

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**SÜREKLİ DÖKÜM PROSESİNDE POTA NOZULU TIKANMA
PROBLEMİNİN ANALİZİ VE AZALTILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Zafer ÇETİN

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Malzeme Mühendisliği Programı

ARALIK 2016

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**SÜREKLİ DÖKÜM PROSESİNDE POTA NOZULU TIKANMA
PROBLEMİNİN ANALİZİ VE AZALTILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Zafer ÇETİN
(506121438)**

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Malzeme Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Necip ÜNLÜ

ARALIK 2016

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 506121438 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Zafer ÇETİN**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı **“SÜREKLİ DÖKÜM PROSESİNDE POTA NOZULU TIKANMA PROBLEMİNİN ANALİZİ VE AZALTILMASI”** başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Doç. Dr. Necip ÜNLÜ**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Ercan AÇMA**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Nilgün KUŞKONMAZ**
Yıldız Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : **21 Kasım 2016**
Savunma Tarihi : **23 Aralık 2016**

Aileme,

ÖNSÖZ

Yüksek lisans tez çalışmalarım boyunca, gösterdiği her türlü destek, öneri ve yönlendirmelerinden dolayı değerli danışman hocam Sayın Doç. Dr. Necip ÜNLÜ'ye en içten dileklerimle teşekkür ederim.

İTÜ'de gördüğüm eğitim boyunca engin bilgileri, kıymetli önerileri ile bana destek olan Sayın Prof. Dr. E. Sabri KAYALI'ya en içten teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarım sırasında ki yardımlarından ötürü iş arkadaşlarım İsa KESKİN, Emre ALAN ve Kağan KELER'e teşekkür ederim.

Son olarak maddi ve manevi desteklerini benden hiç esirgemeyen anneme, babama, kardeşime ve müstakbel eşime sonsuz saygı ve sevgilerimi sunarım.

Aralık 2016

Zafer Çetin
Metalurji ve Malzeme Mühendisi

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xiii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xv
ÖZET.....	xvii
SUMMARY	xix
1. GİRİŞ	1
2. BAZİK OKSİJEN ÇELİK ÜRETİMİ	5
2.1 Sıcak Metal Ön İşlemi.....	6
2.2 Bazık Oksijen Fırını Prosesi.....	6
2.2.1 Şarj alma	9
2.2.2 Oksijen üfleme	9
2.2.3 BOF'taki rafinasyon reaksiyonları	10
2.2.4 Konvertörden potaya döküm.....	12
2.3 İkincil Metalurji İşlemleri	12
2.3.1 Pota fırını.....	14
2.3.2 Vakum işlemi	15
2.4 Çeliğin Sürekli Dökümü.....	16
2.4.1 Sürekli döküm prosesi.....	17
2.4.2 Sürekli döküm ekipmanları	19
2.4.2.1 Taret.....	20
2.4.2.2 Pota ara tüpü	20
2.4.2.3 Tandış.....	20
2.4.2.4 Tandış daldırma nozulu	21
2.4.2.5 Kalıp.....	21
2.4.2.6 İkincil soğutma bölgesi.....	22
2.4.3 Sürekli döküm çeşitleri	23
3. SÜREKLİ DÖKÜMDE NOZUL TIKANMASI.....	25
3.1 Nozul Tıkanmasına Etki Eden Mekanizmalar	25
3.1.1 Deoksidasyon ürünlerinin aglomerasyonu.....	26
3.1.2 Çeliğin katılaşması	26
3.1.3 Kompleks oksitlerin aglomerasyonu.....	26
3.1.4 Reaksiyon ürünlerinin birikmesi	26
3.2 Çelik Temizliği.....	27
3.3 Çelikte Oksit İnklüzyonlarının Oluşumu	27
3.4 Kalsiyum İşlemi ve İnklüzyon Modifikasyonu	29
4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	33
4.1 Laboratuvar İncelemeleri	33
4.1.1 Numune hazırlama	33
4.1.2 Optik mikroskop incelemeleri.....	36
4.1.3 Taramalı elektron mikroskobu incelemeleri	36

4.1.4 Optik emisyon spektrometresi analizleri	37
4.2 Veri Analizleri	38
4.3 Deney Tasarımı Çalışmaları	39
4.4 İşletme Koşullarında Deneyler	40
5. SONUÇLAR VE İRDELEME	43
5.1 Laboratuvar İncelemeleri Sonuçları	43
5.1.1 Optik mikroskop incelemeleri	43
5.1.2 Taramalı elektron mikroskobu incelemeleri	45
5.1.3 Optik emisyon spektrometresi analizleri	50
5.2 Veri Analizleri Sonuçları	51
5.2.1 Pota fırınında %P artışı	51
5.2.2 Pota fırınında kükürt giderme miktarı	52
5.2.3 Pota fırınında briket Al ilavesi	52
5.2.4 Pota ara tüp argon basıncı	53
5.2.5 Pota fırını başlangıç %S miktarı	54
5.2.6 Pota fırını alttan karıştırma süresi	54
5.2.7 Pota fırını üstten karıştırma süresi	55
5.2.8 Pota fırını işlem süresi	56
5.2.9 Pota fırını granüle Al ilave miktarı	56
5.2.10 Pota fırını son %Al miktarı	57
5.2.11 Pota fırını kireç ilave miktarı	58
5.2.12 BOF'tan potaya dökümde kireç ilave miktarı	58
5.2.13 Pota fırını son çelik sıcaklığı	59
5.2.14 Cürufta FeO+MnO miktarı	60
5.2.15 Cürufta Al ₂ O ₃ miktarı	60
5.2.16 BOF'tan potaya döküm anında ön deoksidasyon işlemi	61
5.2.17 BOF üfleme sonu %C miktarı	62
5.3 Deney Tasarımı Kapsamında Yapılan Deneylerin Sonuçları	63
5.4 İşletme Koşullarında Yapılan Uzun Süreli Deneylerin Sonuçları	63
6. GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER	65
KAYNAKLAR	69
ÖZGEÇMİŞ	73

KISALTMALAR

%	: Yüzde
Al	: Alüminyum
Ar	: Argon
At	: Atomik
Al₂O₃	: Alümina
BOF	: Bazik Oksijen Fırını
CaO	: Kalsiyum oksit
CO	: Karbon monoksit
CO₂	: Karbon dioksit
C	: Karbon
C°	: Santigrat derece
cm³	: Santimetre küp
DOE	: Design of Experiment
DRI	: Direct Reduced Iron
dk	: Dakika
EAF	: Elektrik Ark Fırını
EDS	: Enerji Dağılımı Spektrometresi
Fe	: Demir
g	: Gram
keV	: Kilo elektron volt
kV	: Kilovolt
LF	: Ladle Furnace
LD	: Linz-Donawitz
LC	: Low Carbon
MnS	: Mangan sülfür
mm	: milimetre
µm	: mikrometre
Nm³	: Normal metre küp
OES	: Optik Emisyon Spektrometresi
O	: Oksijen
P	: Fosfor
ppm	: Parts per million
RH	: Rurhstahl Heraeus
S	: Kükürt
SEN	: Submerged Entry Nozzle
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
SEI	: İkincil Elektron Görüntüsü
Si	: Silisyum
T	: Sıcaklık
USD	: Amerikan doları
VOD	: Vacuum Oxygen Decarburization
VAD	: Vacuum Arc Degassing
W	: Tungsten

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : Bazik oksijen çelik üretim aşamaları ve süreleri.....	7
Çizelge 3.1 : Kalsiyum-aluminat tipleri ve özellikleri.....	31
Çizelge 4.1 : Deney tasarımı faktörleri ve seviyeleri	39
Çizelge 4.2 : Deney seti	40
Çizelge 4.3 : Uzun süreli deneylerdeki uygulama değişiklikleri.....	41
Çizelge 5.1 : OES analiz sonuçları.	51
Çizelge 5.2 : Deney tasarımı deneylerine ait nozul tıkanma adetleri	63
Çizelge 6.1 : Maliyet tablosu	66

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : Çelik üretim akış şeması	1
Şekil 2.1 : Bazık oksijen çelik üretim konvertörü	5
Şekil 2.2 : BOF prosesi adımları	8
Şekil 2.3 : Konvertördeki reaksiyonlar	10
Şekil 2.4 : Üfleme esnasında sıvı ham demir kimyasal kompozisyonundaki değişim..	11
Şekil 2.5 : İkincil metalurji kademeleri	14
Şekil 2.6 : Pota fırını şematik gösterimi	15
Şekil 2.7 : Çelik üretiminde en yaygın kullanılan vakum prosesleri	16
Şekil 2.8 : Sürekli döküm tesisinin şematik gösterimi	17
Şekil 2.9 : Sıvı çeliğin potadan tandişe ve tandiştan kalıba aktarılması.....	18
Şekil 2.10 : Sürekli döküm donanımları	19
Şekil 2.11 : Sürekli döküm makinesi tipleri	24
Şekil 3.1 : Sıvı çeliğin potadan tandişe akışı ve pota iç nozulu.....	25
Şekil 3.2 : Kalsiyum işlemi ile inklüzyonların modifikasyonu	29
Şekil 3.3 : CaO-Al ₂ O ₃ faz diyagramı.....	30
Şekil 4.1 : Struers Discotom-65 kesme cihazı	34
Şekil 4.2 : Nozul içerisinde katılaşmış çelik blok ve numune çıkartılan bölgeler.....	34
Şekil 4.3 : Struers CitoPress-20 sıcak bakelite alma cihazı.....	35
Şekil 4.4 : Struers TegraPol-21 zımparalama ve parlatma cihazı.....	35
Şekil 4.5 : Nikon Epiphot-200 model optik mikroskop.....	36
Şekil 4.6 : JEOL JSM 5600 model tungsten (W) filamanlı taramalı elektron mikroskobu	37
Şekil 4.7 : Thermo Scientific ARL-4460 OES cihazı.....	37
Şekil 5.1 : 1 numaralı bölgeye (kenar) ait mikroyapı fotoğrafları (X100).....	43
Şekil 5.2 : 2 numaralı bölgeye (kenar) ait mikroyapı fotoğrafları (X100).....	44
Şekil 5.3 : 3 numaralı bölgeye (kenar) ait mikroyapı fotoğrafları (X100).....	44
Şekil 5.4 : 4 numaralı bölgeye (merkez) ait mikroyapı fotoğrafları (X100).....	44
Şekil 5.5 : 5 numaralı bölgeye (merkez) ait mikroyapı fotoğrafları (X100).....	45
Şekil 5.6 : Kenar bölgeye ait ikincil elektron görüntüsü (SEI-X100).....	45
Şekil 5.7 : Kenar bölgeye ait ikincil elektron görüntüsü (SEI-X150).....	46
Şekil 5.8 : Kenar bölgeye ait ikincil elektron ve EDS görüntüsü (SEI-X350).....	46
Şekil 5.9 : Kenar bölgeye ait ikincil elektron ve EDS görüntüsü (SEI-X500).....	47
Şekil 5.10 : Kenar bölgeye ait ikincil elektron ve EDS görüntüsü (SEI-X1000).....	48
Şekil 5.11 : Kenar bölgeye ait ikincil elektron ve EDS görüntüsü (SEI-X900).....	49
Şekil 5.12 : Kenar bölgeye ait ikincil elektron ve EDS görüntüsü (SEI-X1500).....	50
Şekil 5.13 : Pota fırınında P artışının nozul tıkanması üzerindeki etkisi.....	51
Şekil 5.14 : Pota fırınında kükürt giderme nozul tıkanması üzerindeki etkisi.....	52
Şekil 5.15 : Pota fırınında briket Al ilavesinin nozul tıkanması üzerindeki etkisi.....	53
Şekil 5.16 : Pota ara tüp Ar basıncı ile nozul tıkanma oranı arasındaki ilişki.....	53
Şekil 5.17 : Pota fırını ilk %S miktarı ile nozul tıkanma oranı arasındaki ilişki.....	54
Şekil 5.18 : Pota fırını alttan karıştırma süresinin nozul tıkanması üzerinde etkisi.....	55
Şekil 5.19 : Pota fırını üstten karıştırma süresinin nozul tıkanması üzerinde etkisi.....	55

Şekil 5.20 :	Pota fırını işlem süresi ile nozul tıkanma oranı arasındaki ilişki.....	56
Şekil 5.21 :	Pota fırını granüle Al ilavesi ile nozul tıkanma oranı arasındaki ilişki.....	57
Şekil 5.22 :	Pota fırını son Al miktarı ile nozul tıkanma oranı arasındaki ilişki.....	57
Şekil 5.23 :	Pota fırınında kireç ilavesi ile nozul tıkanma oranı arasındaki ilişki.....	58
Şekil 5.24 :	Dökümde kireç ilavesi ile nozul tıkanma oranı arasındaki ilişki.....	59
Şekil 5.25 :	Pota fırını işlem sonu çelik sıcaklığı ile nozul tıkanma oranı arasındaki..	59
Şekil 5.26 :	Cürufta $\%(\text{FeO}+\text{MnO})$ miktarı ile nozul tıkanma oranı arasındaki ilişki.	60
Şekil 5.27 :	Cürufta $\%\text{Al}_2\text{O}_3$ miktarı ile nozul tıkanma oranı arasındaki ilişki.....	61
Şekil 5.28 :	Ön deoksidasyon ile nozul tıkanması arasındaki ilişki.....	62
Şekil 5.29 :	Üfleme sonu $\%\text{C}$ ile nozul tıkanması arasındaki ilişki.....	62
Şekil 5.30 :	Çalışma öncesi ve sonrası nozul tıkanma oranları.....	64

SÜREKLİ DÖKÜM PROSESİNDE POTA NOZULU TIKANMA PROBLEMİNİN ANALİZİ VE AZALTILMASI

ÖZET

Günümüzde, kişi başına düşen çelik kullanımı ülkelerin gelişmişlik düzeylerinin bir göstergesi olarak kabul edilmektedir. Çeliğin kullanıldığı ilk günden bugüne kadar geçen sürede her dönem çeliğe olan ihtiyaç ve talep artış göstermiştir. Bu durumun doğal bir sonucu olarak insanoğlu çeliğin yüksek miktarlarda üretimine odaklanmış ve 60'lı yıllardan itibaren büyük bir gelişim gösteren sürekli döküm prosesi yüksek üretim hızlarına ulaşılabilmesi adına günümüzde çelik üretim prosesinin vazgeçilmez bir parçası olmuştur.

Sürekli döküm prosesi, sıvı çeliğin potalar vasıtasıyla sürekli döküm taretine yerleştirilmesi ve potadan tandişe pota ara tüp vasıtasıyla, tandiştan kalıba daldırma nozulu vasıtasıyla kontrollü bir şekilde akışını sağlamak suretiyle belirli bir salınım hareketiyle (sinüzoidal ve/veya non-sinüzoidal olarak) hava ve suyla (air-mist) soğutularak sıvı formdan katı forma (slab, kütük vb.) dönüştürülmesi işlemlerini kapsamaktadır.

Sürekli döküm prosesinde sıvı çeliğin potadan tandişe aktarılması esnasında, pota iç nozulunda zaman zaman tıkanma problemi yaşanabilmektedir. Tıkanma esnasında nozul çapı daralmakta, çelik akışı yavaşlamakta ve en nihayetinde çelik akışı tamamen kesilmektedir. Bu durum özellikle alüminyum ile deokside edilmiş düşük karbonlu (0,03 – 0,07 %C) çeliklerde yüksek oranda görülmektedir.

Sürekli döküm prosesinde pota nozulunun tıkanması kaynaklı akış kesilmesi, proses verimini ve çelik kalitesini etkileyen önemli bir problemdir. Pota nozulu tıkanmasına neden olan başlıca faktörler, çelik sıcaklığı, dizayn parametreleri (tesis, pota, nozul vb.) ve çelik temizliğidir.

Bu çalışmada, çelik temizliği kaynaklı pota iç nozulu tıkanma probleminin kaynağının belirlenmesi ve problemin azaltılmasına yönelik yapılan incelemeler ve uygulamalar yer almaktadır.

Çalışma Türkiye'deki bir demir-çelik tesisinde alüminyum ile deokside edilmiş düşük karbonlu çelikler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Bahsi geçen çelik grubu sürekli döküm prosesinde en sık nozul tıkanma problemi ile karşılaşılın çelik grubu olup, problemin kök nedenini tespit etmeye ve problemin azaltılmasına yönelik incelemeler ve deneyler yapılmıştır. Bu kapsamda, düşük karbonlu çelikler grubunda nozul tıkanması meydana gelen durumlar analiz edilmiştir. Pota iç nozullarında katılaşılan çelikten numuneler alınmış ve alınan numuneler üzerinde kimyasal analizler ile optik mikroskop incelemeleri ve elektron mikroskobu incelemeleri yapılmıştır. Laboratuvar incelemelerinde özellikle nozul duvarına yakın bölgelerde çelik iç yapısında yoğunlukla metalik olmayan Al_2O_3 tipindeki inklüzyonlar tespit edilmiştir.

Ayrıca bu çalışmada aşağıda belirtilen çelik üretim prosesi parametrelerinin çelik temizliğine olan etkilerinin incelenmesi amacıyla Minitab 17 istatistiksel veri analizi yazılımı vasıtası ile ikili regresyon analizleri gerçekleştirilmiştir.

- Pota fırınında %P artışı
- Pota fırınında kükürt giderme miktarı
- Pota fırınında briket Al ilavesi
- Pota ara tüp argon basıncı
- Pota fırını başlangıç %S miktarı
- Pota fırını alttan karıştırma süresi
- Pota fırını üstten karıştırma süresi
- Pota fırını işlem süresi
- Pota fırını granüle Al ilave miktarı
- Pota fırını son %Al miktarı
- Pota fırını kireç ilave miktarı
- BOF'tan potaya dökümde kireç ilave miktarı
- Pota fırını son çelik sıcaklığı
- Cürufta FeO+MnO miktarı
- Cürufta Al₂O₃ miktarı
- BOF'tan potaya döküm anında ön deoksidasyon işlemi
- BOF üfleme sonu %C miktarı

Belirlenen parametrelerden işletme koşullarında kontrol edilebilir olanlar ile deney tasarımı çalışması yapılarak bir deney seti oluşturulmuş ve bu kapsamda işletme koşullarında 80 adet deney gerçekleştirilmiştir. Laboratuvar incelemeleri, veri analizleri ve deney tasarımı çalışmaları sonucunda çelik temizliğini arttıracak en ideal koşullar belirlenmiştir.

Pota fırınında cüruf deoksidasyonu yapılması, çelikte nihai %Al içeriğinin düşük tutulması, pota fırınında işlem süresinin uzun olması ve pota fırınında S giderme oranının düşük olması gibi çelik temizliğine olumlu etkileri olan parametreler uygulamaya koyularak işletme koşullarında 2100 adet döküm takip edilmiştir. Çalışma öncesinde düşük karbonlu çelikler grubunda %6,4 olan nozul tıkanma oranı , bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen çelik temizliğini arttırmaya yönelik uygulama ve analiz değişiklikleri ile %2,5 oranına gerileyerek %60 oranında iyileşme sağlandığı belirlenmiştir.

REDUCING OF LADLE NOZZLE CLOGGING PROBLEM IN CONTINUOUS CASTING PROCESS

SUMMARY

Methods for manufacturing steel have evolved significantly since industrial production began in the late 19th century. Modern methods, however, are still based the same premise as the Bessemer Process, namely, how to most efficiently use oxygen to lower the carbon content in iron.

Today, steel production makes use of both recycled materials, as well as the traditional raw materials, such as iron ore, coal, and limestone. Two processes; basic oxygen steelmaking (BOF) and electric arc furnaces (EAF) account for virtually all steel production.

Continuous casting is the important linking process between steelmaking and rolling. As early as 1856, Henry Bessemer suggested a continuous casting method but just during the 1930s and 1940s continuous casting became a common production method for nonferrous metals and later from the 1960s for steels. The relatively low thermal conductivity of steel and the high casting temperatures meant that many problems had to be solved compared to nonferrous casting. In the mid-1980s, continuous casting grew into the biggest casting method, exceeding the conventional ingot steel casting route. In the ingot casting route, individual molds are filled with molten steel to produce steel ingots. The continuous casting method has a lot of benefits compared to the older ingot casting methods. The major advantages are improvement of steel quality, better yield, and savings of energy and manpower. Today, about 95% of the world's steel production is made by continuous casting and a great number of steel qualities are cast in very wide variety of dimensions.

The continuous casting process has a simple principle. The liquid steel in a ladle is transferred to the casting machine. When the casting operation starts, the nozzle at the bottom of the ladle is opened and the steel flows at a controlled rate into the tundish and from the tundish through a submerged entry nozzle (SEN) into one mold or several molds. The molds are generally water-cooled copper molds. The first solidification takes place at the metal/mold interface. The thickness of the solidified shell increases progressively when it is withdrawn through the machine. At the mold exit, the shell must be thick enough to support the liquid pool. Below the mold, the shell is cooled by spraying water. The mold cooling is called the primary cooling and the spray cooling the secondary cooling. At the machine end, the strand is cut off and transferred to a rolling mill.

During steel pouring at continuous casting process the buildup of solid or semi-solid material on a refractory surface can cause nozzle clogging problem, as it effects the stream and reduce the flow rate. Thus nozzle clogging can give rise to both quality and productivity problems.

Nozzle clogging is a crucial problem effecting process efficiency and steel quality. Main factors causing nozzle clogging are steel temperature, design parameters and steel cleanliness.

The presence of solidified steel is clearly a problem of heat transfer. Buildups where the majority of the clog is solidified steel should be referred to as thermal clogs. Buildups due to the precipitation and/or agglomeration of solids on refractories at steelmaking temperatures should be referred to as inclusional clogs. The combination of thermal and inclusional clogging, is also possible, and many clogs contain solidified metal. The most commonly observed clogging material is alumina due to the high percentage of steel that is solely aluminium killed. Especially, low carbon (LC) steel grades are prone to nozzle clogging because of higher oxygen potential

In this study, ladle nozzle clogging problem in aluminium killed low carbon steel (0,03 – 0,07 %C) grades was investigated from the point of steel cleanliness.

In order to determine the main causes of nozzle clogging, laboratory investigations were performed on ladle nozzle deposit. In this scope, various samples were taken from different regions of solid steel block and optical microscopy, SEM-EDS and optical emission spectrometry analysis were implemented. During examinations, it was seen that too much inclusions in regions close to nozzle wall and inclusions were characterised with the SEM-EDS and OES analysis. According to results, there were generally Al_2O_3 type inclusions at nozzle deposits and it was understood that nozzle clogging was related with steel cleanliness.

Steelmaking process conditions and operational parameters effect the steel cleanliness. To specify the efficient parameters, binary logistic regression analyses were executed for low carbon steel grades. The following factors were analysed with Minitab 17 statistical software and correlation with nozzle clogging were determined for each one.

- P% pick up at LF
- Desulphurisation ratio at LF
- Addition of Al at LF
- Ladle shroud Ar pressure
- LF first S% content
- Bottom stirring time at LF
- Top stirring time at LF
- Total process time at LF
- Granule Al addition amount at LF
- LF last %Al content
- Amount of lime addition at LF
- Amount of lime addition during tapping
- Final steel temperature at LF
- $\text{FeO}\% + \text{MnO}\%$ content at LF slag
- $\text{Al}_2\text{O}_3\%$ content at LF slag
- Pre-deoxidation with coke during tapping
- BOF end blow C% content

The manageable process parameters were selected, which were LF last %Al content, Granule Al addition amount at LF and Ladle shroud Ar pressure to create a test set for design of experimental (DOE) method. In this scope, 80 experimental works were planned and performed at steelmaking process.

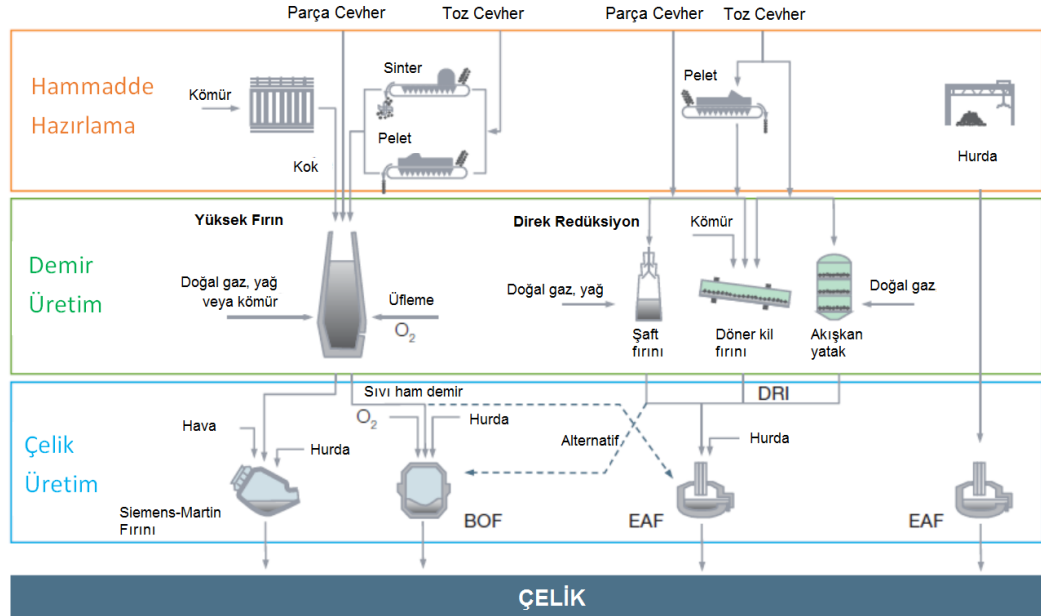
According to the laboratory investigations, data analyses and DOE results, optimum process parameters were determined. With the changes of some operational practice and chemical specification long term trials were implemented and it was seen that clogging problem was decreased in 60% ratio.

Consequently, nozzle clogging problem can be reduced significantly for aluminium killed low carbon steel grades with the steel cleanliness increasing practices which are summarized below.

- Aluminium content should be minimized in steel
- End blow C% content should be maximized for low soluble oxygen
- Maximum S% level should be increased
- Pre-deoxidation should be applied during tapping
- Slag deoxidation should be applied
- Ladle shroud Ar pressure should be minimum 0,04 bar
- Desulphurization should not be applied at LF
- Deoxidation should be completed at tapping
- LF first S% content should be minimum
- Bottom stirring time should be as long as possible
- Top stirring time should be as short as possible
- LF total process time should be long
- Required lime addition should be supplement during tapping
- FeO% + MnO% content at slag should be minimum
- Al₂O₃% content at slag should be optimized for inclusion removal

1. GİRİŞ

Gelişmekte olan ülkeler ve ekonomiler için çelik sektörü büyük önem arz etmektedir. Çeliğin birçok alanda yaygın şekilde kullanılması yüksek miktarlarda üretimini de beraberinde getirmiştir. Bu açıdan çelik üretim yöntemleri çok büyük önem taşımaktadır. Çelik üretiminde birçok farklı yöntem bulunmaktadır ve her yöntemin de değişik yapıları ve bileşenleri bulunmaktadır. Şekil 1.1’de ham çelik üretiminde kullanılan farklı yöntemlere ait akış şeması verilmiştir. Bu yöntemlerden en yaygın olanı BOF prosesi ile ham çelik üretimi ve sürekli döküm prosesi ile katılaşırma prosesisidir.



Şekil 1.1 : Çelik üretim akış şeması.

Dünya genelinde sürekli döküm yöntemi ile üretilen çeliğin oranı %90 seviyelerine kadar yükselmiştir. Sıvı metalin ton başına hadde ürünü verimi, sürekli döküm teknolojisi ile sağlanan malzeme ve enerji tasarrufu ile birlikte %10 oranında artmıştır. Günümüzde çelik üretiminde verimlilik %95 seviyelerine çıkmıştır.

Ayrıca sürekli döküm yöntemi ile üretilen ürünlerde ingot döküme kıyasla daha temiz ürün alınabilmektedir. Yüksek katılaşma hızı nedeni ile bir miktar segregasyon

oluşmasına karşın homojen bir yapı sağlanmaktadır. Bunun yanında sürekli döküm yöntemi, otomasyon için geniş bir imkân alanı, ileri kontrol edilebilirlik ve istikrarlı üretim prosesi sağlamaktadır.

Sürekli döküm ile yakalanan yüksek üretim hızları ve yüksek kalitelerin yanında proseste yaşanan bir takım problemler de bulunmaktadır. Metalurjik açıdan yaklaşıldığından bu problemlerin belki de en önemlisi çelik kalitesini ve üretim performansını çok olumsuz etkileyen nozul tıkanması problemidir.

Alüminyum ile deokside edilmiş çeliklerin sürekli dökümünde meydana gelen nozul tıkanması problemi dünyada çoğu çelik üreticisinin karşılaştığı ve uzun yıllardır çözülmesine yönelik çalışmaların yapıldığı bir problemidir. Problemin çözümüne yönelik en yaygın uygulama kalsiyum işlemidir. Fakat yoğun üretim temposu, maliyet ve çelik kalite özellikleri nedeniyle kalsiyum işleminin tüm üretime uygulanması mümkün olmamaktadır.

Sürekli döküm prosesinde tandiştan kalıba çeliğin akışı esnasında meydana gelen nozul tıkanması ile ilgili çok fazla çalışma olmasına rağmen, pota iç nozulu tıkanması kaynaklı akış kesilmesi ile ilgili sınırlı sayıda araştırma bulunmaktadır [1,2]. Bunun yanında yapılan araştırmalar her iki nozul tıkanması türünün de aynı mekanizmaya bağlı olarak gerçekleştiğini göstermektedir.

Sürekli döküm prosesinde gözlenen nozul tıkanma problemine etki eden parametreler genel olarak çelik sıcaklığı, çelik temizliği ve kullanılan ekipmanların tasarımı ile ilgili konulardır [3].

Özellikle alüminyum ile deokside edilmiş düşük karbonlu çeliklerde, sıvı çeliğin potadan tandişe akışı esnasında pota iç nozulu tıkanarak sıvı çeliğin akışı kesilmektedir [4]. Çelik akışının kesilmesi durumunda potaya oksijen vurularak akış sağlanmaya çalışılmaktadır [5]. Sıvı çelik akışının oksijen ile sağlanamaması durumunda, pota tekrar işlem görmek üzere ikincil metalurji istasyonuna geri iade edilmektedir. İade edilen sıvı çelik tonajının belirli bir seviyenin altında olması durumunda ise potada kalan çelik hurda yapılmaktadır.

Sürekli dökümde pota nozul tıkanması problemine bağlı olarak verim ve üretim kaybı ortaya çıkmaktadır. Ayrıca, sürekli döküm esnasında pota akış kesilme riskinin görülmesi durumunda döküm hızı yavaşlatılarak döküm tamamlanmaktadır. Bu durum da işlem süresinin artmasına ve üretim kaybına neden olmaktadır [6]. Problemin

özümüne yönelik en yaygın uygulama kalsiyum işleml olmasına rağmen maliyetler ve yoğun üretim temposu nedeniyle özellikle ticari çelik gruplarına kalsiyum işlemi uygulanamamaktadır.

Bu çalışmada Al ile deokside edilmiş düşük karbonlu çeliklerde meydana gelen nozul tıkanması problemine metalurjik açıdan yaklaşarak çelik temizliğinin problem üzerindeki etkileri incelenmiş ve kalsiyum işlemi uygulanmayan çeliklerde çelik temizliğini arttırıcı uygulamalar ile nozul tıkanma probleminin azaltılması amaçlanmıştır.

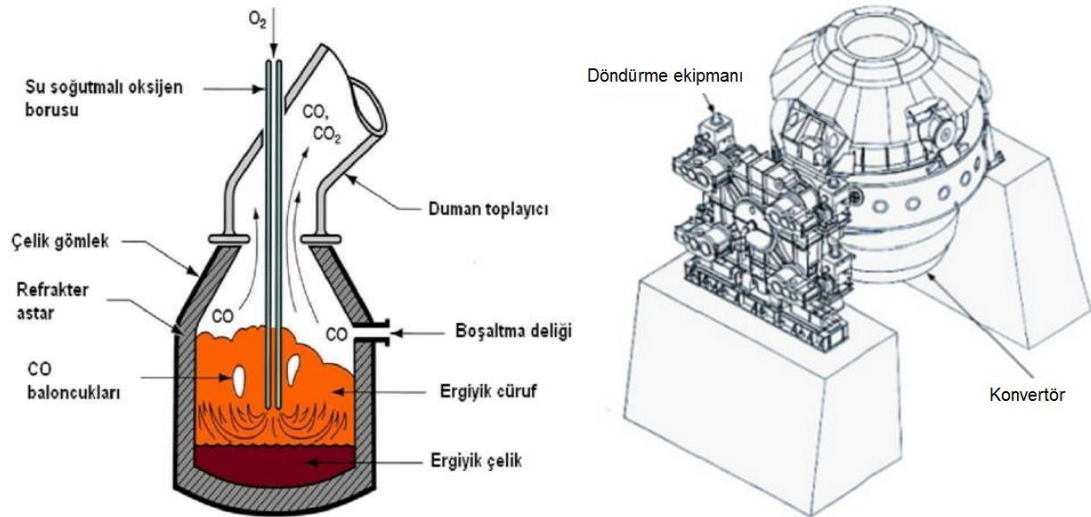
Çalışmada, nozul tıkanması meydana gelen potalardan katılaşmış çelik bloklar çıkartılarak numuneler alınmıştır. Laboratuvar incelemeleri kapsamında çelik blokların farklı bölgelerinden uygun boyutlarda numuneler alınarak OES, optik mikroskop ve SEM-EDS analizleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, Minitab 17 istatistiksel modelleme yazılımı ile nozul tıkanma probleminin en sık görüldüğü düşük karbonlu çeliklere ait proses verileri üzerinde ikili regresyon analizleri gerçekleştirilmiş ve nozul tıkanma problemi üzerindeki etkileri belirlenmiştir. Bu parametreler içerisinde işletme koşullarında kontrol edilebilir olanlar; granüle alüminyum ilavesi, çelik sıcaklığı, pota fırını işlem sonu Al miktarı, pota ara tüp argon basıncı olarak belirlenmiş ve bu faktörler ile deney tasarımı çalışması yapılarak bir deney seti oluşturulmuştur. Oluşturulan deney seti kapsamında 80 adet deney yapılarak bu parametrelerin optimum değerleri belirlenmeye çalışılmıştır.

Laboratuvar çalışmaları, veri analizleri ve deney tasarımı çalışmaları sonucunda elde edilen veriler ışığında en ideal analiz ve uygulama pratikleri tasarlanmış ve bu kapsamda işletme koşullarında uzun süren deneyler gerçekleştirilerek nozul tıkanma oranlarındaki değişim analiz edilmiştir.

2. BAZİK OKSİJEN ÇELİK ÜRETİMİ

Oksijenin ticari olarak, büyük miktarlarda düşük fiyatla üretilmesinden sonra, çelik üretiminde hava yerine oksijenin kullanılması mümkün olmuş ve çeşitli çelik üretim yöntemleri ticari uygulamaya girmiştir. Bazik oksijen yöntemi ilk defa 1952-1953 yıllarında Avusturya'nın Linz ve Donawitz işletmelerinde kullanılmaya başlanmıştır. Bu nedenle bu yöntem Linz-Donawitz veya kısaca LD yöntemi olarak adlandırılmaktadır.

LD yönteminde, Bessemer yöntemine benzeyen sabit tabanlı bir konvertörün ağız kısmından içeri giren refrakter bir lans vasıtası ile sıcak metale yüksek safiyette oksijen üflenerek başta karbon olmak üzere silisyum, fosfor, mangan gibi istenmeyen elementlerin oksitlenerek istenilen seviyeye hızlı bir şekilde düşürülmesi ile çelik üretilmektedir. Rafinasyon işlemlerinin gerçekleştirildiği konvertörler eğilebilir ve refrakter astar ile kaplıdır. Konvertör kapasiteleri 50 ila 400 ton arasındadır. Şekil 2.1'de şematik olarak bazik oksijen fırını gösterilmiştir [7].



Şekil 2.1 : Bazik oksijen çelik üretim konvertörü [8].

Bazik oksijen çelik yapımı ile ilgili gelişmelerin ardından Thomas ve Bessemer yöntemlerini korumak amacıyla oksijen üfleme işleminin konvertör altından yapmaya yönelik çalışmalar olmuştur. Fakat oksijen kaynaklı reaksiyonların çok güçlü olması konvertör tabanındaki refrakterlerin hızlı aşınması problemini doğurmuştur. Bu

sebeple günümüzde yaygın olduğu gibi oksijenin su soğutmalı bir lans vasıtası ile üstten üflenmesi fikri gelişmiştir. Bununla birlikte alttan üflemenin avantajlarının fazla olması nedeniyle bu konudaki çalışmalar uzun süre devam etmiş ve 60'lı yılların son döneminde oksijenin alt nozullardan koruyucu gazlar vasıtası ile konvertör tabanından üflendiği bir alttan üfleme yöntemi geliştirilmiştir.

Bazık oksijen konvertörü ile çelik üretimi çeşitli üstünlük ve kolaylıkları nedeni ile büyük bir uygulama alanı bulmuştur. Kütle çelik üretiminde tekno-ekonomik açıdan rakipsizdir. LD yöntemindeki hızlı gelişmelere bağlı olarak bugün dünya çelik üretiminin yarısından fazlası bu konvertörlerde yapılmaktadır [7,9].

2.1 Sıcak Metal Ön İşlemi

Yüksek fırınlarda üretilen sıvı ham demir konvertöre sevk edilmeden önce kükürt, fosfor ve silis gibi istenmeyen elementlerin uzaklaştırılması amacıyla ön işleme tabi tutulur. Sıvı metal ön işlemleri ile kükürt giderme, fosfor giderme ve silis giderme işlemlerinin tamamı Japonya'da yaygın olarak uygulanırken, Avrupa'da konvertör prosesi öncesi sadece kükürt giderme işlemi uygulanmaktadır.

Kükürt giderme işlemi yüksek fırınlardan sıvı ham demirin nakledildiği torpidolarda veya transfer potasında gerçekleştirilir. Kükürt oranını düşürmek amacıyla kalsiyum karbür veya magnezyum karbür gibi ilaveler kullanılmaktadır. Kükürt giderme elementleri bir lans vasıtası ve itici güç oluşturacak azot yardımıyla sıcak metal içerisine üflenmektedir. Cüruf içerisinde bağlanan kükürt yoğunluk farkından yararlanarak sıcak metal üst kısmına doğru yüzerek uzaklaşmaktadır. Kükürt giderme işleminin ardından yüzeyde oluşan cüruf uzaklaştırılarak sıcak metal konvertöre transfer edilmektedir [10].

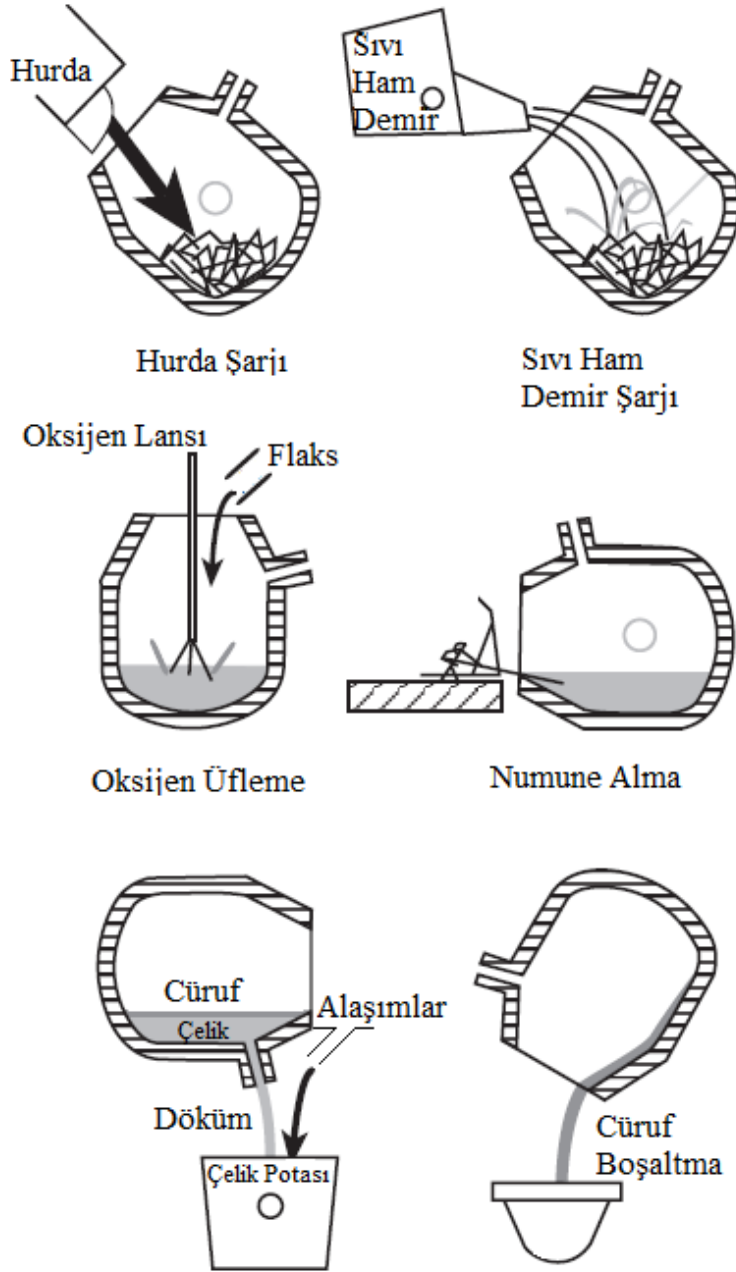
2.2 Bazık Oksijen Fırını Prosesi

Oksijen ile çelik üretimi, "Bazık Oksijen Fırını (BOF)" adı verilen içi refrakter tuğla ile örülü dışı çelik gömlek olan kapalı bir sistemde gerçekleştirilmektedir. Reaksiyonlar hurda ve sıvı ham demir şarjından sonra bir lans vasıtasıyla yüksek safiyette oksijen üflenmesi ile başlamaktadır. Bazık oksijen fırını prosesinde amaç karbon miktarını istenilen seviyeye indirmek ve diğer oksitlenebilir elementleri çelikten uzaklaştırmaktır [11].

Prosesin ilk adımında, bazik oksijen konvertöründe (BOF) gerçekleşecek oksidasyon reaksiyonları sonucu ortaya çıkacak ısıyı dengelemek amacıyla soğutucu olarak hurda ilavesi yapılmaktadır. Ardından sıcak maden potaları içerisindeki sıvı pik demir konvertöre şarj edilmektedir. Daha sonra su soğutmalı oksijen lansı konvertörün içerisine girerek üfleme işlemi başlamaktadır. Üflemenin ilk dakikalarında gerekli cüruf yapıcılar ilave edilmektedir. Oksijen üfleme işlemi 13 ila 25 dakika arasında sürmektedir. Üfleme sonrası konvertör içerisindeki sıvı çelikten sıcaklık ve oksijen değeri ölçülmesi amacıyla numune alınmaktadır. Daha sonra konvertör döndürülerek içerisindeki sıvı çelik ikincil metelurji tesislerine gönderilmek üzere sıvı çelik potalarına dökülmektedir. Döküm esnasında potaya gerekli alaşım ilaveleri yapılmaktadır. En son olarak konvertör ters döndürülerek içerisinde kalan cüruf, cüruf potalarına aktarılmaktadır. Çelik üretim sürecinin aşamaları ve süreleri çizelge 2.1’de, prosesin temel adımları ise şematik olarak şekil 2.2’de verilmiştir [9].

Çizelge 2.1 : Bazik oksijen çelik üretim aşamaları ve süreleri.

İşlem	Süre (dk)
Sıcak metal ve hurda şarjı	5-10
Rafinasyon-oksijen üfleme	13-25
Numune-Kimyasal Analiz	4-15
Döküm	4-8
Cüruf Boşaltma	3-9



Şekil 2.2 : BOF prosesi adımları [9].

Günümüz koşullarında daha yüksek kalitede çeliklere duyulan ihtiyaç artmaktadır. Bu durum da daha düşük seviyede empüritelere sahip çelik üretimine olan gereksinimi arttırmaktadır. Sıcak metal ön işlemi, BOF prosesi öncesi yüksek fırınlardan gelen sıcak metale uygulanan silisyum giderme, fosfor giderme ve kükürt giderme işlemlerini kapsamaktadır.

2.2.1 Şarj alma

Konvertör prosesinde hurda ve sıvı ham demir şarjı termodinamik altyapısı ile çalışan modeller ile belirlenmektedir. Model, birincil şarj hesabı ve ikincil şarj hesabı olmak üzere iki aşamalı hesaplama gerçekleştirmektedir.

İlk aşamada, konvertöre ilave edilecek sıvı ham demir ve hurda miktarı belirlenmektedir. Bu hesabın yapılmasında model tarafından sıvı ham demir sıcaklığı, sıvı ham demir kimyasal kompozisyonu, hedeflenen çelik kimyasal kompozisyonu ve hedef çelik sıcaklığı verileri kullanılmaktadır. İkinci aşama hesabında ise hedeflenen kimyasal analize ve sıcaklığa ulaşmak için ihtiyaç duyulan cüruf yapıcı malzemelerin, ısıtıcı (FeSi) veya soğutucu (FeO, dolomitik kireç taşı) ilavelerinin ve üflenmesi gereken oksijen miktarının hesaplaması gerçekleştirilir [11].

Yapılan hesaplamaların ardından önce konvertör tabanına belirlenen miktar kadar hurda şarjı yapılmaktadır. Ardından yaklaşık 1350°C sıcaklıktaki sıvı ham demir ve cüruf yapıcı flakslar ilave edilerek oksijen üfleme işlemi gerçekleştirilmektedir.

2.2.2 Oksijen üfleme

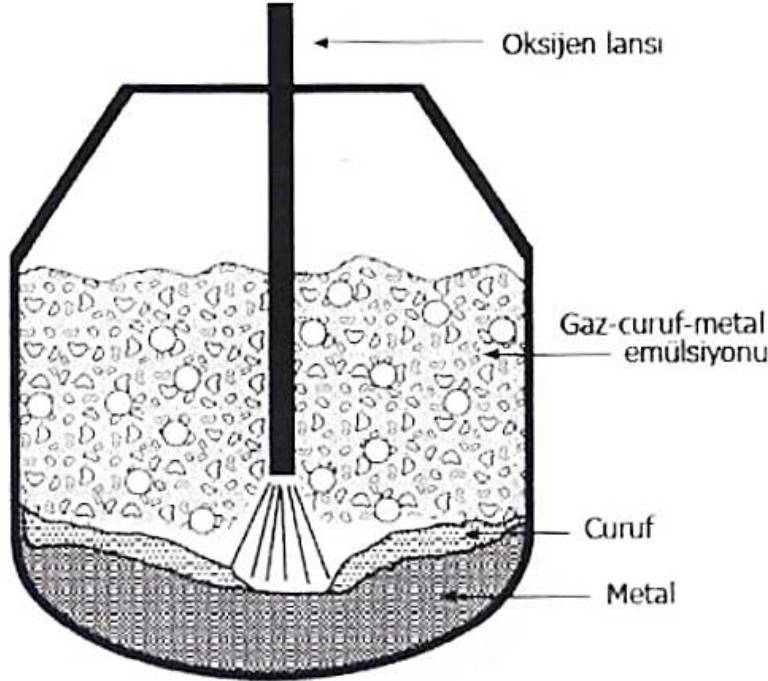
Tipik oksijen üfleme zamanları bir tesisten diğerine değişiklik göstermekte olup genellikle 13 ila 25 dakika arasında sürmektedir. Oksijen üfleme birkaç aşamada gerçekleştirilir. Her aşama, çelik banyo üzerindeki değişik lans yükseklikleriyle karakterize edilmektedir ve her aşamada üflenene oksijen debisi de değişebilmektedir. Üfleme debisi, oksijenin basınç ve kalitesine bağlı olarak tesisten tesise farklılık göstermektedir ve bu debi genel itibarıyla dakikada 560 ila 1000Nm³ aralığında değişmektedir. Pratikte; fırın hacmi, gaz halindeki reaksiyon ürünleri ve tozu manipüle eden gaz toplama sisteminin kapasitesi üflenecek oksijen debisini belirleyen faktörlerdir.

Oksijen ile çelik üreten modern tesislerde, eriyik banyo üzerine çok yüksek hızlarda oksijen enjekte etmek için su soğutmalı lans kullanılmaktadır. Daha düşük empürite değerleriyle daha yüksek kaliteli çeliklere olan talebin artmasıyla birlikte çok yüksek safiyette oksijen temin edilmesi zorunlu hale gelmiştir. Bu nedenle çelik üretimi için oksijenin minimum %99,5 saflıkta, ideal olarak ise %99,7'nin üzerinde saflıkta olması gerekmektedir. Geriye kalan kısımda da azot ve argon gazları bulunmaktadır.

Oksijen üflemleri konvertörlerde, oksijen su soğutmalı lansı ucundaki nozullarla ses üstü hızlarla püskürtülmektedir. Çeliği rafine etmek üzere, güçlü bir gaz jeti cürufu deler ve metal yüzeyine şiddetle çarpar. Günümüzde birçok BOF tesisi 4 veya 5 nozul ihtiva eden lans başlığıyla ve oksijen üfleme debisi 640 ila 900Nm³/dk arasında değişen pratikle çalışmaktadır [7,9].

2.2.3 BOF'taki rafinasyon reaksiyonları

Üfleme sırasındaki oksidasyon reaksiyonları, flaks ve hurdayı eritmek ve sıvı çelik sıcaklığının istenilen sıcaklığa ulaşması için gerekli enerjiyi sağlamaktadır. Metal banyoya oksijen enjekte edildiğinde, oksijen jetinin darbesiyle banyo yüzeyinden koparılan metal damlacıkları ve sıvı cürufu bir emülsiyon oluşturan yüksek miktarda gaz çıkışı olmaktadır.



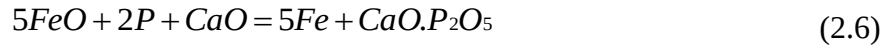
Şekil 2.3 : Konvertördeki reaksiyonlar [9].

Oksijenin sıvı ham demire ilk temasında, termodinamik olarak öncelikli olmamasına rağmen, ortamda demir elementinin miktarının fazla olmasından dolayı denklem 2.1'e göre öncelikle demir – oksijen reaksiyonu gerçekleşmektedir ve FeO oluşmaktadır.

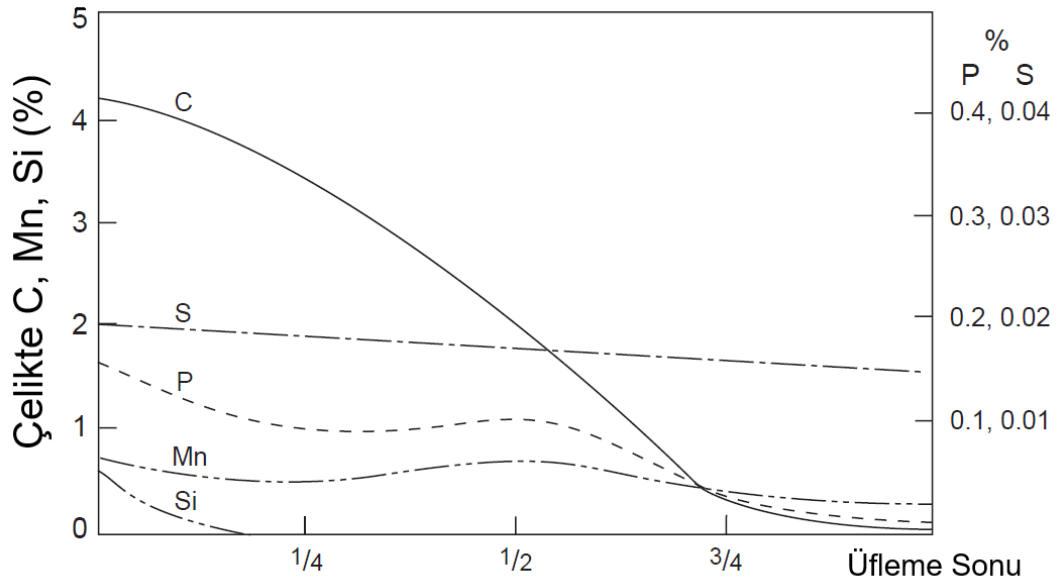


FeO sıvı metalde bulunan ve ortamdan alınarak baca gazına ya da cürufa gönderilmesi istenen elemanlarla reaksiyona girerek redüklenmektedir. Sıvı metaldeki istenmeyen

empüriteler ise oksitlenerek uzaklaşmaktadır. Pik demirden çelik elde edilirken konvertör prosesinde sırasıyla aşağıdaki reaksiyonlar meydana gelerek rafinasyon işlemi gerçekleşmektedir [9,12].



Konvertörde Si, Mn, P ve C elementleri ekzotermik reaksiyonlar ile oksitlenmektedir. Reaksiyonlar nedeni ile açığa çıkan ısının konvertör refrakterinde hasar oluşturmaması ve ısıl dengeyi sağlamak amacıyla daha önce belirtildiği şekilde çelik hurdası ilavesi yapılmaktadır. Şekil 2.4'te üfleminin farklı aşamalarında sıvı ham demir kimyasal kompozisyonunda meydana gelen değişim gösterilmiştir.



Şekil 2.4 : Üfleme esnasında sıvı ham demir kimyasal kompozisyonundaki değişim [9,12].

2.2.4 Konvertörden potaya döküm

Oksijen üfleme işleminin sonunda sıcaklık ve kimyasal kompozisyon gereksinimlerin karşılanması ile birlikte konvertör döküm deliği tarafına çevrilerek içerisindeki sıvı çeliğin bir pota içerisine dökümü gerçekleştirilmektedir. Bu işlem sırasında konvertör cürufunun potaya kaçmasını önlemek amacı ile çeşitli donanımlar kullanılmaktadır.

Konvertör cürufundaki demir oksit ve fosfor içeriğinden dolayı ileriki rafinasyon işlemlerinde çeliğin reoksidasyona maruz kalmaması ve daha temiz çelik üretimi sağlanabilmesi açısından potaya kaçan cürufun en az seviyede olması hedeflenmektedir. Aksi halde yüksek demir oksit içeriğine sahip cüruf nedeni ile ikincil metalurji işlemlerinde kükürt giderme verimi olumsuz etkilenecek ve aynı zamanda çelikte istenmeyen alümina inklüzyonlarının oluşumuna zemin hazırlanacaktır.

Konvertörden potaya döküm esnasında alaşımların birçoğu potaya ilave edilmektedir. Bunun yanında nikel, molibden, bakır gibi büyük miktarlardaki oksitlenmeyen alaşımlar, üfleme esnasında oksidasyona direnebildiklerinden dolayı genel olarak hurda ile birlikte konvertöre ilave edilmektedir. Bu sayede potada yaşanabilecek ısı kayıpları engellenmektedir.

Konvertörde üfleme işleminin ardından sıvı çelikte 500 ila 1000 ppm arasında değişen değerlerde çözünmüş oksijen bulunmaktadır. Bu nedenle deoksidasyon amacıyla döküm esnasında alüminyum gibi deoksidant ilaveleri yapılarak oksijen içeriği istenilen değerlere indirilmektedir. Bu değer tam deokside edilmiş çelikler için 5 ppm'in altıdır.

Ayrıca döküm esnasında çeşitli cüruf yapıcı ilaveleri yapılmaktadır. Buradaki amaç sıvı çelik yüzeyinde çeliği termal olarak izole edebilen, çeliği oksitlenmekten koruyabilen, çeliği desülfürize edebilen ve çelikten inklüzyonları temizleyebilecek kapasiteye sahip koruyucu bir cüruf oluşturmaktır.

2.3 İkincil Metalurji İşlemleri

Konvertör prosesinden sonra potaya alınan sıvı çelik, ikincil metalurji tesisinde pota fırını işlemlerinden geçmektedir. Pota metalurjisinde temel amaç çelik sıcaklığının ve kimyasal kompozisyonunun döküm aşamasından önce istenilen değerlere getirilmesi ve çelik temizliğinin sağlanmasıdır. İkincil metalurji işlemleri ısıtmalı ya da ısıtmasız

yapılabildiği gibi, özel çelik kaliteleri için atmosferik koşullar yerine vakum altında gaz giderme ünitesinde de gerçekleştirilebilmektedir.

Çelik içerisinde kükürt, fosfor, oksijen, hidrojen ve azot gibi istenmeyen empüriteler yer almaktadır. Bunlar demir kafesi içinde ara yer atomları olarak yer almaktadırlar. Bu empüritelerin çelik üzerinde süneklik, darbe dayanımı ve korozyon direncini düşürmek gibi olumsuz etkileri bulunmaktadır. Oksijen ve kükürt ayrıca çelik içinde bulunan ve inklüzyon olarak bilinen metalik olmayan taneciklerin de kaynağıdır. Bu kalıntılar (inklüzyonlar) da çelik özellikleri üzerinde zararlı olduğundan mümkün olduğunca çelik içinden uzaklaştırılması gerekmektedir. Karbon da benzer bir ara yer atomudur, ancak genellikle zararlı bir empürite olarak kabul edilmez ve şartnameye uygun miktarda bulunması gerekir. Ancak günümüzde karbonun da olabildiğince düşük olması gereken yeni çelik türleri geliştirilmiştir. [11,13]

İkincil metalurji işleminin genel olarak amaçları arasında, çeliğin kalitesini artırmak ve rafinasyon-ergitme bölümlerinin verimliliği gibi metalurjik fonksiyonları alttan akışlı bir düzeneğe transfer ederek artırmak vardır. Bu bölümde yapılan işler aşağıda belirtildiği şekilde sınıflara ayrılmaktadır. İkincil metalurji kademeleri şekil 2.5'te şematik olarak gösterilmiştir.

- Gerekli kimyasal analize ulaşmak amacıyla alaşım ilavelerinin yapılması
- Sıcaklık ve bileşim homojenizasyonu, sıcaklık kontrolü
- Etkili karbon giderimi
- Kükürt giderme
- Fosfor giderme
- Kalıntı elementlerin uzaklaştırılması
- Gaz giderimi
- Oksijen giderimi
- Çelik temizliğinin arttırılması

Cüruf taşmasının önlenmesi				
Karıştırma/homojenizasyon	gaz enjeksiyonu  kabarcık-landırma (poroz zar)	 üfleme borusu	elektromanyetik karıştırma  bobin	
Katı şarjı	alaşım elementleri 	toz/gaz 	tel gaz 	
Vakumla işlem	gaz giderme 	RH/DH 	VOD vakum oksijen dekarbürizasyon 	
Isıtma	pota fırını 	VAD vakum ark biriktirme 		
Potadan döküm teknesine perdelama	gaz 	gaz 	gaz 	

Şekil 2.5 : İkincil metalurji kademeleri [14].

2.3.1 Pota fırını

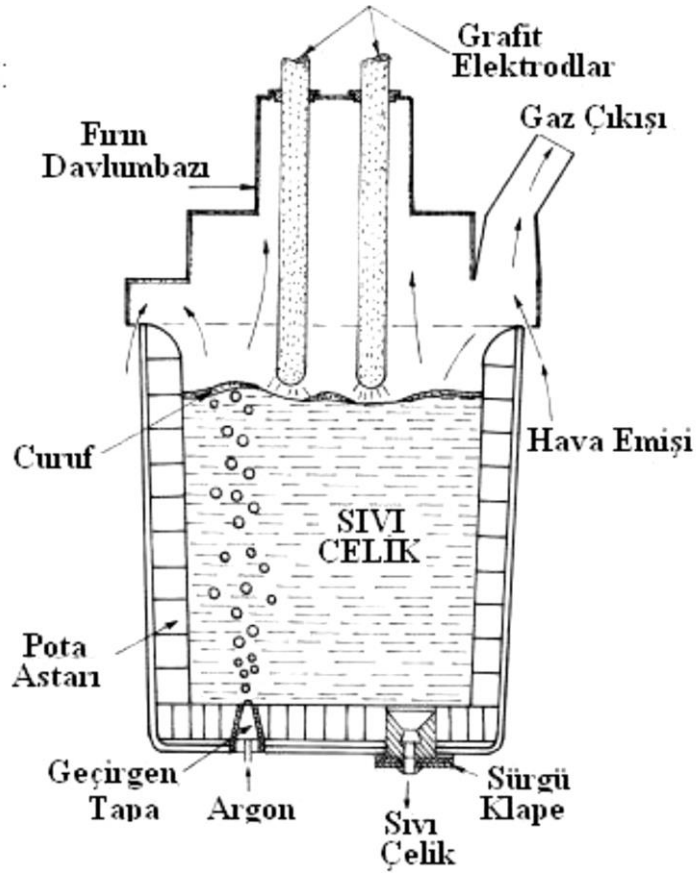
Pota fırını birçok ikincil metalurji işleminde temel ısıtma donanımı olarak kullanılır ve başlıca işlevleri şunlardır;

- Grafit elektrotlarla iletilen elektrik enerjisi ile sıvı çeliğin yeniden ısıtılması
- Asal gaz karıştırma yöntemi ile çeliğin sıcaklık ve bileşiminin homojenleştirilmesi
- Refrakterleri ark zararlarından koruyan, ısıyı sıvı çelik üzerinde yoğunlaştıran, inklüzyon ve metal oksitlerini tutan ve kükürt giderme ortamını oluşturan bir cüruf tabakasının oluşturulması

Pota fırını işlevleri arasında sayılabilecek ikincil işlevler;

- Kimyasal kontrol için yapılacak alaşım beslemeleri
- Gaz giderme veya inklüzyon yapısının kontrolü için çekirdekli tel

- Etkin bir kükürt giderme şartlarının sağlanması
- Fosfor giderme şartlarının sağlanması

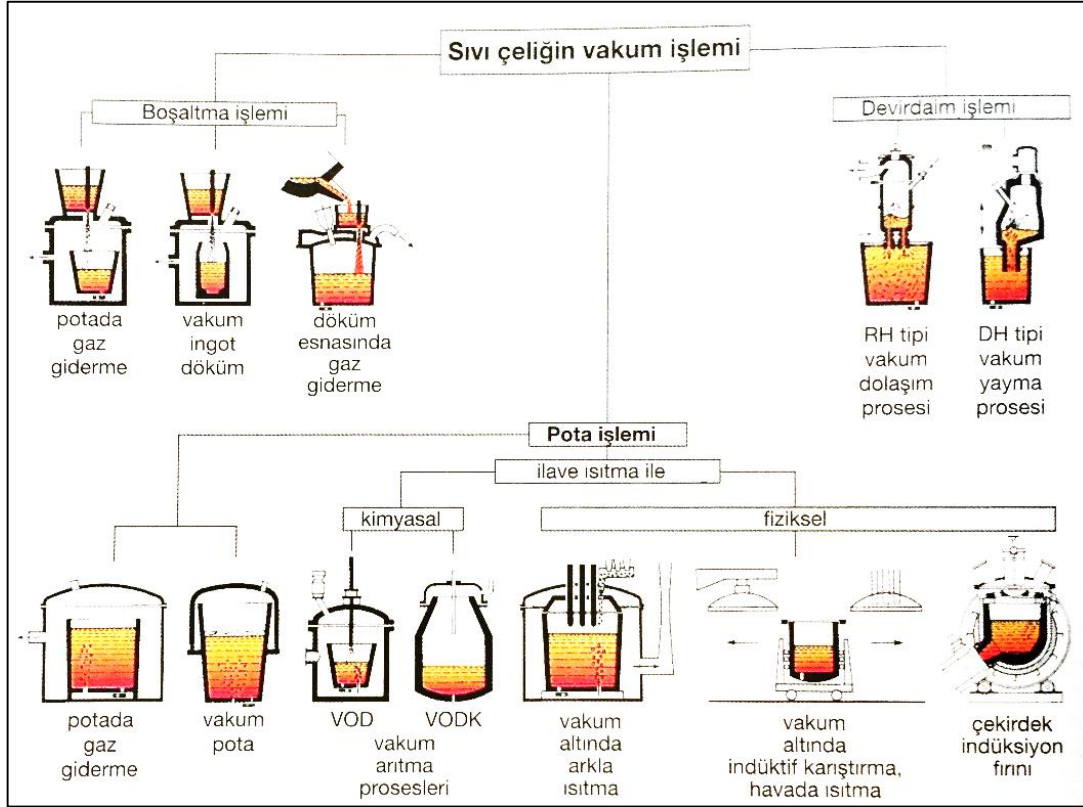


Şekil 2.6 : Pota fırını şematik gösterimi.

2.3.2 Vakum işlemi

Artan çelik temizliği gereksinimi ve yüksek kaliteli çeliklere olan talep vakum prosesini daha önem arz eder hale getirmiştir. Birçok çelik üreticisi müşterilerinin talepleri doğrultusunda çeliği vakum altında işleme tabi tutarlar.

Tüm vakum işlemlerinin altında yatan temel prensip, çözülmüş olan gazların uzaklaştırılmasıdır. Gaz gidermeden başka diğer metalurjik reaksiyonlarda vakum altında yapılabilir. Örneğin hassas dekarburizasyon, alaşımlama, deoksidasyon ve inklüzyon uzaklaştırılması gibi metalurjik işlemlerde çelik temizliğini arttırmak amacıyla vakum altında yapılmaktadır. Sıvı çeliğin vakum altında yapılan işleminden gelen, yüksek iç temizlik, düşük gaz içerikleri ve yakın alaşım toleransları elde edilebilmesi gibi temel yararları vardır.

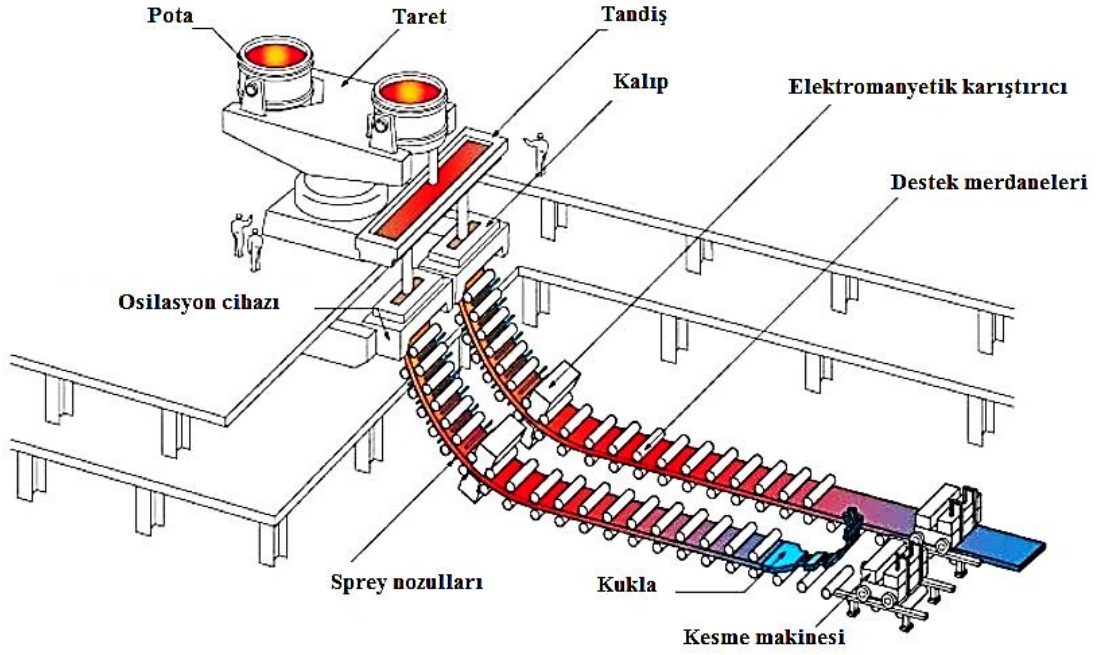


Şekil 2.7 : Çelik üretiminde en yaygın kullanılan vakum prosesleri [14].

2.4 Çeliğin Sürekli Dökümü

Çelikhanelerde kısa aralıklarla yüksek miktarda çelik üretilir (200 – 500 ton/saat). Bu miktarlar verimli dökülmek zorundadır. Sürekli döküm prosesi, bu miktarları ingot döküme göre, daha çabuk üretme yeteneğinden dolayı zamanla ön plana çıkmıştır ve şu anda çeliklerin kitlesel üretiminde kullanılan en yaygın döküm yöntemidir.

Çeliğin sürekli döküm yöntemiyle dökülmesinin temel amacı ingot dökümde oluşan çekme boşlukları, döküm boşlukları gibi hataları yok etmek ve yüksek üretim hızlarına ulaşmaktır. Şekil 2.8’de bir sürekli döküm tesisi şematik olarak gösterilmiştir.

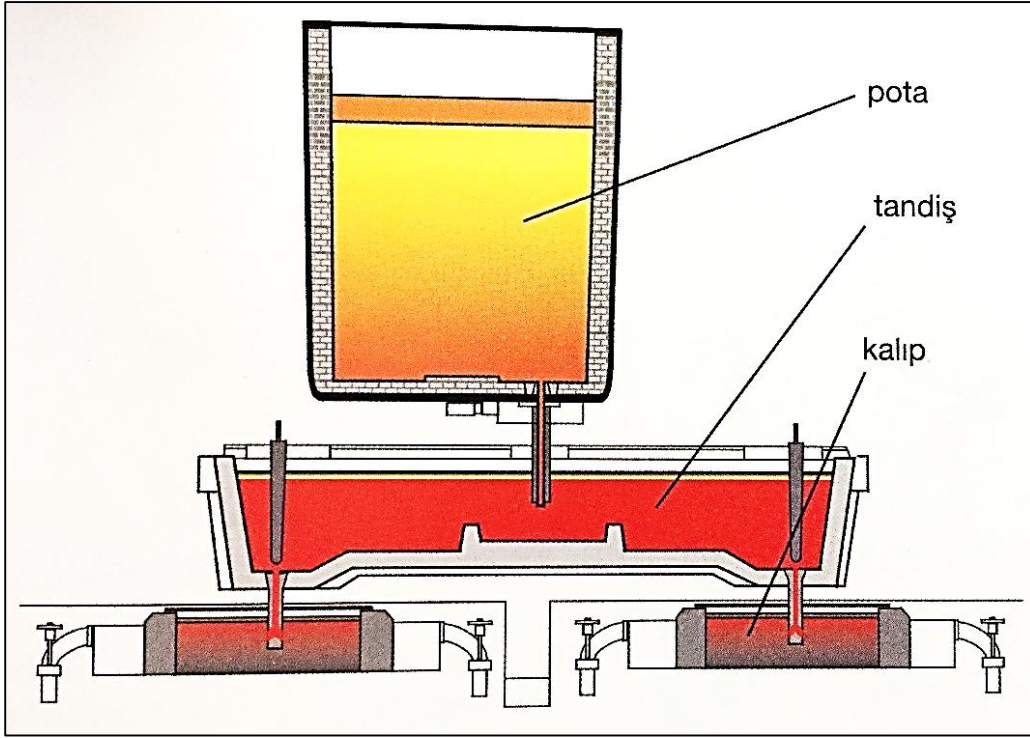


Şekil 2.8 : Sürekli döküm tesisinin şematik gösterimi [15].

2.4.1 Sürekli döküm prosesi

Sürekli döküm sırasında, sıvı çelik havasız ortamda döküm potasından nozul içerisinden dökülerek tandişe aktarılmaktadır. Tandiş refrakter bazlı olup, kapasitesi tesisten tesise farklılık göstermektedir ve 15 ila 100 ton arasında değişmektedir. Ardından sıvı çelik tandiştten ön ısıtılmış refrakter nozullar ile su soğutmalı bakır kalıplara aktarılmaktadır. Çeliğin potadan tandişe ve tandiştten kalıba aktarılması şematik olarak şekil 2.9’da gösterilmiştir.

Akış hızı, döküm potasının altında bulunan piston valfi vasıtasıyla sağlanmaktadır. Tandiştten kalıba akış ise kalıpta bulunan seviye kontrol sistemi ve buna bağlı olarak çalışan stoper ismi verilen bir tapa mekanizması ile kontrol edilmektedir. Bu tapa elektrikli veya hidrolik sistemle çalışmaktadır ve tandiştteki döküm deliğini kısmen ya da tamamen kapatabilmektedir.



Şekil 2.9 : Sıvı çeliğin potadan tandişe ve tandiştan kalıba aktarılması.

Kalıbın şekli sürekli döküm ürünü olan slabın veya kütüğün şeklini de belirlemektedir. Döküm işleminden önce kalıp tabanı tampon görevi yapması amacıyla kukla adı verilen ekipman ile kapatılmaktadır. Kalıptaki sıvı çelik seviyesi istenilen seviyeye ulaştığında segmentlerdeki roller vasıtası ile çekilerek çıkartılır ve böylece sürekli döküm işlemi başlamış olur.

Sıvı çelik kalıpta iken ilk katılaşma meydana gelmekte ve yüzeyde yeterli kalınlıkta kabuk oluştuğunda kalıptan çıkmaktadır. Çekirdeğinde henüz sıvı çelik bulunan slab, katılaşmanın tamamlanması amacıyla su ve hava yardımı ile ikincil soğutmaya tabi tutulmaktadır. Katılaşmanın tamamlanması süresince slab iki geniş yüzeyinden merdaneler ile desteklenmektedir. Bu destekler yeni oluşmuş kabuğun parçalanmasını ve ferrostatik basınç nedeniyle slabın şişmesini engellemektedir. Katılaşmanın tamamlanması ile birlikte slab istenilen ebatlarda kesilmekte ve ardından markalama yapılarak sınıflandırılmaktadır [16].

Sürekli dökümün güncel durumu aşağıda belirtilen özellikler ve sistemler ile karakterize edilmektedir;

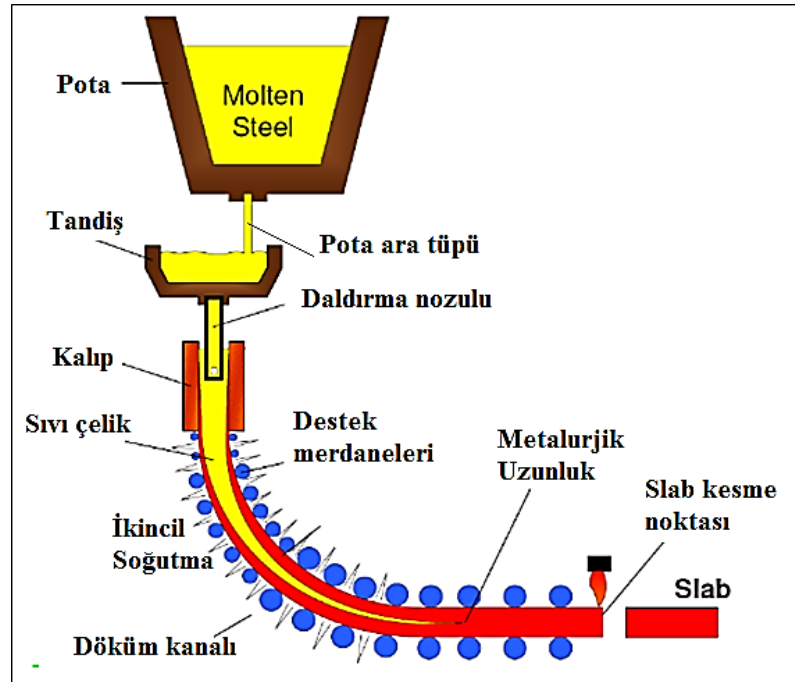
- Döner kuleler (taret) yardımıyla ardışık döküm yapılması iki pota olmasını zorunlu kılmaktadır. Ayrıca hızla aşınan tandişler için anahtar görevi gören

döndürme araçları vardır; bunlar ayrıca çeşitli çelik alaşımlarının art arda dökülmesine imkân sağlamaktadır.

- Yeniden oksidasyonu engelleyerek çelik temizliğini arttırmak için pota ile tandiş ve tandiş ile kalıp arasındaki döküm akışına bir koruyucu refrakter ve inert gaz yardımıyla perdeleme yapılmaktadır.
- Slabın kalıba yapışmasını engellemek için kalıp osilasyon hareketi yapmaktadır.
- Toz ve granül haldeki döküm flaksları, slabın yüzeyini geliştirmek amacıyla otomatik olarak eklenmektedir.
- Döküm esnasında döküme son verilmeden ebat değiştirmeye imkân sağlayan otomatik genişlik ayarlı kalıplar kullanılmaktadır.
- Slabın genişliğine bağlı püskürtme sistemi ile birlikte ikincil soğutma yapılmaktadır.
- Slab yüzey ve iç kalitesini arttırmak amacıyla kalıpta veya kalıp altında kısmen katılaşmış bölgede elektromanyetik karıştırma uygulanmaktadır.

2.4.2 Sürekli döküm ekipmanları

Bir sürekli döküm makinesinin ekipmanları şematik olarak şekil 2.10’da verilmiştir.



Şekil 2.10 : Sürekli döküm donanımları [17].

2.4.2.1 Taret

Sürekliliği sağlayan ekipmanların birincisidir. İki ayaklı olup eksenini etrafında 360° dönebilme kabiliyetine sahiptir. Görevi; dolu potayı döküm konumuna, boş potayı da döküm sirkülasyonuna girmesi için geri göndermek üzere potanın vincine taşımaktır.

2.4.2.2 Pota ara tüpü

Alümina-grafit malzemenin izostatik presleme yöntemiyle preslenmesinden elde edilen refrakter yapıları bir malzemedir. Sıvı çeliğin ve cürufun kimyasal ve mekanik aşındırma etkisine dayanıklı olması istenir. Aynı zamanda soğuk olarak kullanıldığından ani ısı şoklarına direnç göstermesi gerekmektedir. Pota ara tüpünün görevleri;

- Sıvı çeliğin, potadan tandişe akışı esnasında hava ile temasını keserek ısı kaybını önlemek, çelik temizliğine ve çeliğin mekanik özelliklerine olumsuz etkileri olan azot ve oksijen kapmasını minimuma indirmek,
- Sıvı çeliğin tandişe düzenli şekilde akışını sağlayarak tandişte oluşacak ısı kayıplarını minimuma düşürmek,
- Ayrıca bu düzenli akış tandiş içerisindeki cürufun ve inklüzyonların sıvı çelik yüzeyine yüzerek çıkmasına olanak sağlamaktır.

2.4.2.3 Tandiş

Sürekli döküm prosesinde sürekliliği sağlayan ikinci ekipmandır. Potadaki sıvı çelik bittiğinde taret vasıtasıyla yeni potanın döküm konumuna getirilmesine kadar geçen sürede kalıba sıvı çelik akışını devam ettirerek dökümün sürekliliğini sağlar. Döküm anında tandiş içindeki sıvı çelik belirli yükseklikte tutularak, kalıba düzenli ve döküm hızı ile orantılı miktarda sıvı çelik akışı sağlanır. Çelik içyapı temizliğini iyileştirmek için tandiş içi çeşitli akış kontrol refrakterleri ile donatılabilir. Aksi takdirde tandiş seviyesinin düşmesi veya akış düzeninin bozulması durumlarında slab yüzeyinde veya yüzey altında makro-inklüzyon kusurları görülebilir. Tandışten kalıba sıvı çelik akışı stoper veya sürgülü sistem sayesinde kontrol edilir. Sürgülü sistem, iki sabit plaka arasındaki hareketli plaka sayesinde akışı kontrol eden mekanizmadır. Hava ile teması kesmek için hareketli plakadan inert gaz üflenmektedir. Fakat çelik temizliği açısından bakıldığında stoper sistemi sürgü plakası sistemine göre daha avantajlıdır. Çünkü sürgülü sistemde çeliğin oksitlenmesi daha kolaydır, ayrıca tandište nozul çevresinde

oluşan türbülansla kalıba cüruf kaçma olasılığı daha fazladır. Tandış yüzeyindeki sıvı çeliğin atmosferle temasını kesmek için tandış örtü tozları kullanılır. Tandış örtü tozlarının görevleri şu şekilde sıralanabilir;

- Atmosferle sıvı çelik arasında izolasyon sağlayarak, sıcaklık kaybını minimize etmektedir.
- Çeliğin havadan oksijen kaparak tekrar oksitlenmesini ve kalıntı oluşumunu engellemektedir.
- Çelik yüzeyinde sıvı bir cüruf tabakası oluşturarak tekrar oksitlenme kaynaklı inklüzyonları hapsedmektedir.
- Düşük süper ısı ile döküme imkan sağlayarak slab yırtılması, içyapı ve yüzey kalitesinde önemli avantajlar sağlamaktadır.

2.4.2.4 Tandış daldırma nozulu

Tandış daldırma nozulu, tandışten kalıba belirli hızda ve düzenli olarak türbülans oluşturmada sıvı çelik beslemesi yapmaktadır. Tandış daldırma nozulu kalıbın aşağıya ve yukarıya yapmış olduğu sinüsoidal hareket sırasında kalıptaki sıvı çelik yüzeyinde herhangi bir oynama meydana getirmeden sıvı çeliğin tandışten kalıba akışını sağlamaktadır. Ayrıca çeliğin akış sırasında atmosferle temasını keserek yalıtım görevi de yapmaktadır.

Tandışten kalıba düzenli akış sayesinde seviye oynamalarını engelleyerek çeliğin cüruf kapmasını ve iç temizliğinin bozulmasını engellemektedir. Tandış daldırma nozullarının kalıp içindeki derinliği de slab yüzeyinde çatlak oluşumu açısından ve kalıp yüzeyindeki seviye oynamasının önlenmesi açısından önem arz etmektedir. Tandış daldırma nozulu, sıvı çeliğin ve döküm tozunun aşındırıcı etkisini bertaraf etmesi için alümina grafit (%80-90 Al_2O_3 , %10-20 C) malzemeden yapılmıştır.

2.4.2.5 Kalıp

Kalıp, ilk katılaşmanın sağlandığı ve sıvı çeliğin katı bir kabuk oluşturduğu yerdir. Eşit bir ısı çıkarımı sağlayarak, katılaşan yüzeyin bozulma ve yırtılma olmadan ikincil soğutma bölgesine ulaşmasını sağlamaktadır. Katılaşan kabuk kalınlığı kalıbı terk ettiği sırada döküm hızına ve kalıbın uzunluğuna bağlı olarak 10 ila 30 mm arasında olmaktadır. Kalıptaki ısı çıkışı sürekli döküm prosesinin en önemli noktasıdır. Çünkü

ısı transferinin kontrolü sayesinde slab yüzey kalitesinin bozulması ve slab yırtılma riski önlenmektedir. Isı çıkışı su soğutmalı bakır plakalar sayesinde olmaktadır. Ayrıca kalıp, sıvı çeliğin inklüzyonlardan kurtulma imkânının olduğu son yer olarak da tanımlanmaktadır.

Sürekli döküm kalıbı döküm esnasında osilasyon adı verilen dikey salınım hareketi yapmaktadır. Bu hareketin amacı kalıp ile katı kabuk arasındaki sürtünmeyi düşürmek ve yapışmayı önlemektir. Osilasyon hareketi üç temel parametre ile tanımlanır. Stroke, frekans ve negatif strip. Stroke; salınım hareketinin derinliğini, frekans; birim zamandaki salınım sayısını, negatif strip ise kalıbın aşağıya doğru hareketi ile katılaşan kabuğun aşağı hareketi arasındaki farkı ifade eder. Kalıp osilasyon hareketi, slab yüzeyinde osilasyon çizgileri adı verilen izlere neden olur. Osilasyon çizgilerinin derin ve düzensiz olması başta enine yüzey çatlakları olmak üzere bazı kusurlara neden olur. Kalıbın osilasyon hareketi sırasında bakır plakalarla katılaşan kabuk arasındaki yağlamayı gerçekleştirmek için kalıba döküm tozu beslemesi yapılır. Döküm tozlarının görevleri şunlardır;

- Kalıp ile katı kabuk arasında yağlama yapmak
- Sıvı çeliğin hava ile temasını engelleyerek tekrar oksitlenmeyi önlemek
- Kalıpta ısı transferini düzenlemek
- Sıvı çelik yüzeyine yükselen inklüzyonları toplamak
- Sıvı çelik yüzeyinde ısı yalıtım yapmak

Döküm tozları genel olarak SiO_2 , CaO , Al_2O_3 , Na_2O , CaF_2 ve ergime ve yalıtım özelliğini düzenlemek amacı ile %1,0-1,5 C içerir. Döküm tozlarında baziklik değeri ($\text{CaO} / \text{SiO}_2$ oranı) önemlidir. Yüksek baziklik, viskoziteyi düşürürken döküm tozunun oluşturduğu sıvı cürufun kalıntı ve oksit çözme kapasitesini artırır. Ayrıca yüksek baziklikte ısı transferi azalır ve slab yırtılması riski artar. Döküm tozu içindeki alkali ve floritler ise akıcılığı artırarak, hızlı ısı transferi sağlarlar.

2.4.2.6 İkincil soğutma bölgesi

Kalıpta meydana gelen ilk katılaşma ve kabuk oluşumundan sonra ikincil soğutma bölgesi boyunca soğutma devam ettirilerek slabın tüm kesiti boyunca tamamen katılaşması sağlanır. İkincil soğutma sistemi makine özelliklerine, döküm hızına göre

belirlenen soğutma bölgelerinden meydana gelir. Her bir bölgenin farklı hedef sıcaklığı vardır. Püskürtme suyu debileri bu sıcaklığa göre belirlenir.

Soğutma eğrilerini kabaca üç ana grupta toplayabiliriz:

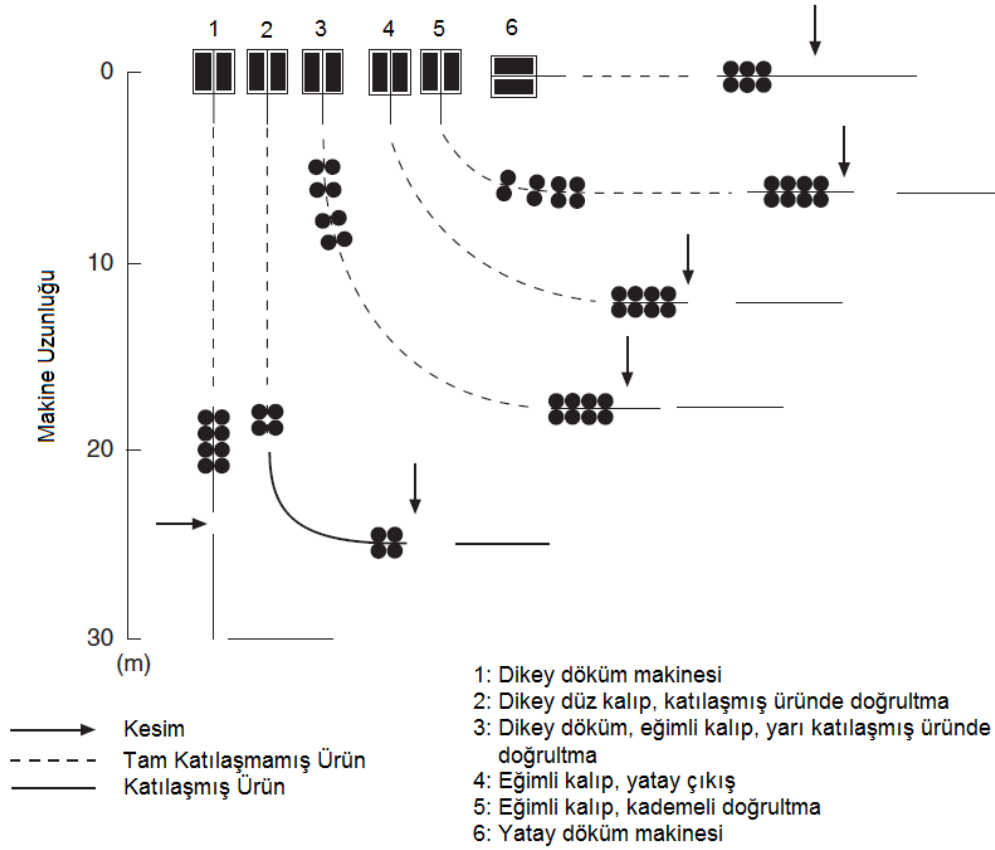
- Sert Soğutma
- Orta Soğutma
- Yumuşak Soğutma

İkincil soğutma sisteminde hedef alınan metalurjik kriterler şöyledir:

- Dökümün tüm yüzeyi ve kesiti boyunca homojen bir soğutma sağlamak
- Slab yüzey sıcaklığının menüsküsten doğrultma noktasına kadar önceden belirlenen standart sıcaklıklarda değişimini sağlamak
- Sıcaklık farklılaşmalarını en aza indirmek
- Doğrultma bölgesinden önce tam katılaşma sağlamak, şişme gerilimlerini minimize etmek
- Slab yüzey sıcaklığını doğrultma noktasında kırılma sıcaklık bölgesinin (700-900°C) dışında tutmak
- Makine çıkışında sıcak şarj için gerekli maksimum yüzey sıcaklığı sağlamak

2.4.3 Sürekli döküm çeşitleri

Sürekli döküm tesisinin türleri genel hatlarıyla dikey, dikey bükümlü, dairesel ark ve oval eğimli sürekli döküm makineleri şeklinde sıralanabilir. Sürekli döküm türlerine ait örnekler şekil 2.11’de verilmiştir.



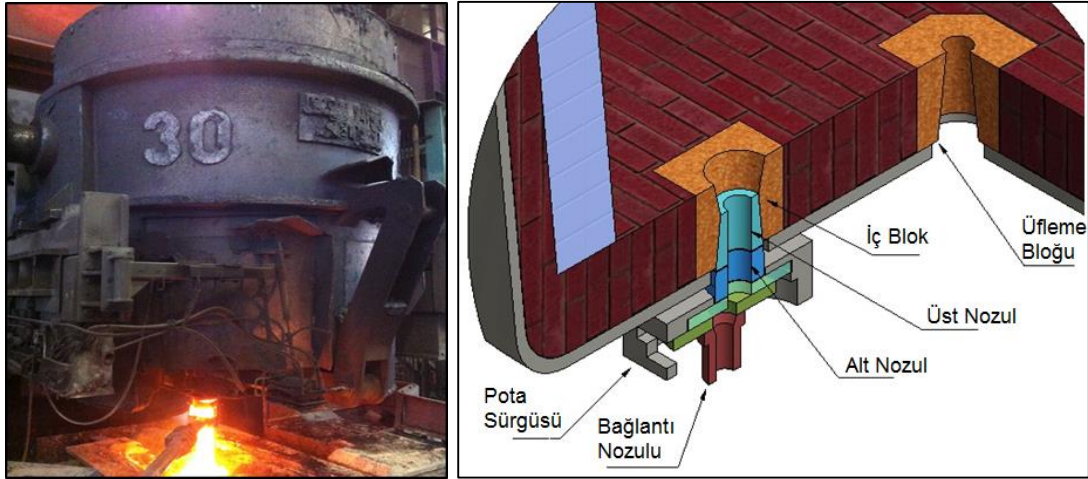
Şekil 2.11 : Sürekli döküm makinesi tipleri [16].

Dairesel ark ve oval eğimli sürekli döküm makineleri, makine boylarını önemli ölçüde kısaltmak amacıyla geliştirilmiştir. Günümüzde bu tipteki sürekli döküm makinelerinin toplam uzunluğu 6 metre civarındadır. Dairesel ark ve oval eğimli döküm makinelerinde, slab kalıptan dikey olarak değil kıvrılmış olarak çıkmaktadır. Slab daha sonra doğrultularak yatay hale getirilir. Günümüzde sürekli döküm makinelerinin çoğunluğu dikey eğim tasarımına sahiptir. Dikey boyların 2.5-3 metre arasında değiştiği bu tip döküm makineleri, inklüzyonların yüzerek uzaklaşması açısından avantaj sağlamaktadır.

Sürekli döküm ile üretilen karşılıklı kesitler dikdörtgen, kare ve yuvarlak kesitleri içerir. Kütük döküm makinelerinde hattın ölçüleri 100x100 mm'den yaklaşık 370x490 mm'ye kadar değişir. Yassı mamul dökümü yapan tesislerde ise 400x2.500 mm'ye varan ölçüler bulunmaktadır. Jumbo dökümlerde ise 3250 mm'yi bulan genişliklerde dökümler yapılabilmektedir.

3. SÜREKLİ DÖKÜMDE NOZUL TIKANMASI

Sürekli döküm prosesinde nozul tıkanması problemi sıvı çeliğin potadan tandişe aktarılması esnasında çelik içerisindeki kalıntıların nozul duvarında birikmesine bağlı olarak zamanla nozul kesitinin daralması ve sıvı çelik akışının tamamen kesilmesi şeklinde meydana gelmektedir. Sürekli döküm prosesinde sıvı çeliğin potadan tandişe akışı ve tıkanmanın meydana geldiği pota iç nozulu şematik olarak şekil 3.1’de verilmiştir.



Şekil 3.1 : Sıvı çeliğin potadan tandişe akışı ve pota iç nozulu.

Nozul tıkanması problemi dünya genelinde çelik üreticilerinin sıklıkla karşılaştığı, çelik kalitesini ve üretim performansını çok olumsuz etkileyen yaygın bir problemdir. Problem üzerinde etkili parametreler ana hatlarıyla tesis dizaynı, çelik sıcaklığı ve çelik temizliği şeklinde sıralanmaktadır. Metalurjik açıdan bakıldığında ise çelik temizliği başlığı ön plana çıkmaktadır.

3.1 Nozul Tıkanmasına Etki Eden Mekanizmalar

Nozul tıkanma problemi üzerinde yapılan araştırmalar, problemin oluşumunda 4 temel mekanizmanın bulunduğunu göstermektedir. Nozul tıkanma probleminin tek bir faktöre bağlı gerçekleşmesi mümkün olmakla beraber, iki veya daha fazla faktörün birlikte etkisi ile de gerçekleşebilmektedir [21].

3.1.1 Deoksidasyon ürünlerinin aglomerasyonu

Oksijenli çelik üretim prosesinde konvertör prosesi sonrası çelik içerisinde çözünmüş oksijenin giderilmesi gerekmektedir. Bu amaçla çeliğe Al, Ti, Zr gibi deoksidant alaşımlar ilave edilmektedir. Oksijen ile bu deoksidantların reaksiyonu sonucu çelik üretim sıcaklıklarında katı formda olan oksit inklüzyonların oluşmaktadır. Yapılan araştırmalar bu oksitli inklüzyonların sinterleşme mekanizmasıyla nozul duvarında bir yığın oluşturduğu ve tıkanmaya sebep olduğunu göstermektedir. Bu tipteki bir tıkanmada biriken inklüzyonlar aynı tipte ve genel olarak 1 ila 20 mikron arasında boyutlarda olmaktadır [19,23,24].

3.1.2 Çeliğin katılaşması

Çelik sıcaklığının, katılaşma sıcaklığının yeterince üzerinde olmaması veya çeliğin transferi esnasında düşük yalıtım nedeniyle yüksek ısı kayıplarının olması durumunda sıvı çelik nozul içerisinde katılaşarak tıkanmaya neden olabilmektedir [26].

3.1.3 Kompleks oksitlerin aglomerasyonu

İkincil metalurji prosesinde şiddetli karıştırma veya kısa işlem süresinde yüksek ilaveler yapılması gibi durumlarda çelik – cüruf etkileşimi en üst seviyeye çıkmaktadır. Ayrıca kalsiyum işleminin ideal şekilde uygulanmadığı durumlarda çelik üretim şartlarında katı fazda olan kalsiyum alüminat inklüzyonların oluşabilmektedir. Bu tarz durumlarda çelik içerisinde CaO, CaS ve $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ gibi oksitler bulunabilmektedir. Cüruf ve deoksidasyon ürünlerinin aglomere olması ile oluşan kompleks oksitlerin de tıkanmaya neden olduğu durumlarda olabilmektedir [18,20,22].

3.1.4 Reaksiyon ürünlerinin birikmesi

Çelik üretim prosesinde yalıtımın yetersiz olması ve çeliğin atmosfer ile teması halinde çelik içerisinde oksijene ilgisi yüksek ve metalik halde bulunan elementlerin oksitlenmesi mümkün olabilmektedir. Çelik yüzeyindeki cüruf kalınlığının az olduğu veya çeliğin içerisinden geçtiği nozula uygulanan argon basıncının yetersiz olduğu durumlarda çelik atmosfer ile temas edebilmektedir. Ayrıca cürufun yüksek miktarda indirgenebilir oksitler içermesi durumunda da çelik içerisindeki oksijene ilgisi yüksek elementler oksitlenebilmektedir. Bahsi geçen şekilde oluşan reaksiyon ürünleri de çelik üretim şartlarında katı formda olacağından nozul tıkanmalarına sebebiyet verebilmektedir [25,27,28].

3.2 Çelik Temizliği

Çelik üretim prosesinde deoksidasyon ve reoksidasyon kaynaklı olarak metalik olmayan inklüzyonlar oluşmaktadır ve bu inklüzyonlar proses koşullarında genellikle katı fazda bulunmaktadır. Prosesin doğası gereği inklüzyonsuz çelik üretilmesi mümkün değildir. Inklüzyon içeriği düşük ve zararlı inklüzyonlar içermeyen çelikler temiz çelik olarak tanımlanmaktadır. Al ile oksijeni giderilmiş çeliklerde bulunan en zararlı inklüzyonlar Al_2O_3 ve MnS inklüzyonlarıdır [29,30,31].

Çelik temizliğinin en önemli göstergelerinden birisi çeliğin ihtiva ettiği toplam oksijen miktarıdır. Sıvı çelikte bulunan toplam oksijen değeri arttıkça nihai üründe bulunan inklüzyon miktarında arttığı yapılan çalışmalarda belirlenmiştir [32]. Çelik temizliğini belirlemeye yönelik kesin bir ölçüm yöntemi bulunmadığından ancak farklı yöntemlere ait analiz sonuçları değerlendirilerek daha doğru tespitler yapılabilmektedir [4,34].

Sıvı çelik konvertörden potaya aktarılırken kaçan cüruf miktarının azaltılması, ideal bir oksijen giderimi, optimum cürufun elde edilmesi, inklüzyon modifikasyonu, ikincil metalurji uygulamaları ve uygun refrakter seçimi ile çelik temizliği iyi seviyelere getirilmektedir [33].

Al ile deokside edilmiş çeliklerde bulunan alümina inklüzyonlarının nozul tıkanması üzerinde çok etkili olduğu bilinmektedir. Çelik üretim koşullarında katı formda bulunan bu alümina inklüzyonlarının zararlı etkilerini en aza indirmek için kullanılan en yaygın yöntem kalsiyum işlemidir. Kalsiyum işlemi ile alümina inklüzyonlarının sıvı kalsiyum alüminat inklüzyonlarına dönüşmesi sağlanmaktadır, ardından uygun karıştırma vasıtası ile yüzey alanlarının büyümesi ve çelikten uzaklaştırılması daha kolay hale gelmektedir [28,37].

3.3 Çelikte Oksit Inklüzyonlarının Oluşumu

Çelikte oksit inklüzyonları çeliğin fiziko-kimyasının kaçınılmaz bir sonucu olarak karşımıza çıkmaktadır. Sıvı çelikte BOF prosesinin gereği olarak çözünmüş oksijen bulunmaktadır ve bu çözünmüş oksijen çelikten ilave edilen deoksidantlar ile giderilmektedir. Deoksidasyon reaksiyonlarının bir sonucu olarak da oksit inklüzyonları oluşmaktadır. Sıvı çelikte bulunan çözünmüş oksijenin giderilmemesi durumunda sürekli döküm prosesinde katılaşma esnasında CO oluşumu meydana

gelmekte ve slabta gaz boşluğu ve çatlak oluşumu gibi kusurlara sebebiyet vermektedir [29,37]. Yine çelik üretim prosesinde çeliğin transferi ve dökümü esnasında sıvı çeliğin atmosfere maruz kalması sonucu oksijen konsantrasyonunun sürekli olarak artması da bir oksit inklüzyon kaynağıdır.

Sıvı çelikte bulunan çözünmüş oksijenin giderimi için kullanılan en yaygın deoksidant alüminyumdur. Alüminyum oksijene olan yüksek ilgisi, düşük ergime sıcaklığı (660°C) ve ekonomik olması nedeniyle tercih edilmektedir. Fazla alüminyum kullanımı metalik olmayan inklüzyonların artışına ve dolayısıyla çelik temizliğinin olumsuz etkilenmesine sebep olmaktadır [38].

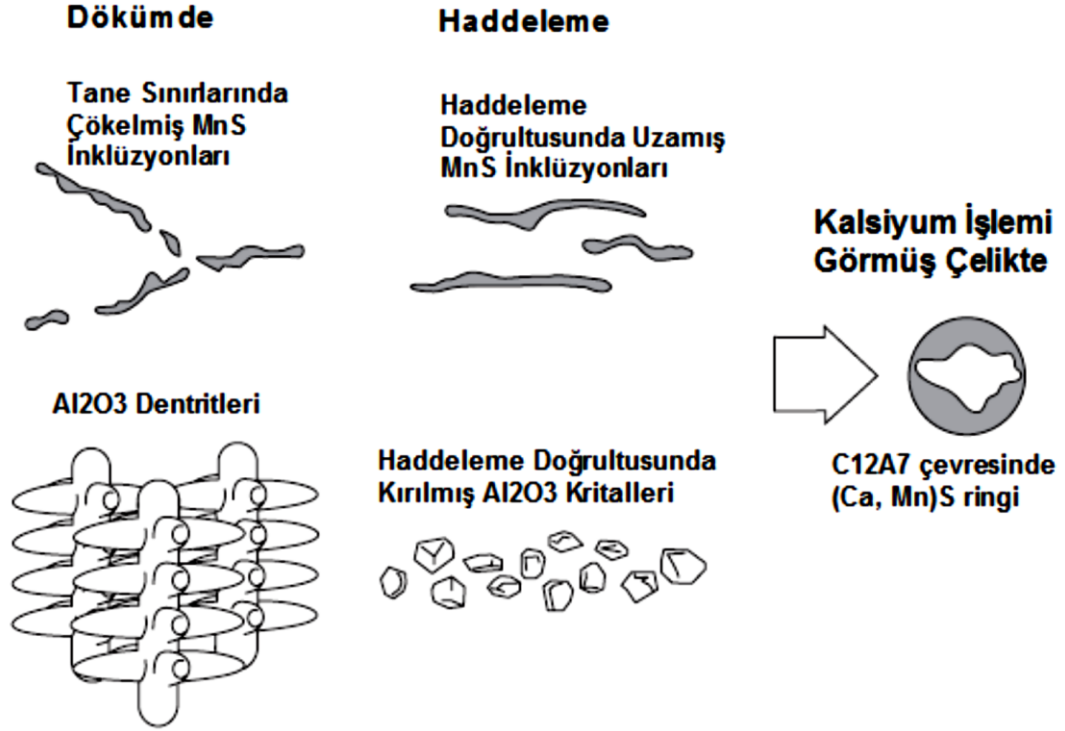
Sıvı çeliğin konvertörden potaya aktarılması esnasında, içeriğinde FeO , MnO ve P_2O_5 gibi kararsız oksitler bulunan konvertör cürufu kaçmaktadır. Oksijen kaynağı olarak cürufta bulunan bu oksitler çeliğin ikincil metalurji işlemlerinde karıştırılması ve ısıtılması esnasında çelik-cüruf etkileşiminin artmasıyla birlikte reoksidasyon kaynaklı inklüzyon oluşumuna neden olmaktadır [39].

İkincil metalurji ve tandiş koşullarında reoksidasyon gerçekleşebilmekle birlikte, pota fırınından tandişe ve tandiştan kalıba çeliğin transferi esnasında da önemli miktarda reoksidasyon gerçekleşmektedir. Oluşan reoksidasyon kaynaklı metalik olmayan inklüzyonlar ise sürekli dökümde nozul tıkanmasına, nihai üründe ise kusur oluşumuna neden olmaktadır [40].

Deoksidasyon ürünü kimyasal olarak kararlı bir yapıda olmalı, ayrışma ve çeliğe tekrar oksijen verme eğiliminde olmamalı ve kolaylıkla yüzdürülerek çelikten uzaklaşabilmelidir. Al ile deokside edilmiş çeliklerde ise deoksidasyon ürünü olarak çelik üretim koşullarında katı fazda olan Al_2O_3 inklüzyonları oluşmaktadır. İri boyutlu inklüzyonlar ($>30\mu\text{m}$) karıştırma ile kolaylıkla çelikten uzaklaştırılabilirken küçük boyutlu inklüzyonlar ise sıvı çelikte kalırlar. CaSi enjeksiyonu ile çelikten uzaklaştırılamayan Al_2O_3 inklüzyonları öncelikle sıvı kalsiyum alüminat inklüzyonlarına dönüştürülür. İdeal karıştırma ile birlikte sıvı kalsiyum alüminat inklüzyonlarının yüzey alanları büyütülüp, yüzdürülerek, cürufa geçirilmesi sağlanmaktadır. Bu işleme kalsiyum işlemi denilmektedir [41].

3.4 Kalsiyum İşlemi ve İnküzyon Modifikasyonu

Ca işlemi, iki ana sebepten dolayı uygulanmaktadır. İlki, çeliğin dökülebilirliğini iyileştirmek, ikincisi, nihai ürünün spesifikasyonlarını sağlamaktır. Ca işleminin uygulanması ile Al_2O_3 ve MnS mekanik testlerde kırılma ihtimalini düşüren kalsiyum alüminat ve kalsiyum sülfite dönüştürülmektedir. Şekil 3.2’de kalsiyum işlemi ile inküzyonların modifikasyonu şematik olarak gösterilmiştir.



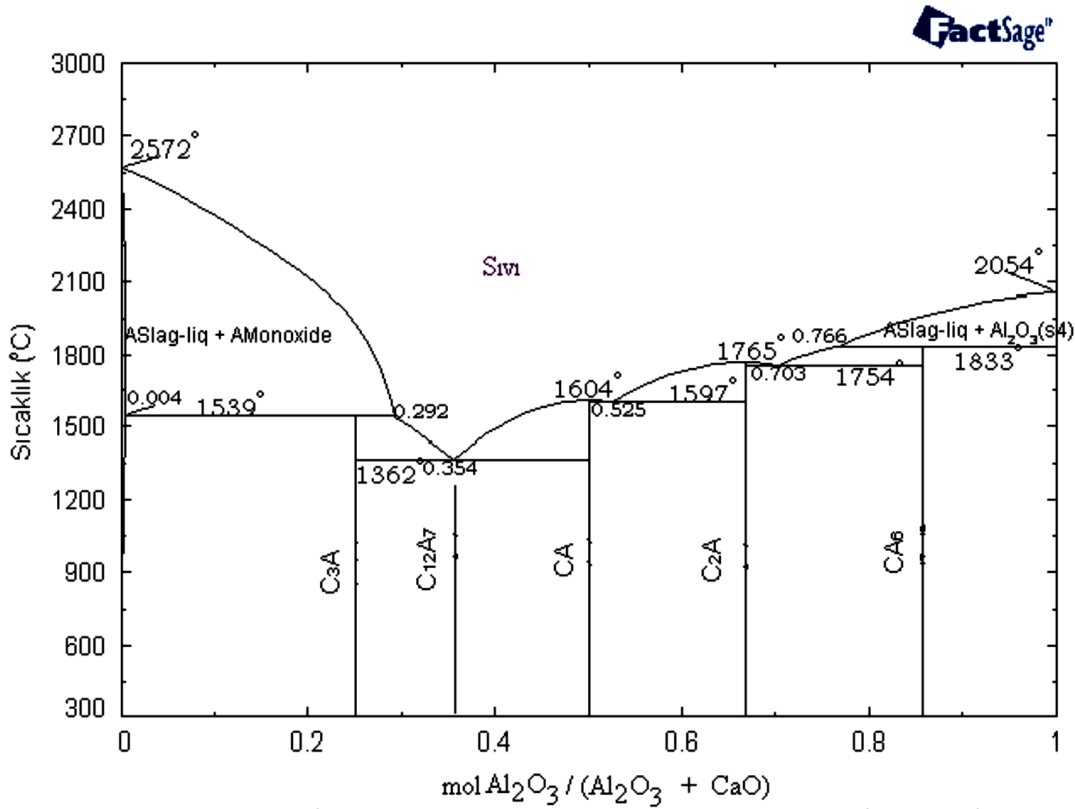
Şekil 3.2 : Kalsiyum işlemi ile inküzyonların modifikasyonu [45].

Al ile deokside edilmiş çeliklerde, çelik üretim koşullarında katı fazda olan Al_2O_3 inküzyonları bulunmaktadır. Deoksidasyon kaynaklı Al_2O_3 inküzyonları küçük boyutlu ($<5\mu m$) olduklarından büyük bir kısmı çelikten uzaklaşamaz. Büyük boyutlu alümina inküzyonlarının ise bir kısmı çelik içerisinde kalmaktadır. Bu inküzyonlar, haddeleme işlemi esnasında uzayarak kırılırlar ve nihai üründe yüzey hataları ve yorulma direnci başta olmak üzere mekanik özellikleri olumsuz yönde etkilerler. Ca ilavesi ile birlikte, katı Al_2O_3 inküzyonları sıvı kalsiyum alüminat yapısına dönüştürülür. Uygun karıştırma koşullarında yüzey alanları büyütülerek sıvı çelikten cürufa çekilirler [48].

Al_2O_3 inküzyonları sürekli döküm sıcaklıklarında katı fazda olduğundan dolayı, nozul tıkanması ve buna bağlı sıvı çelik akışının kesilmesi gibi problemlere yol açmaktadır.

Kalsiyum enjeksiyonu ile alümina inklüzyonları sıvı kalsiyum alüminat inklüzyonlarına dönüştürülerek sürekli döküm prosesinde nozul tıkanması problemi çözülebilmektedir [13,3]. $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3$ faz diyagramı, kalsiyum alüminat inklüzyonlarının içerdiği CaO ve Al_2O_3 oranlarındaki değişime bağlı olarak, oluşacak olan kalsiyum alüminat tiplerindeki değişimi göstermektedir (Şekil 3.3). $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3$ denge diyagramında Ca ilavesinin artışı ile birlikte katı Al_2O_3 inklüzyonlarından başlayarak, sırasıyla $\text{CaO} \cdot 6\text{Al}_2\text{O}_3$ (CA_6), $\text{CaO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3$ (CA_2), sıvı fazda olan $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ (CA) ve $12\text{CaO} \cdot 7\text{Al}_2\text{O}_3$ (C_{12}A_7), son olarak ise katı $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ (C_3A) dönüşümleri gerçekleşir.

Faz diyagramı incelendiğinde, $\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{CaO}+\text{Al}_2\text{O}_3)$ mol oranının 0,29-0,52 arasında olması durumunda çelik üretim şartlarında sıvı fazda olan kalsiyum alüminat tipleri (C_{12}A_7 , CA) oluşmaktadır. $\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{CaO}+\text{Al}_2\text{O}_3)$ mol oranının 0,35 olması (% CaO : 55, % Al_2O_3 : %45) durumunda ise, ötektik dönüşüm gerçekleşmekte, ergime sıcaklığı en düşük kalsiyum alüminat tipi (C_{12}A_7) oluşmaktadır. Bu açıdan bakıldığında, $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3$ faz diyagramı kalsiyum işlemi ile inklüzyon modifikasyonunun başlangıç noktası olmuştur.



Şekil 3.3 : $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3$ faz diyagramı [49].

Sıvı çeliğe Ca ilavesi ile birlikte, Ca gaz fazına geçerek çelikte çözünür (3.1). Düşük ergime sıcaklığı ve yüksek buhar basıncı nedeniyle proses koşullarına bağlı olarak Ca'un bir kısmı sıvı çelikten uzaklaşır. İyi deokside edilmiş bir çeliğe Ca enjeksiyonu yapıldığında oldukça düşük seviyede CaO oluşumu (3.2) beklenmektedir [45].

Kalsiyum ilavesi, alümina ve MnS inklüzyonlarını modifiye etmektedir. Fakat kesin reaksiyon sırası başta S ve oksijen miktarı olmak üzere termodinamik ve kinetik koşullara bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Uygun koşullarda, Ca ilavesi ile birlikte Al_2O_3 inklüzyonları kısmi olarak indirgenerek kalsiyum aluminat inklüzyonlarına dönüşmektedir [47].

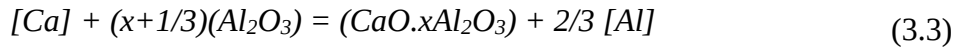
Kalsiyum işlemi koşullarına bağlı olarak sıvı çelikte CA_6 , CA_2 , CA , $C_{12}A_7$, C_3A olmak üzere 5 temel kalsiyum aluminat tipi oluşmaktadır. CA_6 , CA_2 ve C_3A kısmen modifiye olmuş, CA modifiye olmuş, $C_{12}A_7$ ise tam modifiye olmuş kalsiyum aluminat tipleridir. CA_6 ve CA_2 tipindeki kalsiyum aluminat inklüzyonları ergime sıcaklığı yüksek, çelik üretim şartlarında katı fazda, C_3A tipindeki kalsiyum aluminat inklüzyonları ise sıvı faza geçiş sıcaklığı düşük olmasına rağmen ($1535^{\circ}C$), $1900^{\circ}C$ 'nin üzerinde tamamen sıvı faza dönüşen inklüzyonlardır.

Çizelge 3.1 : Kalsiyum-alüminat tipleri ve özellikleri.

İnküzyon Tipi	İnküzyon Kimyası	T_{erg} ($^{\circ}C$)	Yoğunluk (g/cm^3)	m/n ($mCaO \cdot nAl_2O_3$)	Modifikasyon Durumu
C	CaO	2570	3,34	-	Modifiye Olmamış
A	Al_2O_3	2050	3,96	-	Modifiye Olmamış
CA_6	$CaO \cdot 6Al_2O_3$	1850	3,38	0,17	Kısmen Modifiye Olmuş
CA_2	$CaO \cdot 2Al_2O_3$	1750	2,91	0,5	Kısmen Modifiye Olmuş
CA	$CaO \cdot Al_2O_3$	1605	2,98	1	Modifiye Olmuş
$C_{12}A_7$	$12CaO \cdot 7Al_2O_3$	1455	2,83	1,71	Tam Modifiye Olmuş
C_3A	$3CaO \cdot Al_2O_3$	1535	3,04	3	Kısmen Modifiye Olmuş

CA tipindeki kalsiyum alüminat inklüzyonları ergime sıcaklığı düşük (1605°C), çelik üretim şartlarında büyük oranda sıvı fazda, C₁₂A₇ tipindeki kalsiyum alüminat inklüzyonları ise en düşük ergime sıcaklığına (1455°C) sahip çelik üretim şartlarında tamamen sıvı fazda olan inklüzyonlardır (Çizelge 3.1). Kalsiyum işlemi ile başarılı bir inklüzyon modifikasyonunda hedef çelik üretim şartlarında sıvı fazda olan, C₁₂A₇ tipinde veya en kötü ihtimalle CA tipindeki kalsiyum alüminat inklüzyonlarının elde edilmesidir.

Al ile deokside edilmiş, düşük S içeren çeliklerde, Ca enjeksiyonu ile birlikte öncelikli olarak oksit inklüzyonlarının modifiye olması beklenmektedir (3.3). Termodinamik olarak sırasıyla CA₆, CA₂, CA ve son olarak CaO içeriği yüksek sıvı C₁₂A₇ inklüzyonlarının oluşumu gerçekleşmektedir [46,47]. C₁₂A₇ tipindeki kalsiyum alüminat inklüzyonları düşük ergime sıcaklığına sahip, küresel inklüzyonlardır ve kolaylıkla yüzerek çelikten cürufa geçebilirler. Son adımda ise Ca çeliği desülfürize etmektedir (3.4) ve sülfid inklüzyonları modifiye edilerek (3.5) sülfid şekil kontrolü sağlanmaktadır [45].



4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Al ile deokside edilmiş düşük karbonlu çeliklerin sürekli dökümünde karşılaşılan pota iç nozulu tıkanma probleminin kaynağını belirlemeye yönelik olarak laboratuvar incelemeleri ve veri analizleri gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmaların ilk adımı olan laboratuvar incelemeleri kısmında tıkanmış nozullar üzerinde optik mikroskop, OES ve SEM-EDS analizleri gerçekleştirilmiştir. İkinci aşamada ise düşük karbonlu çeliklerin proses verileri analiz edilerek, nozul tıkanması üzerinde etkili faktörler belirlenmiş ve işletme koşullarında kontrol edilebilir faktörler ile deney tasarımı yapılmıştır.

Laboratuvar incelemeleri ve deney tasarımı çalışmalarında elde edilen sonuçlar ışığında, çelik üretim koşullarında kontrol edilebilir faktörler dikkate alınarak optimum parametrelerle işletme koşullarında uzun süreli deneysel çalışmalar yapılmıştır.

4.1 Laboratuvar İncelemeleri

Laboratuvar incelemeleri kapsamında nozul içerisinde katılaşmış çelik bloklardan numuneler çıkartılmıştır. Nozul numuneleri üzerinde optik mikroskop, OES ve SEM-EDS incelemeleri gerçekleştirilmiştir.

4.1.1 Numune hazırlama

Yapılacak laboratuvar incelemeleri için nozul içerisinde katılaşmış çelik bloklar uygun ebatlarda kesilerek kenar ve merkez bölgelerden numuneler çıkartılmıştır. Çelik blokların kesme işlemi şekil 4.1’de gösterilen “Struers Discotom-65” kesme cihazında gerçekleştirilmiştir. Pota iç nozulu içerisinde katılaşmış çelik blok ve numune çıkartılan bölgeler şekil 4.2’de verilmiştir. Ardından kesilen numuneler mikroyapı incelemeleri amacıyla “Struers CitoPress-20” sıcak bakalite alma cihazı ile bakalite alınmıştır (Şekil 4.3). Bakalite alınan numuneler sırasıyla 120, 240, 400, 800, 1200 ve 2500 numaralı zımparalar kullanılarak zımparalanmıştır. Zımparalama işleminin ardından sırasıyla 6µm, 3µm ve 1µm’lik elmas solüsyonlar ve çuhalar kullanılarak

parlatılmıştır. Zımparalama ve parlatma işlemi şekil 4.4'te gösterilen “Struers TegraPol-21” zımparalama ve parlatma cihazında gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.1 : Struers Discotom-65 kesme cihazı.



Şekil 4.2 : Nozul içerisinde katılaşmış çelik blok ve numune çıkartılan bölgeler.



Şekil 4.3 : Struers CitoPress-20 sıcak bakalite alma cihazı.

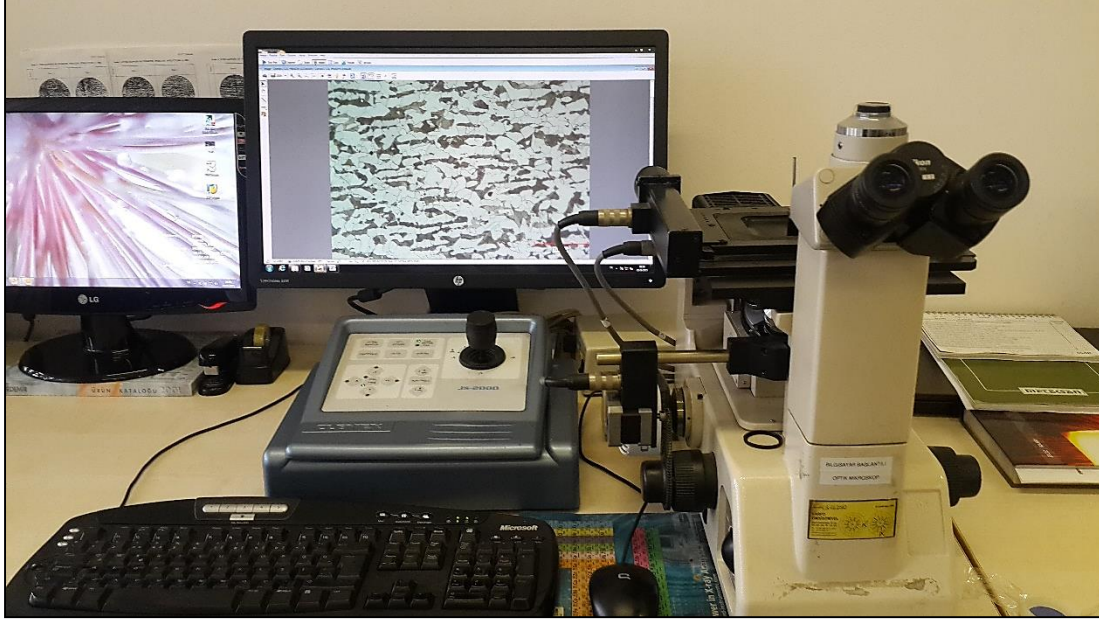


Şekil 4.4 : Struers TegraPol-21 zımparalama ve parlatma cihazı.

Zımparalama ve parlatma işlemi tamamlanmış numuneler optik mikroskop incelemelerinde inklüzyonların belirgin hale gelebilmesi ve çelik temizliğinin tespit edilmesi amacıyla %10'luk tartarik asit ($C_4H_6O_6$) ile 4sn süre ile dağlanmıştır.

4.1.2 Optik mikroskop incelemeleri

Tıkanmış nozulun kenar ve merkez bölgelerinden alınan ve yukarıda belirtilen şekilde hazırlanan numuneler nozulun farklı bölgelerindeki çelik temizliğinin belirlenmesi amacıyla optik mikroskopta incelenmiştir. Optik mikroskop incelemeleri şekil 4.5'te gösterilen “Nikon Epiphot-200” model optik mikroskop ile gerçekleştirilmiştir.

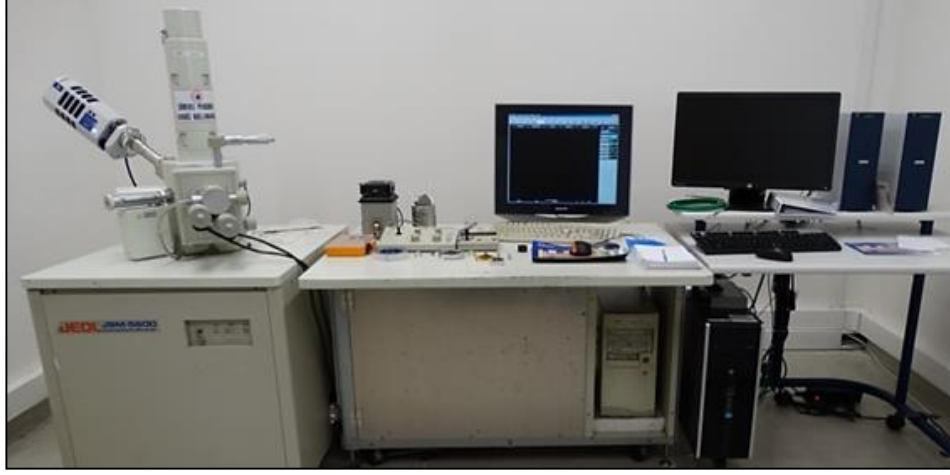


Şekil 4.5 : Nikon Epiphot-200 model optik mikroskop.

İnklüzyon analizlerine yönelik mikroyapı incelemeleri ASTM E-45 ve ASTM E-112 standartlarında belirtilen koşullar dikkate alınarak X100 büyütmede gerçekleştirilmiştir. 1, 2, 3, 4 ve 5 numaralı bölgelerden alınan numuneler optik mikroskopta incelenmiştir.

4.1.3 Taramalı elektron mikroskobu incelemeleri

Optik mikroskop incelemelerinde tespit edilen inklüzyonları karakterize etmek amacıyla, taramalı elektron mikroskobunda görüntüler alınmış ve EDS analizleri gerçekleştirilmiştir. İncelemelerde şekil 4.6'da gösterilen Oxford X-Max 50 EDS ataçmanına sahip JEOL JSM 5600 model taramalı elektron mikroskobu kullanılmıştır. İncelemelerde 15kV ivmelendirme voltajı ve ikincil elektron görüntüleri (SEI) kullanılmıştır.



Şekil 4.6 : JEOL JSM 5600 model tungsten (W) filamanlı taramalı elektron mikroskobu.

4.1.4 Optik emisyon spektrometresi analizleri

Kenar ve merkez bölgelerden alınan numunelerin kimyasal kompozisyonunu belirlemek amacıyla optik emisyon spektrometresi (OES) yöntemi ile kimyasal analizler gerçekleştirilmiştir. Analizler şekil 4.7’de gösterilen “Thermo Scientific ARL-4460” optik emisyon spektrometre cihazında gerçekleştirilmiştir. Her bölgeden 3 adet analiz alınarak ortalamaları hesaplanmıştır



Şekil 4.7 : Thermo Scientific ARL-4460 optik emisyon spektrometresi (OES) cihazı.

4.2 Veri Analizleri

Çelik üretim prosesi parametrelerinin nozul tıkanması problemi üzerindeki etkilerini belirlemek amacıyla “Minitab 17 İstatiksel Veri Yazılımı” ile düşük karbonlu çeliklere ait proses verileri kullanılarak iki değişkenli regresyon analizleri yapılmıştır.

İki değişkenli regresyon analizi, belirli bir proseste girdi parametrelerinin birden çok değişkenlik göstermesine karşın, çıktı parametrelerinin sadece iki seviyede değişkenlik gösterdiği durumlarda tahminleme modeli oluşturmak amacıyla kullanılmaktadır. Bu kapsamda aşağıda belirtilen çelik üretim proses parameterleri analiz edilerek her birinin nozul tıkanma problemi üzerindeki etkisi belirlenmiştir.

- Pota fırınında %P artışı
- Pota fırınında kükürt giderme miktarı
- Pota fırınında briket Al ilavesi
- Pota ara tüp argon basıncı
- Pota fırını başlangıç %S miktarı
- Pota fırını alttan karıştırma süresi
- Pota fırını üstten karıştırma süresi
- Pota fırını işlem süresi
- Pota fırını granüle Al ilave miktarı
- Pota fırını son %Al miktarı
- Pota fırını kireç ilave miktarı
- BOF’tan potaya dökümde kireç ilave miktarı
- Pota fırını son çelik sıcaklığı
- Cürufta %FeO + %MnO miktarı
- Cürufta %Al₂O₃ miktarı
- BOF’tan potaya döküm anında ön deoksidasyon işlemi
- BOF üfleme sonu %C miktarı

4.3 Deney Tasarımı Çalışmaları

Minitab 17 yazılımı ile gerçekleştirilen iki değişkenli regresyon analizleri sonrası proses parametrelerinin nozul tıkanması üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bu parametrelerden 3 adeti işletme koşullarında kontrol edilebilir olarak belirlenmiştir. Belirlenen 3 adet faktör ile 2 seviyeli 10 tekrarlı ful faktöriyel deney tasarımı çalışması yapılmış ve toplamda 80 adet dökümde deneyler yapılması planlanmıştır.

Deney tasarımı yapılmasındaki amaç, belirlenen 3 adet faktörün nozul tıkanması çıktısını minimize edecek optimum seviyelerinin tespit edilmesidir. Bu amaçla, deney tasarımında belirlenen faktörlerin alt ve üst limitleri proses koşulları ve nihai çelik kompozisyonları dikkate alınarak belirlenmiştir. Deney tasarımında kullanılan faktörler ve seviyeleri çizelge 4.1’de verilmiştir. Tasarlanan deney seti de çizelge 4.2’te verilmiştir.

Çizelge 4.1 : Deney tasarımı faktörleri ve seviyeleri.

Faktör	Birim	Düşük	Yüksek
Granül Al Miktarı	Kg	40	80
LF Son Al	%	0,035	0,060
Ara tüp Argon Basıncı	Bar	0,040	0,080

Çizelge 4.2 : Deney seti.

Deney Grubu	LF Granül Al İlavesi (Kg)	LF İşlem Sonu Al (%)	Pota Ara Tüp Argon Basıncı (Bar)
1	80	0,060	0,080
2	40	0,060	0,080
3	40	0,060	0,040
4	80	0,060	0,040
5	80	0,035	0,080
6	40	0,035	0,080
7	40	0,035	0,040
8	80	0,035	0,040

4.4 İşletme Koşullarında Deneyler

Laboratuvar incelemeleri, veri analizleri ve deney tasarımı çalışmaları sonucunda nozul tıkanma problemi üzerinde en etkili ve çelik üretim prosesinde kontrol edilebilecek parametreler ve optimum değerleri belirlenmiştir. Belirlenen değerler ile işletme koşullarında 2100 adet dökümde uzun süreli deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmalarda çizelge 4.3'te belirtilen analiz ve uygulama değişiklikleri yapılmıştır.

Çalışmalar probleminin yaşandığı düşük karbonlu çelik grubunda gerçekleştirilmiştir. İşletme koşullarındaki deneylerde çizelge 4.3'te belirtilen analiz ve uygulama değişiklikleri dışında standart çelik üretim prosedürü uygulanmıştır.

Çizelge 4.3 : Uzun süreli deneylerdeki uygulama değişiklikleri.

Faktör	Mevcut	Yeni
%Al Değeri	0,020 – 0,080	0,020 – 0,050
%S Değeri (max)	0,012	0,015
%C Değeri	0,030 – 0,040	0,030 – 0,050
Granül Al ilavesi (Kg)	0	40
Pota Ara Tüp Ar Basıncı (Bar)	0,040	0,040

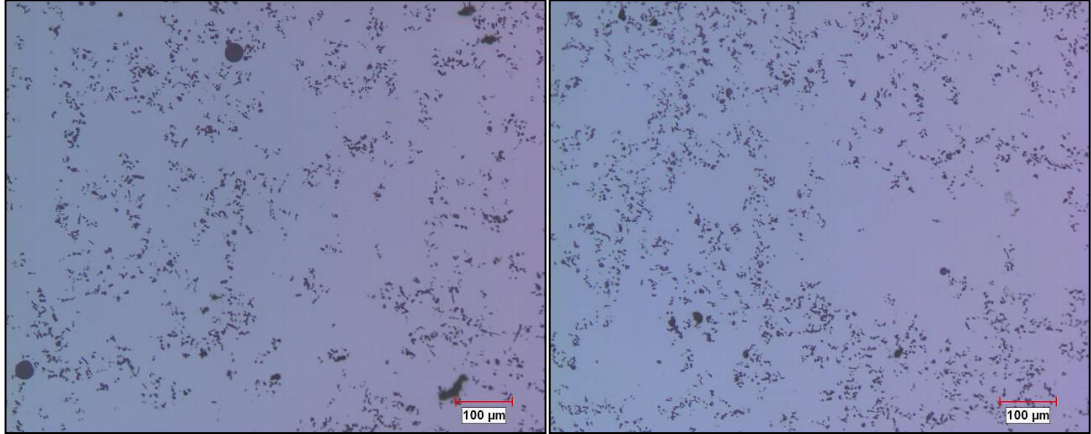
5. SONUÇLAR VE İRDELEME

5.1 Laboratuvar İncelemeleri Sonuçları

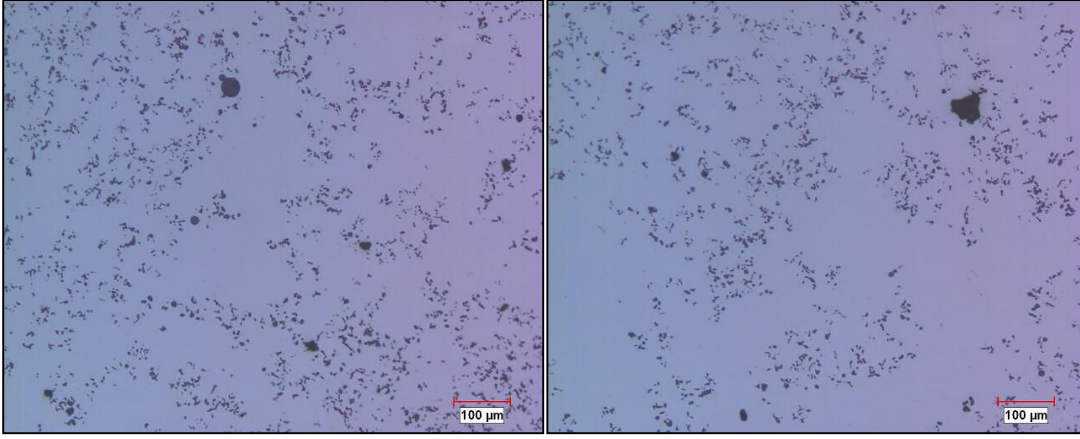
5.1.1 Optik mikroskop incelemeleri

Laboratuvar incelemeleri kapsamında ilk olarak nozul içerisinde katılaşmış çelik bloktan uygun ebatlarda numuneler çıkartılarak, mikro yapı incelemeleri için numune hazırlama işlemine tabi tutulmuştur. Numuneler çelik bloğun nozul duvarına yakın olan bölgelerden ve merkez bölgeden çıkartılmıştır. Yapılan incelemelerde nozul duvarına yakın bölgelerde merkez bölgelere oranla çok daha yüksek miktarda inklüzyon içeriği tespit edilmiştir. Kenar bölgelerde daha yüksek inklüzyon içeriğinin olması, inklüzyonların nozul duvarında tutunarak biriktiğini ve zamanla nozul çapında daralmaya yol açtığını göstermektedir.

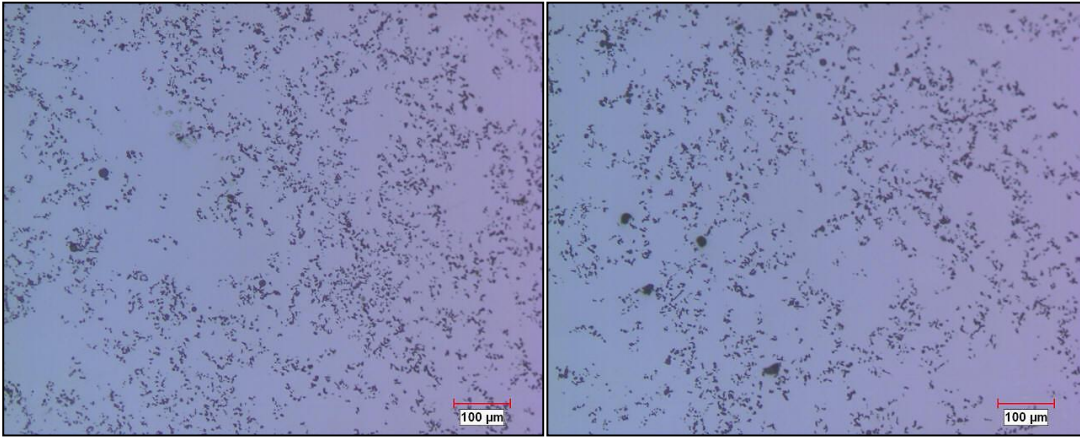
1, 2 ve 3 numaralı bölgelere (kenar bölgeler) ait numunelerin mikroyapı fotoğrafları şekil 5.1, 5.2 ve 5.3’de verilmiştir. 4 ve 5 numaralı bölgelere (merkez bölgeler) ait numunelerin mikroyapı fotoğrafları şekil 5.4 ve 5.5’te verilmiştir.



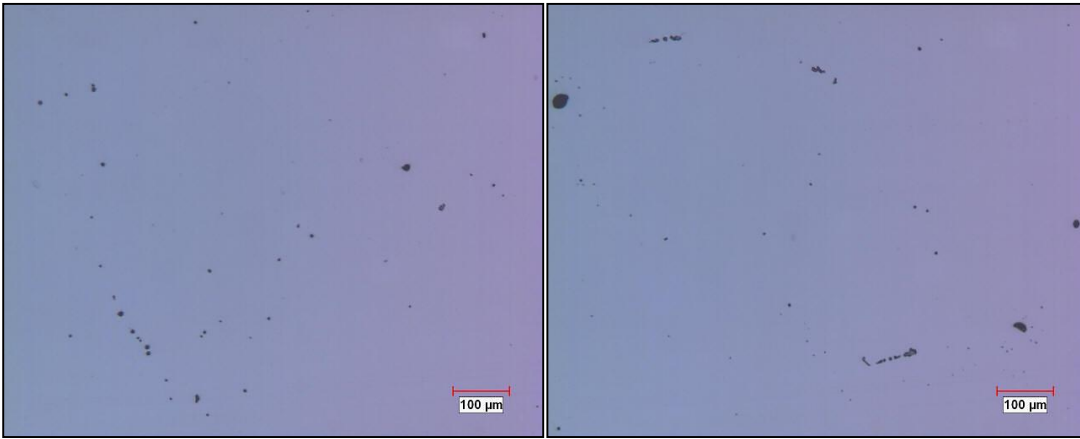
Şekil 5.1 : 1 numaralı bölgeye (kenar) ait mikroyapı fotoğrafları (X100).



Şekil 5.2 : 2 numaralı bölgeye (kenar) ait mikroyapı fotoğrafları (X100).



Şekil 5.3 : 3 numaralı bölgeye (kenar) ait mikroyapı fotoğrafları (X100).



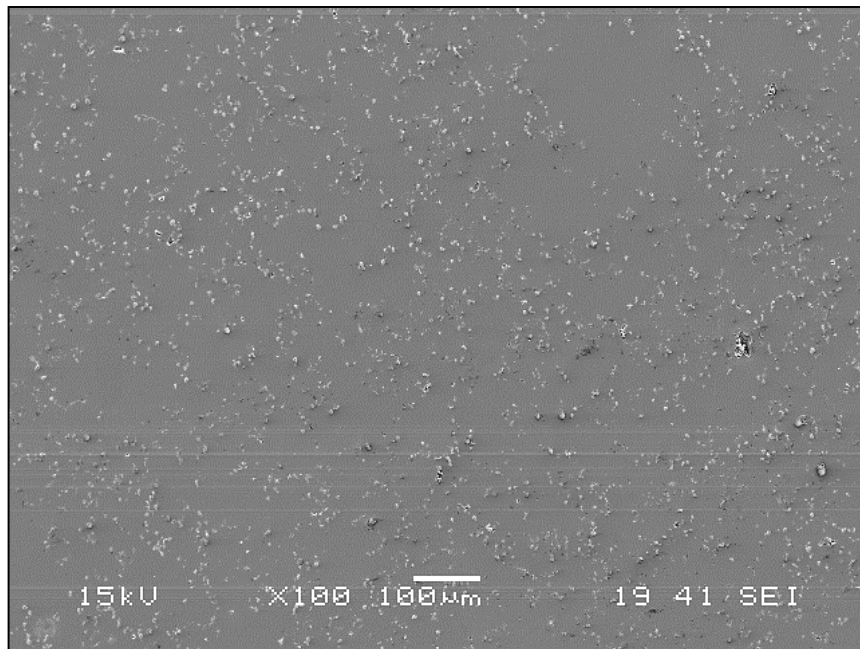
Şekil 5.4 : 4 numaralı bölgeye (merkez) ait mikroyapı fotoğrafları (X100).



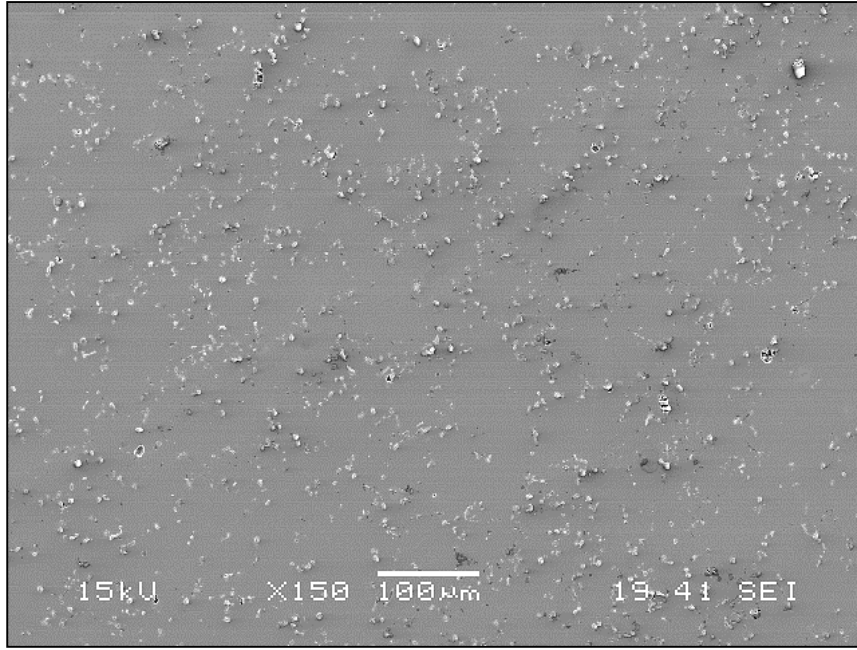
Şekil 5.5 : 5 numaralı bölgeye (merkez) ait mikroyapı fotoğrafları (X100).

5.1.2 Taramalı elektron mikroskobu incelemeleri

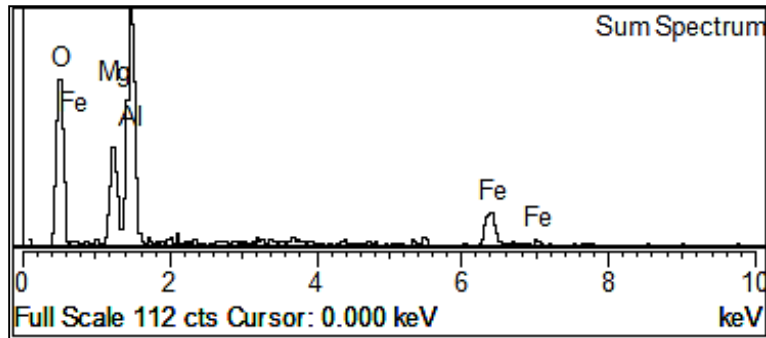
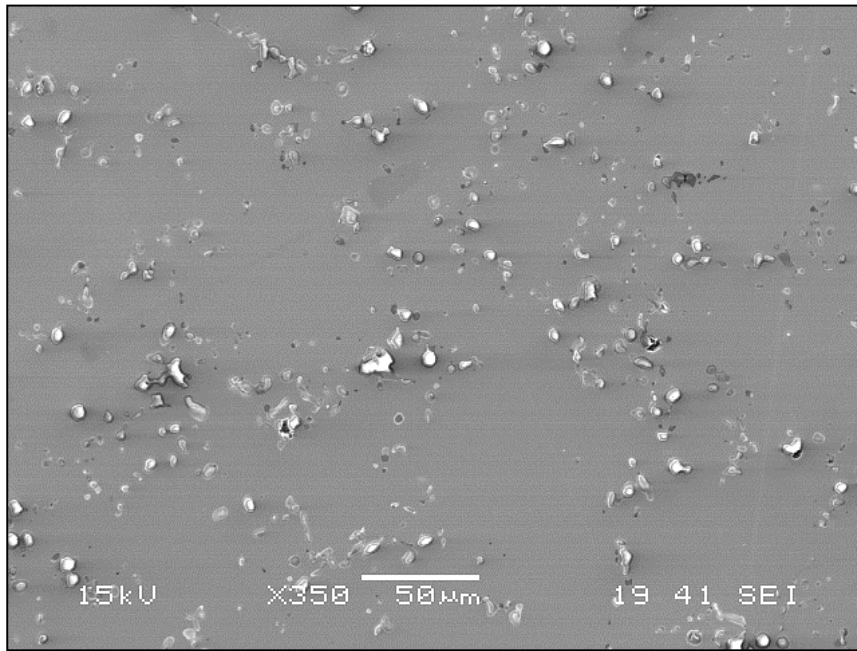
Gerçekleştirilen SEM-EDS analizlerinde yine kenar bölgelerde yüksek miktarda inklüzyonlar olduğu görüntülenmiş ve EDS analizlerinde bu inklüzyonların yoğunlukla Al_2O_3 yer yer de $\text{MgO}.\text{Al}_2\text{O}_3$ (Spinel) tipinde inklüzyonlar olduğu belirlenmiştir. Farklı büyütmelerde yapılan elektron mikroskobu incelemeleri ve EDS analizlerine ait görüntüler şekil 5.6, 5.7, 5.8, 5.9, 5.10, 5.11 ve 5.12’de verilmiştir.



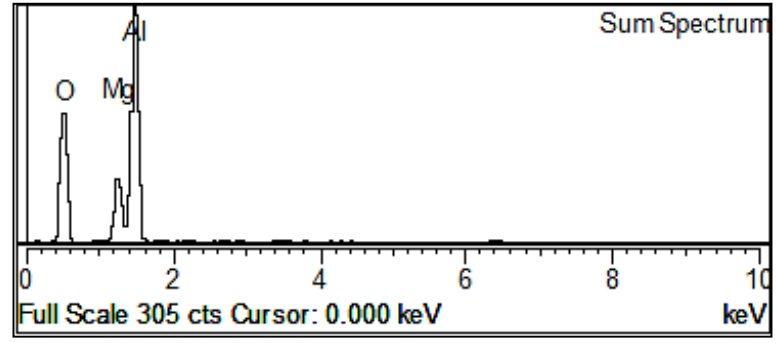
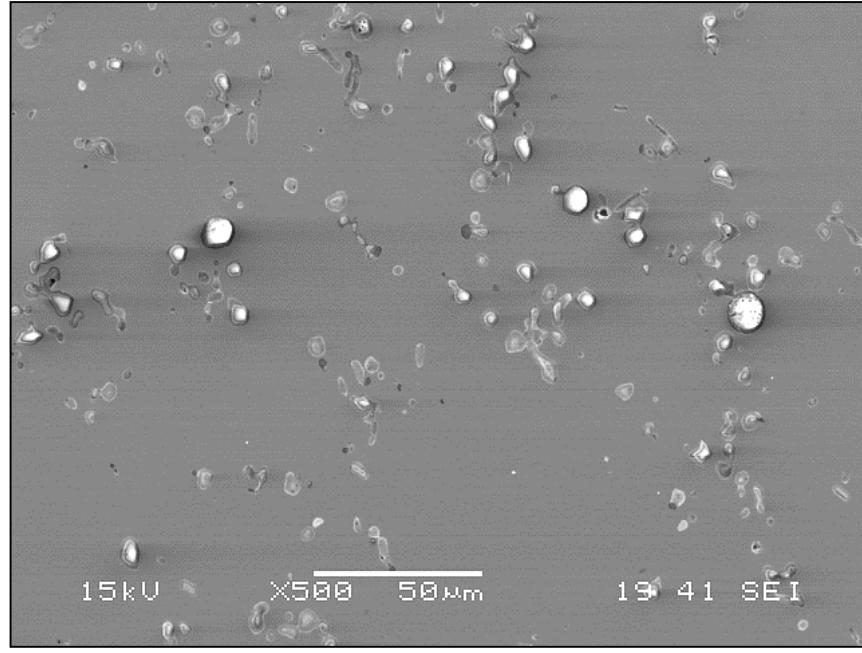
Şekil 5.6 : Kenar bölgeye ait ikincil elektron görüntüsü (SEI-X100).



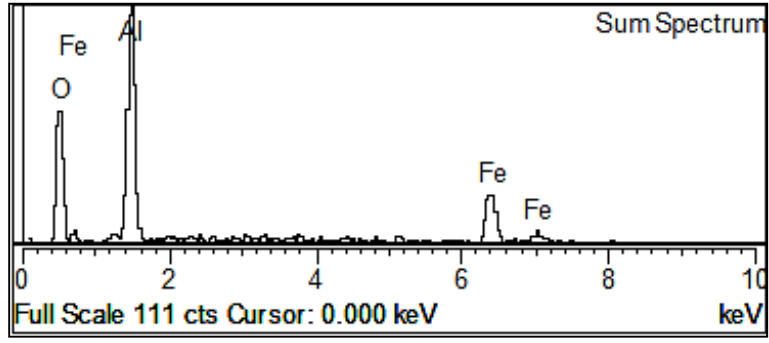
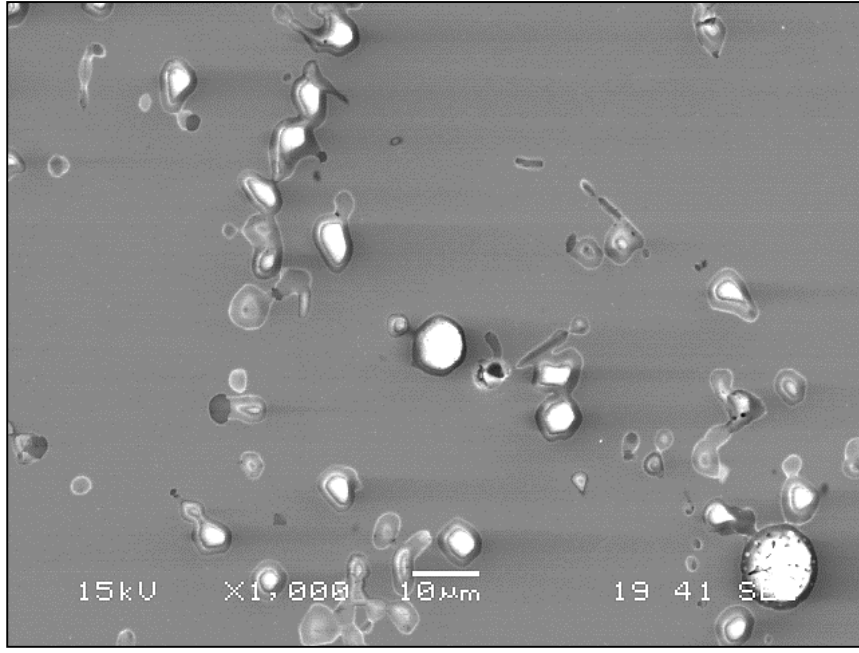
Şekil 5.7 : Kenar bölgeye ait ikincil elektron görüntüsü (SEI-X150).



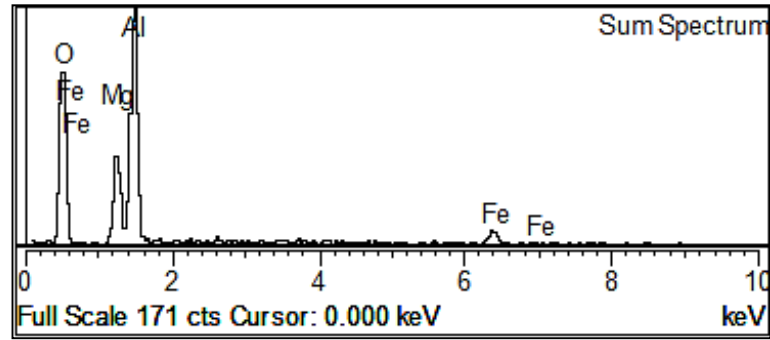
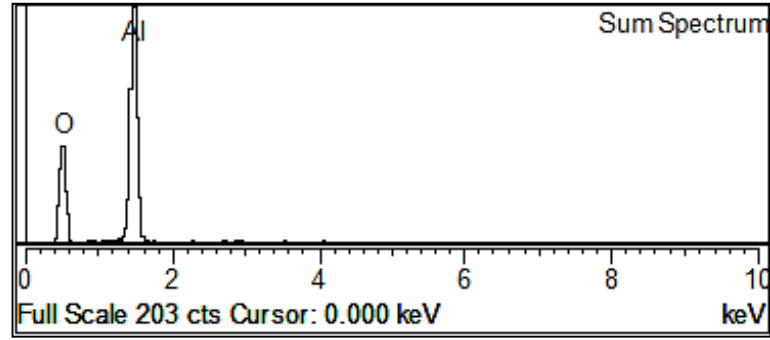
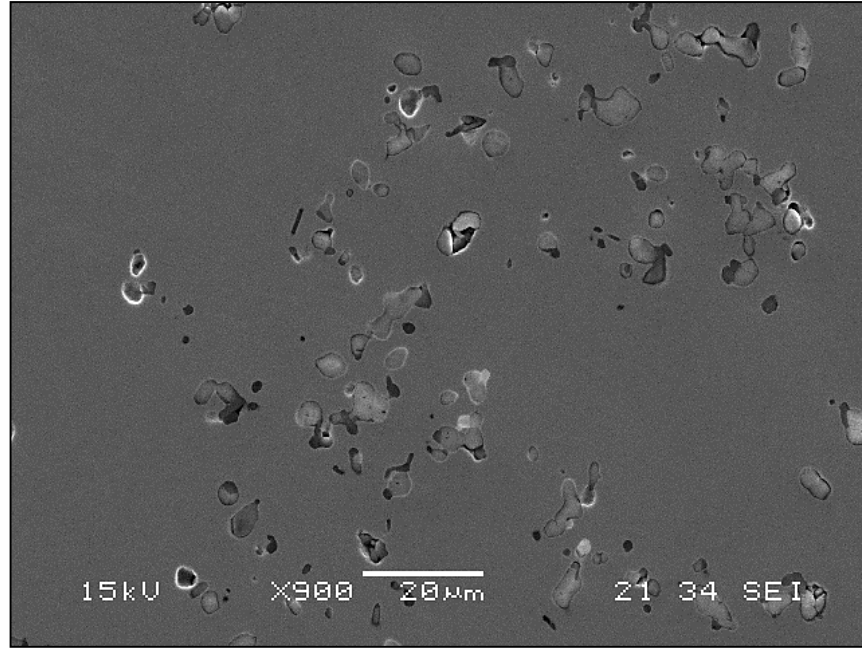
Şekil 5.8 : Kenar bölgeye ait ikincil elektron görüntüsü (SEI-X350) ve EDS analizi.



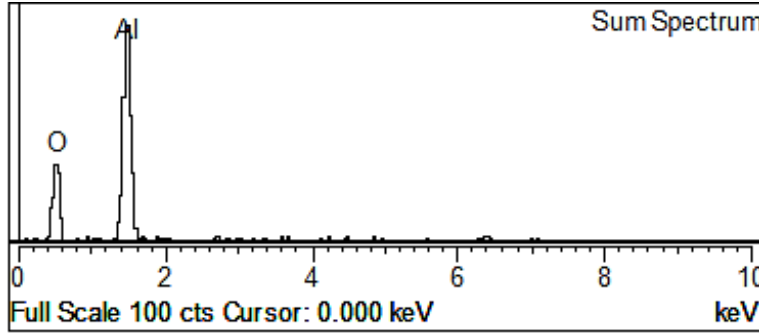
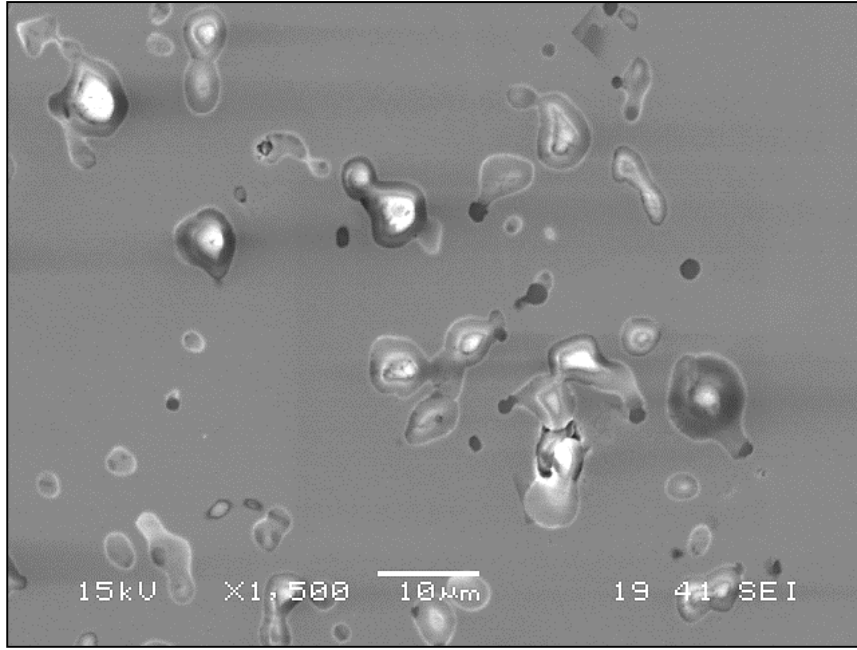
Şekil 5.9 : Kenar bölgeye ait ikincil elektron görüntüsü (SEI-X500) ve EDS analizi.



Şekil 5.10 : Kenar bölgeye ait ikincil elektron görüntüsü (SEI-X1000) ve EDS analizi.



Şekil 5.11 : Kenar bölgeye ait ikincil elektron görüntüsü (SEI-X900) ve EDS analizleri.



Şekil 5.12 : Kenar bölgeye ait ikincil elektron görüntüsü (SEI-X1500) ve EDS analizi.

5.1.3 Optik emisyon spektrometresi analizleri

Kenar ve merkez bölgelerden alınan numuneler üzerinde kimyasal analizler gerçekleştirilmiştir. Yapılan OES analizlerinde nozul kenarına yakın bölgelerde yüksek miktarda Al içeriğine rastlanırken merkez bölgelerde Al içeriğinin çok daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Bu sonuçlar SEM-EDS analizi sonuçları ile örtüşmektedir. Analizlere ait ortalama değerler çizelge 5.1’de verilmiştir.

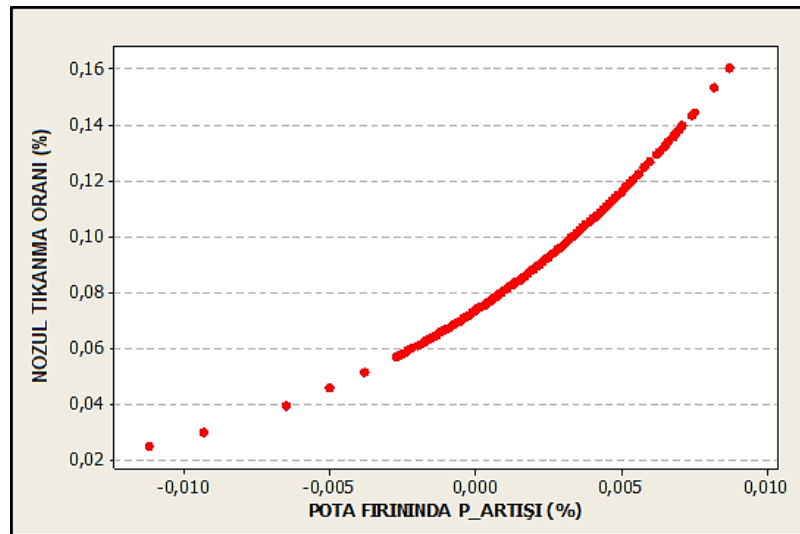
Çizelge 5.1 : OES analizi sonuçları (%Ağ).

Numune No	%C	%Mn	%S	%Al	%Si	%Ca
1	0,41	1,05	0,003	3,28	0,09	0,001
2	0,40	1,09	0,005	2,73	0,09	0,001
3	0,38	1,08	0,004	2,91	0,09	0,000
4	0,35	1,03	0,005	0,05	0,10	0,001
5	0,39	1,07	0,007	0,04	0,07	0,002

5.2 Veri Analizleri Sonuçları

5.2.1 Pota fırınında %P artışı

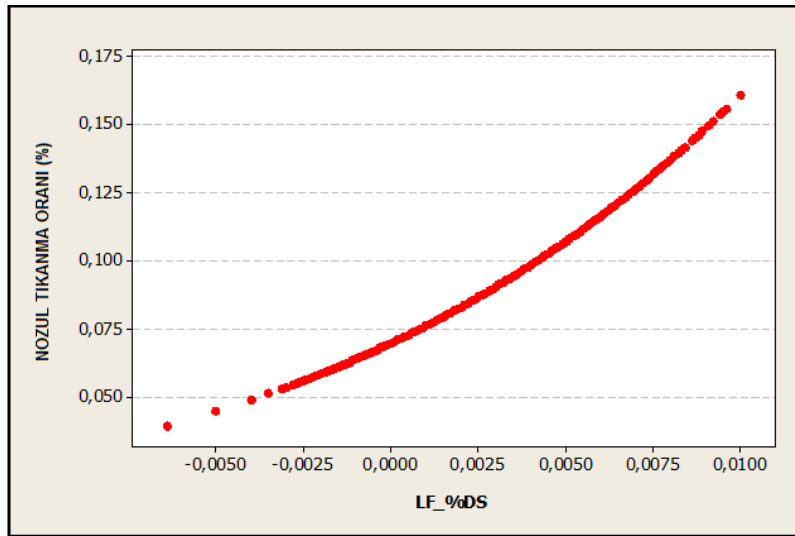
Pota fırınında P artışı BOF'tan potaya kaçan cüruf miktarının göstergesi olarak kabul edilmektedir. Cüruf kaynaklı reoksidasyonun etkisini incelemek amacıyla pota fırınında P artışının nozul tıkanması üzerine etkisi incelenmiştir. İncelemeye ait grafik şekil 5.13'te verilmiştir. P artışı fazla olan durumlarda nozul tıkanma oranında artış olduğu tespit edilmiştir. Konvertörden potaya kaçan cüruf miktarının fazla olması cürufta redüklenebilir oksitlerin fazla olduğu anlamına gelmektedir. Bu durum reoksidasyon kaynaklı inklüzyon oluşumuna neden olmaktadır.



Şekil 5.13 : Pota fırınında P artışının nozul tıkanması üzerindeki etkisi.

5.2.2 Pota fırınında kükürt giderme miktarı

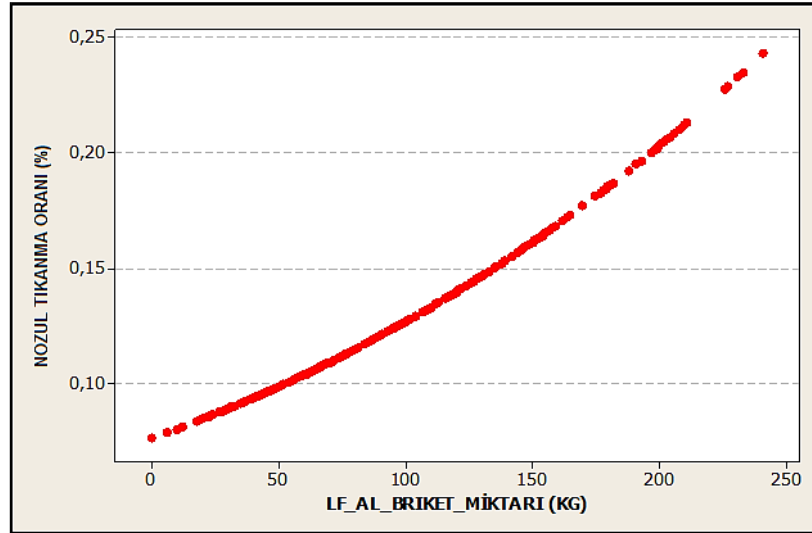
Pota fırınında S giderme miktarının nozul tıkanmasına olan etkisi incelendiğinde, S giderme miktarı fazla olan durumlarda nozul tıkanma riskinin arttığı gözlemlenmiştir. İncelemeye ait grafik şekil 5.14’te verilmiştir. Bu durum, S giderme esnasında şiddetli karıştırmaya bağlı çelik-cüruf etkileşiminin artmasından dolayı çeliğe cüruf karışmasına ve reoksidasyon kaynaklı inklüzyonların oluşmasına sebep olmaktadır. Dolayısı ile pota fırını işlem başında S miktarının düşük olması S giderme ihtiyacını da azaltacak ve bu durumu ortadan kaldıracaktır.



Şekil 5.14 : Pota fırınında kükürt giderme nozul tıkanması üzerindeki etkisi.

5.2.3 Pota fırınında briket Al ilavesi

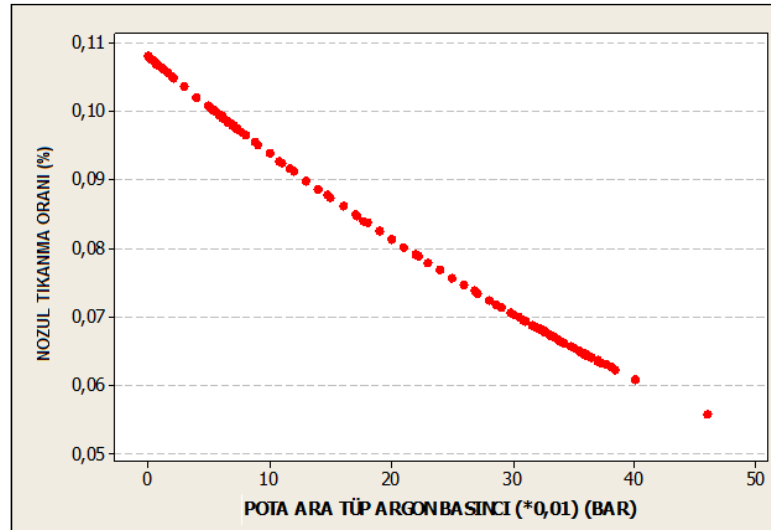
Herhangi bir nedenle deoksidasyonun pota fırınında yapılmak zorunda kalınması durumunda pota fırınında alüminyum ilavesi yapılmaktadır. Pota fırınında Al ilavesi ile nozul tıkanma oranı arasındaki ilişki incelendiğinde ilave miktarındaki artışa bağlı olarak nozul tıkanma riskinin arttığı belirlenmiştir. İncelemeye ait grafik şekil 5.15’te verilmiştir. Pota fırınında yetersiz işlem süresi ve karıştırmanın da etkisi ile birlikte, oluşan deoksidasyon ürünlerinin büyük bir kısmının çelikte kalarak nozul tıkanması riskini arttırmaktadır.



Şekil 5.15 : Pota fırınında briket Al ilavesinin nozul tıkanması üzerindeki etkisi.

5.2.4 Pota ara tüp argon basıncı

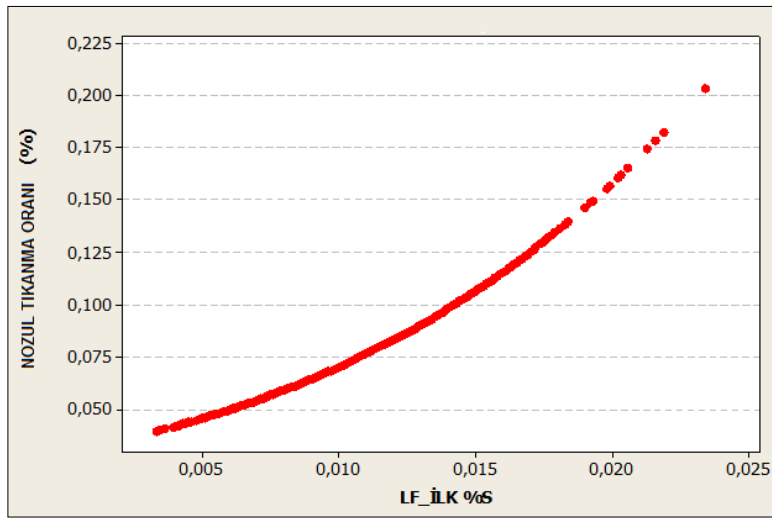
Sıvı çeliğin potadan tandişe akışı esnasında inert ortam sağlanması ve hava ile temasın kesilmesi amacıyla ara tüpe argon tatbik edilmektedir. Pota ara tüp argon basıncı ile nozul tıkanma oranı arasındaki ilişki incelenmiş ve incelemeye ait grafik şekil 5.16’da verilmiştir. Artan argon basıncı ile birlikte nozul tıkanma riskinin düştüğü belirlenmiştir. Bunun sebebi; argon basıncının yetersiz olması durumunda inert ortam ideal şekilde sağlanamamakta ve reoksidasyon kaynaklı inklüzyon oluşumuna sebebiyet vermektedir.



Şekil 5.16 : Pota ara tüp argon basıncı ile nozul tıkanma oranı arasındaki ilişki.

5.2.5 Pota fırını başlangıç %S miktarı

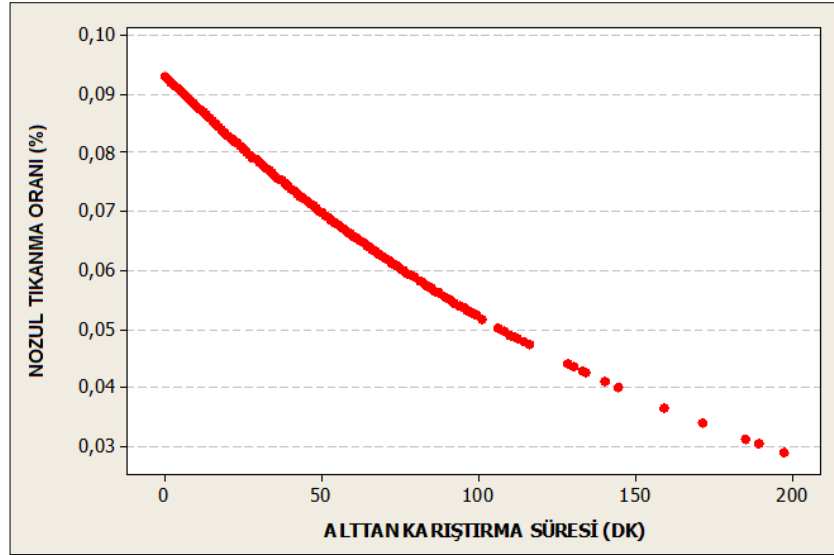
Pota fırını başlangıç %S miktarı ile nozul tıkanma oranı arasındaki ilişki incelenmiştir. İncelemeye ait grafik şekil 5.17’de verilmiştir. Pota fırınında işlem başlangıcında kükürt miktarı yükseldikçe nozul tıkanma riskinin arttığı belirlenmiştir. İşlem başlangıcında S değerinin yüksek olması S giderme ihtiyacı doğurmaktadır. S giderme işlemi esnasında şiddetli karıştırma uygulandığından bu durum çelik temizliğini olumsuz etkilemekte ve nozul tıkanmasına sebebiyet vermektedir.



Şekil 5.17 : Pota fırını başlangıç %S miktarı ile nozul tıkanma oranı arasındaki ilişki.

5.2.6 Pota fırını alttan karıştırma süresi

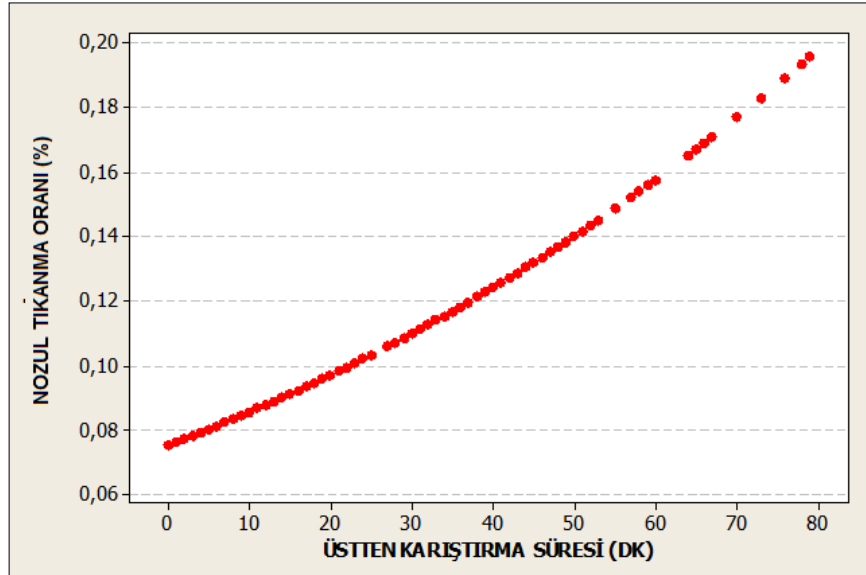
Pota fırınında alttan karıştırma sıvı çelikten inklüzyon uzaklaştırmak için uygulanan yöntemlerden biridir. Bu noktadan hareketle, pota fırını alttan karıştırma süresi ile nozul tıkanma oranı arasındaki ilişki incelenmiştir. İncelemeye ait grafik şekil 5.18’de verilmiştir. Altan karıştırma süresi arttıkça çelikten uzaklaştırılan inklüzyon oranı da artacağından nozul tıkanma riskinin azaldığı belirlenmiştir.



Şekil 5.18 : Pota fırını alttan karıştırma süresinin nozul tıkanması üzerinde etkisi.

5.2.7 Pota fırını üstten karıştırma süresi

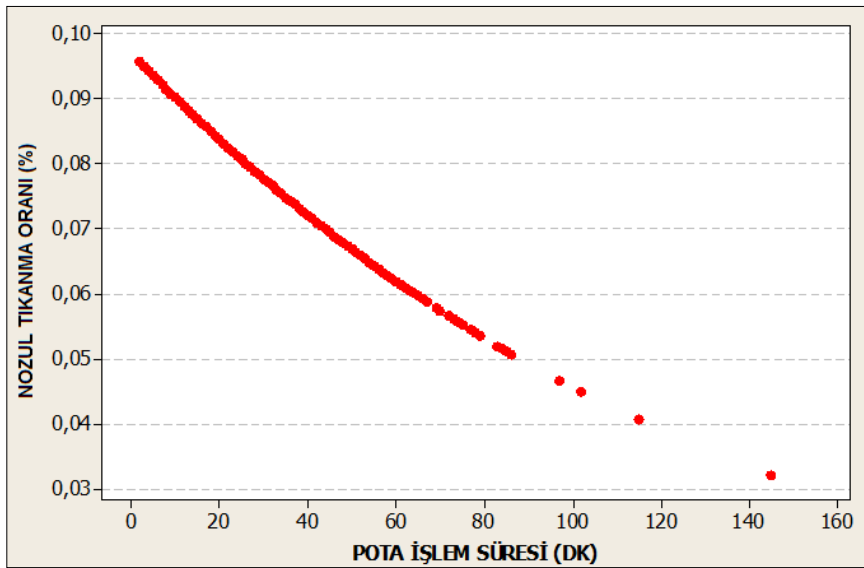
Pota fırınında üstten karıştırma ile nozul tıkanma oranı arasındaki ilişki incelenmiştir. İncelemeye ait grafik şekil 5.19’da verilmiştir. Pota fırınında üstten karıştırma çelik-cüruf etkileşiminin artmasına bağlı olarak reoksidasyon kaynaklı inklüzyon oluşumunu artıran bir faktördür. Bu nedenle üstten karıştırma süresi arttıkça nozul tıkanma riski artmaktadır.



Şekil 5.19 : Pota fırını üstten karıştırma süresinin nozul tıkanması üzerinde etkisi.

5.2.8 Pota fırını işlem süresi

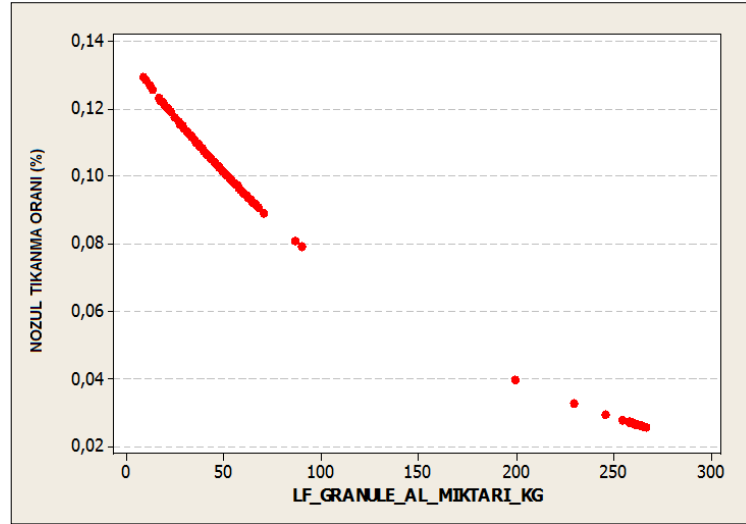
Pota işlem süresi ile nozul tıkanma oranı arasındaki ilişki incelenmiştir. İncelemeye ait grafik şekil 5.20’de verilmiştir. Pota işlem süresi çelikten inklüzyon uzaklaştırmada en önemli faktörlerden biridir. İşlem süresinin yeterli olmaması durumunda pota fırınında uygulanması gereken tüm işlemler aksamakta, çeliğin dinlenmesi için yeterli zaman kalmamakta ve çelik temizliği istenilen seviyede sağlanamamaktadır. Bu nedenle işlem süresi arttıkça nozul tıkanma riski düşmektedir.



Şekil 5.20 :Pota fırını işlem süresi ile nozul tıkanma oranı arasındaki ilişki.

5.2.9 Pota fırını granüle Al ilave miktarı

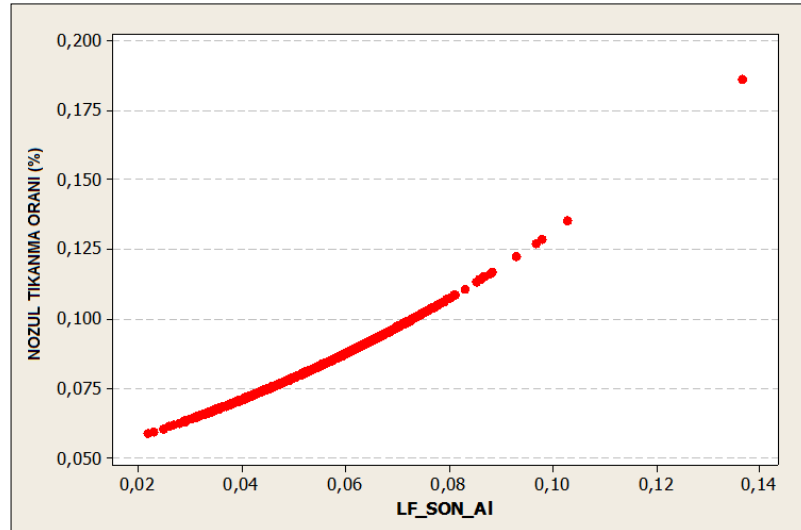
Pota fırını granüle Al ilave miktarı ile nozul tıkanma oranı arasındaki ilişki incelenmiştir. İncelemeye ait grafik şekil 5.21’de verilmiştir Pota fırınında granüle Al cüruf deoksidasyonunu sağlamak amacıyla cüruf yüzeyine ilave edilmektedir. Yeterli cüruf deoksidasyonu yapılamaması durumunda sıvı çelikte reoksidasyon kaynaklı inklüzyon oluşum riski artmaktadır. Bu sebeple ideal şekilde cüruf deoksidasyonu yapıldığı durumlarda nozul tıkanma riski azalmaktadır.



Şekil 5.21 : Pota fırını granüle Al ilave miktarı ile nozul tıkanma oranı arasındaki ilişki.

5.2.10 Pota fırını son %Al miktarı

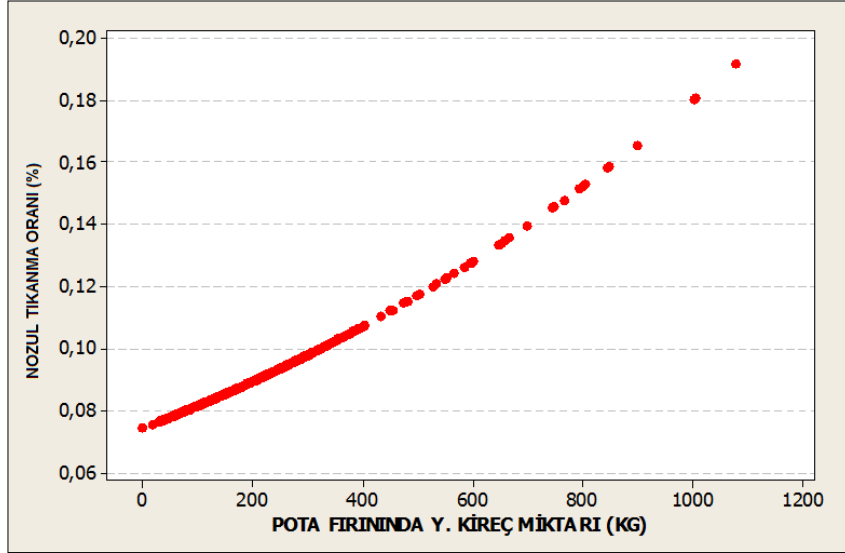
Pota fırını son Al miktarı ile nozul tıkanma oranı arasındaki ilişki incelenmiştir. İncelemeye ait grafik şekil 5.22’de verilmiştir. Pota fırını işlem sonunda çelikte bulunan Al miktarının nozul tıkanması üzerindeki etkisi analiz edildiğinde yüksek Al değerlerinin nozul tıkanma riskini arttırdığı belirlenmiştir. Kolay oksitlenebilir Al elementinin yüksek miktarlarda bulunması, reoksidasyon kaynaklı inklüzyon oluşumu riskini de arttırmaktadır. Bu nedenle yüksek Al içeriğinin nozul tıkanma problemini tetikleyen faktörlerden biri olarak karşımıza çıkmaktadır.



Şekil 5.22 : Pota fırını son Al miktarı ile nozul tıkanma oranı arasındaki ilişki.

5.2.11 Pota fırını kireç ilave miktarı

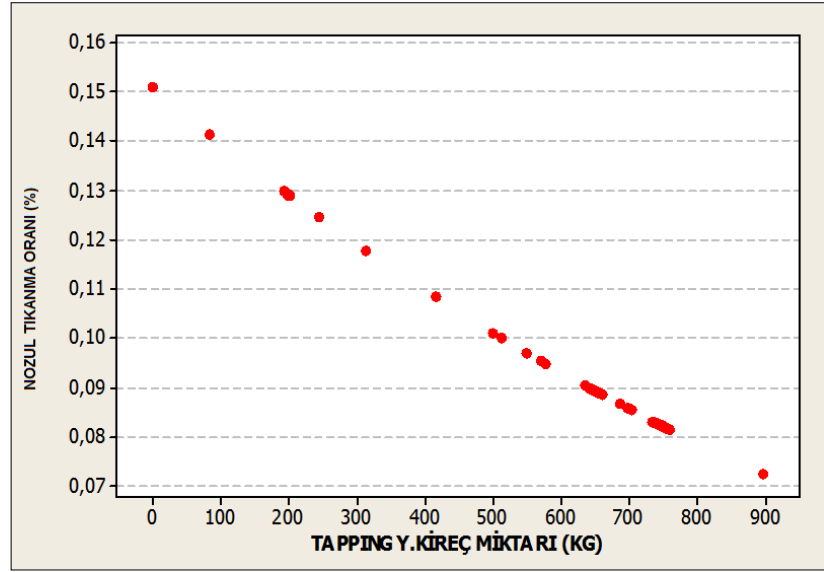
Pota fırınında kireç ilave miktarı ile nozul tıkanma oranı arasındaki ilişki incelenmiştir. İncelemeye ait grafik şekil 5.23'te verilmiştir. Pota fırınında yüksek miktarlarda yapılan kireç ilavesi çelik-cüruf etkileşimini arttırmakta ve çelik temizliğini olumsuz etkilemektedir buna bağlı olarak da nozul tıkanma riskini arttırmaktadır.



Şekil 5.23 : Pota fırınında kireç ilave miktarı ile nozul tıkanma oranı arasındaki ilişki.

5.2.12 BOF'tan potaya dökümde kireç ilave miktarı

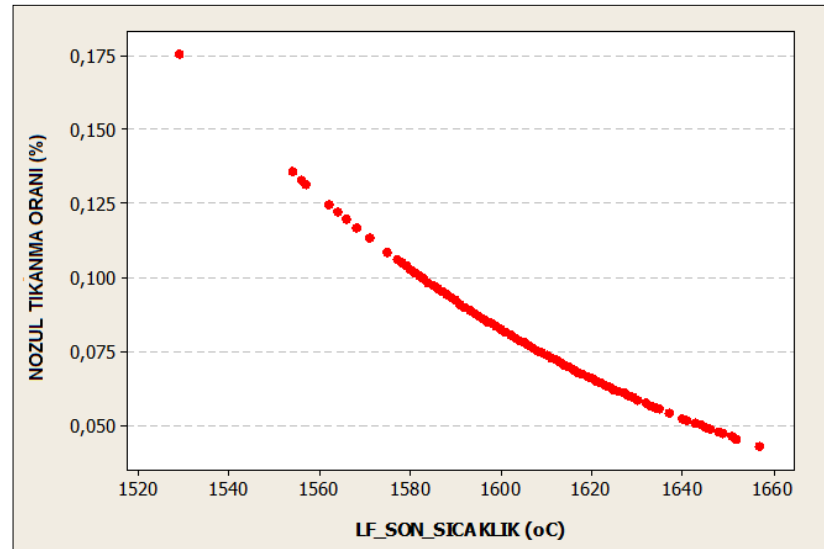
Cüruf oluşturulması amacıyla gerekli olan kireç miktarının BOF'tan potaya döküm alınması esnasında ilave edilmesi ile nozul tıkanma oranı arasındaki ilişki incelenmiştir. İncelemeye ait grafik şekil 5.24'te verilmiştir. Gerek duyulan kireç ilavesinin konvertörden potaya döküm esnasında yapılması durumunda, pota fırınında kireç ilavesi yapılmayacağından nozul tıkanma riskinin düştüğü belirlenmiştir.



Şekil 5.24 : Dökümde kireç ilave miktarı ile nozul tıkanma oranı arasındaki ilişki.

5.2.13 Pota fırını son çelik sıcaklığı

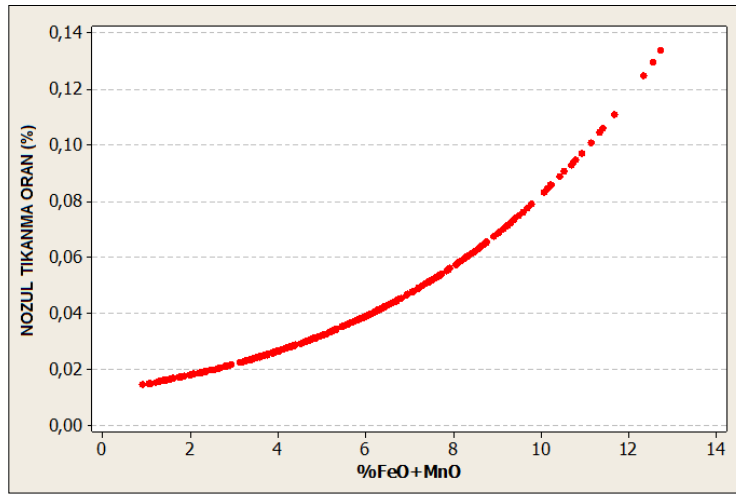
Pota fırını işlem sonu çelik sıcaklığı ile nozul tıkanma oranı arasındaki ilişki incelenmiştir. İncelemeye ait grafik şekil 5.25'te verilmiştir. Pota fırınında işlem sonu çelik sıcaklığı çeliğin sürekli dökümde kalıba ulaşmadan katılaşmasını engelleyecek seviyede olması gerekmektedir. Belirli kritik sıcaklığın altında kalınması çeliğin proseste katılaşma riskini arttırmaktadır. Bu nedenle çelik sıcaklığı düştükçe katılaşmaya bağlı nozul tıkanma riski artmaktadır.



Şekil 5.25 : Pota fırını işlem sonu çelik sıcaklığı ile nozul tıkanma oranı arasındaki ilişki.

5.2.14 Cürufta FeO+MnO miktarı

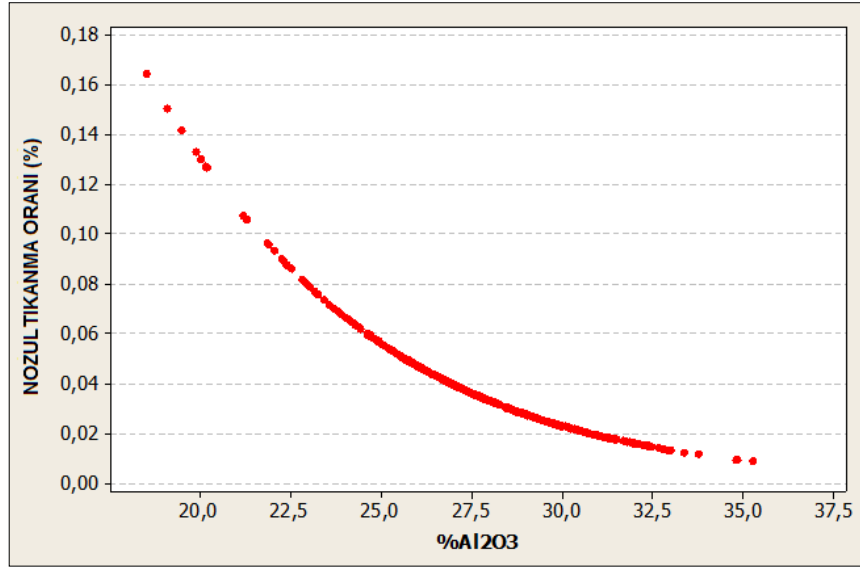
Cürufta bulunan redüklenabilir oksitlerin (%FeO + %MnO) toplamı ile nozul tıkanması arasındaki ilişki analiz edilmiştir. İncelemeye ait grafik şekil 5.26'da verilmiştir. Pota fırını cürufunda, konvertörden potaya döküm esnasında kaçan cüruf miktarına bağlı olarak %(FeO+MnO) içeriği artmaktadır. Cürufta bulunan bu tip redüklenebilir oksitler, reoksidasyon kaynaklı inklüzyonların oluşumuna neden olmakta ve çelik temizliğini olumsuz etkilemektedir. Bu nedenle nozul tıkanma riskini arttırmaktadır.



Şekil 5.26 : Cürufta %FeO+%MnO miktarı ile nozul tıkanma oranı arasındaki ilişki.

5.2.15 Cürufta Al₂O₃ miktarı

Yapılan veri analizi ile cürufta bulunan %Al₂O₃ ile nozul tıkanma oranı arasındaki ilişki incelenmiştir. İncelemeye ait grafik şekil 5.27'de verilmiştir. Pota fırını cürufunda Al₂O₃'ün kaynağı, deoksidasyon ürünü ve alümina içerikli cüruf yapıcı ilavesidir. Kükürt giderme ve çelik temizliği açısından pota fırını cürufunda bulunması gereken ideal %Al₂O₃ oranı %28-32 aralığıdır. Cürufta Al₂O₃ oranının yüksek olması çelikteki Al₂O₃ inklüzyonlarının uzaklaştırıldığı anlamına gelmektedir bu nedenle cürufta %Al₂O₃ oranı arttıkça nozul tıkanma riski azalmaktadır.

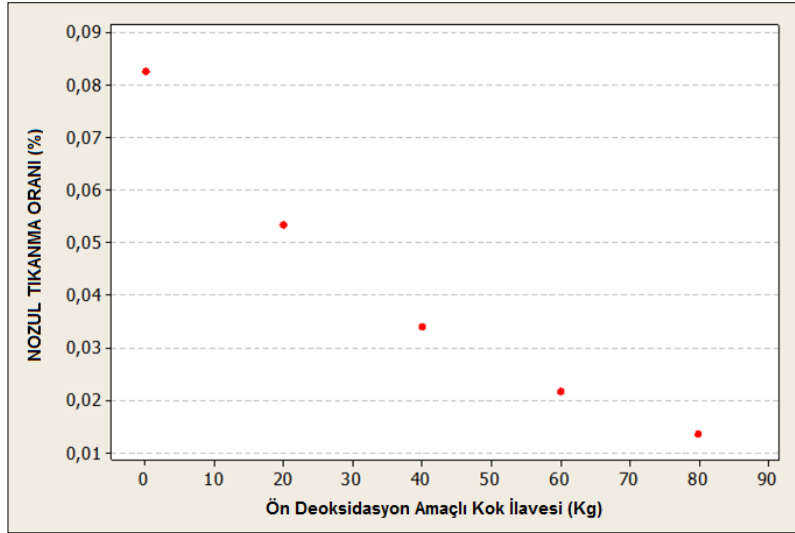


Şekil 5.27 : Cürufta %Al₂O₃ miktarı ile nozul tıkanma oranı arasındaki ilişki.

5.2.16 BOF'tan potaya döküm anında ön deoksidasyon işlemi

Ön deoksidasyon amacı ile ilave edilen kok miktarı ile nozul tıkanması arasındaki ilişki incelenmiştir. Analize ait grafik şekil 5.28'de verilmiştir. İlave edilen kok miktarı arttıkça nozul tıkanma riskinin azaldığı belirlenmiştir.

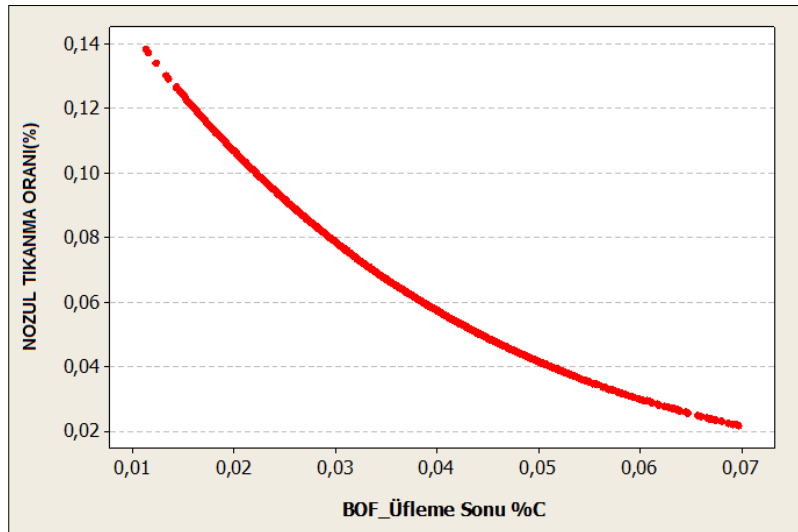
Deoksidasyon pratiğinin çelik temizliği üzerinde oldukça önemli etkisi bulunmaktadır. Alüminyum ile deokside edilen çeliklerde deoksidasyon ürünü olarak Al₂O₃ inklüzyonları oluşmaktadır. Spesifikasyondaki %C değerine bağlı olarak, deoksidasyon işlemine katkıda bulunmak ve alüminyum tüketimini azaltmak amacıyla karbon ile ön deoksidasyon işlemi uygulanabilmektedir. Sonucunda deoksidasyon sonucu oluşacak Al₂O₃ inklüzyonlarının da azalması beklenmektedir. Bu nedenle ön deoksidasyon işleminin çelik temizliğine olumlu katkısı bulunmaktadır.



Şekil 5.28 : Ön deoksidasyon amaçlı ilave edilen kok miktarı ile nozul tıkanması arasındaki ilişki.

5.2.17 BOF üfleme sonu %C miktarı

BOF üfleme sonu %C miktarı ile akış kesilmesi arasındaki ilişki incelenmiştir. Analize ait grafik şekil 5.29’da verilmiştir. Düşük karbonlu çeliklerin spesifikasyon %C değeri düşük olduğu için BOF prosesinde sert üfleme yapılması gerekmektedir. Sert üfleme ise üfleme sonu oksijen miktarını artıran bir faktördür. Artan oksijen miktarı da fazla alüminyum tüketimi ve dolayısıyla fazla Al_2O_3 inklüzyonları anlamına gelmektedir. Bu nedenle BOF üfleme sonu %C değeri düşüğe nozul tıkanma riski artmaktadır.



Şekil 5.29 : Üfleme sonu %C ile nozul tıkanması arasındaki ilişki.

5.3 Deney Tasarımı Kapsamında Yapılan Deneylerin Sonuçları

Deney tasarımı çalışması kapsamında işletme koşullarında 80 adet deney gerçekleştirilmiştir. Deney grupları ve deneylerde karşılaşılan nozul tıkanma miktarları çizelge 5.2’de belirtilmiştir.

Çizelge 5.2 : Deney tasarımı deneylerine ait nozul tıkanma adetleri.

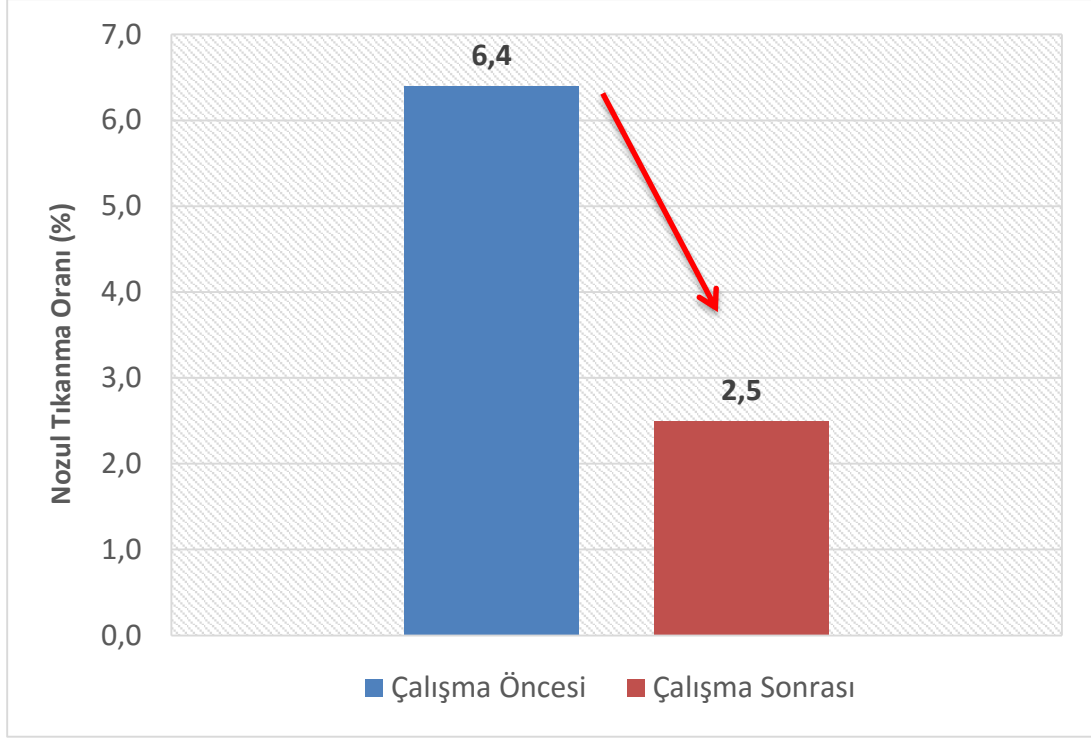
Deney Grubu	LF Granül Al İlavesi (Kg)	LF İşlem Sonu Al (%)	Pota Ara Tüp Argon Basıncı (Bar)	Nozul Tıkanma Miktarı
1	80	0,060	0,080	4
2	40	0,060	0,080	2
3	40	0,060	0,040	2
4	80	0,060	0,040	3
5	80	0,035	0,080	1
6	40	0,035	0,080	0
7	40	0,035	0,040	0
8	80	0,035	0,040	0

Deney tasarımı kapsamında yapılan deney sonuçlarına göre 6, 7 ve 8 nolu deney gruplarında nozul tıkanması gerçekleşmemiştir. Çelik temizliği, işletme pratikleri ve maliyetler düşünüldüğünde pota fırını %Al değerinin 0,040, granül Al ilave miktarının 40 kg ve pota ara tüp argon basıncının 0,040 bar olduğu 7 no’lu deney grubu hem maliyet açısından hem proses verimi açısından en ideal durum olarak belirlenmiştir.

5.4 İşletme Koşullarında Yapılan Uzun Süreli Deneylerin Sonuçları

Laboratuvar incelemeleri, veri analizleri ve deney tasarımı çalışmaları sonucunda nozul tıkanma problemi üzerinde en etkili, ve çelik üretim prosesinde kontrol edilebilecek parametreler ve optimum değerleri belirlenmiştir. Akabinde çizelge 4.3’te belirtilen çelik temizliğini arttırıcı analiz ve uygulama değişiklikleri yapılarak 2100

adet dökümde deneyler gerçekleştirilmiştir. Değişiklikler öncesi durum ile revizyonlar sonrasındaki durum kıyaslandığında, çelik temizliğini arttırmaya yönelik yapılan değişiklikler ile birlikte nozul tıkanma probleminin %6,4'ten %2,5'e gerileyerek %60 oranında iyileşme kaydettiği belirlenmiştir. Çalışma öncesi ve sonrası nozul tıkanma oranlarındaki değişim şekil 5.30'da verilmiştir.



Şekil 5.30 : Çalışma öncesi ve sonrası nozul tıkanma oranları.

6. GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada düşük karbonlu çeliklerin sürekli dökümünde meydana gelen pota nozulu tıkanma probleminin kök sebeplerinin belirlenmesi ve önlenmesine yönelik olarak laboratuvar incelemeleri, veri analizleri ve deney tasarımı çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda optimum parametreler ile işletme koşullarında uzun vadeli çalışmalar yapılmıştır.

Laboratuvar incelemeleri sonucunda nozul tıkanmasına neden olan ana sebebin çelikte bulunan ve çelik üretim sıcaklıklarında katı formda bulunan metalik olmayan inklüzyonlar olduğu belirlenmiştir. Bu durum, çelik temizliğinin nozul tıkanması probleminde önemli faktör olduğunu göstermektedir.

Çelik temizliği kaynaklı nozul tıkanma probleminin çözümünde en etkili yöntemin kalsiyum işlemi olduğu yapılan birçok çalışma ile ispatlanmış ve çelik sektöründe yaygın olarak kullanılan bir yöntem olmuştur. Kalsiyum işlemi uygulaması her ne kadar etkili bir yöntem olsa da maliyetler ve işletme kısıtları nedeniyle her çelik grubunda tercih edilmemektedir. Genel itibari ile çelik temizliğinin büyük önem arz ettiği katma değeri yüksek özellikle otomotiv sektörüne yönelik çeliklerde hassasiyetle uygulanmaktadır. Fakat ticari çelikler grubunda kalsiyum işlemi uygulanması durumunda oluşacak maliyetin karşılanması pek mümkün gözükmemektedir. Ayrıca çelik üretim prosesindeki yoğun üretim temposu nedeniyle bu çelik grubunda kalsiyum işlemi için gerekli ideal zaman ayırlanamamaktadır. Bu sebeple bu çalışmada kalsiyum işlemi uygulamadan çelik üretim prosesinde yapılacak değişiklikler ve iyileştirmeler ile çelik temizliğinin artırılması amaçlanmıştır. Bu doğrultuda çelik üretim prosesindeki farklı parametrelerin çelik temizliğine ve nozul tıkanmasına olan etkilerini belirlemek amacıyla veri analizleri ve deney tasarımı gerçekleştirilmiştir. Öncelikle çelik temizliğine etki edebilecek 17 adet faktör üzerinde iki değişkenli regresyon analizleri yapılmıştır.

Yapılan veri analizleri ile çelik üretim prosesindeki birçok faktörün nozul tıkanma problemi üzerindeki etkileri belirlenmiştir. Ardından işletme koşullarında kontrol edilebilir faktörler esas alınarak deney tasarımı yapılmış ve deney seti oluşturulmuştur

ve belirlenen parametrelerle işletme koşullarında 80 adet deney gerçekleştirilmiştir. Deney tasarımı kapsamında yapılan deneyler sonucunda belirlenen 3 faktörün en ideal seviyeleri belirlenmiştir.

Veri analizleri ve deney tasarımı sonucunda elde edilen optimum değerler dikkate alınarak işletme koşullarında uzun süreli deneyler gerçekleştirilmiştir. Belirlenen değişiklikler ile gerçekleştirilen uzun süreli deneyler sonucunda; çalışma öncesi %6,4 olan nozul tıkanma oranının uzun süreli deneylerde %2,5 değerine gerilediği ve %60'a yakın oranda iyileşme sağlandığı belirlenmiştir. Nozul tıkanması problemindeki iyileşmeye bağlı olarak yıllık bazda sağlanabilecek maliyet tasarrufu kalemleri hesaplanmıştır. Nozul tıkanması kaynaklı hurda miktarı, üretim kaybı ve alüminyum tüketimi kalemleri dikkate alınarak yapılan hesaplamalarda, çalışmanın yapıldığı düşük karbonlu çelikler grubunda yıllık 1.1 milyon USD tasarruf sağlanabileceği hesaplanmıştır. Maliyet kalemleri ve yıllık projeksiyon değerleri çizelge 6.1'de verilmiştir.

Çizelge 6.1 : Maliyet tablosu.

Gider Kalemi	Birim	Çalışma Öncesi	Deney Süreci	Kazanç (USD)
Hurda	Ton / Yıl	1,976	31	300,000
Üretim Kaybı	Dk / Yıl	3,441	396	330,000
Alüminyum Tüketimi	Kg / Yıl	984	742	500,000
TOPLAM 1,130,000 \$/yıl				

Yapılan çalışmalar, nozul tıkanması problemi üzerinde çelik temizliğinin çok önemli etkileri bulunduğunu göstermektedir. Çelik üretim prosesinde ise çelik temizliğini etkileyen birçok faktörün bulunduğu bu tez çalışmasında incelenerek belirtilmiştir.

Alüminyum ile deokside edilmiş düşük karbonlu çelik grubunda çelik temizliğini arttırmak ve nozul tıkanması probleminin önüne geçebilmek amacıyla bu çalışma ile belirlenen tespitler doğrultusunda alınabilecek tedbirler ve öneriler aşağıda özetlenmiştir.

- Çelikteki %Al değerinin standartlar dâhilinde minimize edilmesi
- Düşük karbonlu çeliklerde spesifikasyondaki %C üst değerinin arttırılması
- Düşük karbonlu çeliklerde spesifikasyondaki %S üst değerinin arttırılması
- BOF'tan potaya döküm esnasında kok ile ön deoksidasyon uygulanması
- Pota fırınında cüruf deoksidasyonun gerçekleştirilmesi (40 kg granül Al)
- Pota ara tüp argon basıncının en az 0,04 bar olması
- Pota fırınında mümkün olduğunca az S giderme işlemi uygulanması
- Deoksidasyon işleminin pota fırınında Al ilavesine gerek kalmayacak şekilde BOF'tan potaya döküm esnasında tamamlanması
- Pota fırını başlangıcında S miktarının mümkün oldukça düşük tutulması
- Pota fırını alttan karıştırma süresinin mümkün oldukça uzun tutulması
- Pota fırını üstten karıştırma işleminden mümkün oldukça kaçınılması
- Pota işlem süresinin uzun tutulması (en az 20 dk.)
- Cüruf için gerekli kireç ilavesinin BOF'tan potaya döküm esnasında yapılması ve pota fırınında mümkün oldukça kireç ilavesi yapılmaması
- Pota fırını cürufunda indirgenebilir oksitlerin minimum seviyede tutulması ($\%FeO + \%MnO < \%4$)
- Yüksek inklüzyon kapasitesine sahip bir cüruf oluşturulması ($\%50-55 CaO + \%28-32 Al_2O_3$)

KAYNAKLAR

- [1] **Li S., Zuo X., Peng K., Wang Y., Zhang L.,** (2009). Investigation on Ladle Nozzle Clogging During Steel Pouring Process, Proceedings of AISTech 2009 Iron & Steel Technology Conference and Exposition, Vol.II, AIST, Warrandale, PA, 589-600.
- [2] **Choudhary S. K., Halder J., Bhanu C., Jha R. K., Ghosh A.,** (2006). Evaluation of Deoxidation Practice for Optimal Inclusion Morphology, Tata Steel Limited, Jamshedpur, India, 303-308.
- [3] **Fera S., Harloff A., Roedl S.,** (2005). Development of a Model Predicting Inclusions Precipitation in Nozzles Based on Chemical Composition and Process Parameters Such as Casting Rate, Liquid Temperature, Nozzle Design and Slag Composition, European Commission, Technical Steel Research, Final Report.
- [4] **Vermeulen Y., Coletti B., Blanpain B., Wollants P., Vleugels J.,** (2002). Material Evaluation to Prevent Nozzle Clogging During Continuous Casting of Al Killed Steels, ISIJ International, Vol. 42, No. 11, 1234–1240.
- [5] **Kovacic M., Jurjovec B., Krajnc L.,** (2013). Ladle Nozzle Opening and Genetic Programming, Computer Methods in Materials Science, Informatyka w Technologii Materialów, Vol. 13, No. 1, 147-152.
- [6] **Chang L., Kuo Y., Hsienchou W., Kao C.,** (2009). Clogging Mechanism of Ladle Nozzle in Bloom Casting, China Steel Technical Report, No.22, 13-17.
- [7] **Seetharaman S., McLean A., Guthrie R., Sridhar S.,** (2014). Treatise On Process Metallurgy, Vol. 3, Industrial Processes, Part A, 231-238.
- [8] **Gündoğan B.,** (2014). Slab Kalite Çeliklerin Üretim Sürecinde Deoksidasyon Malzemelerinin Kullanım Uygulamaları ve Maliyete Etkisi (Yüksek lisans tezi).
- [9] **Freuhan, R. J.,** (1998). The Making, Shaping and Treating of Steel, 11th Edition Steelmaking and Refining Volume, Chapter 9, 475, 478-485, 496-499.
- [10] **Freuhan, R. J.,** (1998). The Making, Shaping and Treating of Steel, 11th Edition Steelmaking and Refining Volume, Chapter 7, 417-418.
- [11] **Barker K. J., Paules J. R., Rymarchyk N., Jancosko R. M.,** (1998). Oxygen Steelmaking Furnace Mechanical Description and Maintenance Considerations.
- [12] **Türkdoğan E. T.,** (1996). Fundamentals of Steelmaking, The Institute of Materials, USA, 220, 231-237.
- [13] **Fruehan, R. J. ,** (1985). Ladle Metallurgy Principles and Practices, Iron &Steel Society, USA, 2-4, 5-6, 8.

- [14] **Bartos R.**, (2012). Steel Manual, Verlag Stahleisen GmbH, Duesseldorf, Chapter 5.
- [15] **Senk D., Schwerdtfeger K.**, (2015). Continuous Casting of Steel, Scientific and Practical Approaches, International VDEh-Seminar Notes, Cologne, Germany.
- [16] **Cramb A. W.**, (2003). The Making, Shaping and Treating of Steel, 11th Edition Casting Volume, Chapter 1, 11-12.
- [17] **Cramb A. W.**, (2003). The Making, Shaping and Treating of Steel, 11th Edition Casting Volume, Chapter 5, 1-5.
- [18] **Hoh B. et. al.**, (1998). Improvement of Cleanliness in Continuous Casting, Fourth International Conference on Continuous Casting Proceedings.
- [19] **Ogibayashi S. et. al.**, (1992). Mechanism and Countermeasure of Alumina Buildup on Submerged Nozzle in Continuous Casting, 75th ISS Steelmaking Conference Notes, Toronto, Canada.
- [20] **Fix W., Jacobi H., Wünnenberg K.**, (1993). Collision-controlled Growth of Composites in Casting Nozzles, Steel Research, Vol. 64, No. 1, 71-76.
- [21] **Szekeres E. S.**, (1992). Review of Strand Casting Factors Affecting Steel Product Cleanliness, 4th International Conference on Clean Steel, Balatonszéplak, Hungary.
- [22] **Shin Y. K. et. al.**, (1988). Construction and Start-up of a Billet Caster at Pohang Works, Ironmaking and Steelmaking, Vol. 15, No. 3, 143-149.
- [23] **Singh S. N.**, (1974). Mechanism of Alumina Buildup in Tundish Nozzles During Continuous Casting of Aluminum-Killed Steels, Metallurgical Transactions, Vol. 5, 2165-2178.
- [24] **Cameron S. R.**, (1992). The Reduction of Tundish Nozzle Clogging During Continuous Casting at Dofasco, 75th ISS Steelmaking Conference, Toronto, Canada.
- [25] **Tai M. C., Chen C. H., Chou C. L.**, (1985). Development and Benefits of Four-Port Submerged Nozzle for Bloom Continuous Casting, London, England.
- [26] **Szekely J., DiNovo S. T.**, (1974). Thermal Criteria for Tundish Nozzle or Taphole Blockage, Metallurgical Transactions, Vol. 5, 747-754.
- [27] **Fukuda Y., Ueshima Y., Mizoguchi S.**, (1992). Mechanism of Alumina Deposition on Alumina Graphite Immersion Nozzle in Continuous Caster, ISIJ International, Vol. 32, 164-168.
- [28] **Lührsen E. et. al.**, (1991). Boron Nitride Enrichment of the Submerged Entry Nozzles: A Solution to Avoid Clogging, 1st European Conference on Continuous Casting, Florence, Italy.
- [29] **Holappa, L., Hele A.S.**, (1995). Inclusion Control in High-Performance Steels, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 53, 177-86.
- [30] **Ghosh, A.**, (2000). Secondary Steelmaking Principles and Applications, Clean Steel Technology, Part 10, USA.
- [31] **Millman, S.**, (2004). IISI Study on Clean Steel, Corus, U.K.

- [32] **Bonilla, C.**, (1995) Slivers in Continuous Casting, 78th Steelmaking Conference Proceedings, Vol. 78, page 41-45, Warrendale, USA.
- [33] **Posch, W.**, (1998). Treatment Methods During Tapping and in Ladle, Clean Steel State of Art and in Ladle, Voestalpine, Austria.
- [34] **Coletti, B., Gommers, B., Vercruyssen, C., Blanpain, B., Wollants, P., Haers, F.**, (2003). Reoxidation During Ladle Treatment, Ironmaking and Steelmaking, Vol. 30, No. 2, 101-105.
- [35] **Zhang, L., Thomas, B.G.**, (2003). State of the Art in Evaluation and Control of Steel Cleanliness, ISIJ International, Vol. 43, No. 3, 271-291.
- [36] **Carlos, J., Garcia, A.**, (2004). Modification of oxide inclusions present in aluminum killed low carbon steel by addition of calcium, Revista Escola de Minas, Vol. 57, No.3,183-189.
- [37] **Dekkers, R.**, (2002). Non Metallic Inclusions in Liquid Steels, PhD Thesis, Katholieke Universiteit Leuven, Belgium.
- [38] **Conejo, A. N., Hernández, D. E.**, (2005). Analysis of Aluminum Deoxidation Practice in the Ladle Furnace, AISTech 2005 Proceedings, Vol. 1, 947-961.
- [39] **Cicutti, C., Valdez, M., Perez, T., Ares, R., Panelli, R., Petroni, J.**, (2001). Optimisation of Calcium Treatment to Improve Castability, Steel Making Conference Proceedings, Argentina.
- [40] **Zhang, L., Thomas, B.G., Wang, X., Kaike, C.**, (2002). Evaluation and Control of Steel Cleaness, 85th Steelmaking Conference Proceedings, ISSAIME, Warrendale, PA, USA.
- [41] **Freuhan, R. J., Carmb, A. W.**, (2004). Clean Steel Technology Short Course, University Holiday Inn, Pittsburgh, U.S.A.
- [42] **Freuhan, R.J.**, (1985). Ladle Metallurgy Principles and Practices, Iron and Steel Society, U.S.A.
- [43] **Das, N. K., Sen N., Ghosh, M. and Sau, R.**, (2005). Effect of simultaneous addition of CaO–Al₂O₃ flux and CaSi on the modification of inclusions in aluminium-killed steel, Scandinavian Journal of Metallurgy, Vol. 34, 278-280.
- [44] **Blais, C., L’EspCrance, G., Hoang, L., Forget, C.**, (1997). Development of an Integrated Method for Fully Characterizing Multiphase Inclusions and Its Application to Calcium-Treated Steels, Materials Characterization, Vol. 38, 26-34.
- [45] **Kor, G. J. W., Glaws, P. C.**, (1999). Ladle Refining and Vacuum Degassing, Chapter 11, Steel Making and Refining Volume,11th Edition, U.S.A.
- [46] **Kiessling, R.**, (1980). Clean Steel-a debatable concept, Metal Science, Vol. 14, No. 5.
- [47] **Singh, V., Lekakh, S., Martinez, E., Peaslea, K.**, (2009). AIST Steel Properties & Applications Conference Proceedings, Materials Science and Technology, Inclusions and Steel Properties: General Session, 223-235.

- [48] **Kato, T.**, (1986). Stirring in the Steelmaking Processes, commemoration of his receiving G. Watanabe Medal in the 11th ISIJ Meeting on April 2, The University of Tokyo in Tokyo, Japan.
- [49] **Url-1** <<http://www.factsage.com>>, 2016

ÖZGEÇMİŞ



Ad Soyad : Zafer Çetin
Doğum Yeri ve Tarihi : Kdz. Ereğli – 26.08.1988
E-Posta : zafercetin67@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2012, Yıldız Teknik Üniversitesi, Kimya-Metalurji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği
- **Yükseklisans** : 2016, İstanbul Teknik Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, Malzeme Mühendisliği.

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- Haziran 2014 - ... : Ereğli Demir ve Çelik Fab. T.A.Ş, ARGE Direktörlüğü, Proje Yöneticisi

TEZDEN TÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- Çetin Z., Alan E., Öztürk C., Kaçar Y., Gündüz O., 2016. Investigation of Ladle Nozzle Clogging Problem in ULC Steel Grades at Continuous Casting Process, 18th International Metallurgy and Materials Congress, 29 Sept. – 01 Oct., Istanbul, Turkey.
- Çetin Z., Öztürk C., Kaçar Y., Demirhan U., Kocabaş T., 2015. Reducing of Ladle Nozzle Clogging Problem in Continuous Casting Process, 2nd International Iron and Steel Symposium, 1-3 April, Karabük, Turkey.

DİĞER YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- Çetin Z., Alan E., Yamantürk Y., Çimen D., Kaçar Y., Gündüz O., 2016. Development of V-N Microalloyed High Yield Strength Steel For Automotive Applications, The 10th International Rolling Conference and the 7th European Rolling Conference, 6-9 June, Graz, Austria.
- Ekmekçi N., Keskin İ., Çetin Z., 2015. Microstructural Alterations in Electrical Discharge Machining of Nitrogen and Vanadium Alloyed Steels, The Advances in Materials and Processing Technologies Conference, 14-17 December, Madrid, Spain.