

**T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ATIK PLASTİK KATKISININ DEMİR CEVHERİ PELETLERİNİN REDÜKSİYON
ÖZELLİKLERİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

GÖKHAN POLAT

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
ÜRETİM METALURJİSİ PROGRAMI**

**DANIŞMAN
DOÇ. DR. MUHLİS NEZİHİ SARIDEDE**

İSTANBUL, 2013

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ATIK PLASTİK KATKISININ DEMİR CEVHERİ PELETLERİNİN REDÜKSİYON
ÖZELLİKLERİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Gökhan POLAT tarafından hazırlanan tez çalışması 28/11/2013 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Doç. Dr. Muhlis Nezihi SARİDEDE
Yıldız Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Doç. Dr. Muhlis Nezihi SARİDEDE
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof.Dr. Ahmet EKERİM
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof.Dr. Hanifi SARAÇ
Yıldız Teknik Üniversitesi

Bu alışma, Yıldız Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü'nün 2011-07-02-KAP02 numaralı projesi ile desteklenmiştir.

ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasının başından sonuna kadar, tüm bilgi ve tecrübesini benimle paylaşan, çalışmama yön veren ve her şeyden de önemlisi insanlığıyla bana örnek olan saygıdeğer Hocam Doç. Dr. Muhlis Nezihi SARIDEDE'ye sonsuz teşekkürlerimi sunuyorum.

Gerek bilgi konusunda, gerekse deneysel çalışmalarda her zaman desteğini arkamda hissettiğim Hocam Arş. Gör. Dr. Burak BİROL'a, Arş. Gör. Dr. Nilüfer EVCİMEN DUYGULU'ya, Uzm. Yahya BAYRAK'a arkadaşlarım Met. Yük. Müh. Oğuz KARAAHMET'e, Arş. Gör. İbrahim Gökhan GÜNDÜZ'e, laboratuvar ve cihaz kullanımları için yardımcı olan Yıldız Teknik Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü tüm araştırma görevlileri ve teknik elemanlarına teşekkürü borç bilirim.

Bu çalışma sadece benim değil, aynı zamanda tüm eğitim hayatım boyunca desteklerini her zaman fazlasıyla aldığım saygıdeğer ailemin de bir ürünüdür. Ailemdeki her bireye ayrı ayrı teşekkürlerimi sunuyorum.

Aralık, 2013

Gökhan POLAT

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ	vii
KISALTMA LİSTESİ	viii
ŞEKİL LİSTESİ.....	ix
ÇİZELGE LİSTESİ	xi
ÖZET	xii
ABSTRACT	xiv
BÖLÜM 1	1
GİRİŞ	1
1.1 Literatür Özeti	1
1.2 Tezin Amacı	3
1.3 Hipotez	3
BÖLÜM 2	5
DEMİR-ÇELİK ÜRETİM YÖNTEMLERİ	5
2.1 Yüksek Fırın Teknolojisi	5
2.2 Alternatif Sünger Demir Üretim Prosesleri.....	10
2.2.1 Kömür Bazlı Sünger Demir Üretim Prosesi	12
2.2.2 Gaz Bazlı Sünger Demir Üretimi Prosesi	17
2.3 Alternatif Pik Demir Üretim Prosesleri	19
2.3.1 COREX Prosesi.....	19
2.3.2 ITmk3 Prosesi.....	22
2.3.2.1 Proses Özellikleri	23
2.3.2.2 Ürün Özellikleri.....	24
BÖLÜM 3	25
KOMPOZİT PELETLER VE ÖZELLİKLERİ	25
3.1 Kompozit Peletlerin Redüksiyon Termodinamiği ve Kinetiği.....	26

3.1.1	Kompozit Peletlerin Redüksiyon Termodinamiği	26
3.1.2	Kompozit Peletlerin Redüksiyon Kinetiği.....	29
BÖLÜM 4		32
ATIK PLASTİKLER VE GERİ DÖNÜŞÜMLERİ		32
2.1	Plastiklere Uygulanan Geri Kazanım Yöntemleri	33
2.1.1	Birincil Geri Kazanım.....	34
2.1.2	İkincil Geri Kazanım	34
2.1.3	Üçüncül Geri Kazanım.....	34
2.1.4	Dördüncül Geri Kazanım.....	35
2.2	Yüksek Fırında Redükleyici Olarak Atık Plastik Kullanımı.....	35
BÖLÜM 5		39
DENEYSEL ÇALIŞMALAR		39
5.1	Deneylerde Kullanılan Hammaddeler ve Cihazlar	39
5.2	Deneyin Yapılışı	40
5.2.1	Atık Plastiğin (PET) Peletlemeye Uygun Hale Getirilmesi.....	41
5.2.2	Kompozit Pelet Üretimi	43
5.2.3	Redüksiyon İşlemleri.....	44
BÖLÜM 6		46
DENEYSEL SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME		46
6.1	Redüklenmeye Ait Deney Sonuçları.....	46
6.2	XRD Analizi Sonuçları	48
6.2.1	XRD Sonuçlarına Bağlı Olarak Sürenin Redüksiyona Olan Etkisi	48
6.2.2	XRD Sonuçlarına Bağlı olarak Sıcaklığın Redüksiyona Olan Etkisi.....	50
6.3	Karışım Oranlarının Redüksiyon Ürününe Etkisi	53
6.4	Elde Edilen Metalik Demirlerin Kimyasal Analizleri	53
6.5	Redüksiyon Esnasında Yapılan Gaz Analizleri	55
6.6	Elde Edilen Metalik Demirlerin Mikroyapıları.....	57
BÖLÜM 7		58
SONUÇ VE ÖNERİLER		58
KAYNAKLAR.....		61
ÖZGEÇMİŞ.....		63

SİMGE LİSTESİ

$^{\circ}\text{C}$	Santigrat derece
f	Reaksiyon oranı
$^{\circ}\text{K}$	Kelvin derece
t	Reaksiyon süresi (dk.)
T	Reaksiyon sıcaklığı (K)
T_c	Kristalizasyon
R_x	Bir oksit küresinin redüksiyon oranı (giderilen oksijenin yüzdesi)

KISALTMA LİSTESİ

BF-BOF	Bazık fırın-Bazık oksijen fırını
DR	Direkt redüksiyon
DRI	Direkt redüklenmiş demir
HBI	Sıcak briketlenmiş demir
ITmk3	Üç numaralı demir üretim teknolojisi
LCA	Doğada parçalanma için geçen ömür
PE	Polietilen
PET	Polietilen tereftalat
PP	Poliporopilen
PVC	Polivinilklorür

ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2.1	Yüksek fırının şematik yapısı ve sıcaklık bölgelerine bağlı olarak gerçekleşen reaksiyonlar..... 7
Şekil 2.2	Döner fırında sünger demir üretiminin akış diyagramı..... 14
Şekil 2.3	Fastmet prosesi akış diyagramı..... 16
Şekil 2.4	Midrex prosesi akış diyagramı 17
Şekil 2.5	COREX prosesi akış diyagramı 20
Şekil 2.6	ITmk3 prosesinin akış şeması..... 23
Şekil 2.7	Kobe Steel ITmk3 pilot tesisinde yapılan çalışmada ürün tanelerinin C içerikleri..... 24
Şekil 3.1	Kompozit pelet üretim akım şeması 26
Şekil 3.2	Süre ile pelet sıcaklığının ve fırındaki CO,CO ₂ miktarlarının değişimi..... 27
Şekil 3.3	Sıcaklıkla redüksiyon derecesinin değişimi 28
Şekil 3.4	Çeşitli demir ve sünger demir üretim yöntemlerinin Fe-C denge sisteminde çalıştığı kısımlar 29
Şekil 3.5	Daha önce yapılmış çalışmalara göre redüksiyon oranının zaman fonksiyonuna göre değişimi ve karbon monoksit ile demir redüksiyonunun karşılaştırılması..... 30
Şekil 3.6	Kompozit peletlerin redüksiyon esnasındaki değişimleri 31
Şekil 4.1	Plastik geri kazanımı için tipik bir akış diyagramı..... 33
Şekil 4.2	Yüksek fırın prosesinde atık plastik kullanımı ve tüyerlerden plastik enjeksiyonu 36
Şekil 4.3	Pulverize kömür ve atık plastik kullanıldığında tüyer önü bölgesinin görüntüsü 38
Şekil 5.1	Multipex marka küresel pelet makinası..... 40
Şekil 5.2	Redüksiyon için kullanılan yatay tüp fırın ve MRU marka gaz analiz cihazı 40
Şekil 5.3	Etüv fırınında 1,2,3 saat bekletilen PET numuneleri için % Ağırlık-Eleküstü grafiği 42
Şekil 5.4	Kurutma sonrası elde edilen pelet numuneleri 44
Şekil 5.5	Grafit kayıkçık içerisine yerleştirilmiş pelet numuneleri..... 44
Şekil 6.1	1400°C’de redüksiyon-zaman grafiği 47
Şekil 6.2	1450°C’de redüksiyon-zaman grafiği 47
Şekil 6.3	1400°C’de %60 PET-%40 kok karşımı içeren, a)2 dakika, b)6 dakika, c)10 dakika sonunda elde edilen numunelerin XRD grafikleri..... 49

Şekil 6.4	%0 PET-%100 kok karışımının a)1400 °C’de, b)1450 °C’de redüklenmiş numunelere ait XRD sonuçları	50
Şekil 6.5	%60 PET-%40 kok karışımının a)1400°C’de, b)1450°C’de redüklenmiş numunelere ait XRD sonuçları	51
Şekil 6.6	%100 PET-%0 kok karışımının a)1400°C’de, b)1450°C’de redüklenmiş numunelere ait XRD sonuçları	52
Şekil 6.7	1400°C’de 10 dakika sonucunda elde a)%0 PET-%100 kok, b)%60 PET-%40 kok ve c)%100 PET-%0 kok içeren numunelere ait görüntü	53
Şekil 6.8	1450°C’de 10 dakika sonucunda elde a)%0 PET-%100 kok, b)%60 PET-%40 kok ve c)%100 PET-%0 kok içeren numunelere ait görüntü	53
Şekil 6.9	Redüksiyon esnasında fırın ortamındaki gaz analizi ve sıcaklık ölçümü a)1400°C %0 PET-%100 kok, b)1400°C %60 PET-%40 kok, c)1400°C %100 PET-%0 kok, d)1450°C %0 PET-%100 kok, e)1450°C %60 PET-%40 kok ve f)1450°C %100 PET-%0 kok içeren numuneler	55
Şekil 6.10	1450°C’de 10 dk.’lık sürede tek başına grafit kayıkçığa ait gaz analizi grafiği	56
Şekil 6.11	1450°C’de 10 dakikada elde edilmiş (500x büyütme) a)%0 PET-%100 kok, b)%60 PET-%40 kok ve c)%100 PET-%0 kok içeren numunelerden elde edilmiş mikroyapı görüntüleri (C:sementit, F:Ferrit ve L:Ledeburit)	57

ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge 2.1	Alternatif demir üretim prosesleri ve özellikleri	11
Çizelge 2.2	Demir cevherinin redüklenme esnasındaki fazları ve bileşimleri	13
Çizelge 2.3	COREX prosesi ile çelik üretimi için uygun kömürlerin özellikleri	21
Çizelge 2.4	Demir tanesi kimyasal kompozisyonu	24
Çizelge 5.1	Pelet kekinin kimyasal analizi	39
Çizelge 5.2	Kokun kimyasal analizi	39
Çizelge 5.4	1, 2 ve 3 saat etüvde bırakılan numunelerin elek analizi tablosu	42
Çizelge 5.4	Hazırlanan pelet türleri ve pelet harmanı miktarları	43
Çizelge 6.1	Çeşitli pelet numunelerine ait redüksiyon koşulları ve elde edilen redüksiyon oranları	46
Çizelge 6.2	1450°C’de redüksiyon sonucunda metalik demir elde edilen numuneler ve kimyasal analizleri	54

**ATIK PLASTİK KATKISININ DEMİR CEVHERİ PELETLERİNİN REDÜKSİYON
ÖZELLİKLERİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

Gökhan POLAT

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Muhlis Nezihi SARIDEDE

Günümüzde, düşük kaliteli cevherlerin ve kompozit pelet adı verilen, redükleyicisini içerisinde barındıran peletlere dayalı olarak çeşitli üretim yöntemleri geliştirilmiştir. Bu yöntemlerden biri ise nispeten düşük sıcaklıklarda (1350°C - 1400°C) ve kısa sürelerde redükleyici ergitmenin gerçekleştirildiği ITmk3 prosesidir. Bu proseste düşük sıcaklık sayesinde enerjiden, prosesin hızlı ilerlemesinden dolayı ise süreden tasarruf sağlanmaktadır. ITmk3 prosesinde redükleyici olarak kok kömürü kullanılmakta ve pik demir kalitesinde demir tanesi elde edilmektedir.

Gelişen teknoloji ile birlikte plastiklerin yaygın olarak kullanılmaya başlanması, oluşan atık miktarında da önemli artışlara sebep olmuştur. Plastiklerin doğadaki çok uzun süren bozunumlarından dolayı atık plastikler, çevresel zararlara ve kirliliklere sebep olmaktadır. Plastiklerin geri dönüşümü ile bu problemler belli bir ölçüye kadar ortadan kaldırılabilir. Atık plastiklerin demir çelik endüstrisinde kok yerine alternatif redükleyici olarak kullanılabilirliğinin araştırılması, atık plastik geri dönüşüm yöntemlerine alternatif oluşturacaktır. Ayrıca kokun demir çelik endüstrisinde yüksek oranlarda kullanılması önemli sorunlar teşkil etmektedir.

Bu çalışmanın amacı, pik demir üretimine alternatif olan redükleyici ergitme prosesinde kömür yerine kullanılabilecek alternatif, ucuz bir redükleyici geliştirmek ve

plastik atıkların geri dönüşümüne farklı bir uygulama alanıyla katkıda bulunmaktadır. Bu amaçla yapılan deneysel çalışmalarda, atık plastikler kompozit peletlere redükleyici olarak ilave edilmiştir. Atık plastik olarak; plastik atıklar sınıfında yüksek bir kullanım oranına sahip olan PET (Polietilen teraftalat) atıkları, içerdiği yüksek karbon oranından dolayı kullanılmıştır. Deneysel çalışmalarda, PET atıklarını, kok ve manyetit cevherini barındıran kompozit peletler hazırlanmıştır. Hazırlanan bu kompozit peletler, görece yüksek sıcaklıklarda ve çeşitli sürelerde redükleyici ergitme işlemine tabi tutulmuşlardır. İşlem süresince pelette meydana gelen değişim ve dönüşümler gözlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: PET atıkları, geri kazanım, kompozit pelet, demir ve çelik, redüksiyon

**INVESTIGATION OF THE EFFECT OF WASTE PLASTIC ADDITION ON
REDUCTION BEHAVIOR OF IRON ORE PELLETS**

Gökhan POLAT

Department of Metallurgical and Materials Engineering

MSc. Thesis

Adviser: Assoc. Prof. Dr. Muhlis Nezihi SARIDEDE

Traditionally, the method of iron and steel production facilities are based on the blast furnace. In the blast furnace method, iron ore charged in the form of lump ore, pellets or sinter. Together with a sufficient amount of ore and flux, fuel oil or mostly coke is used as a reductant. Dependence on such a high rates of coke, leads to the use of high quantities of coke. The development of new production technologies and reducing dependence on coal provides a significant contribution to iron and steel industry.

Nowadays, various production methods have been developed based on using low quality ores and composite pellet which include its self reductant. One of these methods is ITmk3 process which carried out at relatively low temperatures (1350°C - 1400°C) and in short times. Thanks to low temperatures and short reduction times, energy and time is saved in this process. In the ITmk3 process, coke is used as reductant and successful results obtained up to now.

Depends on improving technology using of plastics in the world increases day by day and the amount of waste plastics increase as a result of high consumption. The long degradation period of plastics in nature cause the plastic wastes to be a major problem for environmental damage and pollution. By recycling of plastics these problems can

be eliminated. For this aim plastics can be used as alternative reductant for iron and steel industry instead of coke. Additionally, high production cost and high consumption of coke has always been the primary problem of iron and steel industry. The aim of this study is reduction of costs due to coke consumption in iron making and environmental damage caused by waste plastics. By this aim waste plastics were added to composite pellets as reductant. In this study PET (Polyethylene terephthalate) which is the remarkable percent of plastic wastes, was used due to its high carbon content. In the experiments, composite pellets which contain PET wastes, coke and magnetite iron ore were prepared. After that, composite pellets were reduced at relatively high temperatures during various reduction times in order to investigate its behavior during reduction melting process.

Keywords: PET wastes, recycle, composite pellet, iron and steel, reduction

1.1 Literatür Özeti

Demir ve çeliğin sahip olduğu üstün mekanik özellikler, demir ve çelik sektörü gün geçtikçe daha da gelişmektedir. Demir çelik sektörünün bu şekilde yoğun bir talep uyandırmasından dolayı mevcut yeraltı ve enerji kaynakları bu talepleri karşılayamaz hale gelmiştir. Dünyada birçok ülkede, mevcut demir-çelik kaynaklarını daha olumlu kullanılması ve üretimin daha da ekonomik duruma gelmesi için birçok çalışma yapılmaktadır [1].

Günümüzde yüksek fırın teknolojisi, yüksek üretim kapasiteleri ile demir üretiminde hala birincil üretim metodu olarak kullanılmaktadır [2]. Yaygın olarak kullanılan bu üretim metodunun yatırım maliyeti ve açığa çıkan hurda miktarının yüksek olması elektrik ark ocaklı tesis sayısının artmasına neden olmuştur. Yüksek fırının sahip olduğu dezavantajlardan dolayı zamanla, yüksek fırın prosesinde iyileştirmeler ve prosesin yerini tutacak bazı girişimler ortaya çıkmıştır [3]. Bunlardan bazıları; çeşitli proses seçeneklerinin geliştirilmesi, direkt redüksiyonu içermesi ve koksuz redükleyici ergitme olarak sıralanabilir. Bu gelişmeler uygun bir şekilde uygulanmasına rağmen, yüksek fırın teknolojisi bu sürekli gelişmelere karşı zorluklar ortaya çıkarmaktadır. Bu yüzden, yüksek fırının rolü, başlıca iyileştirmeler ve demir üretiminin son zamanlardaki önemli gelişmeleri gözden geçirilmelidir [2].

Hammaddenin kısıtlılığı, kurulum ve işletme maliyeti, çevre sorunları gibi olumsuz durumlar, çeşitli demir üretim teknolojilerinin doğmasına yol açmıştır. Bu üretim teknolojileri şu şekilde sıralanabilmektedir;

- Daha düşük kalitede hammaddenin kullanılabileceği şaft fırınları,
- Bir demir üretim kapasitesini arttırmak veya koklaşmış kömürün azlığından dolayı geliştirilmiş DRI üretimi ve döner fırınlar,
- Cevher hazırlama kademesini atlatmak için geliştirilen redükleyici ergitme,
- Koklaşmış kömür azlığından ve koklaştırma prosesinden uzak durmak için ise COREX prosesi geliştirilmiştir [4].

Geleneksel demir çelik üretim yöntemlerinin eskimesi, artıkların geri dönüşümünün önem kazanması ve açığa çıkan gaz emisyonlarının miktarları da demir çelik üretim tesislerinin geliştirilmesinde önemli rol oynamaktadır. Bundan dolayı, yüksek fırın işlemi öncesi hammaddelere yüksek sıcaklıkta uygulanan koklaştırma, sinterleme gibi hazırlama işlemlerinden uzak durmak için alternatif yöntemler araştırılmıştır. Bu alternatif yöntemler biri, bünyesinde redükleyici (karbon) ve demir cevheri barındıran kompozit pelet ismi verilen topakların kullanılmasıdır. Kompozit peletler, soğuk bağlı peletler olup birçok ülkede denenmiş olmasına rağmen yüksek fırında kullanıma karşı yeterli mukavemete sahip olmadığı görülmüştür. Bu yüzden kompozit peletler, şaft fırınları ile üretim yapan tesisler için uydun şarj maddeleri değildir [4,5].

Düşük mukavemetli topakların kullanılabilmesi açısından döner hazneli fırınlar daha gelişmiş reaktörlerdir. Yüksek fırın ve döner fırın kıyaslandığında, katı ve gaz arasındaki konveksiyon mekanizmalı ısı ve kütle transferi döner fırında çok daha az öneme sahiptir [6].

Demir-çelik üretiminde BF-BOF sistemi birinci jenerasyon, doğalgaz kullanılarak DR üretilen MIDREX yöntemi ikinci jenerasyon iken en son geliştirilen ve kompozit pelet kullanılan ITmk3 (Ironmaking Technology Mark Three) yöntemi yeni bir teknoloji olarak yerini almıştır. Bu yeni teknolojik yöntemde, döner hazneli fırın içerisinde ince demir cevheri ve kömür kullanılarak nispeten düşük sıcaklıklarda yüksek saflıkta direkt demir üretilmektedir. Bu yöntemin araştırma ve geliştirme safhası 1996 yılında başlamış ve konuyla ilgili temel çalışmalar üniversiteler ve araştırma enstitülerinin ortak çalışmasıyla devam ettirilmiştir [7].

Yapılan bu çalışmaların çoğunda redükleyici olarak kömür türleri kullanılmıştır. Kömürün bu derece çok kullanılması ve açığa çıkan bazı atıkların değerlendirme

gerekliliği, araştırmacıları bu atıkların alternatif redükleyici olarak kullanılmasının araştırılmasına itmiştir. Redükleyici olarak kullanılması araştırılan atıklardan biri de plastik atıklarıdır. Plastiklerin kömüre alternatif olarak kullanılması üzerine yapılan bazı çalışmalar aşağıda sıralanmıştır;

- Plastiklerin enjekte etmek suretiyle metalürjik bir hammadde olarak yüksek fırında kullanımları [8].
- Kok fırını kullanılarak atık plastiklerin karbonizasyonu [9]
- Yüksek fırına enjekte etmek suretiyle atık plastiklerin ayrışması ve enerji sağlayıcısı olarak kullanılıp enerjiden tasarruf edilmesi [10]

Atık plastiklerin demir-çelik endüstrisinde kullanılması üzerine yapılan bir başka çalışma da Çinli araştırmacılar tarafından gerçekteştirilmiştir. Bu araştırmacılar, polikarbonat ve PET atıklarını ayrı ayrı demir oksitlerle karıştırmış ve en son bu karışımın üzerini kok ile kaplayarak belli bir sıcaklıkta, süreye ve karışımdaki atık plastiklerin oranlarına bağlı olarak redüksiyon derecelerini incelemişlerdir. Bu çalışma sonucunda atık plastiklerin miktarına bağlı olarak redüksiyona olumlu katkıda bulunduğu tespit edilmiştir [11].

1.2 Tezin Amacı

Bu çalışmada, günlük tüketim sonucu yüksek miktarlarda açığa çıkan PET atıkları, değişen oranlarda kok ile birlikte demir cevherinin içerisine katılarak bir pelet harmanı hazırlanmıştır. Elde edilen bu harman, bir döner disk yardımıyla kompozit pelet haline getirilmiştir. Hazır hale gelen her bir pelet karışımının redüksiyon özelliklerini tespit etmek amaçlı sıcaklığın ve sürenin redüksiyona etkisi incelenmiştir. Bu amaç doğrultusunda peletler, iki farklı sıcaklıkta ve çeşitli sürelerde redüksiyon işlemine tabi tutulmuştur. Bu incelemeler sonucunda PET atıklarının demir cevherinde redükleyici olarak kullanılabilmesi için gerekli optimum koşulların (karışım oranı, sıcaklık ve süre) saptanması amaçlanmıştır.

1.3 Hipotez

Kompozit pelet ile demir tanesi üretiminde redükleyici olarak çoğunlukla kömür hammaddesi kullanılmaktadır. Kömür, temel olarak bünyesinde yüksek oranda karbon

(C) barındırmaktadır. Bir plastik türü olan PET ise aynı şekilde bünyesinde yüksek miktarda karbon bulundurmaktadır. Demir cevherinin redüklenmesi de karbon ile sağlanabilmektedir. Yüksek sıcaklıkta PET'in parçalanması sonucu açığa çıkan karbon bileşikleri sayesinde de demir cevherinin redüklenmesi gerçekleştirilebilir. Böylece doğada bozunması çok uzun zaman alan PET atıkları değerlendirilerek hem çevreye olan zararlı etkileri azaltılmış olur, hem de alternatif bir hammadde olarak demir-çelik endüstrisinde kullanımı sağlanmış olur.

BÖLÜM 2

DEMİR-ÇELİK ÜRETİM YÖNTEMLERİ

2.1 Yüksek Fırın Teknolojisi

Yüksek fırın şematik olarak Şekil 2.1’de verilmiştir. Fırın, bir çelik kılıf ve bu kılıfın içerisinde örülü refrakterlerden meydana gelen 20 m - 30 m yüksekliğinde bir şafttan oluşmaktadır. Fırına, cevher, kok ve flaks (cüruf yapıcı) şarj edilmektedir. Flaks kullanılmasının amacı, daha uygun bileşimde bir cüruf hazırlamaktır. Bunlar genellikle kireç, kireç taşı ve dolomittir. Fırın tabanında ise tüyerlerden sıcak hava üflenmektedir. Fırın gazları fırının tepesinden çıkmaktadır. Ergimiş metal ve cüruf fırının tabanındaki hazneden alınmaktadır. Gövde ile hazne arasındaki ters koni şeklinde bölüme karın ismi verilmektedir.

Fırında gerçekleşen kimyasal reaksiyonlar ve fırın şaftı boyunca çıkan CO_2/CO oranı Şekil 1’de gösterilmiştir. Tüyer seviyesinde hava ile kokun etkileşimi ile $2\text{C} + \text{O}_2 = 2\text{CO}$ reaksiyonu meydana gelmektedir. Bu reaksiyon, ısının ve redükleyici gazın ana kaynağıdır. Fırın gövdesinin üst kısımlarında, cevher aşağıdaki reaksiyon adımlarıyla redüklenir;



Bu reaksiyonlar, sıcaklık $400^\circ\text{C} - 500^\circ\text{C}$ ’ye gelince gerçekleşmeye başlar ancak asıl reaksiyonlar $700^\circ\text{C} - 1200^\circ\text{C}$ aralığında gerçekleşir.

Uygulamada, Fe_2O_3 ve Fe_3O_4 , FeO 'ya redüklendikten sonra demire redüklenmeye başlar. Bu durum, gaz içerisindeki CO 'dan en etkili şekilde faydalanmayı sağlamaktadır. Ayrıca, pelet gibi küçük boyutlu reaktif cevherler kullanılması ile oldukça etkili sonuçlar elde edilmektedir. Kaba ve daha az reaktif olan cevherler reaksiyonların oluşmasını zorlaştırmaktadır [2].

En son kademe reaksiyonu olan wüstitin demire redüklenmesi, sıcaklığın $1000\text{ }^\circ\text{C}$ 'nin üstüne çıktığı fırın gövdesinin en alt kısmına doğru cevherin ulaşması ile birlikte meydana gelmeye başlar. Bu bölgede, kok yüzeyindeki reaksiyon hızı, wüstit redüksiyonunu gerçekleştirecek yeterli hıza sahiptir. Ayrıca eş zamanlı olarak Boudouard reaksiyonları meydana gelmektedir. Bu yüzden FeO 'nun redüksiyon sonucu oluşan CO_2 , C ile reaksiyona girebilmektedir [2].



Yukarıdaki reaksiyon aslında gaz fazı boyunca meydana geliyor olsa bile “direkt redüksiyon” olarak adlandırılmaktadır. Bu durumdaki kok ve CO_2 arasında reaksiyon, karbon henüz tüyerlere ulaşmadan gerçekleştiği (parçalandığı) için “çözünme kaybı” olarak adlandırılır. Kokun reaksiyona girmesi için yeterli sıcaklığın sağlanamadığı fırın gövdesinin üst tarafında CO ile demir cevheri arasındaki reaksiyon “indirekt redüksiyon” olarak adlandırılmaktadır [2].

Ürünlerin genel olarak ergiyik halde olduğu fırının alt kısmında aşağıdaki reaksiyonlar meydana gelmektedir:



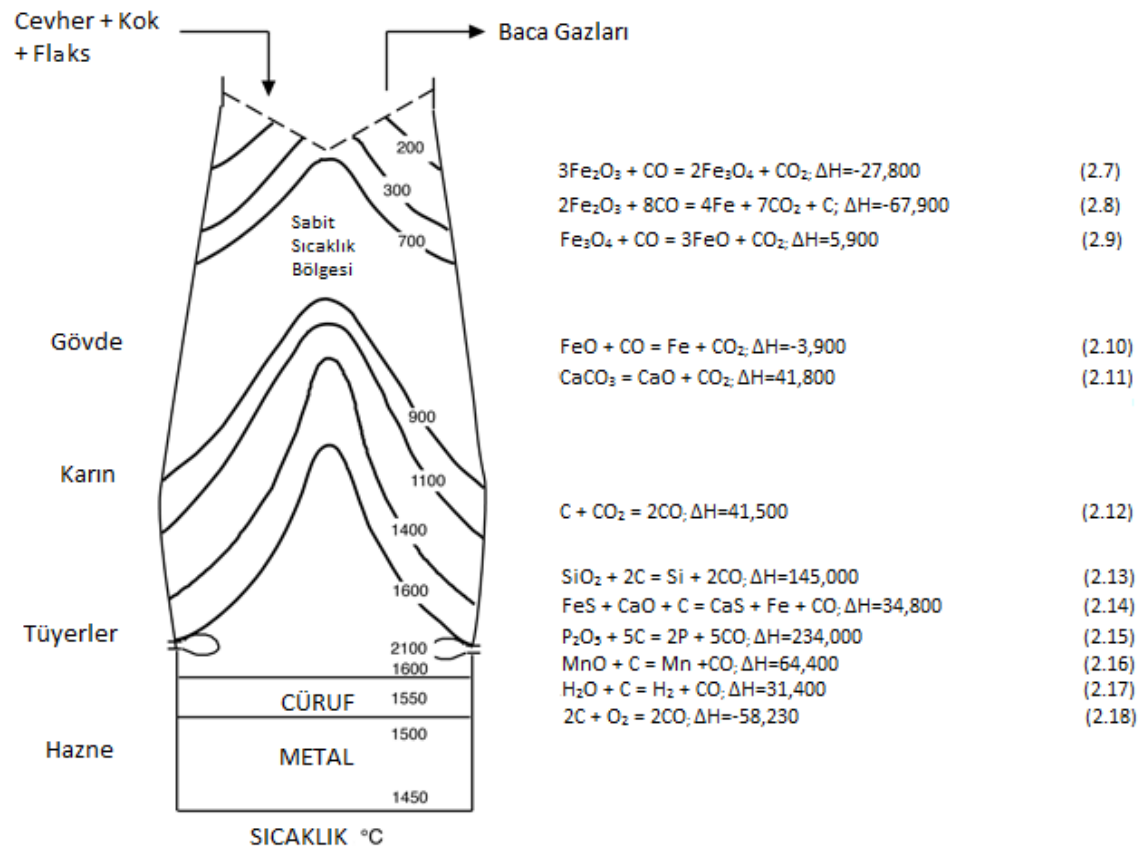
Bu reaksiyonlar CO açığa çıkardıklarından dolayı direkt redüksiyon olarak da adlandırılabilir [2].

Tüyerlerden fırının tepesine doğru gaz geçişi için bir hava boşluğunun olduğu varsayılmıştır. Tüyerlerden üflenen havanın içindeki oksijen, tüyerlerin çıkış ağzında tepkimeye sokularak CO_2 üretilir. Fırının biraz iç kısmına doğru gidildikçe CO_2 reaksiyona girerek CO oluşturur ve fırın sıcaklığı ise 1800°C - 2000°C aralığında olmaktadır. Meydana gelen bu gaz, fırın boyunca ilerlerken cevher ve kok ile temas haline geçer. Temas sonucu çıkan gaz bileşimi CO 'nun cevher ve kok ile

reaksiyonundan çıkan gazların bileşimi şeklindedir. Fırın sıcaklığı 1000°C'ye düştüğünde kok yüzeyinde reaksiyon yavaşlamaya başlarken cevher yüzeyinde meydana gelen reaksiyon hala devam eder. Bu durumda meydana gelen gaz bileşimi FeO - Fe reaksiyon eşitliğinden bulunabilir. Eğer çok reaktif bir cevher kullanılır ise FeO'nun büyük bir oranı 900°C altında indirekt reaksiyon ile redüklenir ve ortamdaki CO₂/CO gaz oranı yaklaşık 0,5 olmaktadır [2].

Yüksek fırın, karşıt akış prensibine dayalı olarak çalışan bir sistemdir. Şarj fırın boyunca aşağı doğru yavaşça inerken çıkan gazlar, yukarı doğru hareket ederek şarj ile reaksiyona girer. Bu işlem redükleyici ergitme olarak adlandırılır. Fırının, demir oksitleri metalik demire redükleme ve ergimiş ürünü metal ve cüruf olarak ayırma olmak üzere iki ana fonksiyonu vardır [2].

Şekil 2.1'de şematik olarak çizilen bir yüksek fırın içerisindeki sıcaklık dağılımları ve sıcaklık bölgelerine bağlı olarak gerçekleşen reaksiyonlar gösterilmiştir.



Şekil 2.1 Yüksek fırının şematik yapısı ve sıcaklık bölgelerine bağlı olarak gerçekleşen reaksiyonlar [2,12]

Kok, pratik olarak fırın boyunca, tüyer seviyesine ulaşana kadar değişmeden kalır. Tüyer seviyesine ulaşan kok, CO (Eşitlik 2.16) oluşacak şekilde reaksiyon verir ve aynı zamanda yüksek miktarda ısı açığa çıkarır. Bu yanma bölgesi, fırın sıcaklığının en yüksek olduğu kısımdır. Burada elde edilen sıcaklık, reaksiyon (Eşitlik 2.16) sonucu açığa çıkan ısıya bağlı yapılan teorik hesaplamalardan daha yüksek olmaktadır. Çünkü burada kullanılan kok ve hava ön ısıtmaya tabii tutulmuştur. Hava, direkt olarak sıcak sobalardan üflenmekte ve kok ise fırın gövdesi boyunca aşağı doğru indikçe kademeli olarak ısınmaktadır. Yanma sonucu oluşan, hacimce yaklaşık olarak % 35 CO ve % 65 N_2 'den meydana gelen gaz, yukarı doğru hareket eden çok sıcak bir redükleyici gaz karışımıdır. Havadan gelebilecek nem, karbon ile parçalanmaktadır. Oluşan bu reaksiyon endotermik olup, yanma bölgesinde sıcaklığın düşmesine sebep olmaktadır.

Gaz karışımı yukarı doğru hareket ettikçe gazların gizli ısıları daha soğuk katı malzemeler tarafından absorblanmaktadır. Bu yüzden endotermik reaksiyonlar meydana gelmektedir. Aynı zamanda, bu gazlar, fırın şarj seviyesine ulaşp sıcaklıkları yaklaşık 180°C civarına düşmektedir [2].

Fe_2O_3 'nin redüksiyonu fırına şarj edildiği andan itibaren başlar. Bu redüksiyon genellikle kademeli olarak gerçekleşmektedir. Redüklenme, Fe_2O_3 'ün Fe_3O_4 'e, Fe_3O_4 'ün FeO'ya ve en son FeO'nun Fe'ye dönüşümü şeklinde gerçekleşir. Şarj, sıcaklığın 750 °C'nin üstüne olduğu fırın giriş ağzının yaklaşık 5 m - 6 m aşağısına geldiğinde bütün oksitler, sünger demire redüklenir. Kireç taşı, 800 °C civarında parçalanmaya başlar (Eşitlik 2.11) ve 1000 °C'de ise tamamen parçalanmış hale geçer. Şarj, karın bölgesinin üst kısmına ulaştığında sünger demir partikülleri ve oksitli bileşenler (CaO, SiO_2 , MnO, Al_2O_3 vb.) haline geçmektedir [2].

Gaz karışımındaki ana redükleyici CO'dur. Şekil 2.1'de, 2.7'den 2.10'a kadar olan eşitliklerde gösterildiği gibi, demir oksitler CO tarafından redüklenmektedir. Fırının en üst kısımlarında kokun tek başına bir redükleyici etkisi yoktur. Karbon, yüksek sıcaklıklarda CO_2 ile oksitlenmekte (Eşitlik 2.12) ve 1000 °C'nin üzerinde serbest karbonun varlığında, ortamda CO_2 bulunmaz. Bu yüzden, fırının alt seviyelerinde CO_2 'ye oksitlenme olmadan CO'nun redükleyicilik etkisi olmamaktadır. Şekil 2.1'de eşitlik 2.13'ten eşitlik 2.18'e kadar C ve CO'nun redükleyici olarak oluşumu gösterilmiştir [2].

Fırının üst kısımlarındaki sünger demir bir miktar karbonu bünyesine almaktadır. Ergiyik demirler damlalar akkor halindeki kömürün üstüne doğru düşmekte ve doymun hale gelene kadar karbon çözündürmektedir. Şekil 2.1’de 2.13, 2.15, 2.16 numaralı eşitliklerde gösterildiği gibi ergitme bölgesinde, sıcak karbon SiO_2 , P_2O_5 ve MnO gibi birçok oksidi redüklemektedir. Aynı bölgede kükürdün bir miktarı FeS ’ten CaS ’a dönüşmektedir (Eşitlik 2.14). Redüklenmiş elementler ergiyik demirin bünyesine geçerken oksitlenmiş elementler ise cüruf içerisinde çözünmektedir. Bu durumlardan dolayı, demir, çözünmüş C, Si, Mn, S ve P’den; cüruf ise CaO , CaS , SiO_2 , Al_2O_3 , MgO ve bir miktar MnO ’dan meydana gelmektedir. Aynı bölgede kükürdün FeS formu demir içerisinde çözünürken, CaS formu cürufta çözünmektedir [2].

Pik demirin bileşimi, yakıtın miktarını artırmak veya azaltmak suretiyle belli bir dereceye kadar ayarlanabilmektedir. Yakıt miktarına bağlı olarak ergitme bölgesindeki sıcaklık da ayarlanabilmektedir. Yüksek sıcaklıklar, eşitlik 2.13’den eşitlik 2.16’ya kadar olan reaksiyonların gerçekleşmesini sağlamaktadır. Bu yüzden sıcak bir fırından alınan demir, görece, yüksek miktarda silisyum ve mangan, düşük miktarda kükürt içermektedir. Şarjın içerisinde tüm fosfor redüklenip demir bünyesine geçmektedir. Manganın büyük bir miktarı redüklenirken, silisyumun ise sadece küçük bir miktarı elementel silisyum haline redüklenmektedir [2].

- **Hava:** Ton başına 4 ton hava gerekmektedir.
- **Pik Demir:** Yüksek fırından dökülmüş ergiyik demire pik demir adı verilmektedir. Pik demirin bileşimi; % 90 - % 95 Fe, % 3,5 - % 4,5 C, % 0,5 - % 0,8 Mn, % 0,7 - % 3,5 Si, % 0,02 - % 0,12 S ve % 0,1 - % 0,9 P şeklindedir.
- **Cüruf:** Yüksek fırın cürufunun bileşimi; % 30 - % 35 SiO_2 , % 35 - % 40 CaO , % 10 - % 15 Al_2O_3 , % 2 - % 10 MgO , % 0,1 - % 1,2 Mn, % 0,2 - % 0,4 FeO ve % 1 - % 2 S şeklindedir.
- **Fırın Gazları:** Fırından çıkan gazlar; % 14 - %16 CO_2 , % 23 - % 25 CO, % 3 - %5 H_2 , ve % 56 - % 57 N_2 şeklindedir.

Demir ve cüruf sürekli bir şekilde potalara alınmakta ve günde 4-5 kere döküm alınabilmektedir [2].

2.2 Alternatif Sünger Demir Üretim Prosesleri

Alternatif proseslerde, katı demir (sünger demir veya DRI) ve sıvı demir (redükleyici) olmak üzere iki farklı fiziksel formda demir üretilmektedir. Demir oksidin sünger demire redüksiyonu boyunca, demir oksit içinde bulunan oksijenin neredeyse tamamı katı faz olarak uzaklaştırılır. Sonuç olarak elde edilen ürün, yüksek metalizasyon derecesine sahip olur. Oksijen ve koklaştırılmamış kömürün kullanılarak sıvı demirin (sıcak metal) üretildiği bu prosesler, demir oksitlerin, çeşitli formlarda, direkt redüksiyonu ve ergitilmesinin bir kombinasyonunu oluşturmaktadır. Bazı kullanışlı ve ticari alternatif demir üretim prosesleri Çizelge 2.1’de verilmiştir [2].

Çizelge 2.1 Alternatif demir üretim prosesleri ve özellikleri [2]

Proses	Corex	Romelt	Hismelt	Midrex	Fastmet	ITmk3
Temel İşlemler	Şaft fırınında ergitme sonrası ön redüksiyon	Dikdörtgen şekilli, tek reaktör, tek kademeli proses	Akışkan yataklı fırında FeO kademesine kadar ön redüksiyon	Sürekli karışıt akışlı şaft fırını	Döner hazneli fırında DRI/HBI'ya kadar ön redüksiyon	Döner hazneli fırında 1350-1500 °C'ye kadar ısıtılan ham pelet
Kullanılan Reaktör Tipi	Şaft	Şaft olmayan	Şaft olmayan	Şaft	Tek kademeli	Tek kademeli
Proses Adımları	Çok kademeli	Tek kademeli	Çok kademeli	Tek kademeli	Tek kademeli	Tek kademeli
Kullanılan Yanma Ortamı	oluşturulmuş doğal gaz, koklaştırılmamış	Yeniden oluşturulmuş doğal gaz, koklaştırılmamış kömür, kısmi kok	Yeniden oluşturulmuş doğal gaz	Yeniden oluşturulmuş doğal gaz	Fuel oil veya pulvarize kömür	Ön ısıtılmış hava
Redükleyici	Parça kömür, CO&H ₂	Kömür	Koklaştırılmamış kömür	Koklaştırılmamış kömür, CO&H ₂	Ufalanmış kömür, karbonlu madde	Ufalanmış kömür
Cevher Şekli	Parça, pelet	Parça, entegre demir çelik tesislerinde elde edilmiş ufalanmış demir oksit	oksit formları, Koklaştırılmamış kömür, flaks,	Parça, pelet	Demir oksit, konsantre, kompozit pelete eklenmiş kömür	Peletlik demir cevheri, kompozit pelete eklenmiş kömür ve flaks
Ürün	Sıvı	Sıvı	Sıvı	Sünger	Sünger	Demir tanesi

Demir oksitlerin redüklenerek katı bir halde üretilmesine sünger demir ismi verilir. Bu yöntem ayrıca “direkt redüklenmiş demir (DRI)” olarak da bilinir. Bunlar genellikle poroziteyi azaltmak ve sıcak briketlenmiş demire çevrilip sıkılaştırıldıktan sonra istiflenmeye ve satışa hazır hale gelir. Direkt redüksiyon (DRI), demir cevherinin (pelet veya parça halinde) katı faza bir redükleyici katı veya gaz tarafından redüklendiği bir proses bütününden meydana gelir. Redükleyici gaz haline getirilen doğal gaz veya koklaştırılmamış kömür, redükleyici olarak kullanıldığı kadar, birincil enerji kaynağı olarak da kullanılır. Bütün direk redüksiyon proseslerinin nihai ürünü, çelik üretimi için hurdada olduğu gibi, ergitmek suretiyle kullanılan bir katıdır. Kömür bazlı direkt redüksiyon için, döner fırın, döner hazneli fırın ve çok hazneli fırınlar kullanılır. Gaz bazlı direkt redüksiyon için ise akışkan yataklı fırın, şaft fırınları ve retortlar kullanılır [2].

2.2.1 Kömür Bazlı Sünger Demir Üretim Prosesi

Bu proste redükleyici olarak kömür kullanılır. Sünger demir üretimi, sabit parametreler altında demir cevheri içerisindeki oksijeni uzaklaştırma işlemidir. Bu işlem, döner hazneli fırın içerisinde yapılmaktadır. Bu yöntem, yüksek tenörlü demir cevheri ve koklaşmayan kömür için en uygun yöntemdir. Bu işlem esnasından, karbon monoksidin oksijene karşı olan afinitesinden dolayı, demir oksit içerisindeki oksijen ile reaksiyona girip karbon dioksit oluşturarak, demirin serbest hale geçmesini sağlar. Karbon monoksit tekrar kömür içerisindeki karbon ile reaksiyona girerek karbon monoksit oluşturur ve reaksiyon zinciri bu şekilde devam eder.

Bu reaksiyonların sürekli bir halde devamlılığı için, sisteme verilen havanın kontrolü sağlanmak suretiyle fırın içerisindeki CO oranının CO₂'den daha fazla olması sağlanır. Hematit fazındaki demir cevheri, aşağıda gösterildiği gibi bünyesindeki oksijeni kaybederek metalik faza dönüşür:

Çizelge 2.1 Demir cevherinin redüklenme esnasındaki fazları ve bileşimleri [2]

Cevherin barındırdığı bileşen	Hematit (Fe_2O_3)	Manyetit (Fe_3O_4)	Wüstit (FeO)	Metalik Demir (Fe)
% Demir	69,9	72,4	77,7	100
% Oksijen	30,1	27,6	22,3	0

Şekil 2.2’de döner fırın içerisinde sünger demir üretimine ait basitleştirilmiş bir akış diyagramı gösterilmiştir. Döner fırın kullanılarak yapılan tüm kömür bazlı direkt redüksiyon proseslerinde boyutlandırılmış parça demir cevheri (veya pelet) ve koklaşmayan kömürün görece kaba kısımları besleme ağzından fırına şarj edilir. Kömür, sadece redükleyici olarak değil, ayrıca fırın içerisindeki gerekli sıcaklığı temin etmek maksadıyla da kullanılmaktadır. Daha ince kömür parçaları ise redüksiyonun tamamlanmasına yardımcı olması için fırının sonundaki deşarj kısmından sokulur. Bu durumda, şarj, fırın boyunun yaklaşık % 70’ine gelen kadar redüksiyon tamamlanmış olur. Daha küçük kömür parçaları ise daha sonraki adımlarda redüksiyon için kullanılabilir [2].

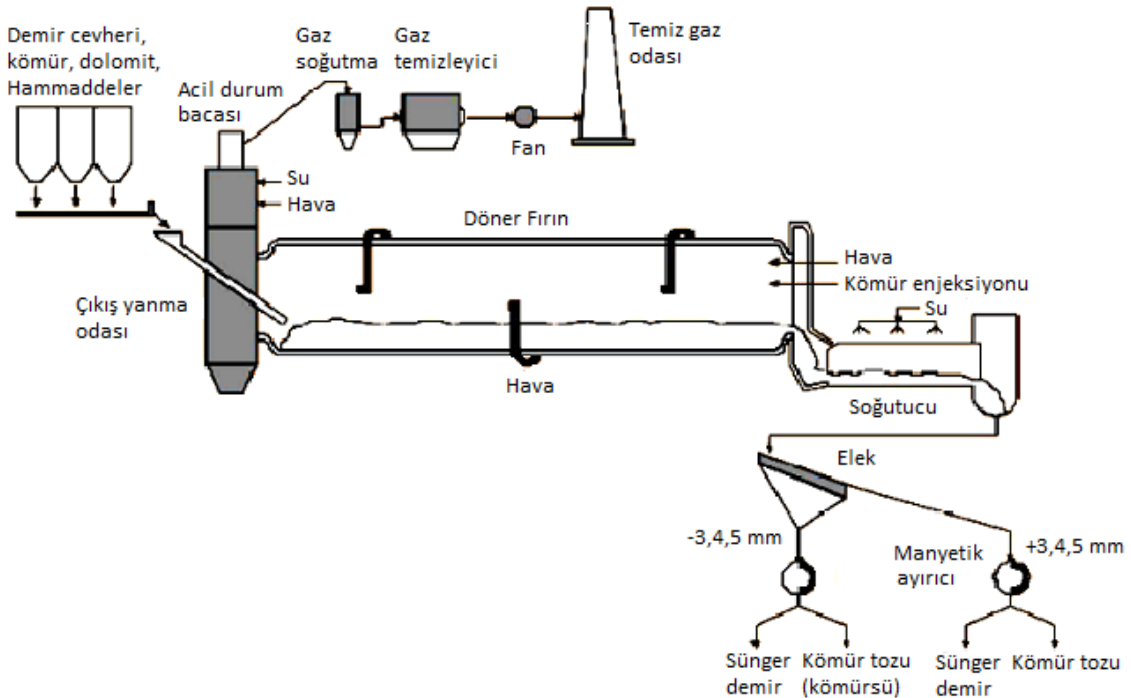
Bütün direkt redüksiyon prosesleri ters akımlı prensip rol oynamaktadır. Gaz, katının tam ters istikametinde hareket ederek redüksiyon gerçekleşir. Taşıma, karıştırma, boyuta bağlı olarak şarjın sınıflanması, ısıtma, gaz üretimi ve redüksiyon gibi çeşitli kısımlardaki operasyonlar ve proseslerin hepsi seriler halinde birbirine paralel olarak meydana gelir. Şarj maddelerinin (cevher, kömür, flaks) segregasyonu (dağılımı), boyut ve yoğunluk farklılıklarına ve bunun yanı sıra fırının eğimi ve dönüşüne bağlıdır. Segregasyonun mümkün mertebe, uygun fırın tasarımı ve operasyon önlemleri ile engellenmesi gerekmektedir [2].

Fırın içerisindeki şarj yatağının sıcaklığının en fazla 950°C – 1050°C civarında sınırlandırılması gerekmektedir. Böylece kül ve kömürün birlikte ergimesi engellenerek giren şarjın tamamen katı halde kalması sağlanır. Yüksek reaktif kömürler, şarj yatağında CO_2 ’nin gaz fazında katı karbon ile reaksiyona girmesini sağlayıp, sonuç olarak CO oluşumu meydana gelir. Bu oluşum yüksek endotermik olduğundan dolayı, yüksek reaktivlik, katı şarj sıcaklığının, öngörülen 150°C gaz sıcaklığı limitini aşmasını otomatikman engellemektedir. Kireçtaşı veya dolomit gibi bir flaks, kömür ile birlikte

eklenerek CaO'nun kükürt ile reaksiyona girerek CaS oluşması sağlanır. Böylece sünger demir içerisindeki kükürt kontrol altına alınmış olur [2].

Fırından alınan ürün, indirekt olarak soğutulan bir döner soğutucu içerisinde oda sıcaklığına kadar soğutulur. Soğutucu içerisinde su, direkt olarak indirgenmiş ürün ile temas haline geçmemektedir. Böylece yeniden oksitlenme en az seviyeye düşürülmüş olur. Elde edilen sünger demir doğal olarak manyetik olduğundan, manyetik seperatörler yardımıyla ana bileşen olarak kömür külü (veya kömür artığı) içeren manyetik olmayan kısımlardan ayrılabilir [2].

Döner fırın redüksiyonunun en kritik kısmı, kömürün kontrollü olarak yakılması ve bunun karbon monoksit dönüşmesidir. Ayrıca bu dönüşüm, fırının alt kısmındaki deşarj ünitesinden veya bunun yanı sıra fırın duvarına monte edilmiş üfleyicilerden gelen havanın kontrol edilmesi suretiyle de desteklenebilmektedir. Bu üfleyiciler, fırınla birlikte dönen ve ikincil hava borularına hava veren, fırın merkezine kadar çıkıntılı yapılardır. Fırın duvarına monte edilmiş üfleyiciler ve ikincil hava borusu düzeneği, şarj yatağı üzerindeki boşluklardan birkaç noktadan aksel olarak fırın boyunca hava girişini sağlamaktadır [2].



Şekil 2.2 Döner fırında sünger demir üretiminin akış diyagramı [2]

Fırına iki temel sıcaklık bölgesi vardır. İlk bölge, şarjın 900°C - 1000 °C'ye ısıtıldığı ön ısıtma bölgesidir. İkinci bölge ise metalizasyon bölgesi olup, sıcaklık burada 1000°C - 1050 °C'de sabit tutulur [2].

Ön ısıtma bölgesinde, Fe₂O₃'ün redüksiyonu sadece FeO'ya kadar ilerler:



Metalik demire son redüksiyon, metalizasyon bölgesinde FeO'nın CO ile reaksiyona girip metalik demir ve CO₂ oluşturur.

Fırın içerisinde CO₂, artan katı yakıt ile reaksiyona girip, Boudouard reaksiyonları gereğince CO'ye dönüşür.

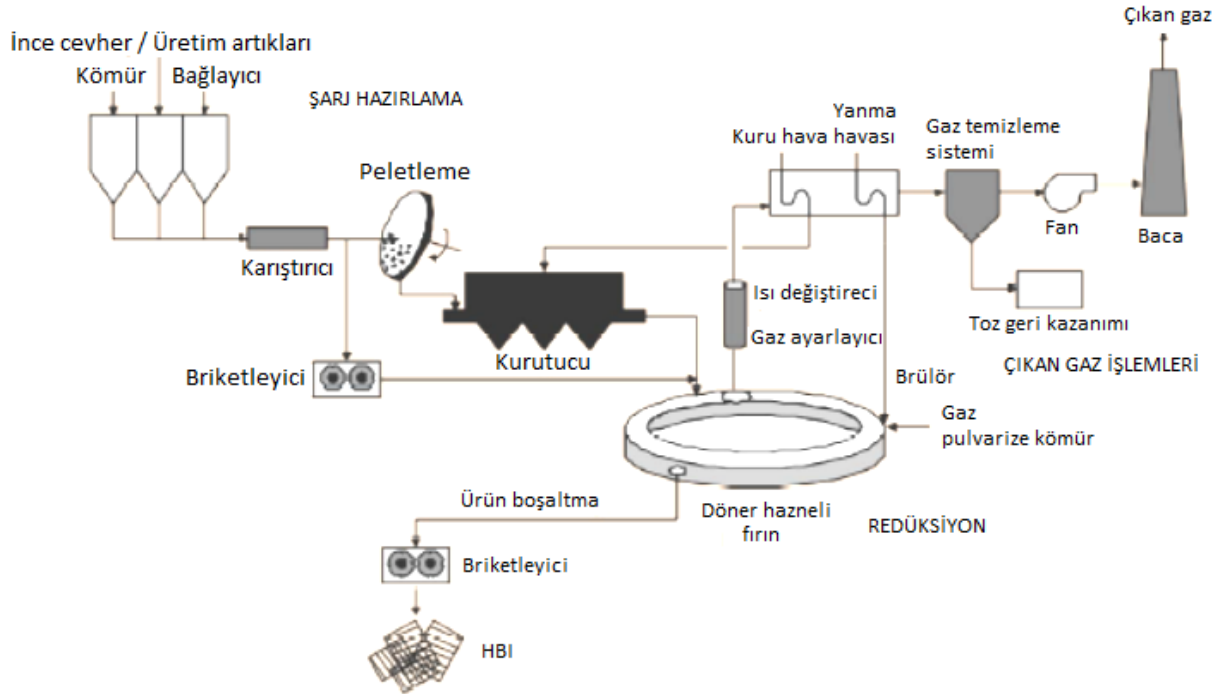


CO₂'yi hızlı bir şekilde CO'ya çevirdiklerinden yüksek reaktif kömürler tercih edilmektedir. Bu sayede redüksiyon için gerekli koşullar, fırın içerisindeki metalizasyon bölgesinde elde edilmiş olur. Kömürün CO₂ ile yüksek endotermik reaksiyonu, fırının aşırı ısınmasına ve sıcaklığın yükselmesine engel olarak şarjın erimesini veya birbirine yapışmasını önlemektedir [2].

Ön ısıtma bölgesinde, fırının alt bölgelerinden içeri verilen hava bazı gazları yakacaktır. Aksi halde bu gazlar, yanmadan fırını terk edecek ve fazla yakıt tüketimine sebep olacaktır [2].

Sünger demir üretim prosesinde kullanılan hammaddeler, parça demir oksit cevheri, koklaşmayan kömür ve kireç taşı veya dolomittir. Kullanılacak olan demir cevherinin tercihen yüksek demir içeriğine (> % 65 Fe) olması ve fırın koşullarına dayanıklı olması istenir. Kömürün ise yüksek reaktif, yüksek parçalanma sıcaklığına sahip olması ve ayrıca koklaşmayan özellikte olması istenir. Düşük parçalanma sıcaklığı, fırın içerisinde kalıntı oluşumuna sebep olduğundan tercih edilir bir durum değildir. Kömür tozunun bileşimi ise ayrı bir öneme sahiptir. Çünkü kömür içerisindeki silis tozları demir oksitlerle reaksiyona girebilir ve reaksiyon sonucu düşük ergime sıcaklığına sahip demir silikatlar meydana getirebilir. Oluşan bu demir silikatlar ise cevherin metalik demire redüksiyonunun engelleyebilmektedir [2].

Önemli kömür bazlı sünger demir üretim yöntemlerinden biri Fastmet Prosesi'dir. Bu proses, döner hazneli fırında ince taneli oksitlere (özellikle atıklara) uygulanan katı redüktant bazlı bir prosestir. Prosesin akış şeması Şekil 2.3'te verilmiştir [2].



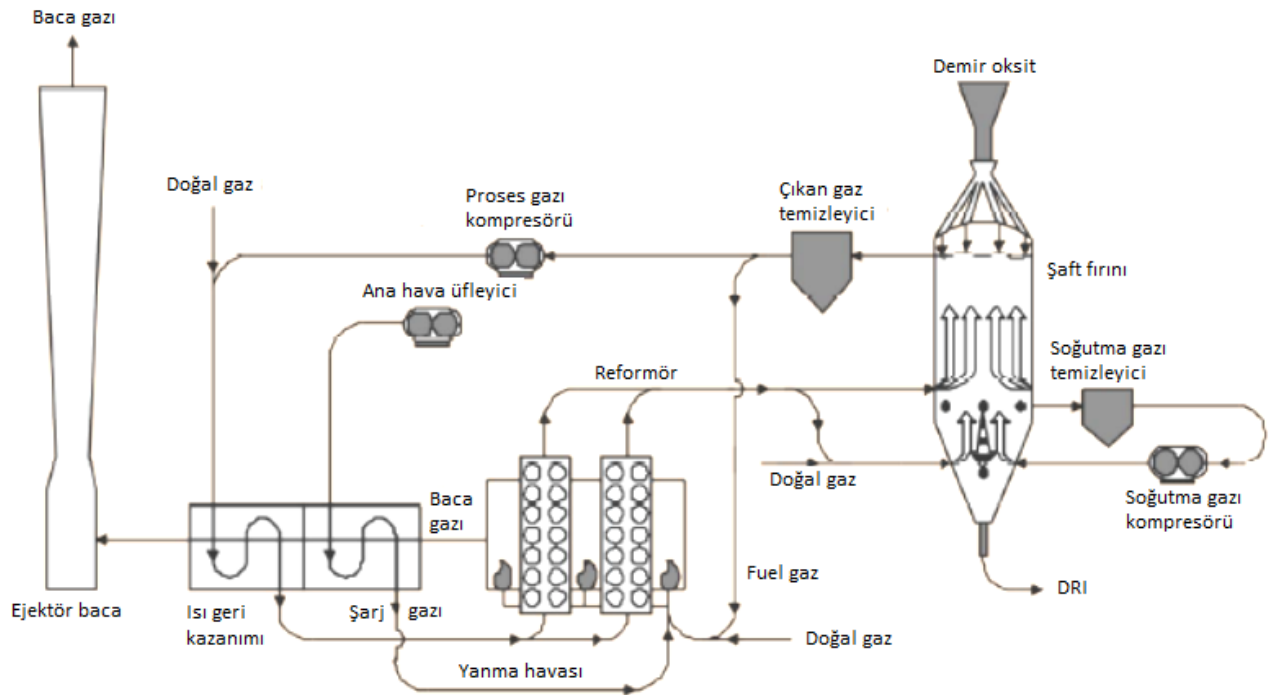
Şekil 2.3 Fastmet prosesi akış diyagramı [2]

Bu prosesin temel olarak kullanıldığı alan demir oksitlerin indirgenmesidir. Konsantre şeklindeki demir oksit taneleri bir redükleyici ile birlikte peletlenir, kurutulur ve tek tabaka halinde döner hazneli fırına şarj edilir. Birincil şarj maddeleri çelikhane artıklarıdır. Bu artıklar, genellikle briket haline getirildikten sonra hazneye şarj edilirler. Haznede, gaz, petrol veya pulvarize kömürün yanması ile briketler 1250°C - 1400 °C'ye ısıtılır. Redükleyici içeren aglomerasyonlar, metalik demir redüklenir. Görece yüksek sıcaklıkta, pelet / briket içerisinde karbon ve demir oksit tanelerinin homojen bir şekilde temas etmesi ile redüksiyon gerçekleşir. Redüksiyon oldukça hızlı gerçekleşir. Şarjın döner hazneli fırın içerisinde kalma süresi 6 dakika - 12 dakika arasında değişmektedir. Bu süre sonunda demir oksidin % 90- % 95'i metalik demire dönüşür. Üretilmiş olan direkt redüklenmiş demir, yaklaşık 1000 °C'de sürekli olarak bir briketleme makinesine boşaltılır. Bu şekilde üretilen ürüne sıcak briketlenmiş demir (HBI) denir. Ürün içerisindeki karbon oranı % 1 - % 6 arasında olacak şekilde üretilir. Bu ürün, yüksek metalizasyon derecesine sahip olmasından ve içerisinde yeterli miktarda karbon olmasından dolayı çelik üretimi için ideal bir malzeme olmaktadır [2].

2.2.2 Gaz Bazlı Sünger Demir Üretimi Prosesi

Bu proste redükleyici olarak doğal gaz kullanılır. Günümüzde, dünyada, gaz bazlı direkt redüklenmiş demir üretim tesisleri, kurulu direkt redüklenmiş demir tesislerinin % 90'ından fazlasını kapsamaktadır. Bu üretimin de % 85'i Midrex ve HYL yöntemlerinden meydana gelmektedir. Bu proseslerde, demir oksitlerin redüksiyonu CO ve H₂ gaz karışımı tarafından 750°C - 950°C sıcaklıklarında gerçekleştirilir. Redükleyici gaz, doğal gazın yeniden oluşumu (reformasyon) ile elde edilir. Bu oluşum hidrokarbonların kısmi oksidasyonu ile meydana gelir. Yeniden oluşum prosesini geliştirmek için ise katalizör kullanılır [2].

Gaz bazlı sünger demir üretim prosesleri arasında en yaygın kullanılan Midrex Prosesidir. Bu prosesin akış şeması Şekil 2.4'te gösterilmiştir. Bu proste kullanılan redükleyici, yeniden oluşturulmuş doğal gazdır. Doğal gazın yeniden oluşumu için, 700°C'de buhar oksijen karışımı ve katalizör olarak nikel kullanılır. Bu işlem sonucu, redükleyici olarak kullanılan CO ve H₂ elde edilir [2].



Şekil 2.4 Midrex prosesi akış diyagramı [2]

Bu prosesin temel bileşenleri DRI şaft fırını, gaz yeniden oluşturucu ve gaz soğutucudur. Katı ve gaz akışı sistemler yardımıyla gösterilir ve sistem değişkenleri işlem limitleri ile kontrol altına alınır. Redüksiyon için optimum yatak sıcaklığı,

metalizasyon derecesi, karbonizasyon seviyesi (Fe_3C içeriği), redükleyici gazından etkili şekilde verim elde etmek için şaft fırınında, sıcaklık ve her bir gaz bileşimi özel limit değerleri ile kontrol altına alınır [2].

DRI şaft fırını, çelik konstrüksiyon ile donatılmış ve redüksiyon bölgesi tuğla ile örülmüş bir fırındır. Katı şarj sürekli olarak fırının ağız kısmından verilir. Redüksiyon fırını, şarjın üniform bir şekilde hareketini sağlayacak şekilde tasarlanmaktadır. Şarj, ön ısıtma, redüksiyon ve soğutma bölgelerinden geçerek proses tamamlanır. Soğutulmuş DRI ürünleri fırının alt tabanındaki ağızdan sürekli olarak boşaltılır. Fırının çıkış ağzından sürekli olarak bir soy gaz üflenir. Böylece proses gazlarının kaçıışı engellenmiş olur. Fırının çıkış ağzındaki eleme ünitesi ile DRI ürünleri elenerek içerisinde kalan ufak partiküller uzaklaştırılır. Piroforik DRI ürünlerinin, depolama ve taşıma esnasında olası tutuşmalarını önlemek için çeşitli önlemler alınır [2].

Fırın redükleyici gazları yaklaşık % 95 oranında hidrojen ve karbon monoksit kombinasyonundan meydana gelir. Bu gazlar, hava simitleri ve redüksiyon bölgesinin dibine yerleştirilmiş portlar yardımıyla fırına üflenir. Redükleyici gazın sıcaklığı 760-950°C arasında değişmektedir. Bu gazlar aşağı doğru inen şarj ile karşıt akımlı prensibe göre ilerler. Demir oksidin redüksiyonu aşağıdaki reaksiyonlar ile gerçekleşir [2];



Kısmi olarak harcanmış redükleyici gazlar (%70 karbon monoksit ve hidrojenden meydana gelir), fırının tepe noktasına konulmuş bir borudan fırını terk eder. Buradan çıkan gazlar, soğutma ve toz partiküllerini uzaklaştırmak için temizleme işlemlerinin yapıldığı gaz temizleme ünitesine geçer. Daha büyük orandaki sıkıştırılmış gaz (yaklaşık üçte ikisi), doğal gaz ile zenginleştirilir, 400 °C'ye ısıtılır ve yeniden oluşturucu tüplerin içerisine üflenir. Karbon ve hidrojen içeriği % 95'e çıkartılan yeniden oluşturulmuş sıcak

gaz (900°C'nin üstünde), daha sonra DRI fırınında yeniden kullanılır. Oluşum reaksiyonları aşağıdaki gibidir [2];



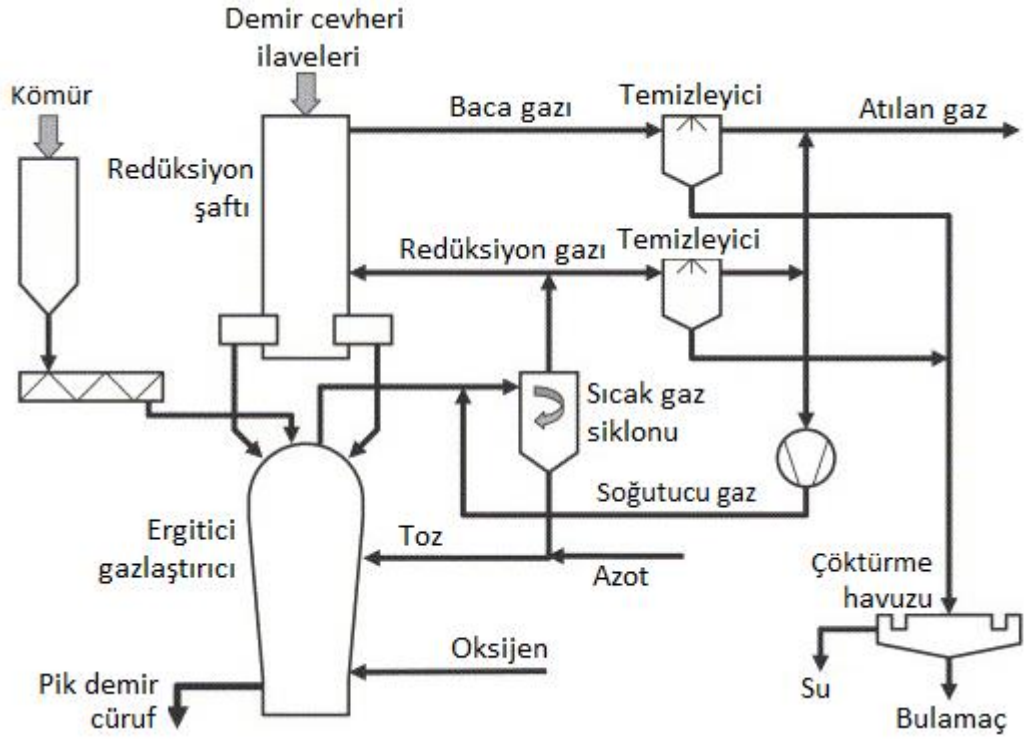
Denge gazları (yaklaşık üçte biri), reformer içerisinde brülör için bir yakıt olarak geliştirilir. Reformerdan çıkan sıcak gazlar, ısı rejeneratörleri içerisinde, brülör için gerekli yakma havasını yeniden ısıtmak ve yeninden oluşum öncesi proses gazlarını ön ısıtmak için kullanılır. Isı rejeneratörlerinin bu gaz akışlarına ilavesi proses verimliliğini geliştirmektedir [2].

Soğutma gazları, şaft fırınının soğutma bölgesinde şarj ile ters akışlı prensibe göre hareket eder. Gaz, soğutma bölgesinin sonunda ayrılır ve soğutma gazı temizleyicisine ilerler. Temizlenmiş ve soğutulmuş gaz sıkıştırılır, bir buğu giderici içerisine geçer ve soğutma bölgesi için yeniden kazanılır [2].

2.3 Alternatif Pik Demir Üretim Prosesleri

2.3.1 COREX Prosesi

COREX prosesi ile demir üretim yönteminin araştırma ve geliştirme çalışmaları 1977 yılında Almanya'da yarı endüstriyel bir pilot tesiste yoğun çalışmalar sonucunda başlamıştır [13].



Şekil 2.5 COREX prosesi akış diyagramı [14]

Bu proses hem üretim açısından hem de ticari olarak kanıtlanmış bir direkt redükleyici ergitme prosesidir. Proses, hem çevre açısından hem de üretim maliyetlerini düşürmesi yönünden avantaj sağlamaktadır. Hammadde olarak direkt parça demir cevheri, koklaşmamış (termal) kömür kullanılarak üretim yapılmaktadır [15].

Bu proseste demir cevheri (parça cevher, pelet, sinter veya bunların karışımı şeklinde) bir redüksiyon şaft fırınına şarj edilir. Şarj edilen cevher ile redüksiyon gazları karşıt akışlı prensibe göre cevheri redükleyerek DRI elde edilir. Elde edilen DRI ürün, spiral aktarıcı yardımıyla ergitici gazlaştırıcıya transfer edilir. Burada diğer metalürjik reaksiyonlara ilaveten son redüksiyon ve ergime gerçekleşir. Sıcak metal ve cüruf geleneksel yüksek fırın prosesinde olduğu gibi dökülüp alınır [15].

Kömür, ergitici gazlaştırıcıya direkt olarak şarj edilir. Oksijenin de ortama verilmesi ile birlikte oldukça etkili redüksiyon gazları oluşmaya başlar. Burada elde edilen gaz, gazlaştırıcıdan çıkarak soğutulduktan sonra redüksiyon şaft fırınına aktarılır. Şaft fırınında ise bu gazlar yardımıyla bahsedildiği gibi redüksiyon işlemi sonucu DRI elde edilir. Redüksiyon şaftından çıkan gazlar soğutulup temizlendikten sonra başka uygulamalar için kullanılır [15].

Yüksek fırında ısı üretmek, redüksiyon gazlarını oluşturmak ve yeterli yatak geçirgenliğini sağlamak amacıyla kok kömürü kullanılmaktadır. COREX prosesinde ise koklaşmış kömüre ihtiyaç duyulmaz ve sadece termal kömür kullanılır. Bu özel proses gereksinimlerini sağlayabilmesi için termal kömürün Çizelge 2.3'teki özellikleri sağlaması gerekmektedir [15].

Çizelge 2.3 COREX prosesi ile çelik üretimi için uygun kömürlerin özellikleri [13]

Özellikler	İstenen Değer
Sabit Karbon	%55-65
Uçucu Madde	%25-35
Kül	≤%12
Kükürt	<%0,5
Kalorifik Değer	>7000 kcal/kg
Tane Boyutu	20-30 mm

Kömürün tane boyutu COREX prosesi için önemli bir faktördür. Tane boyutunun azalması kömürün geçirgenliğini azalarak gazların yönlendirmesini olumsuz şekilde etkilemektedir. Bunun durum ise sıcak metalin sıcaklığını düşürmekle beraber kalitesini de olumsuz etkilemektedir. COREX teknolojisi ile üretim yapan bir tesisin etkin olarak işleyebilmesi için kömürün tane boyutunun en az 16 mm, en fazla 70-80 mm ve ortalama olarak da 20-30 mm olacak şekilde seçilmesi gerekmektedir [13].

COREX prosesinin avantajları aşağıdaki gibidir [13];

- Geleneksel yüksek fırın işlemine nazaran yatırım maliyetleri oldukça düşüktür.
- Yüksek fırına kıyasla üretim maliyeti % 15 - % 25 oranında daha düşüktür.
- Geniş özellik aralıklarında demir cevheri ve kömür kullanılabilir.
- Koklaştırma tesisleri ortadan kaldırılmış olur.
- Tüm çelik uygulamaları için ideal metal kalitesi elde edilmektedir.
- Ton demir üretimi başına düşen CO₂ oluşumu azaltılmıştır.
- Çevreye zararı yoktur.

2.3.2 ITmk3 Prosesi

FASTMET'in geliştirilmesi esnasında işlem sıcaklığının artışıyla metalin gang minerallerinden hızlı bir şekilde ayrıldığı gözlenmiştir. Bu reaksiyonu temel alarak geliştirilen proses ITmk3 prosesidir [7].

BF-BOF sistemi birinci jenerasyon ve MIDREX gibi doğalgaz kullanan DR prosesi ikinci jenerasyon iken, ITmk3 (Ironmaking Technology Mark Three) prosesi yeni bir teknoloji olarak yerini almıştır. ITmk3 Fe-C diyagramında yeni bir yer kaplayan özel bir teknolojidir.

Bu alanda karbon kompozit peletleri 1350°C gibi düşük bir sıcaklıkta redüklenir ve ergirler. Ayrıca sıcak metal curuftan kolaylıkla ayrılmaktadır. ITmk3 reaksiyonu diğer geleneksel demir üretim proseslerinden farklı olarak katı-sıvı geçiş fazında bulunur. Ergime redüksiyondan sonra olduğu için refrakterde FeO hasarı oluşmaz [5].

ITmk3 geleneksel demir üretim teknolojilerine nazaran şu avantajlara sahiptir:

- Redüksiyon ve curuf ayrımı tek basamakta oluşur,
- Çok yüksek sıcaklıklar gerekmez,
- Refrakterde FeO hasarı oluşmaz,
- Curuf metalden kolay ve temiz bir biçimde ayrılır,
- İnce ve düşük kaliteli cevher kullanılabilir.

Bu proste esas amaç, ince cevher ve kömürden direkt olarak tek basamaklı bir prosesle ergimiş demir elde etmektir. Redüksiyon aşamasında pelet içerisinde iki reaksiyon oluşur. Bu reaksiyonlar aşağıdaki gibidir;

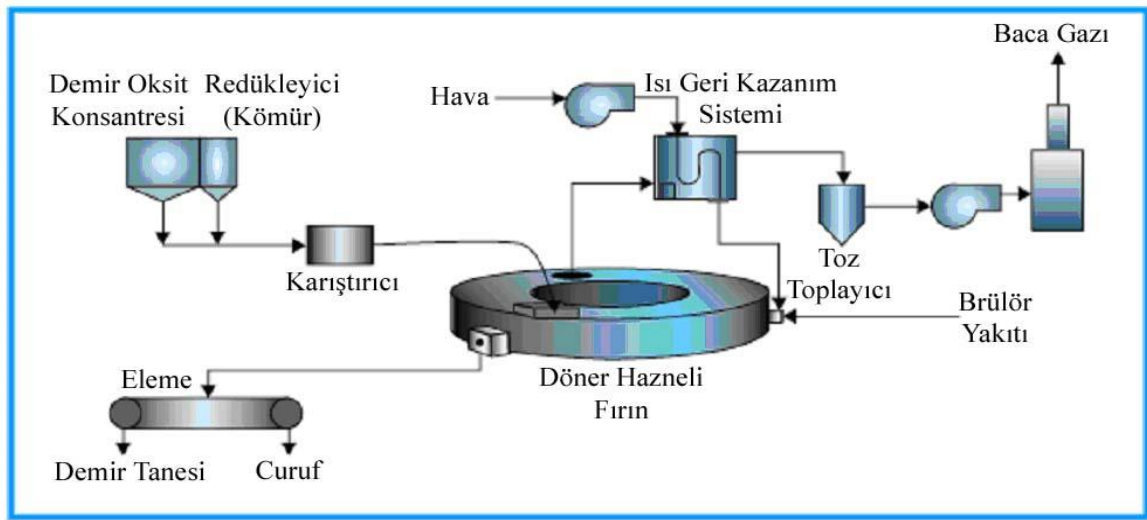


(2.30) reaksiyonu endotermik olup, 1000°C'nin üzerindeki sıcaklıklarda oluşmaktadır. Redüksiyon 1000°C'nin üzerindeki sıcaklıklarda en aktif olduğundan, gereken reaksiyon ısısı fırının ısıtma hızı ile dengeye gelir. Böylece pelet sıcaklığı sabit tutulmuş olur. Redüksiyon derecesi % 95 veya üzerine eriştiğinde demirde bir sıcaklık düşmesi görülür. Bu da karbürizasyon ve ergime oluştuğunun kanıtıdır.

Bu reaksiyon mekanizmasını ve bir FASTMET tipi döner hazneli fırın, hammadde olarak da karbon kompozit demir cevheri peleti kullanarak, ITmk3 prosesi katı olarak pik demire benzeyen demir tanesi üretir [5].

2.3.2.1 Proses Özellikleri

ITmk3 prosesinin basit bir proses olması, düşük yatırım maliyeti, düşük işletme maliyeti, çeşitli demir cevheri ve redükleyici seçilebilmesi gibi bir çok avantajı bulunmaktadır. Proses akışı ve ekipman donanımı FASTMET prosesine çok benzemektedir [16]. Şekil 2.6’da ITmk3 prosesinin akış şeması görülmektedir.



Şekil 2.6 ITmk3 prosesinin akış şeması [16]

Yıllık 500.000 tonluk üretim yapabilecek bir ITmk3 tesisinin yatırım maliyeti 90 ile 100 milyon Amerikan Doları arasında olduğu tahmin edilmektedir. ITmk3 manyetit veya hematit kullanabilir. Pilot tesis denemelerinde demir tanesi birçok demir oksit kullanılmıştır. Proses, metal ile curufu tek bir basamakta ayırdığında demir cevherini belirgin bir şekilde konsantre eder. Bu da zenginleştirme tesislerinden kalan ince oksitler gibi düşük dereceli demir oksitlerin bile değerlendirilmesini sağlar, ancak demir oksit kalitesi düştükçe bir ton demir tanesi için kullanılan enerji miktarı artmaktadır. Oksidin içerisinde bulunan tüm demir metalik demire dönüştürülür. ITmk3 prosesi, karbon kaynağı açısından da esneklik göstermektedir yani kok kömür, odun kömürü ve diğer karbonlu maddeler kullanılabilir [5].

2.3.2.2 Ürün Özellikleri

ITmk3 ile üretilen tanelerin birçok yararlı özellikleri vardır; cürufsuz saf ürünler, kontrol edilebilir karbon içeriği, tekrar oksitlenme olmaması, ince tane ve tozların oluşmaması, kolay taşınması gibi.

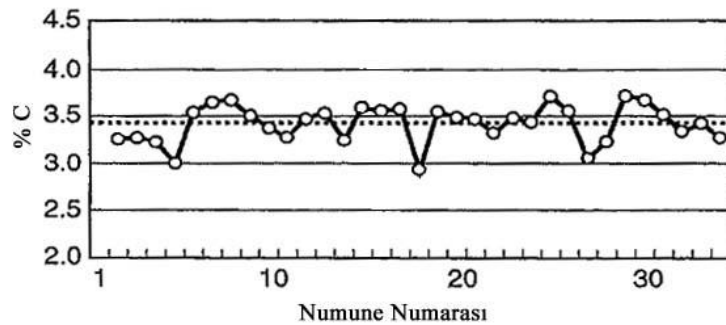
Üründeki silisyum, mangan ve fosfor içeriği hammadde seçimine bağlı olmaktadır. Kükürt seviyesi ise kömür içeriğine göre değişmektedir. Fakat prosesin tane içerisinde kalan kükürt seviyesini kabul edilebilir bir seviyede tutabilme kabiliyeti vardır. Çizelge 2.4'te örnek bir demir tanesinin kimyasal kompozisyonu verilmiştir.

Çizelge 2.4 Demir tanesi kimyasal kompozisyonu [5]

Demir Tanesi Kimyasal Kompozisyonu	Miktarı (% ağı.)
Metalik Fe	96-97
FeO	0
C	2,5-3,5
Si	Hammaddeye göre değişir
Mn	Hammaddeye göre değişir
P	Hammaddeye göre değişir
S	0,05

Çizelgeden de görüldüğü gibi demir oksidin tümü redüklenmiş ve demir tanesinde hiç FeO kalmamıştır. Karbon seviyesi, karbon eklenmesi ve ısıtma rejiminin değiştirilmesiyle en fazla % 3,5 C olacak şekilde kontrol edilebilmektedir [5].

Tsuge vd.nin [16] Kakogawa'daki Kobe Steel ITmk3 pilot tesisinde yaptıkları çalışmada elde ettikleri demir tanelerinin C içerikleri Şekil 2.11'de görülmektedir.



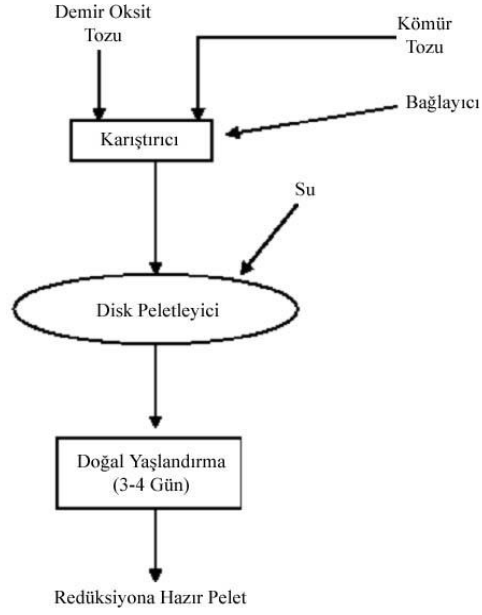
Şekil 2.7 Kobe Steel ITmk3 pilot tesisinde yapılan çalışmada ürün tanelerinin C içerikleri [16]

KOMPOZİT PELETLER VE ÖZELLİKLERİ

Kompozit pelet, ince demir oksit cevheri ve bir karbonlu madde (kok, kömür, odun kömürü) içeren peletler için kullanılan bir terimdir. Bu peletlerin taşınma esnasında veya redüksiyon esnasında oluşabilecek iç gerilmelere dayanıklı olabilmesi amacıyla oda sıcaklığına yakın bir sıcaklıkta mukavemet kazandırılmaktadır [6].

Kompozit peletler, cevher ve redükleyicinin iyi karışmasından dolayı yüksek reaksiyon hızına sahip olmaktadır. Aynı zamanda, koklaşmamış kömür ve odun kömürü gibi alternatif bir redükleyici kullanılması ise kompozit peletlerin ayrı bir avantajı olarak görülebilmektedir. Bu şarj maddelerinin kullanılması, geleneksel bir demir çelik üretim yöntemi olan yüksek fırına alternatif olarak başka üretim yöntemlerinin kullanılmasına olanak sağlamaktadır [17].

Kompozit peletlerin kullanılabilmesi iki ana özelliğinin göz önünde bulundurulması gerekmektedir. Bu özelliklerden ilki pelete olan ısı transferinin iyi olması gerekmektedir. Diğer ise kompozit peletler pişirlemediğinden dolayı düşük olan mukavemetleridir. Bu yüzden, redüksiyon prosesi esnasında ya peletlerin üzerine hiçbir yük binmemesine dikkat edilecek ya da soğuk bağlayıcı kullanılarak peletlerin mukavemetinin arttırılması gerekmektedir. Şekil 3.1’de soğuk bağlayıcı kullanılarak üretilen bir kompozit peletin üretimi şematik gösterilmiştir [18].



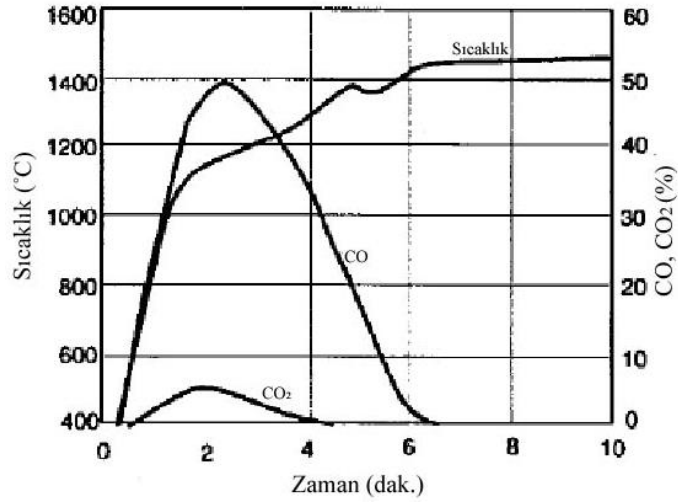
Şekil 3.1 Kompozit pelet üretim akış şeması [19]

Döner hazneli fırın ile üretim yapıldığında peletlere çok fazla bir yük binmediğinden kompozit peletler herhangi bir bağlayıcı kullanılmadan bu yöntemde direkt olarak kullanılabilir. Diğer yandan, taşıma esnasında meydana gelebilecek olası deformasyonlara dayanıklı olabilmesi için bir miktar basma mukavemeti istenmektedir. Arzu edilen bu mukavemet değeri 30 kg/pelet civarındadır [18, 20].

3.1 Kompozit Peletlerin Redüksiyon Termodinamiği ve Kinetiği

3.1.1 Kompozit Peletlerin Redüksiyon Termodinamiği

Kompozit peletler üzerine Kobayashi vd.'nin [21] yaptığı bir çalışmada, redüksiyon ve ergime mekanizması, 1450 °C sabit sıcaklığında gaz kompozisyonu ve pelet sıcaklığına bağlı olarak incelenmiştir. Yapılan bu incelemeye ait sonuçlar Şekil 3.2'de gösterilmiştir [21].

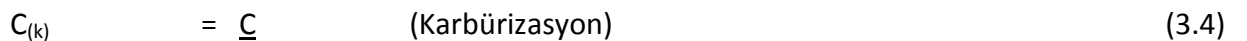


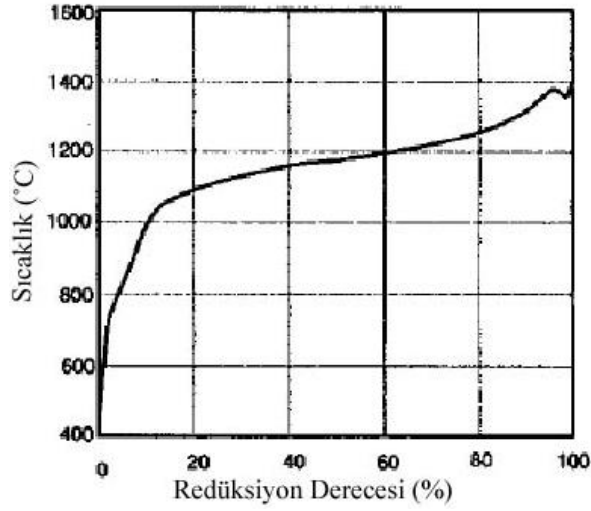
Şekil 3.2 Süre ile pelet sıcaklığının ve fırındaki CO,CO₂ miktarlarının değişimi [21]

Şekil 3.2'de görüldüğü gibi redüksiyon esnasında CO ve CO₂ gazlarının açığa çıktığı görülmektedir. Pelet redüksiyonu açığa çıkan bu gazlar yardımıyla gerçekleşmektedir. Peletin sıcaklığı 1100°C civarına kadar hızlı bir şekilde arttığı ve devamında bu artışın bir miktar azaldığı görülmektedir. Gaz evriminin tamamlandığı noktada ise sıcaklığın bir miktar düştüğü ve sonrasında tekrardan yükseldiği görülmektedir [21].

Aynı çalışmada, redüksiyon derecesi pelet sıcaklığına bağlı olarak incelenmiştir. Burada redüksiyon derecesi, CO ve CO₂ içerisindeki oksijen dengesinden hesaplanmıştır. Burada görüldüğü gibi, peletin sıcaklığı ilk başta hızlı bir şekilde 1000°C civarına çıkmış ve bu ana kadar redüksiyon derecesinde ciddi bir artış söz konusu olmamıştır. Peletin sıcaklığı 1000°C'nin üstüne çıktığında redüksiyon derecesinin de hızlı bir şekilde arttığı görülmektedir. Redüksiyon derecesi % 100'e yakın bir safhaya geldiğinde pelet sıcaklığında bir miktar düşüş ve tekrardan artış görülmüştür. Meydana gelen bu düşüş, o esnada meydana gelen bazı endotermik reaksiyonlar olduğunun kanıtı olarak belirtilmektedir [21].

Meydana gelen reaksiyonlar olarak karbürizasyon ve ergime olarak görülebilir. Yapılan analizlere göre reaksiyonun aşağıdaki basamaklardan oluştuğu saptanmıştır [21]:





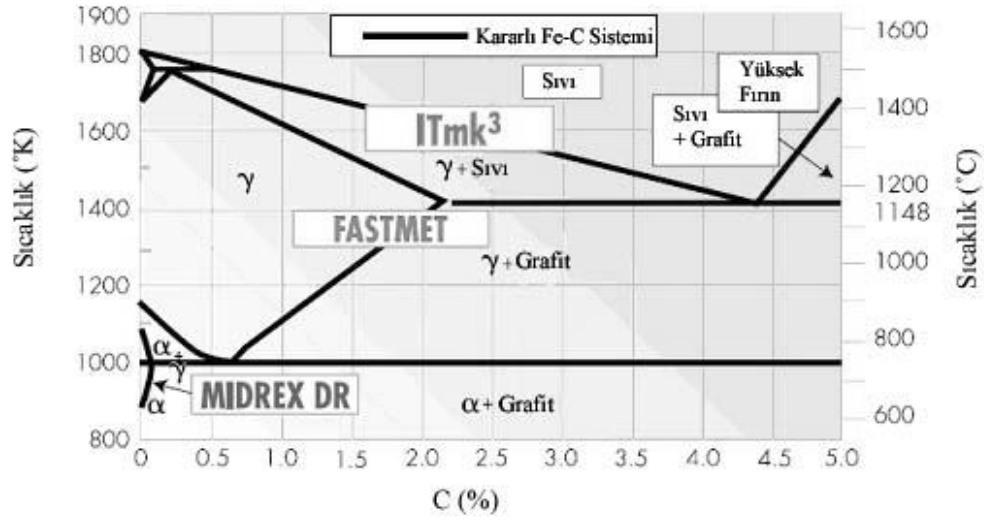
Şekil 3.3 Sıcaklıkla redüksiyon derecesinin değişimi [21]

Reaksiyon ısı, fırının ısıtılma hızıyla dengeli bir şekilde ayarlanırsa pelet sıcaklığı sabit tutulabilir. Isı transferi hızı kimyasal reaksiyonlardan daha hızlı ilerlemektedir. Artan bu ısı pelet içerisine doğru nüfuz edip peletin sıcaklığını hızlı bir şekilde yükselttiğinde ergimiş gang ile reaksiyona girmemiş demir oksitlerin reaksiyona girerek ergimenin başlamasına neden olmaktadır.



Meydana gelen sıvı FeO, çok aktif ve refrakterlerle çok kolay etkileşime girip zarar verdiği için refrakterleri FeO'dan kaynaklı erozyondan korumak için "redüksiyon sonrası ergitme" yöntemi tercih edilebilmektedir.

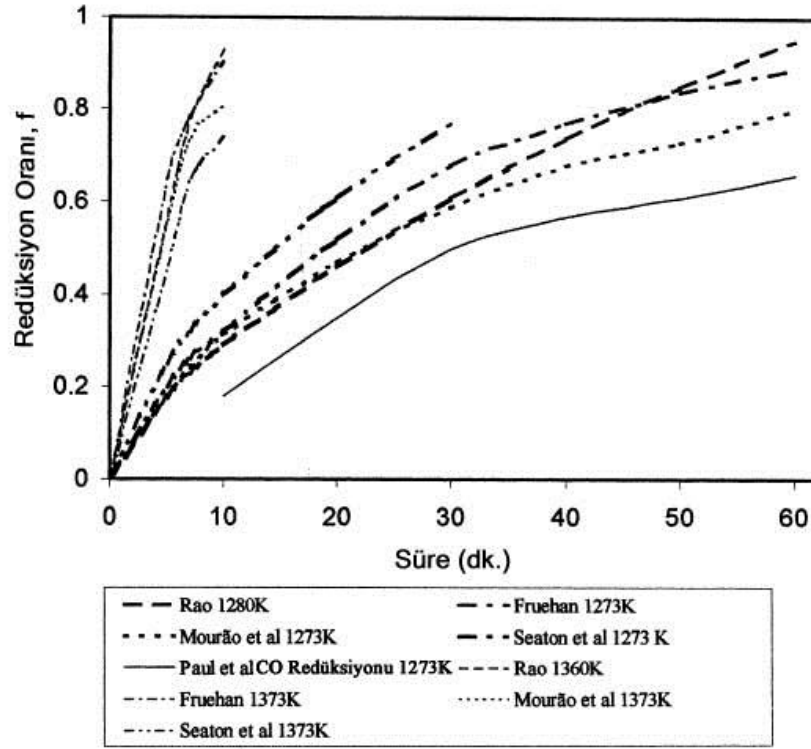
Yapılan çalışmalar, 1350 °C gibi nispeten düşük bir sıcaklıkta karbon kompozit demir cevheri peletlerinin ergiyip metalik demir ve cüruf şeklinde birbirinden ayrıldığını göstermiştir. Şekil 3.4'te demir cevheri peletlerinin kullanılarak gerçekleştirildiği proseslerinin bazılarının çalışma alanları Fe-C denge diyagramı üzerine gösterilmiştir.



Şekil 3.4 Çeşitli demir ve sünger demir üretim yöntemlerinin Fe-C denge sisteminde çalıştığı kısımlar [5]

3.1.2 Kompozit Peletlerin Redüksiyon Kinetiği

Hematit cevherinin, 900°C-1200°C sıcaklık aralığında demir redüklenmesinin kinetiği birçok araştırmacı tarafından incelenmiştir. Yapılan bu araştırmalar sonucunda reaksiyon hızını etkileyen başlıca parametrelerin sıcaklık, reaksiyona giren maddelerin partikül boyutları, redükleyici maddenin türü ve miktarının olduğu tespit edilmiştir. Reaksiyonların kontrol basamaklarının, karbonun gazlaşma reaksiyonuna (Boudouard Reaksiyonu) bağlı olduğu genel kanısına varılmıştır. Diğer yandan, yapılan bazı araştırmalarda ise yüksek endotermikliğe sahip reaksiyonlar için tüm hızın bulunmasında ısı transferinin de önemli bir rol oynadığını vurgulamışlardır. 900°C ile 1100°C arasındaki redüksiyon oranının zamanın fonksiyonu olarak değişimi ve karbon monoksit ile demir redüksiyonunun kıyaslanması Şekil 3.5'te verilmiştir [18].



Şekil 3.5 Daha önce yapılmış çalışmalara göre redüksiyon oranının zaman fonksiyonuna göre değişimi ve karbon monoksit ile demir redüksiyonunun karşılaştırılması [18]

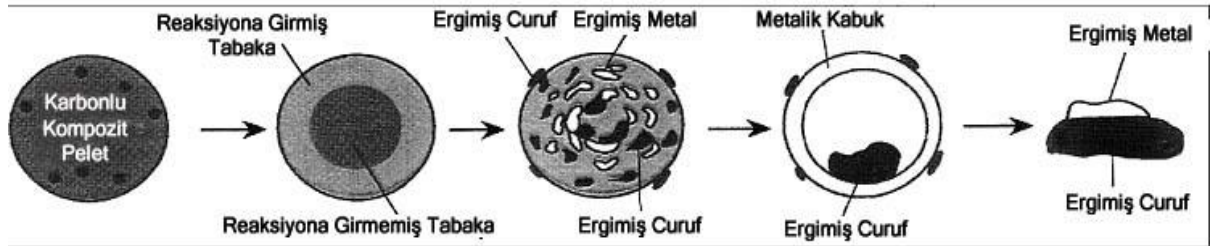
Şekil 3.5'te 1000°C'de hematit peletinin redüksiyonu kıyaslandığında karbon içeren kompozit peletin redüksiyon hızının, klasik peletin CO ile redüksiyonundan daha hızlı olduğu görülmektedir. CO ile redüksiyonun aktivasyon enerjisi 70-127 kJ/mol arasındayken, kompozit peletlerin redüksiyon aktivasyon enerjisinin 260 kJ/mol olduğu daha önceki çalışmalarda görülmüştür. Bu sonuçlara bakıldığında, sıcaklık artışı ile karbon içeren kompozit peletlerin redüksiyon hızının artışı, CO ile redüksiyon hızından daha yüksek olmaktadır [6,18].

Redüksiyon esnasında peletlerin yüzey ve merkez sıcaklıkları ölçüldüğünde izotermal bir durum elde edilmediği görülmüş ve yüzey sıcaklığının, fırın sıcaklığına daha çabuk ulaştığı tespit edilmiştir. Aradaki bu sıcaklık farkının, prosesin ilk safhalarında ve daha yüksek fırın sıcaklıklarında daha fazla olduğu tespit edilmiştir [6,18].

Demir cevheri ve karbon redükleyici içeren kompozit peletler yüksek sıcaklıklara ısıtıldığında redüksiyondan sonra elde edilen metalik demir, sıcaklığa ve elde edilen ürünün karbürizasyon derecesine bağlı olarak kısmi olarak veya tamamen ergiyik hale geçebilir [6,18].

Proses esnasında peletin yapısının değişimi, fırın sıcaklığı, redükleyici maddenin tipi ve miktarı, pelet boyutu, fırında kalma süresi, karışım içerisindeki gang, kül ve bağlayıcı miktarı gibi faktörlere bağlıdır [6,18].

Matsumura vd. (1998) tarafından demir cevheri, kömür ve bentonit bağlayıcı içeren kompozit peletler hazırlanmış ve hazırlanan bu peletler, yüksek sıcaklıkta çeşitli sürelerde reaksiyona sokularak incelenmiştir. Şekil 3.6’da bu çalışma sonucunda peletlerde gözlemlenen sonuçlar gösterilmiştir. Elde edilen bu modele göre, demir oksitlerin karbon tarafından endotermik bir şekilde ilk ve hızlı olarak redüklendiği bir periyot bulunmaktadır. Meydana gelen bu endotermik reaksiyon sonucu ise peletin ısınma hızı kısmen yavaşlamaktadır. Redüksiyonun tamamlanmasına yakın, ısınma hızı artar ve kömürden kalan küller, cevher içerisindeki gang mineralleri ve bağlayıcıdan meydana gelen cüruf yumuşamaya başlar. Metalik demir ise bünyesine karbon çekerek ergimekte. Bu işlemler sonucunda cüruf ve metalik demirden ibaret iki ana faz elde edilir [6,18].



Şekil 3.6 Kompozit peletlerin redüksiyon esnasındaki değişimleri [6, 18]

ATIK PLASTİKLER VE GERİ DÖNÜŞÜMLERİ

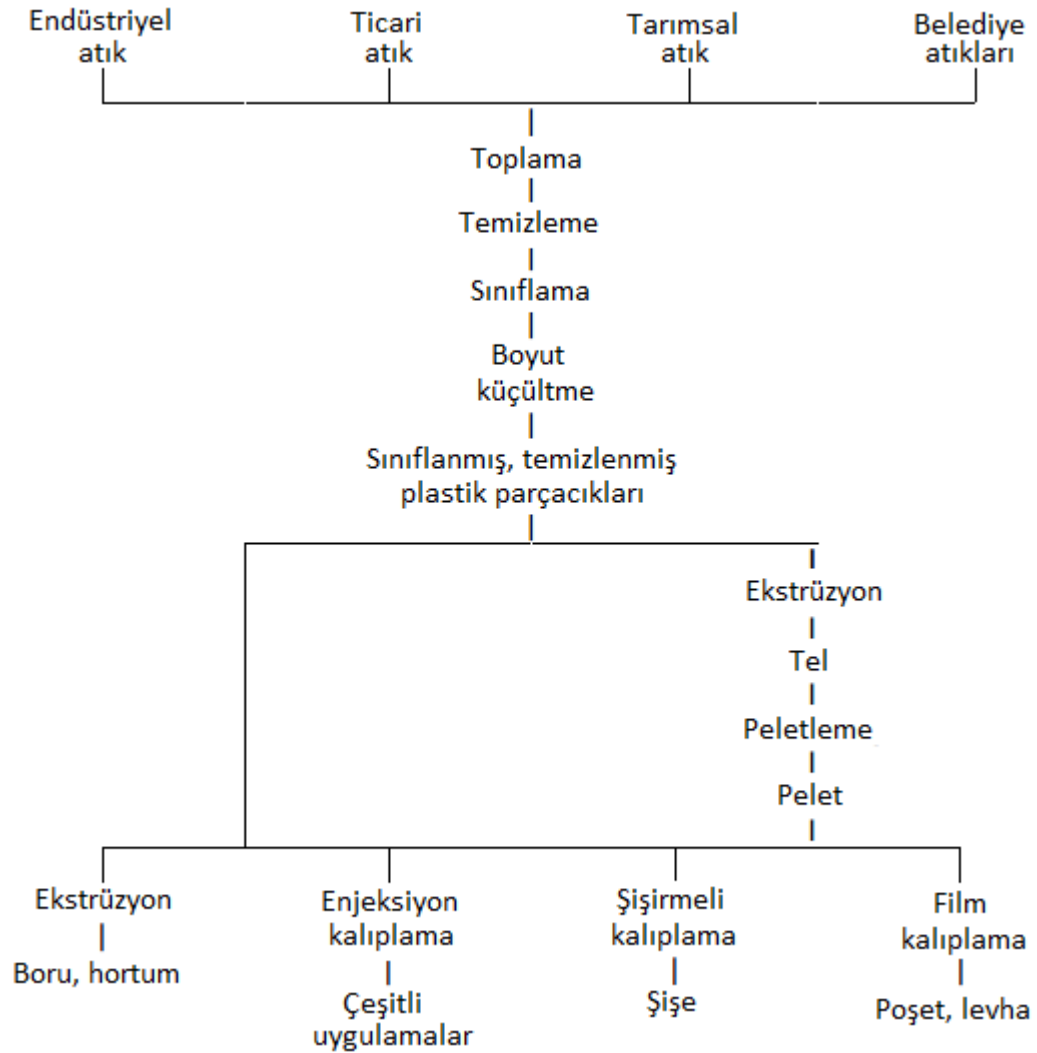
Plastikler, ekonomiklikleri, uygulama kolaylıkları ve özelliklerinin her geçen gün geliştirilmeleri nedeniyle kullanım alanlarını ve miktarlarını giderek arttırmaktadırlar. Elektrikli ev aletlerinde, otomobil sektöründe, mutfak eşyası, park-bahçe alanlarında, plastiğe dayalı inşaat malzemesi, gıda maddesi ambalajı, kozmetik, temizlik malzemesi, narenciye, tarım ürünleri, tekstil, konfeksiyon ambalajı ve sağlık alanında plastiğe dayalı araç gereç kullanımı ile günlük yaşantımızın her alanında plastik ile karşılaşmaktadır. Gelişmişliğin bir göstergesi olarak kabul edilen kişi başına plastik tüketimi 1998 yılında ABD’de 98,1 kg., Batı Avrupa’da 69 kg., Çin’de 11,1 kg., Türkiye’de ise 30,4 kg. olmuştur. 1998 yılında dünya plastik tüketimi 115 milyon ton olmuş, Batı Avrupa’da 28,8 milyon ton ülkemizde ise 2,024 milyon ton olarak gerçekleşmiştir [23].

Plastiklere olan talebin artması atık plastik miktarında da artışa yol açmaktadır. Kullanım ömrünü dolduran plastikler, açık depolama alanlarında biriktirilmekte ve uzun süre (35-40 yıl) çeşitli kirlilikler oluşturmaktadır. Plastiklerin LCA (Life Cycle Assesment) değerlerinin yani doğada parçalanmaları için geçen ömürlerinin yüksek olması ve yeniden kullanım oranlarının düşüklüğü atık plastik miktarını hızla arttırmaktadır. 2005 yılında sadece PVC'nin dünyada 250 milyon ton atık oluşturacağı hesaplanmıştır [23].

Atık plastikler, günümüzde dünya kamuoyunun üzerinde durduğu en önemli konulardan birisidir. Konunun önemi, plastiklerin geri dönüşümü ve enerji üretmek amacıyla değerlendirilmesi konularındaki araştırma ve geliştirme çalışmalarına hız kazandırmıştır [23].

Gelişmiş ülkelerde atık plastiklerin geri kazanımı için atık yakma tesisleri kurulmuştur. Bu sayede hem atıklar ortadan kaldırılmakta hem de elektrik enerjisi üretilmektedir. Japonya’da endüstriyel ve evsel kaynaklardan gelen atık plastikler 1997 de yaklaşık 9,5 milyon tona ulaşmıştır. Bu miktarın % 34’ü (yaklaşık 3,25 milyon ton) araziye gömülmemekte, kalan 6 milyon ton ise yakılmaktadır. Yakılan kısmın yaklaşık 2,8 milyon tonu elektrik üretiminde ya da ısı geri kazanımında kullanılmaktadır. Geri dönüştürülen miktar ilave edilse bile, % 40 tan biraz fazlası ya da 4 milyon tonluk miktar ancak verimli olarak kullanılmaktadır [23].

2.1 Plastiklere Uygulanan Geri Kazanım Yöntemleri



Şekil 4.1 Plastik geri kazanımı için tipik bir akış diyagramı [24]

2.1.1 Birincil Geri Kazanım

Birincil kazanım ile geri dönüştürülen plastikler, genellikle termoplastikleri kapsamaktadır. Buradaki istenilen asıl amaç ise orijinal polimerlerden elde edilen ürünlere eşdeğer ürünler elde etmektir. Bu yöntemde, bir mekanik kıyıcı yardımıyla atık plastiklerin boyutları küçültülerek orijinal plastiklere karıştırılır ve yeniden işleme sokulur. Bu yöntem, özellikle üretim prosesinde açığa çıkan ve kullanım sonrası oluşmuş atıklardan temiz olarak toplanabilen atıkların yeniden kullanılmasına uygundur. Bu şekilde kazanılan atıkların geri dönüşümü basit ve ucuzdur. Eğer plastik artığının içerisinde herhangi bir yabancı madde bulaşmış ise proses daha zor hale gelir [25].

2.1.2 İkincil Geri Kazanım

Atık plastiklerden orijinal plastiklerden elde edilen üründen farklı olarak, ikincil kalitede ürün elde edilir. Bu proseste kullanılmış ve kirlenmiş atık plastikler, ergitildikten sonra temizleme, kurutma benzeri işlemlerden geçmektedir. Devamında ise bir kıyıcı yardımıyla ufak parçalara ayrılır ve elde edilen bu ürün tekrar işlenir. Burada değerlendirilen atıklar, daha çok seralarda elde edilen atık plastikler gibi, içerisinde yüksek oranda katkı maddesi içeren atıklardır. Buradan elde edilen plastik atıklar daha çok ikinci kalite ürünlerin imalatında kullanılır [25].

2.1.3 Üçüncül Geri Kazanım

Bu yöntem kimyasal geri kazanım olarak adlandırılmaktadır. Bu yöntemdeki asıl amaç, plastiklerin üretildiği monomerleri, orijinal polimerleri ve başka amaçlar için kullanılmak üzere çeşitli kimyasalların üretilmesidir [25].

Üçüncül geri kazanım yönteminin diğer geri kazanım yöntemlere kıyasla dezavantajı hala ekonomik olarak kanıtlanmış bir üretim prosesi geliştirilememiş olmasıdır. Aynı zamanda bu konuda dünyada hızlı gelişmeler olmaktadır. Bu yöntemle elde edilmiş katı, sıvı ve gaz ürünler bazı rafineriler, kimya ve petrokimya sektörlerinde hammadde olarak kullanılması uygulama aşamasına geçmiştir [25].

2.1.4 Dördüncül Geri Kazanım

Bu yöntem, plastik atıklardan ısı elde etmek amacıyla yapılan yakma işlemini kapsamaktadır. Buradaki asıl amaç, plastik atıkların yakılması açığa çıkan enerjiden faydalanmaktır. Özellikle son zamanlarda ortaya çıkan çevre kanunları ve diğer yaptırımlardan dolayı uygulanabilecek en son yöntem olarak adlandırılabilir. Yanma sonucu açığa çıkan toksit gazlar insan sağlığını olumsuz etkileyebilmektedir. Dolayısıyla çeşitli üretimlerde bu geri dönüşüm yönteminin kullanılması en kötü değerlendirme yöntemi olarak adlandırılabilir [25].

Geri kazanım yöntemleri hakkında genel bir değerlendirme yapılması gerekirse; birincil ve ikincil geri dönüşüm yöntemleri ekonomik birer yöntem olarak görünmekle birlikte ergitme ve şekillendirme işlemleri sonucunda elde edilen ürünlerin esneklik ve dayanıklılık gibi bazı önemli özelliklerinin düşmesi bir dezavantaj olarak değerlendirilebilir. Ayrıca bu yöntemlerle elde edilen mamullerin kaliteleri sürekli olarak değişkenlik göstermektedir [25].

Dördüncül geri kazanım yönteminde ise plastik atıkların yakılması kaynak israfına ve yanma esnasında açığa çıkan baca gazları ile birlikte sürüklenen furandioksin ve ağır metal buharları gibi zararlı etkileri mevcut olan gazların kontrolü ve giderilmesi maliyeti yüksek yatırımlar gerektiğinden bu yöntem geri dönüşüm için en son uygulanabilecek bir yöntemdir [25].

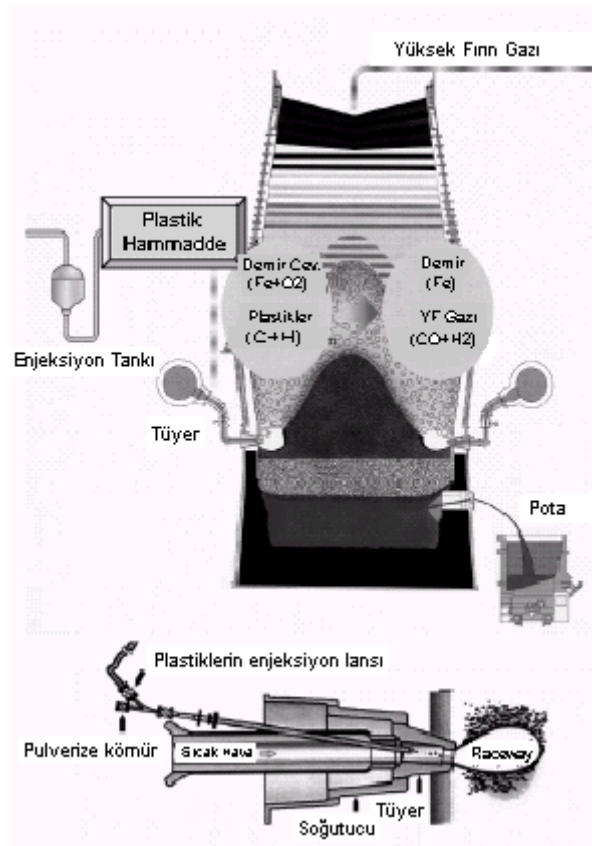
Bu yöntemler dışında geriye kalan üçüncül geri kazanım yöntemi en uygun yöntem olarak görülmektedir. Hem çevresel hem de ekonomik açıdan birçok sorun barındırmasına rağmen gelecek vaat eden bir yöntem olduğundan, dünyada bu konu ile ilgili birçok çalışma yapılmaktadır [25].

2.2 Yüksek Fırında Redükleyici Olarak Atık Plastik Kullanımı

Atık plastiklerin miktarlarının azaltılması ve daha verimli bir geri dönüşümün sağlanması için Japonya ve Almanya'da atık plastiklerin yüksek fırına enjeksiyonu sistemi geliştirilmiştir. Daha önce geliştirilmiş olan toz kömür, gaz ve fuel oil enjeksiyonu yoluyla yüksek fırında kok tüketimi azaltılmaya çalışılmıştır. Bu redukleyici elemanlar yerine plastik atıkların konulması çalışmaları 8-10 yıllık bir geçmişe sahiptir [23].

Demir cevheri ve kok yüksek fırına üstten bir sıra dahilinde yüklenmektedir. Sıcak hava ise fırının alt kısmındaki tüyerlerden üflenerek koktan CO üretilmektedir. Bu reaksiyonun ısısı ve oluşan CO demir cevherini redüklemek ve eritmek için kullanılır. Böylece üretilen pik demir ve curuf belli aralıklarla fırının en alt kısmındaki hazne bölümünden alınır [23].

Son zamanlarda bütün demir çelik fabrikaları kok yerine geçmek üzere tüyerlerden pulverize kömür enjekte etmektedirler, böylece hammadde maliyeti azaltılmaktadır. NKK Keihin İşletmesindeki 1 no.lu yüksek fırında günde yaklaşık 4.000 ton kok ve 1.000 ton pulverize kömür kullanarak 16.000 ton demir cevheri redüklenmekte ve 10.000 ton pik demir üretilmektedir [23].

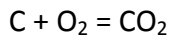


Şekil 4.2 Yüksek fırın prosesinde atık plastik kullanımı ve tüyerlerden plastik enjeksiyonu [23]

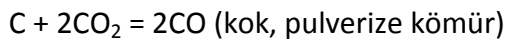
Plastikler karbon ve hidrojenle yapılmışlardır. Kok yerine redükleyici eleman olarak fırına verilen plastik, redükleyici gazlar ($\text{CO}+\text{H}_2$) üretecek şekilde parçalanır ve bunlar fırın içinde yukarı doğru yükselerek demir cevheriyle reaksiyona girerler. Redüksiyon reaksiyonlarını takiben gazlar (yaklaşık 800 kcal/Nm^3) geri kazanım amacıyla çelik

fabrikası içinde ısıtma fırınları ve güç üreteçlerinde gaz yakıt olarak yeniden kullanılırlar [23].

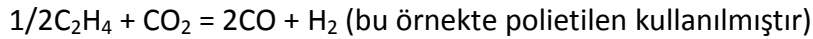
Atık plastikler tüyerler vasıtasıyla fırına enjekte edilirler. Sıcak hava fırının alt kısmındaki tüyerlerden yüksek hızda üflenerek koku akışkanlaştırır ve “hava oluğu/cebi” (raceway) denilen bir boşluk oluşturur. Tüyerler vasıtasıyla enjekte edilen plastik parçacıkları hava oluğu içindeki dönüş esnasında tamamen gazlaşır. Pulverize kömür ve kok, oluk bölgesinin ilk kademesinde 2000°C’yi aşan sıcaklıkta oksijen tüketerek ve CO₂ üreterek hızla yanarlar [23].



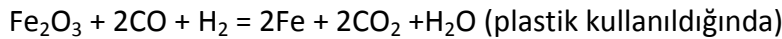
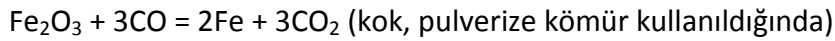
Oluğun son kademesine gelinceye kadar bütün oksijen tükeneneği için kokla CO₂’nin reaksiyonu sonucu CO üretilir.



Kok yerine plastik kullanıldığında, plastik CO ve H₂’e parçalanır.



Üretilen CO ve H₂ fırın içinde yükselerek demir cevherini redükler ve ergitir. Oluşan pik demir fırının alt kısmından alınır.



Plastik kullanıldığında hidrojen redüksiyon reaksiyonuna katkıda bulunur. Böylece ortaya çıkan CO₂ miktarı, sadece kok ve pulverize kömür kullanıldığında çıkan miktara göre yaklaşık % 30 azalmış olur [23].

Şekil 4.3’te pulverize kömür ve atık plastik kullanma durumlarında tüyer önünde oluşan görüntüler verilmektedir [23].



Şekil 4.3 Pulverize kömür ve atık plastik kullanıldığında tüyer önü bölgesinin görüntüsü [23]

Atık plastik kullanılarak üretim yapıldığında pik demirin ve cürufun bileşimlerinde önemli değişiklikler ortaya çıkmamakta, toz ve gaz emisyonlarında artış görülmemektedir [23].

Redükleyici gazın kullanma verimliliği demir oksitle reaksiyon dengesinde genellikle yaklaşık % 60 olarak alınır. Redüksiyon reaksiyonlarını takiben fırın gazları, tozlar uzaklaştırıldıktan sonra çelik fabrikası içinde gaz yakıt olarak kullanılır. Bu durumdaki kullanma verimliliği % 20 olarak hesaplanmıştır. Toplam kullanım verimliliği yaklaşık % 80'e ulaşmaktadır [23].

BÖLÜM 5

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

5.1 Deneylerde Kullanılan Hammaddeler ve Cihazlar

Deneylerde, Erdemir Madencilik Tic. A.Ş. Divriği tesislerinden Divriği manyetit cevheri konsantresinden üretilen pelet keki alınarak deneylerde kullanılmıştır. Kullanılan pelet kekinin analizi Çizelge 5.1’de verilmiştir.

Çizelge 5.1 Pelet kekinin kimyasal analizi

Fe(%)	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	CaO(%)	MgO(%)	S(%)	Mn(%)	K ₂ O(%)	Na ₂ O(%)
68,5	2,2	0,75	0,6	0,58	0,4	0,1	0,07	0,04

Deneyde kullanılan kokun kimyasal analizi Çizelge 5.2’de verilmiştir.

Çizelge 5.2 Kokun kimyasal analizi

Nem (%)	Kül (%)	U.madde (%)	S.karbon (%)	Kükürt (%)
14,6	19	3,2	80,3	0,56

Deneyde kullanılan PET atıklarının bileşimi Çizelge 5.3’te verilmiştir.

Çizelge 5.3 PET atıklarının bileşimi.

C (%)	H (%)	O (%)
62,5	4,17	33,33

Peletleme işlemi için Şekil 5.1'deki laboratuvar tipi 40 cm çaplı, 45° eğimli MULTIPLEX marka peletleme diski kullanılmıştır.



Şekil 5.1 Multipex marka küresel pelet makinası



Şekil 5.2 Redüksiyon için kullanılan yatay tüp fırın ve MRU marka gaz analiz cihazı

Pelet redüksiyonu için Şekil 5.2'de görülen 1500°C'ye kadar ısıtılabilen Protherm marka yatay tüp fırın kullanılmıştır. Redüksiyon esnasında çıkan gaz türlerini ve oranlarını tespit etmek amaçlı ise proje kapsamında temin edilen MRU marka gaz analiz cihazı kullanılmıştır.

5.2 Deneyin Yapılışı

Kompozit pelet oluşturabilmek için öncelikle yüksek tane boyutuna sahip olan hammaddeler çeşitli işlemlerden geçirilerek hazır hale getirilmiştir.

Temin edilen kokun tane boyutu yüksek olduğundan, peletlemeye uygun hale (-125 µm) getirmek amacıyla öğütme işlemine tabi tutulmuştur.

5.2.1 Atık Plastiğin (PET) Peletlemeye Uygun Hale Getirilmesi

Pelet yapımında redükleyici olarak hangi plastiklerin kullanılabileceği araştırılmıştır. Bu araştırma sonucunda, Polietilenteraftalatın (PET) malzemenin pelet yapımında redükleyici olarak kullanılabileceğine karar verilmiştir. Polietilenteraftalatın ($C_{10}H_8O_4$) ergime derecesinin altındaki bir sıcaklıkta belirli bir süre bekletilip kırılğan hale getirilmiştir. Daha sonra öğütülmüş ve eleme işlemi uygulanmıştır.

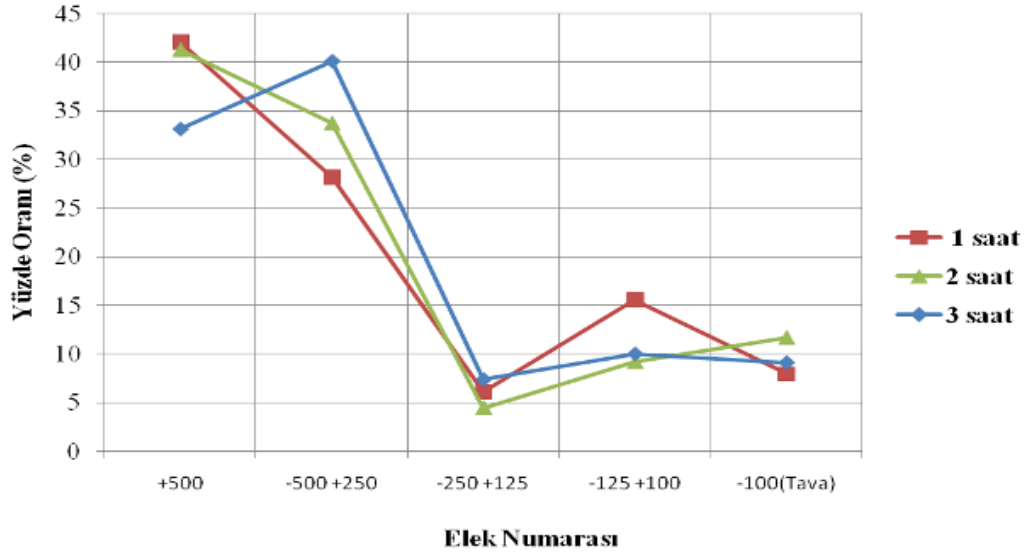
Öğütme işlemi sonunda yüksek verim alınabilmesi için fırında bekletme işlemi önem arz ettiğinden plastiklerin fırında ısıtılma süreleri ve fırın sıcaklığının optimuma getirilmesi hedeflenmiştir. Bu nedenle denemeler yaparak en uygun süreyi bulmak amaçlanmıştır. Bu denemeler sırasında fırında meşrubat şişeleri kullanılmıştır. Bu şişeleri kullanmak için öncelikle kapak ve şişelerin taban kısımlarını birbirinden ayrılıp, suyla temizlenmiş ve ardından kurutulmuştur.

PET kristalizasyonu için ergime sıcaklığının ($260^{\circ}C$) altında olacak şekilde fırının sıcaklığı, $250^{\circ}C$ 'ye ayarlanarak, fırın bu sıcaklığa ulaştıktan sonra numuneler fırın içerisine yerleştirilmiştir. Optimum bekleme süresini belirleyebilmek için sırasıyla 1 saat, 2 saat, 3 saat süreyle numuneler fırında bekletilmiştir. Fırından her bir saat diliminde çıkarılmış numuneler 1 saat boyunca bilyalı değirmende öğütülmüştür ve ardından 15 dakika eleme işlemine tabii tutulmuştur. Eleme işleminde 500 µm'lik, 250 µm'lik, 125 µm'lik ve 100 µm'lik elekler kullanılmıştır.

Çizelge 5.4 1, 2 ve 3 saat etüvde bırakılan numunelerin elek analizi tablosu

Elek No. (mm)	1 Saat Bekletme		3 Saat Bekletme		5 Saat Bekletme	
	Tane Sınıf Ağ.		Tane Sınıf Ağ.		Tane Sınıf Ağ.	
	gr.	% gr	gr.	% gr	gr.	% gr
+500	18,07	42,08	13,67	41,3	10,85	33,18
-500 +250	12,1	28,18	11,17	33,75	13,13	40,15
-250 +125	2,64	6,15	1,51	4,56	2,43	7,43
-125 +100	6,7	15,6	3,05	9,21	3,29	10,06
Tava	3,43	7,99	3,7	11,18	3	9,17
TOPLAM	42,94	100	33,1	100	32,7	100

Eleme işlemi sonucunda her bir elek altında bulunan toz ağırlığı tartılmıştır. Bu veriler kullanılarak elek numaralarına göre tozlarının % ağırlık-elek numaraları grafiği ve tablosu çizilmiştir. Ayrıca kıyaslama yapabilmek için toz ağırlık yüzdesi-elek numarası grafiği çizilmiş ve tabloda gösterilmiştir.



Şekil 5.3 Etüv fırınında 1,2,3 saat bekletilen PET numuneleri için % Ağırlık-Eleküstü grafiği

Yukarıdaki grafikten de görüleceği gibi deneyde gerekli olan 250 mikron altı tane boyutunu elde etmek için PET'lerin 1 saat etüvde bekletilmesi yeterli gelmektedir. 2 ve 3 saat bekletilen numuneler de 1 saat bekletilen numuneyle aynı oranda 250 mikron altı tane boyutu vermektedir. 250 mikronluk eleğin üzerinde kalanlar tekrar öğütücüye beslenerek kapalı devre sistemi oluşturulmuştur.

5.2.2 Kompozit Pelet Üretimi

Pelet keki, -100 mikrona elendikten sonra 110°C’de 2 saat süreyle kurutulmuştur. Her bir pelet serisi için demir cevheri, kok, atık plastik tozu ilave edilip toplamda yaklaşık 650 gr’lık 6 farklı numune türü hazırlanmıştır (Çizelge 5.4). Hazırlanan bu karışımlar, mekanik karıştırıcıda 2 saat süre ile karıştırılarak harman hazırlanmıştır.

Çizelge 5.4 Hazırlanan pelet türleri ve pelet harmanı miktarları

Pelet içeriği	S1 (%0 PET- %100 Kok)		S2 (%20 PET- %80 Kok)		S3 (%40 PET- %60 Kok)		S4 (%60 PET- %40 Kok)		S5 (%80 PET- %20 Kok)		S6 (%100 PET- %0 Kok)	
	gr	%	gr	%	gr	%	gr	%	gr	%	gr	%
Cevher	500	79,607	500	78,729	500	77,87	500	77,029	500	76,205	500	75,399
Kok	121,87	19,403	97,49	15,351	73,12	11,388	48,74	7,5088	24,37	3,7142	0	0
PET	0	0	31,31	4,93	62,62	9,7524	93,94	14,472	125,26	19,091	156,57	23,611
Melas	6,2187	0,9901	6,288	0,9901	6,3574	0,9901	6,4268	0,9901	6,4963	0,9901	6,5657	0,9901
Toplam	628,08	100	635,09	100	642,1	100	649,11	100	656,13	100	663,14	100

Hazırlanan karışım peletleme diskinin besleme ünitesine boşaltılmıştır. Peletleme işlemleri için pelet diski dakikada 30 devir dönecek şekilde ayarlanmıştır. Peletleme işlemi sırasında su ilavesi 20 saniyelik aralıklarla spreyleme yoluyla ve toplamda rutubet ilavesi yaklaşık % 10 olacak şekilde yapılmıştır. Peletleme süresi yaklaşık 30 dakika – 40 dakika arasında değişmiştir.

Bağlayıcı olarak toplam pelet hammaddesinin % 1 oranı kadar melas, suyla karıştırılarak kullanılmıştır. Elde edilen ham peletler etüvde 120 dakika boyunca 110°C sıcaklıkta kurutulmuştur. Üretilen kuru peletler Şekil 5.7’de gösterilmektedir.



Şekil 5.4 Kurutma sonrası elde edilen pelet numuneleri

5.2.3 Redüksiyon İşlemleri

Hazırlanan peletler bir grafit kayıkçık içerisinde yerleştirilerek tüp fırına konulmuştur (Şekil 5.5). Her bir pelet türü için 1400°C ve 1450°C sıcaklıklarda ve 2, 4, 6, 8, 10 dakikalık sürelerde ayrı ayrı redüksiyonları incelenmiştir.



Şekil 5.5 Grafit kayıkçık içerisine yerleştirilmiş pelet numuneleri

Peletlerin ilk ağırlıkları ile son ağırlıkları tartılıp meydana gelen ağırlık kaybından redüksiyon hesaplamaları yapılmıştır. Redüksiyon hesaplamaları için aşağıdaki formül kullanılmıştır;

$$\text{Redüksiyon oranı} = \frac{\text{Giderilen Oksijen Miktarı}}{\text{Giderilmesi Gereken Oksijen Miktarı}} \cdot 100$$

Giderilen oksijen miktarı, peletlerin ağırlık kaybından tespit edilmektedir. Peletteki ağırlık kaybı, kömür kullanıldığında, giderilen oksijen, uçucu maddeler ve oksitlenen karbondan, atık plastik kullanıldığında giderilen oksijen ve gazlaşan plastikten

kaynaklanmaktadır. Ağırlık kaybı hesaplanırken bu kayıplar değerlendirilerek hesaplama yapılmıştır. Pelet içerisindeki oksijen miktarı, direkt olarak cevherden gelen oksijendir.

BÖLÜM 6

DENEYSEL SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME

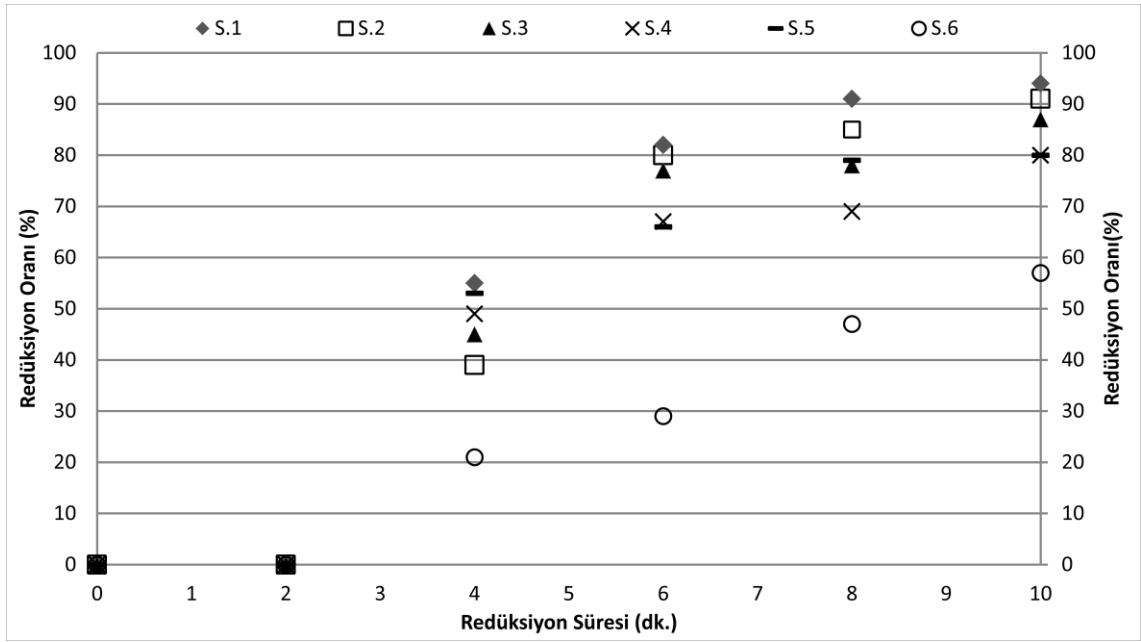
6.1 Redüklenmeye Ait Deney Sonuçları

1400°C ve 1450°C sıcaklıklarda ve 2, 4, 6, 8, 10 dakikalık sürelerde reduklenen numunelerin her biri için hesaplanmış reduksiyon oranları Çizelge 6.1’de gösterilmiştir.

Çizelge 6.1 Çeşitli pelet numunelerine ait reduksiyon koşulları ve elde edilen reduksiyon oranları

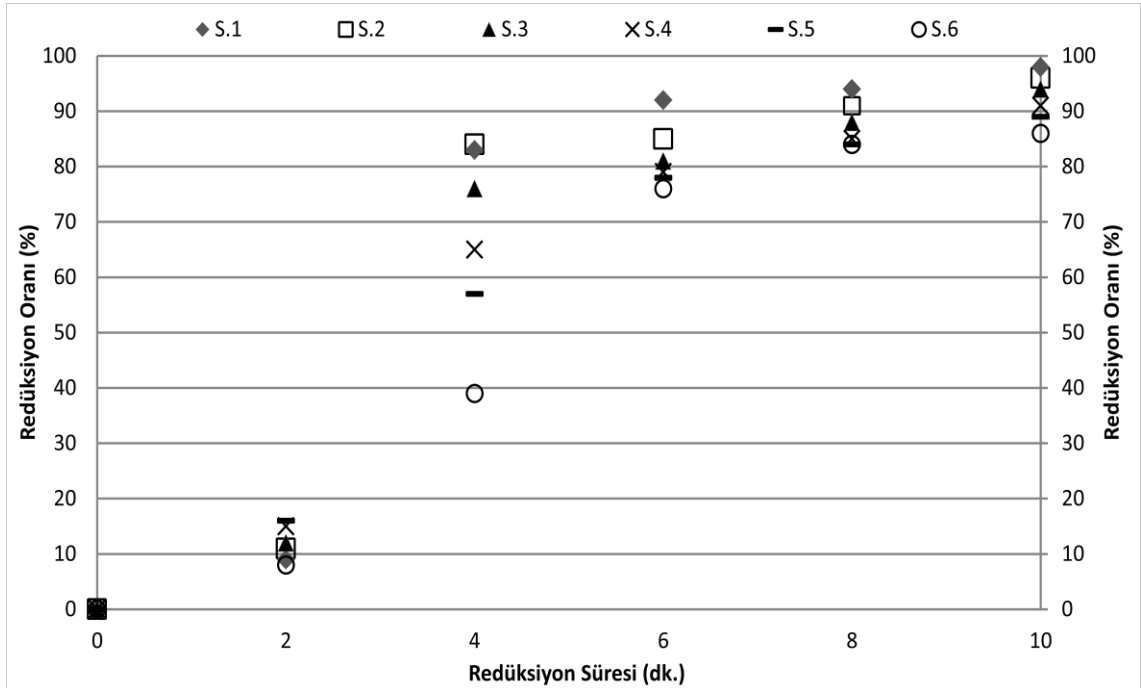
Numune	% Redüksiyon Oranları					
	S1 (%0 PET- %100 Kok)	S2 (%20 PET- %80 Kok)	S3 (%40 PET- %60 Kok)	S4 (%60 PET- %40 Kok)	S5 (%80 PET- %20 Kok)	S6 (%100 PET- %0 Kok)
1400°C 2 dk.	0	0	0	0	0	0
1400°C 4 dk.	55	39	45	49	53	21
1400°C 6 dk.	82	80	77	67	66	29
1400°C 8 dk.	91	85	78	69	79	47
1400°C 10 dk.	94	91	87	80	80	57
1450°C 2 dk.	9	11	12	15	16	8
1450°C 4 dk.	83	84	76	65	57	39
1450°C 6 dk.	92	85	81	79	78	76
1450°C 8 dk.	94	91	88	85	84	84
1450°C 10 dk.	98	96	94	91	89	86

Elde edilen reduksiyon oranlarından yola çıkarak Şekil 6.1 ve Şekil 6.2’de gösterilen reduksiyon-zaman grafikleri oluşturulmuştur.



Şekil 6.1 1400°C'de redüksiyon-zaman grafiği

Grafikten görüldüğü gibi, 1400°C'de yapılan deneyler sonucunda, %0 PET- %100 Kok içeren pelet numunesinin redüksiyon hızının diğer karışımlara kıyasla daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Karışım içerisindeki PET miktarı arttıkça redüksiyon hızı yavaşlamıştır. Ancak 10 dakika sonunda %100 PET-%0 Kok içeren karışım haricinde diğer tüm karışımların redüksiyon oranlarının yaklaşık olarak eşitlendiği görülmektedir.



Şekil 6.2 1450°C'de redüksiyon-zaman grafiği

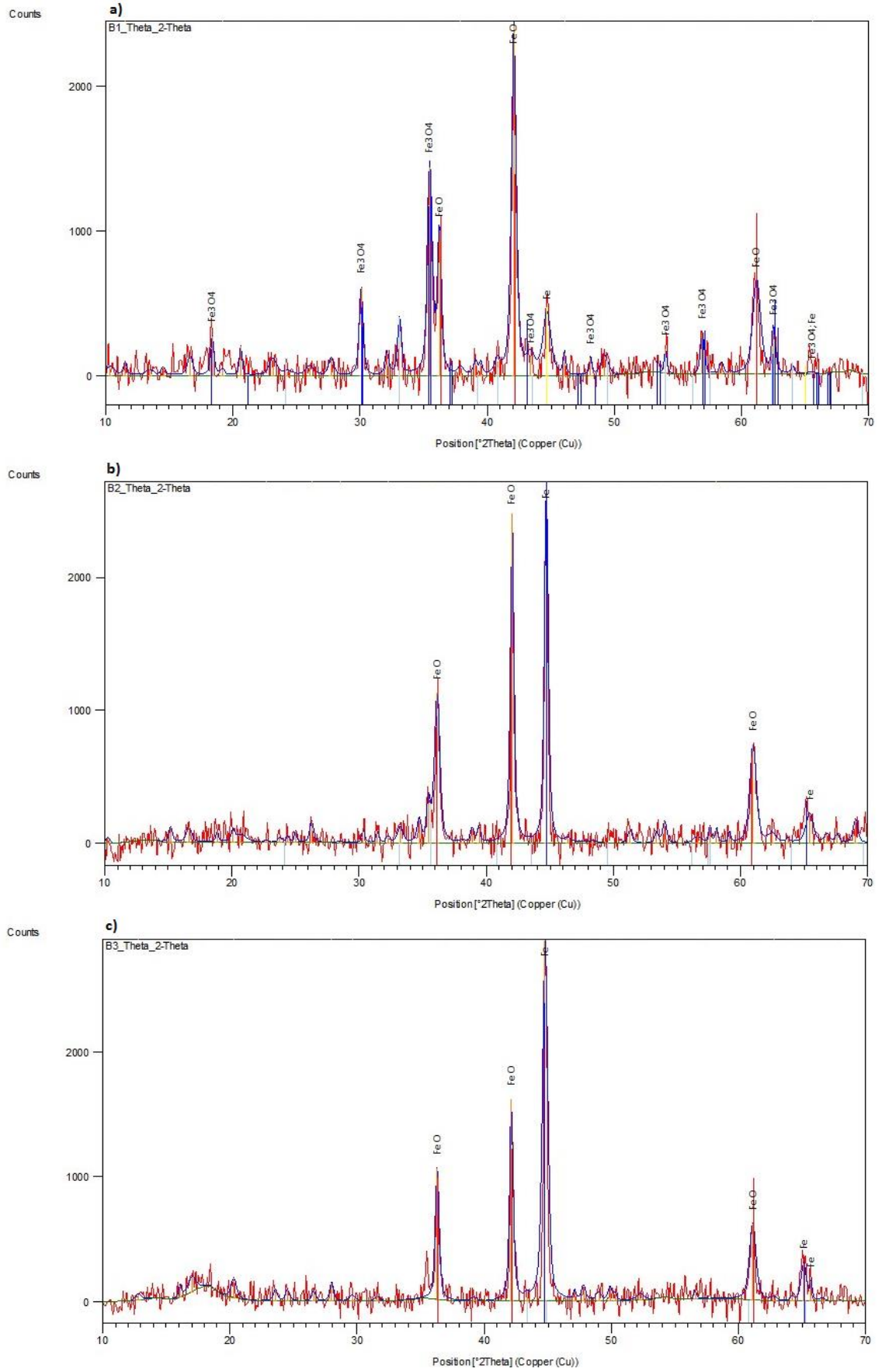
Şekil 6.2’de 1450°C’de farklı karışımlar için çeşitli sürelerde gerçekleştirilen redüksiyon sonuçları verilmiştir. Grafik incelendiğinde, karışımdaki PET oranının artmasının redüksiyon kinetiğini ve redüksiyon oranını bir miktar azalttığı görülmektedir. Fakat aynı sıcaklık için 10 dakikalık redüksiyon sonucunda, redüksiyon oranlarının birbirine yaklaştığı görülmektedir.

6.2 XRD Analizi Sonuçları

Bu deneysel çalışma sonucu elde edilen bazı numunelere ait XRD analizi yapılmış, sürenin ve sıcaklığın redüksiyona etkisini incelemek amaçlı iki ana başlık altında toplanmıştır.

6.2.1 XRD Sonuçlarına Bağlı Olarak Sürenin Redüksiyona Olan Etkisi

1400°C’de % 60 PET - % 40 kok karışımını içeren numuneye sürenin etkisini incelemek için XRD analizi yapılmış ve elde edilen sonuçlar Şekil 6.3’te gösterilmiştir.

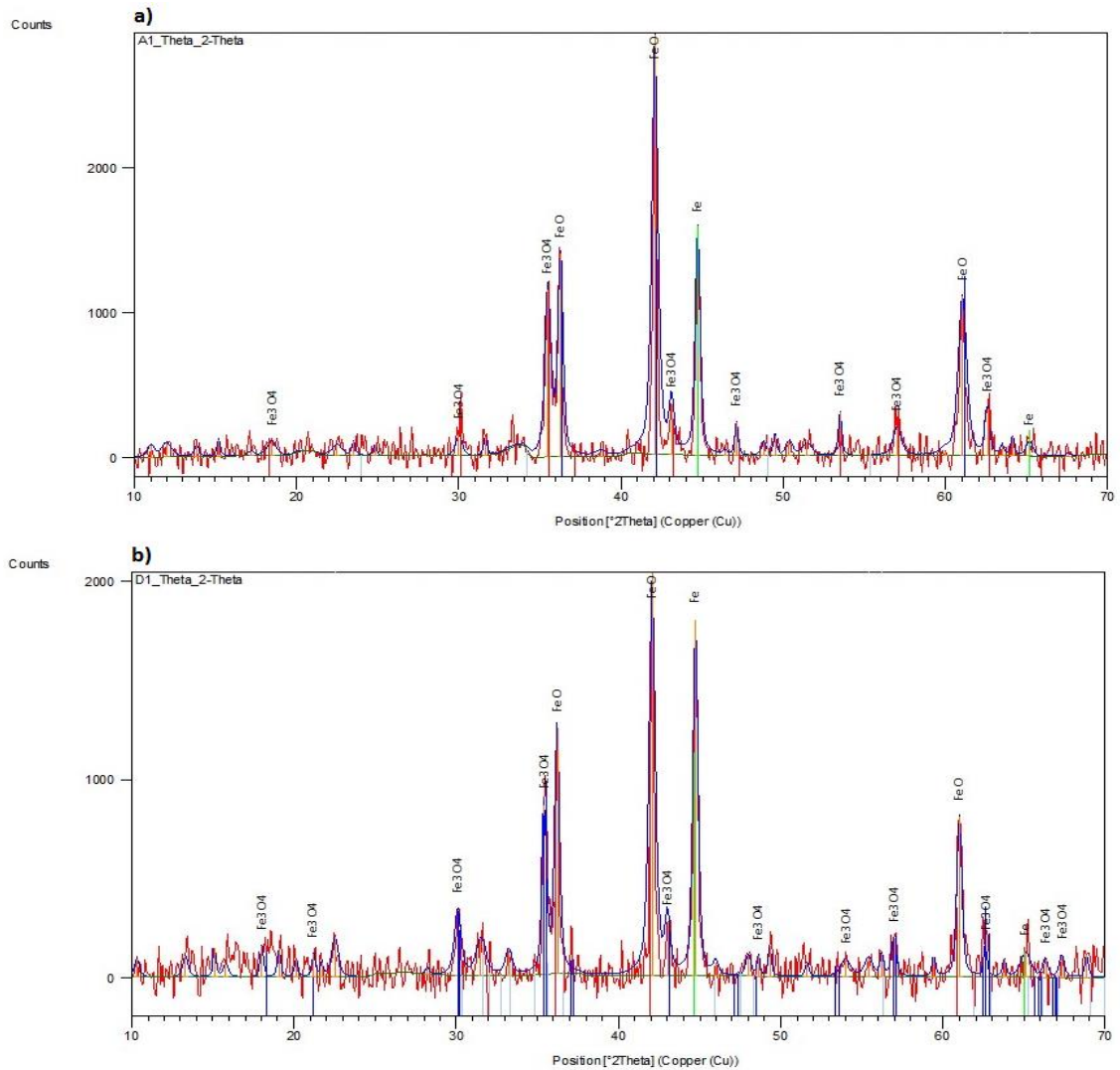


Şekil 6.3 1400°C'de %60 PET-%40 kok karşımı içeren, a)2 dakika, b)6 dakika, c)10 dakika sonunda elde edilen numunelerin XRD grafikleri

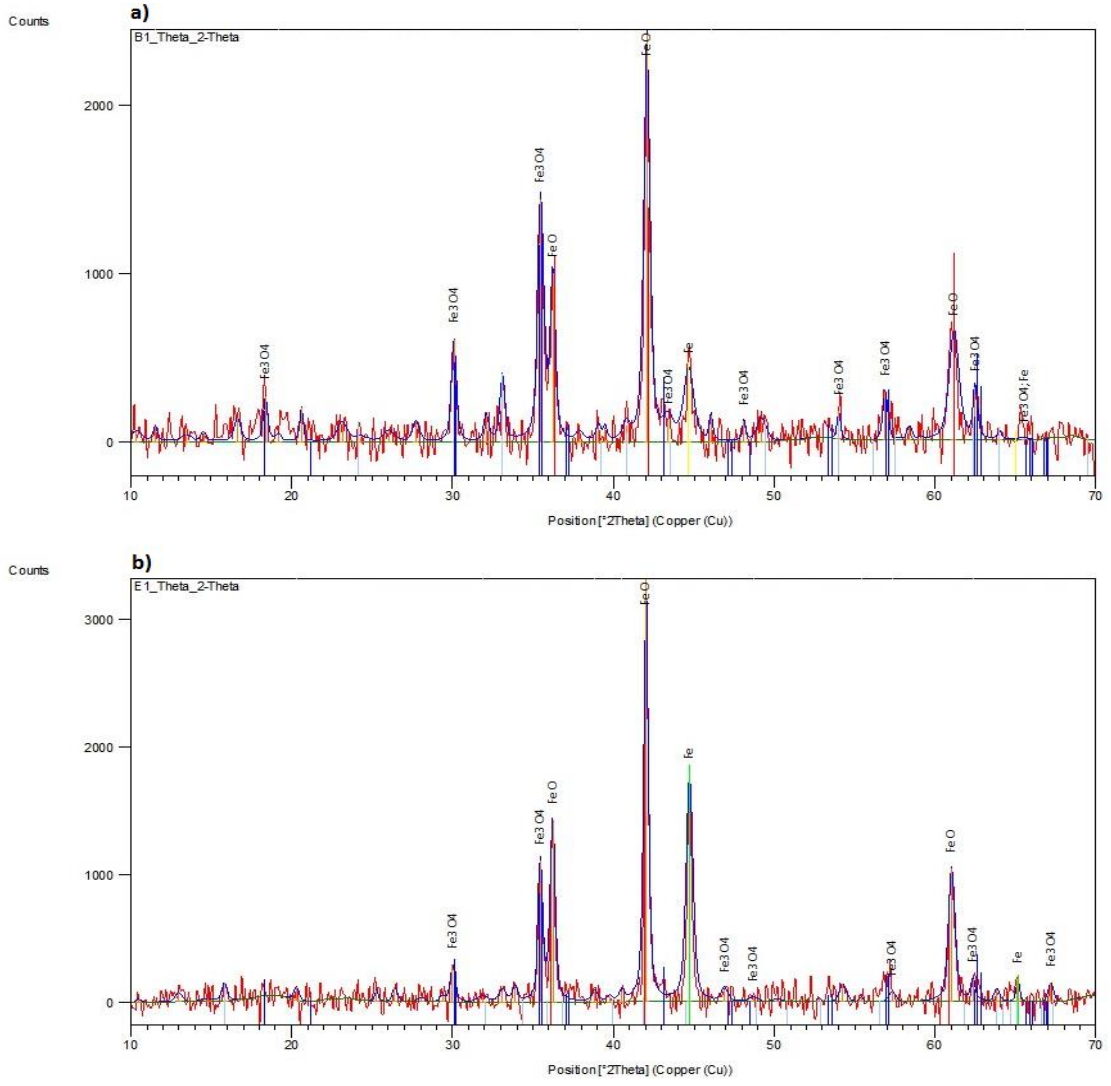
Şekil 6.3'teki grafikler kıyaslandığında, (a) grafiğinde Fe_3O_4 , FeO ve bir miktar da Fe fazı bulunmaktadır. (b) grafiğine bakıldığında, Fe_3O_4 fazı tamamen ortadan kalkmış ve yüksek oranda FeO ve Fe fazları elde edilmiştir. (c) grafiğinde ise FeO ve yüksek oranda Fe fazları elde edilmiştir. Bu verilere göre, sürenin artması ile redüksiyon kademelerinin $\text{Fe}_3\text{O}_4 \rightarrow \text{FeO} \rightarrow \text{Fe}$ şeklinde gerçekleşmekte ve aynı sıcaklıkta, redüksiyon süresinin artmasıyla redüksiyon oranı artmaktadır.

6.2.2 XRD Sonuçlarına Bağlı olarak Sıcaklığın Redüksiyona Olan Etkisi

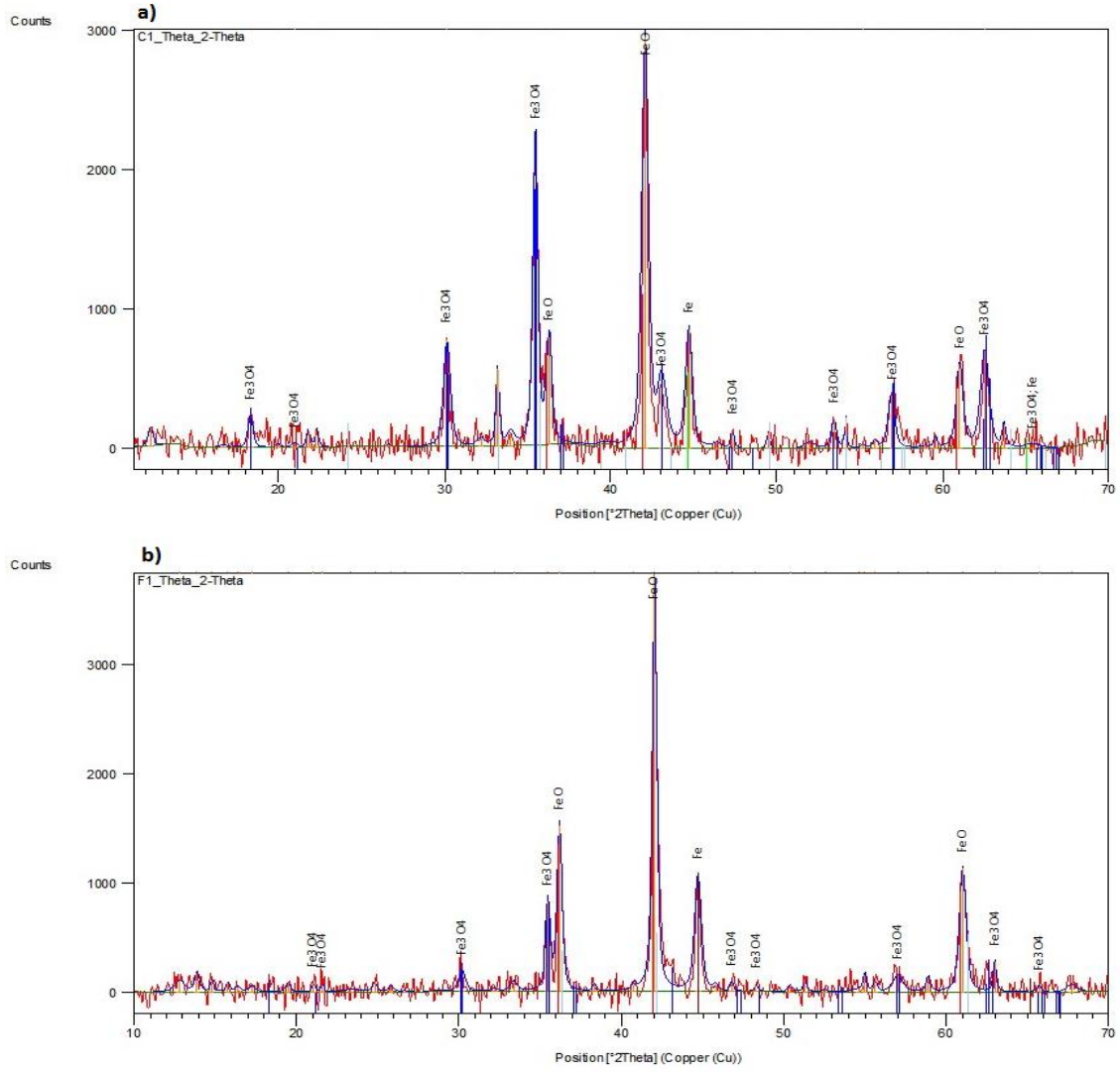
Sıcaklığın redüksiyona olan etkisinin incelenmesi için 1400°C 'de ve 1450°C 'de 2 dakikalık sürede redüklenmiş eş numunelerden % 0 PET - % 100 kok, % 60 PET- % 40 kok ve % 100 PET - % 0 kok numuneleri XRD sonuçlarına bakılarak kıyaslanmıştır.



Şekil 6.4 %0 PET-%100 kok karışımının a) 1400°C 'de, b) 1450°C 'de redüklenmiş numunelere ait XRD sonuçları



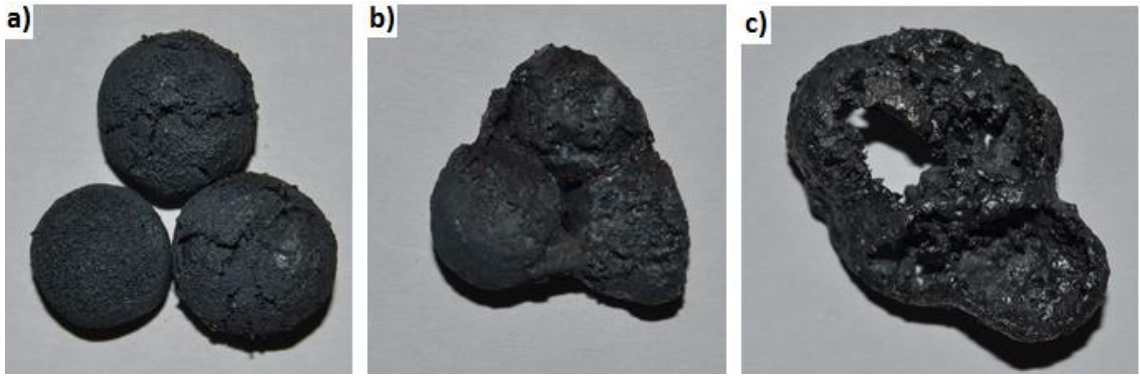
Şekil 6.5 %60 PET-%40 kok karışımının a)1400°C'de, b)1450°C'de redüklenmiş numunelere ait XRD sonuçları



Şekil 6.6 %100 PET-%0 kok karışımının a)1400°C'de, b)1450°C'de redüklenmiş numunelere ait XRD sonuçları

Şekil 6.4, Şekil 6.5 ve Şekil 6.6'ya bakıldığında her bir eş numune için sıcaklığın artmasıyla $\text{Fe}_3\text{O}_4 \rightarrow \text{FeO} \rightarrow \text{Fe}$ faz dönüşümünün gerçekleştiği görülmektedir. Her bir eş karışıma sahip numuneler aynı sürelerde, sıcaklık artışıyla birlikte, bünyelerinde ilk başta mevcut olan Fe_3O_4 çoğunlukla FeO'ya dönüşmekte ve oluşan FeO'nun bir kısmı da Fe'ye redüklenmektedir. Böylece bu üç farklı numune üzerinde yapılan incelemelerde sıcaklığın artışıyla birlikte redüksiyon oranının arttığı görülmektedir.

6.3 Karışım Oranlarının Redüksiyon Ürününe Etkisi

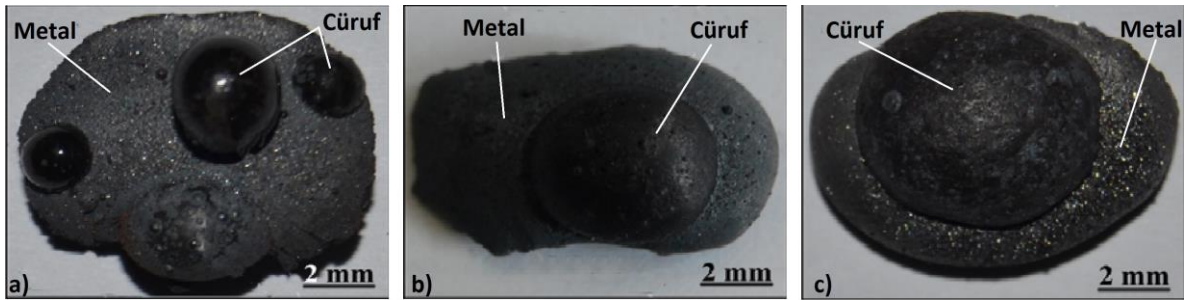


Şekil 6.7 1400°C’de 10 dakika sonucunda elde a)%0 PET-%100 kok, b)%60 PET-%40 kok ve c)%100 PET-%0 kok içeren numunelere ait görüntü

1400°C’de 10 dakikalık redüksiyon sonucunda elde edilmiş 3 farklı karışıma sahip peletlerin görüntüleri Şekil 6.7’de verilmiştir. Bu görüntülerden de anlaşılabacağı gibi karışım içerisindeki PET miktarı arttıkça nihai üründe gözenekli bir yapı elde edilmiştir. Bunun sebebi ise yüksek sıcaklıkta PET atıklarının hızlı bir şekilde parçalanıp pelet merkezinden dışarı doğru uzaklaşması sonucu oluşturduğu gözeneklerdir.

6.4 Elde Edilen Metalik Demirlerin Kimyasal Analizleri

1450°C’de yapılan deneylerde tüm pelet karışımları için metalik demir elde edilmiştir. Metalik demir oluşumu ve yeterli derecede metal-cüruf ayrımı için 10 dk.’lık süreler yeterli olmaktadır. Bu süre sonunda elde edilen metalik demirle cüruf fazının birbirinden çok iyi ayrıldığı görülmektedir (Şekil 6.8).



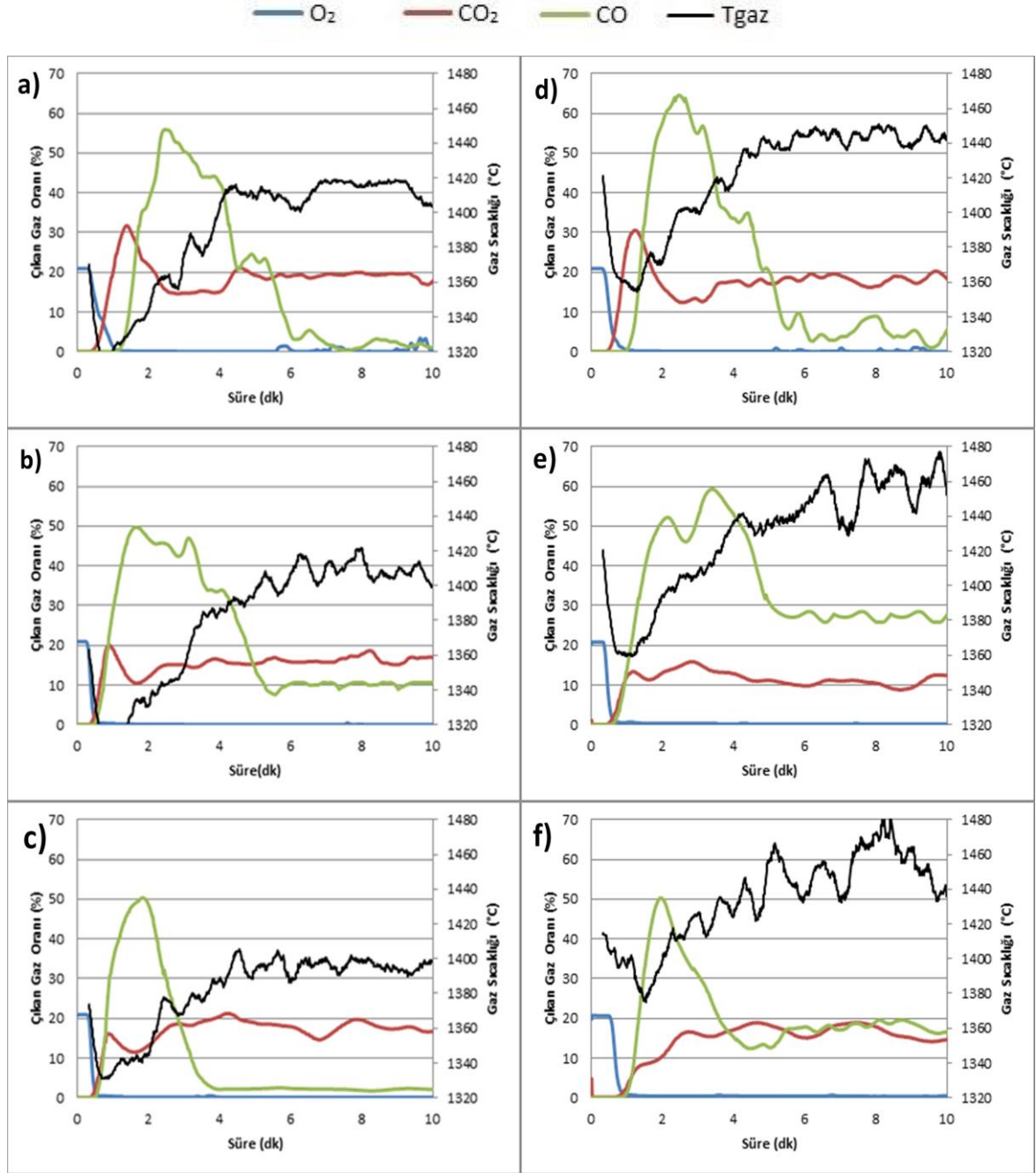
Şekil 6.8 1450°C’de 10 dakika sonucunda elde a)%0 PET-%100 kok, b)%60 PET-%40 kok ve c)%100 PET-%0 kok içeren numunelere ait görüntü

Çizelge 6.2 1450°C’de redüksiyon sonucunda metalik demir elde edilen numuneler ve kimyasal analizleri

	Bileşim				
	Fe	C	Si	P	S
Numune	(% ağı.)				
S.1	95.2	4.12	0.126	0.088	0.385
S.2	93.2	4.09	0.119	0.052	0.356
S.3	95.3	4.15	0.109	0.021	0.288
S.4	94.3	4.39	0.114	0.006	0.243
S.5	94.8	4.67	0.093	0.007	0.226
S.6	95.7	4.65	0.062	0.005	0.209

Çizelge 6.2’de görüldüğü gibi elde edilen numunelerin kimyasal bileşimleri, dökme demirin bileşimi ile örtüşmektedir.

6.5 Redüksiyon Esnasında Yapılan Gaz Analizleri

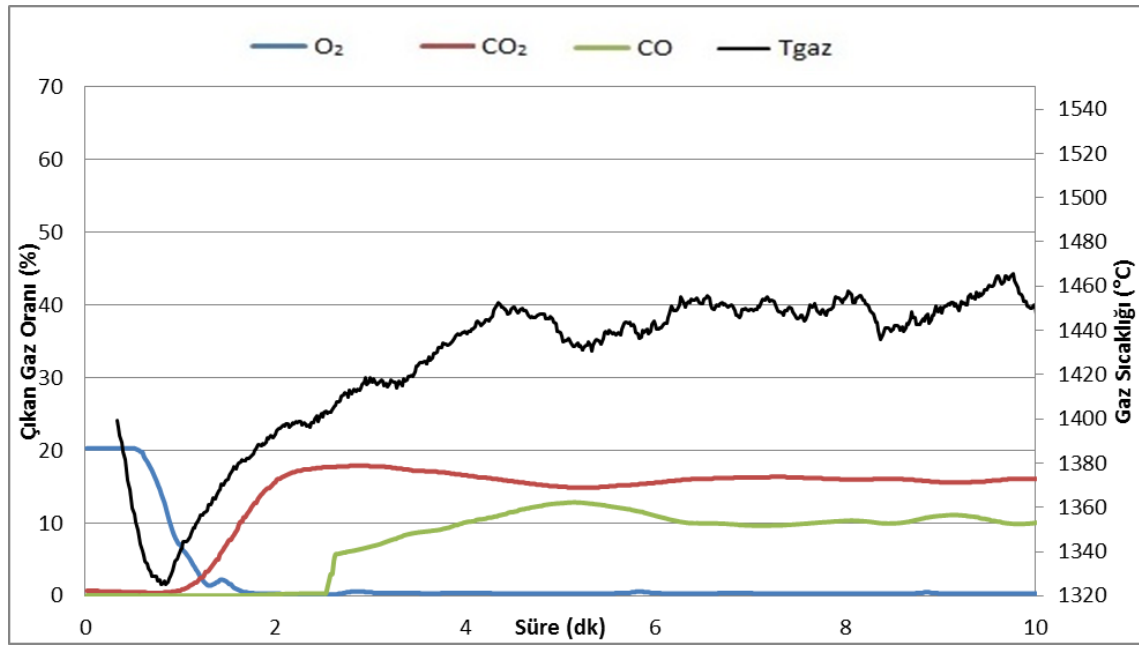


Şekil 6.9 Redüksiyon esnasında fırın ortamındaki gaz analizi ve sıcaklık ölçümü a)1400°C %0 PET-%100 kok, b)1400°C %60 PET-%40 kok, c)1400°C %100 PET-%0 kok, d)1450°C %0 PET-%100 kok, e)1450°C %60 PET-%40 kok ve f)1450°C %100 PET-%0 kok içeren numuneler

Redüksiyon esnasında yapılan gaz analizleri grafikleri incelendiğinde tamamen kok ve kok-PET karışımı içeren numunelerde sıcaklık artışı ile birlikte CO oluşumunun daha yüksek oranlarda olduğu tespit edilmektedir. % 100 PET - % 0 kok içeren numunede ise sıcaklık artışı ile birlikte oluşan CO oranının aynı kaldığı görülmektedir.

Şekil 6.9 (b) ve (e) grafiklerinde CO için 0-4 dk. aralığında iki ayrı pik noktasının oluştuğu görülmektedir. Bunlardan birinci pik, PET atıklarının hızlı bir şekilde parçalanmasından dolayı oluşmaktadır. İkinci pik ise görece daha geç reaksiyon veren kok kömürüne aittir. Ortamdaki oksijen redüksiyon esnasında tamamen harcandığından oranı sıfır olarak görülmektedir.

Kayıkçık içerisindeki pelet numuneleri fırın içerisine soğuk olarak verildiğinden dolayı ilk safhalarda ortamın sıcaklığını ve dolayısıyla çıkan gazların da sıcaklığını azalttığı görülmektedir. Ancak numuneler ortam sıcaklığı ile dengeye ulaştığında, gazların sıcaklığı da fırın sıcaklığı civarında seyir almaktadır.



Şekil 6.10 1450°C'de 10 dk.'lık sürede tek başına grafit kayıkçıga ait gaz analizi grafiği

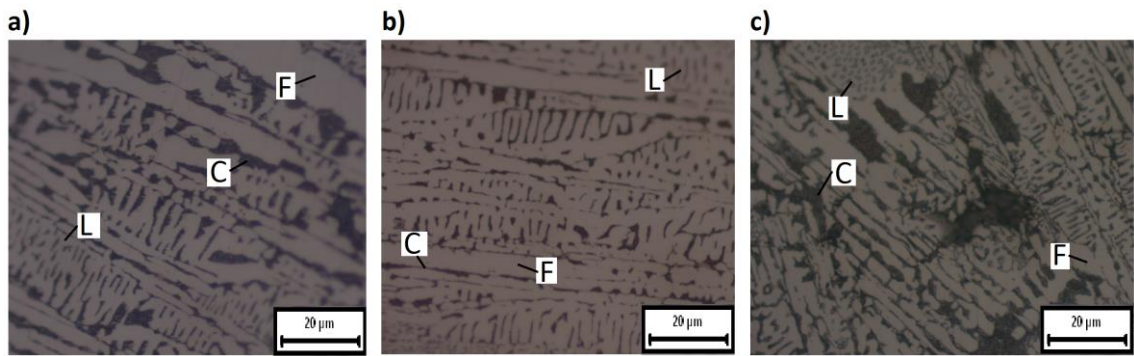
Şekil 6.10'da tüp fırın içerisine tek başına kayıkçık yerleştirilmesi ile 1450°C'de 10 dk.'lık sürede elde edilen gaz analizi grafiği gösterilmektedir. Bu grafikten görüldüğü gibi, fırın içerisindeki CO miktarı yaklaşık 2,5 dakikada yükselişe geçmiş ve 4 dakikadan sonra yaklaşık olarak % 10 civarında bir seyirle sürekli olarak devam etmiştir. CO₂ oranına bakıldığında ise 2 dakikaya kadar yükselişe geçmiş ve bu süreden sonra yaklaşık % 18 civarında sabit bir şekilde ilerlemektedir. 5. Dakikada olduğu gibi, bazı noktalarda CO₂ oranı azalırken, CO oranının bir miktar arttığı görülmektedir. Bu durum, açığa çıkan CO₂'nin ortamdaki katı C ile reaksiyona girmesi ile Boudouard reaksiyonlarının gerçekleşmesinden dolayı meydana gelmektedir.

Tek başına grafit kayıkçık kullanıldığında, Şekil 6.9'da olduğu gibi 0-4 dk. arasında yüksek CO pikleri oluşmadığı görülmektedir. Ana redüksiyon 0-4 dk. aralığında PET'in hızlı parçalanmasından ve kokun ise hızlı bir şekilde yanmasından dolayı meydana gelen piklerle gerçekleşmekte ve redüksiyonun tamamlanması içinse grafit kayıkçıktan kaynaklanan redükleyici gazlar, olumlu bir şekilde etki etmektedir.

Tek başına grafit kayıkçık kullanılması durumunda, 4. dk.'dan sonra, kayıkçık sıcaklığı fırın atmosferi ile dengeye ulaştığında açığa çıkan gazın sıcaklığının 1450°C civarında seyir aldığı görülmektedir.

6.6 Elde Edilen Metalik Demirlerin Mikroyapıları

1450°C'de 10 dakikalık redüksiyon sonucunda elde edilmiş metalik numunelerin bazıları optik mikroskopta incelenmiş ve 500X büyütmede Şekil 6.11'deki mikroyapılar elde edilmiştir.



Şekil 6.11 1450 °C'de 10 dakikada elde edilmiş (500x büyütme) a)%0 PET-%100 kok, b)%60 PET-%40 kok ve c)%100 PET-%0 kok içeren numunelerden elde edilmiş mikroyapı görüntüleri (C:sementit, F:Ferrit ve L:Ledeburit)

Mikroyapılardan görüldüğü gibi, numunelerin yapısındaki fazlar, bir dökme demir malzeme içerisinde görülebilecek fazlarla aynıdır. Üç farklı numune de sementit, ferrit ve ledeburit fazlarından ibarettir.

SONUÇ VE ÖNERİLER

Yapılan deneysel çalışmalarda, redükleyici olarak PET ve/veya kok kömürü içeren kompozit peletlerin redüklenmesinde sıcaklığın ve sürenin etkili olduğu kadar karışımdaki redükleyicilerin de etkili olduğu görülmüştür. Bu çalışma neticesinde aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir;

- Günümüzde demir cevherinin redüklenmesinde yüksek miktarlarda kullanılan kok kömürünün yerine, parçalandığı zaman redükleme özelliği olan CO₂ ve CO gazlarını açığa çıkaran alternatif bir redükleyici olarak bir plastik türü olan PET atıklarının kullanılabileceği görülmüştür.
- PET atıklarının kompozit pelet üretiminde kullanılabilir hale gelmesi için çok ince tane boyutlarına indirilmesi gerekmektedir. Bu amaçla proses öncesi PET atıklarının bir ısıtma işlem kademesinden geçmesi gerekmektedir.
- Redüksiyon özelliklerine bakıldığında, pelet karışımı içerisindeki kok oranının artması genel itibarıyla kinetik açıdan redüksiyon özelliklerini olumlu yönde etkilemektedir. PET atıklarının redükleyici olarak tek başına kullanılması ise düşük sıcaklıklar için olumlu sonuçlar vermemektedir. Ancak PET-kok karışımı halinde kullanıldığında 10 dakikalık redüksiyon sonucunda, sadece kok kullanılarak redükleme yapılan numunelere yakın değerlerde sonuçlar vermektedir.
- Sıcaklığın redüksiyona ve metalik demir oluşumuna olan etkisi ele alındığında, 1400°C'ye kıyasla 1450°C'de ciddi farklılıklar elde edilmiştir. 1400°C'de yapılan deneylerde düşük redüksiyon oranları elde edilmiş ve deney süresince metalik demir oluşumu elde edilememiştir. Sıcaklığın 1450°C'ye çıkması ile redükleyici olarak sadece PET atıklarının (% 100 PET - % 0 kok karışımı) kullanıldığı karışım da

dahil olmak üzere yüksek redüksiyon oranları ve metalik demir oluşumu elde edilmiştir. Yapılan XRD analizleri de sıcaklığın redüksiyon üzerindeki etkileri kanıtlanmıştır.

- Sürenin redüksiyona olan etkisi incelendiğinde, hem redüksiyon oranı hesabı, hem de XRD sonuçları ele alınarak artan süreyle birlikte demir oksitlerin demire redüklendiği görülmektedir. 1400°C'de 2 dakikalık numunelerde redüksiyon olmadığı, artan süreyle birlikte ise redüksiyonun olduğu ancak 10 dakikanın sonunda yeterli oranda redüksiyon ve metalik demir elde edilememiştir. Bu sıcaklıkta yeterli redüksiyon ve metalik demir oluşumu için daha uzun redüksiyon sürelerinin seçilmesi gerekebilir. 1450°C'deki redüksiyonlara bakıldığında, deneyde çalışılan tüm sürelerde redüksiyon oluşmuş ve artan sıcaklıkla birlikte yeterli seviyede sonuçlar elde edilmiştir. Bu sıcaklıkta, demir cevheri içerisine redükleyici olarak PET ve/veya kok katıldığında metalik demir oluşumu için 10 dakikalık süre yeterli olmaktadır.

- Redüksiyon esnasında yapılan ölçümlerle fırın içerisinde oluşan gazlar incelendiğinde pelet karışımı içerisindeki kok miktarı arttıkça ilk safhada açığa çıkan CO₂ ve CO oranı yüksek çıkmaktadır. Sıcaklık artışı ile birlikte PET-kok karışımı şeklindeki peletlerde bu gaz karışımının oranı daha da yükseğe ulaşmaktadır. Redükleyici olarak %100 atık PET içeren numunelerde sıcaklık artışının çıkan gazın oranını etkilemediği görülmüştür. PET atıklarının deney sıcaklıklarında hızlı bir şekilde parçalanmalarından dolayı oluşan bu gazlar, ilerleyen safhalarda azalmaktadır. Bu yüzden, reaksiyonların daha randımanlı bir şekilde ilerleyebilmesi için ilerleyen safhalarda da gaz oluşumunu sağlayacak şekilde PET-kok karışımı kullanmak daha faydalı olmaktadır. Yapılan deneyler sonucunda %60 PET-%40 kok içeren karışımda oldukça iyi sonuçlar elde edilmiştir. Bu yüzden, PET atıklarını redükleyici olarak tek başına kullanmak yerine, PET-kok karışımı şeklinde kullanılması daha uygun görülmektedir.

- 1450°C'de gerçekleştirilen ve farklı oranlarda PET-kok karışımlarına uygulanan deneyler sonucunda oluşan metalik demir taneleri analiz edilip bileşimindeki elementlerin oranına bakıldığında dökme demir ile aynı bileşimde olduğu tespit edilmiştir.

- Oluşan metalik demir tanelerine yapılan mikroskopik inceleme sonucunda ise yine dökme oluşması muhtemel fazlar elde edilmiştir.
- Bu çalışma genel olarak değerlendirildiğinde, doğada biyobozunumları oldukça uzun süren bir plastik atığı türü olan PET atıklarının demir çelik endüstrisinde, kompozit peletten demir üretimi için uygulanabilir bir redükleyici olduğu görülmüştür. Böylece, hem bu atığın çevreye olan zararları indirgenebilir hem de yüksek miktarlarda kullanılan kok kömürüne alternatif bir redükleyici olarak demir çelik endüstrisinde yerini alabilir.

KAYNAKLAR

- [1] Benkli, Y.E., Boyrazlı, M. ve Çizmecioğlu, Z., (2009). “Soğukta Sertleşen Kompozit Pelet Üretiminde Bağlayıcı Olarak Jöle İlavesinin Araştırılması” 5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (IATS’09), 13-15 Mayıs 2009, Karabük, Türkiye.
- [2] Indian Bureau of Mines Web Sitesi, Vision 2020 (Iron&Steel), <http://ibm.nic.in/ch6.pdf>, 5 Ekim 2013.
- [3] Demirci, F.C., (2010). Sürekli Döküm Tufalinin Karbotermik İndirgeme Reaksiyonunun İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [4] Lu, W-K. ve Huang, F., (2001). “The Evolution of Ironmaking Process Based on Coal-Containing Iron Ore Agglomerates”, ISIJ International, 41(8): 807–812.
- [5] Negami, T. (2001), “ITmk3 Premium Ironmaking Process for the New Millenium, Direct from Midres 1st Quarter 2001”
- [6] Birol, B., (2007). Divriği Pelet Konsantresinden Kompozit Pelet ve Demir Tanesi Üretimi, Yüksek Lisans Tezi, YTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [7] Tanaka, H., Kobayashi, I., Tsuge, O., Kikuchi S., Tokuda, K. ve Ito, S. (2004). “Development of ITmk3 Process”, SCANMET II – 2nd International Conference on Process Development in Iron and Steelmaking, 6-9 June 2004, Lulea, İsveç.
- [8] Janz, J. ve Weiss, W., (1996). “Injection of Waste Plastics into The Blast Furnace of Stahlwerke Bremen”, 3rd European Ironmaking Cong., 16-18 Eylül 1996, Belçika.
- [9] Kato, K., Nomura, S. ve Uematsu, H., (2003). “Waste Plastics Recycling Process Using Coke Ovens”, J Mater Cycles Waste Manag 5:98–101
- [10] Buchwalder, J., Fuchs, T., Hunger ve J, Siepert, T., (2003). “Experience with Using Alternative Reducing Agents at Blast Furnace” Revue de Métallurgie, 100(03):289-295.
- [11] Zhang C., Chen S., Miao X. ve Yuan H., (2009). “Reduction Experiment of Iron Scale By Adding Waste Plastics”, Journal of Environmental Sciences, 21(1):48-51.
- [12] Wagner, D., B., The Traditional Chinese Iron Industry and Its Modern Fate, http://donwagner.dk/Fate/Fate_Figs/Fate_Figs.html, 21 Eylül 2013.

- [13] Sahoo, R. ve Roach, D., (2005). "Degradation Behaviour of Weathered Coal During Handling for the COREX Process of Iron Making", Powder Technology, 152(1-3):1-8.
- [14] Lampert, K. ve Ziebig, A., (2007). "Comparative Analysis of Energy Requirements of CO₂ Removal From Metallurgical Fuel Gases", Energy, 32(4):521-527.
- [15] Sharma, P. D., Environmentally Friendly Iron-Making Processes, http://ecacwb.org/editor_upload/files/12710459-Environment-Friendly-Iron-Making-Processes.pdf, 08 Ekim 2013.
- [16] Tsuge, O., Kikuchi, S., Tokuda, K., Ito, S., Kobayashi, I. ve Urugami, A. (2002) "Successful Iron Nuggets Production at ITmk3 Pilot Plant", 61. Ironmaking Conference, 61st Ironmaking Conference Proceedings. Vol. 61, 894 pages , Nashville, TN (United States) 10 - 13 Mart 2002.
- [17] Ghosh, A., Mungolge, M., Gupta, N. ve Tiwari, S., (1999). "A Preliminary Study of Influence of Atmosphere on Reduction Behavior of Iron Ore-Coal Composite Pellets", ISIJ International, 39(8):829-831.
- [18] Mourao, M. B. ve Takano, C., (2003). "Self-Reducing Pellets for Ironmaking: Reaction Rate and Processing", Mineral Processing & Extractive Metall. Rev., 24:183-202.
- [19] Agrawal, B.B., ve Chauhan, G.I.S., (2006). "Development of Ore-Coal Composite Pellets for Sponge Ironmaking", EPD Congress 241.
- [20] Agrawal, B.B., Prasad, K.K., Sarkar S. B. ve Ray H.S., (2000). "Cold Bonded Ore-Coal Composite Pellets for Sponge Ironmaking, Part 1 Laboratory Scale Development", Ironmaking and Steelmaking, 27(6):421-425.
- [21] Kobayashi, I., Tanigaki, Y. ve Urugami, A. (2001) "A New Process to Produce Iron Directly from Fine Ore and Coal", 2001 Ironmaking Conference Proceedings.
- [22] Matsumura, T., Takenaka, Y., Shimizu, M., Negami, T., Kobayashi, J. ve Urugami, A., (1998). "Direct production of molten iron from carbon composite iron ore pellet," La Revue de Me'tallurgie-CIT, 341-351.
- [23] Sarıdede, M., N., Yüksek Fırında Atık Plastik Kullanımı http://www.metalurji.org.tr/dergi/dergi138/d138_5863.pdf, 12 Eylül 2013.
- [24] Practical Action, Recycling Plastics, http://practicalaction.org/docs/technical_information_service/recycling_plastics.pdf, 4 Ekim 2013.
- [25] Tan, E., Tarakçılar, A. R., ve Yurtseven, R., (2007). "Plastik Geri Kazanımları ve Plastik Atıklardan Plastik Üretim Teknolojileri", Metal Dünyası, 170:132-137.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı :Gökhan POLAT
Doğum Tarihi ve Yeri :10.08.1990-Sarıkamış/KARS
Yabancı Dili :İngilizce
E-posta :gokhanpolat87@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Lisans	Metalurji ve Malzeme Mühendisliği	Yıldız Teknik Üniversitesi	2010
Lise	Fen Bilimleri	İncirli Lisesi	2005

İŞ TECRÜBESİ

Yıl	Firma/Kurum	Görevi
2012	Yıldız Teknik Üniversitesi	Araştırma Görevlisi
2011	Necmettin Erbakan Üni.	Araştırma Görevlisi

YAYINLARI

Bildiri

1. Polat, G., Birol, B., Sarıdede, M.N., Using of Waste Pet (Polyethylene Terephthalate) As an Alternative Reductant in Iron and Steel Industry, 22nd International Conference on Metallurgy and Materials, (2013)

Proje

1. Kompozit Peletlerden Demir Tanesi Üretiminde Redükleyici Olarak Plastik Atık Kullanımının Araştırılması

ÖDÜLLERİ

1. “22nd International Conference on Metallurgy and Materials” En İyi Poster Yarışması Mansiyon ödülü, Çek Cumhuriyeti, 2013