme yöntemleri ve kullanımı yaygınlaşmamış kuru cüruf granülasyon yöntemlerinin farklılıkları incelenmiştir. Bu kapsamda her iki yönteminde avantaj ve dezavantajları açıklanmıştır.

## KAYNAKLAR

1. İnternet: Birleşik Metal İşçileri Sendikası, Demir-Çelik Sektörü, URL: [http://www.birlesikmetal.org/kitap/kitap\\_03/2003-2.pdf](http://www.birlesikmetal.org/kitap/kitap_03/2003-2.pdf) , Son Erişim Tarihi: 18.05.2021.
2. İnternet: World Steel in Figures 2019 (WSA), URL: <https://www.worldsteel.org> , Son Erişim Tarihi: 18.05.2021.
3. İnternet: T.C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı Sanayi ve Verimlilik Genel Müdürlüğü, Demir Çelik Sektör Raporu (2019), URL: <http://satso.org.tr> , Son Erişim Tarihi: 18.05.2021.
4. YETİŞKEN, Y., EKMEKÇİ, İ. & ÖZÇELEBİ, S., (2005). Dünya’da ve Türkiye’de Demir Çelik Sektöründeki Üretim Çeşitliliğinin Bugünkü Durumu ve Geleceği . III. Demir-Çelik Kongresi ve Sergisi Bildiriler Kitabı (pp.1-5). Zonguldak, Turkey
5. İnternet: [cdn.bartın.edu.tr](http://cdn.bartın.edu.tr), demircelikuretimisunu2, URL: <https://cdn.bartın.edu.tr/metalurji> , Son Erişim Tarihi: 18.05.2021.
6. İnternet: Hot blast, URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Hot\\_blast#/media](https://en.wikipedia.org/wiki/Hot_blast#/media) , Son Erişim Tarihi: 18.05.2021
7. İnternet: [Seraing - Skip.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:HF6_Seraing_-_Skip.jpg), URL: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:HF6\\_Seraing - Skip.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:HF6_Seraing_-_Skip.jpg) , Son Erişim Tarihi: 18.05.2021.
8. İnternet: [https://www.eng.nipponsteel.com/english/whatwedo/upload/images/1-3-5\\_02.jpg](https://www.eng.nipponsteel.com/english/whatwedo/upload/images/1-3-5_02.jpg) ,Son Erişim Tarihi: 18.05.2021.
9. Reuter ve Ark., 2004)( M., XIAO Y., BOIN U. Recycling and environmental issues of metalurgical slags and salt fluxes. VII. International Conference on Molten Slags, Fluxes and Salts,349-356 p. 2004.
10. Leyser, Patrick, and Christian Cortina. "INBA® slag granulation system with environmental control of water and emissions." Millenium Steel (2006): 67-72.
11. Mizuochi, Toshio, et al. "Feasibility of rotary cup atomizer for slag granulation." Isij International 41.12 (2001): 1423-1428.
12. Erdoğan, T.Y., “BETON”. ODTÜ Geliştirme Vakfı Yayıncılık Ve İletişim A.Ş. 2003 ANKARA.
13. İnternet: Metal Dünyası, Demir ve Çelik Üretiminin Kısa Bir Tarihçesi, URL: <https://metaldunyasi.com.tr/tr/guncel/86/demir-ve-celik-uretiminin-kisa-bir-tarihcesi.html> , Son Erişim Tarihi: 18.05.2021.
14. ÜNAL S., YÜCEL O., KURT M., GÜL S. Atık’tan Ürün’e Demir-Çelik Cürufu, İleri Teknolojiler Çalıştayı,255-267,2014.
15. Çelik, Osman Halil. Alüminyum Siyah Curuflarındaki Alüminyumun Ve Bileşiklerinin Hidro Ve Pirometalurjik Yöntemler İle Geri Kazanılması. Diss. Fen Bilimleri Enstitüsü, 2015
16. Sözbir, Nedim, Mustafa Akçıl, and Hasan Okuyucu. "Alüminyum Cürufundan Alüminyum Metali ve Flaks Eldesi." ISEM2014 Adıyaman (2014): 1108-113
17. ÇŞB, T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, Sektörel Atık Kılavuzları, Birincil ve İkincil Alüminyum Üretimi, 2016

18. Yücel, Onuralp, and Erman Car. "Alüminyum cüruflarının değerlendirilmesi ve klasiyum alüminat sentetik cüruf yapıcı üretimi." Türk Mühendis ve Mimar Odaları Birliği Metalurji ve Malzeme Mühendisleri Odası, Metalurji 175 (2015)
19. TCUD. Türkiye Çelik Üreticileri Derneği, 2015. Demir Çelik Cüruf Raporu.
20. Shen, H.T.; Forssberg, E. An overview of recovery of metals from slags. *Waste Manag.*, 2003 23, 933-949.
21. Liu, J.X.; Yu, Q.B.; Li, P.; Du, W.Y. Cold experiments on ligament formation for blast furnace slag granulation. *Appl. Thermal Eng.*, 2012, 40, 351-357.
22. Sun, W.Q.; Cai, J.J.; Du, T.; Zhang, D.W. Specific energy consumption analysis model and its application in typical steel manufacturing process. *J. Iron Steel Res. Int.*, 2010, 17, 33-37.
23. Sun, W.Q.; Cai, J.J.; Du, T.; Ye, Z. Advances in energy conservation of China steel industry. *Sci. World J.*, 2013, 2013, Article ID 247035, 8 pages.
24. ÖCAL Y. Demir çelik sektöründe atık yönetimi, Uzmanlık Tezi, T.C. Kalkınma Bakanlığı Yayın No:2911. 2014
25. Baycık, Serdar. Granüle Yüksek Fırın Cüruflarının Karo Sektöründe Kullanılabilirliğinin Araştırılması. Diss. Fen Bilimleri Enstitüsü, 2002.
26. Sivrikaya O, Yavascan S, Cecen E. "Effects of ground granulated blast-furnace slag on the index and compaction parameters of clayey soils". *Acta Geotechnica*, 1, 19-27, 2014.
27. Jahanshahi, Sharif, Yuhua Pan ve Dongsheng Xie. "Kuru cüruf granülasyon işleminin bazı temel yönleri." 9. Uluslararası Erimiş Cüruflar, Akıllar ve Tuzlar Konferansı (Molten12), Pekin . 2012
28. McDonald, I. ve Andrea Werner. "Isı geri kazanımlı kuru cüruf granülasyonu." AISTech - Demir ve Çelik Teknolojisi Konferansı Bildirileri (Demir ve Çelik Teknolojisi Derneği, AISTECH), Indianapolis, IN, ABD . 2014
29. Fleischanderl, A., T. Fenzl, and R. Neuhold. "Dry slag granulation—the future way to granulate blast furnace slag." *Proceedings of the 2018 Iron & Steel Technology Conference and Exposition*. 2018.
30. Wu, Jun-Jun, et al. "Cold experiment of slag centrifugal granulation by rotary atomizer: Effect of atomizer configuration." *Applied Thermal Engineering* 111 (2017): 1557-1564.
31. J. Xie, Y. Zhao, J. Dunkley, Effects of processing conditions on powder particle size and morphology in centrifugal atomisation of tin, *Powder Metall.* 47 (2004) 168–172.
32. M. Ahmed, M.S. Youssef, Influence of spinning cup and disk atomizer configurations on droplet size and velocity characteristics, *Chem. Eng. Sci.* 107 (2014) 149–157.
33. J. Liu, Q. Yu, P. Li, W. Du, Cold experiments on ligament formation for blast furnace slag granulation, *Appl. Therm. Eng.* 40 (2012) 351–357.
34. İnternet: Yüksek fırın, URL: [https://tr.wikipedia.org/wiki/Y%C3%BCksek\\_f%C4%B1r%C4%B1n](https://tr.wikipedia.org/wiki/Y%C3%BCksek_f%C4%B1r%C4%B1n) , Son Erişim Tarihi: 18.05.2021.

35. Norgate, Terry, Dongsheng Xie, and Sharif Jahanshahi. "Technical and economic evaluation of slag dry granulation." AISTech2012 Iron & Steel Technology Conference and Exposition. 2012.
36. İnternet: Physical characteristics of water (at the atmospheric pressure), URL: [https://www.thermexcel.com/english/tables/eau\\_atm.htm](https://www.thermexcel.com/english/tables/eau_atm.htm) , Son Erişim Tarihi: 18.05.2021.







**TEKNOVERSITE**



teknoversite **AYRICALIĞINDASINIZ**

**İSTE**

