

152321

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**İKİNCİL ÇELİK ÜRETİMİNDE KÜKÜRT GİDERME
VE ÇELİK KALİTESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Maden Müh. Mehmet Gökhan ÖZAKSOY
(506001301)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 11 Haziran 2004
Tezin Savunulduğu Tarih : 12 Mayıs 2004

Tez Danışmanı : Prfof. Dr. M. Ercan AÇMA (İ.T.Ü.)
Diğer Jüri Üyeleri Prof.Dr. Kelami ŞEŞEN (İ.T.Ü.)
Prof.Dr. Fatma ARSLAN (İ.T.Ü.)

[Handwritten signatures of Prof. Dr. M. Ercan AÇMA, Prof. Dr. Kelami ŞEŞEN, and Prof. Dr. Fatma ARSLAN]

HAZİRAN 2004

ÖNSÖZ

Bu çalışmayı gerçekleştirmemde bana hem maddi hem manevi destek veren, tez danışmanım ve sevgili hocam Prof. Dr. M. Ercan AÇMA'ya çok teşekkür ederim.

Beni yetiştiren ve bu çalışmayı yapmamda bana her konuda destek olan, yurt içi ve yurt dışı çelik sektöründe 25 yılı aşkın süre çalışmış, ülkemizde Pota Metalurjisinin ilk uygulamasını gerçekleştiren kişilerden sevgili babam Ali İhsan ÖZAKSOY'a minnettarım. Her zaman onu örnek aldığımı belirtmek isterim. Tüm yaşantım ve okul hayatım boyunca bana her zaman karşılıksız sevgi ve desteklerini sunan sevgili annem Sadiye ÖZAKSOY'a, ablam Nagi'ye ve ikiz kardeşim Ahmet'e çok teşekkür ederim.

Ayrıca, benim bu mesleği seçmemde ve ilerlememde en önemli etkiye sahip Kroman Çelik Sanayi A.Ş. Fabrika Müdürü Sayın Levent PEKUYSAL'a çok teşekkür ederim.

Çalışmalarımı yürüttüğüm işletmede, benimle her türlü bilgilerini ve dostluğunu paylaşan, Kroman Çelik Sanayi A.Ş. Çelikhane Müdürü Sayın Orhan KURAN'a çok teşekkür ederim. Başta tüm bölüm şeflikleri olmak üzere diğer tüm Kroman Çelik Sanayi A.Ş. çalışanlarına da teşekkürü borç bilirim.

İlk metalurji bilgilerini aldığım ve Metalurji Mühendisliğinde yüksek lisans eğitimimi her zaman destekleyen Maden Mühendisliği bölümü lisans tez danışman hocam Prof. Dr. Fatma ARSLAN'a çok teşekkür ederim. Ayrıca, bu tez çalışmasına ışık tutan ilk çelik bilgilerini edindiğim sevgili hocam Prof. Dr. Kelami ŞEŞEN'e de teşekkürlerimi sunuyorum.

Çalışmalarımın, eleştiri ve görüşleriyle şekillenmesine yardımcı olan Araş. Gör. Şeref Sönmez, Araş. Gör. Serdar AKTAŞ, Araş. Gör. C. Fahir ARISOY ve Araş. Gör. Cüneyt Gürcan'a da teşekkürlerimi sunuyorum.

Sevgili dostum Ali ÖZTÜRK'e ve arkadaşım Hilal E. ERSİN'e beni hiçbir zaman yalnız bırakmadıkları için teşekkür ederim.

NİSAN 2004

Mehmet Gökhan ÖZAKSOY

İÇİNDEKİLER

KISALTMALAR	vi
TABLO LİSTESİ	vii
ŞEKİL LİSTESİ	viii
SEMBOL LİSTESİ	xi
ÖZET	xii
SUMMARY	xiii
1. GİRİŞ VE AMAÇ	1
2. TEORİK BİLGİLER	3
2.1. Hurdanın Önemi	3
2.2. Elektrik Ark Ocağı Ergitmesi	6
2.3. Pota Metalurjisi - Sekonder Metalurji	7
2.3.1. Deoksidasyon	10
2.3.1.1. EAO'dan Döküm Alma Öncesi Sıvı Çeliğin Oksijen Çözünürlüğü	12
2.3.1.2. Mn ile Deoksidasyon	14
2.3.1.3. Si ile Deoksidasyon	15
2.3.1.4. Si - Mn ile Deoksidasyon	16
2.3.1.5. Al ile Deoksidasyon	17
2.3.1.6. Deoksidasyon Sonucu Oluşan Kalıntılar (İnklüzyonlar)	19
2.3.2. Desülfürizasyon	23
2.3.2.1. CaO (Sönmemiş Kireç) Kullanımı	25
2.3.2.2. CaF ₂ (Fluşpat) Kullanımı	25
2.3.2.3. İnert Gaz (Ar) Altında Karıştırma	25
2.3.2.4. Pota Ocağı Sentetik Curufu ve Desülfürizasyon ile İlişkisi	27
2.3.2.5. Ca Tel Uygulaması ile İnklüzyon Şekil Kontrolü	31
2.4. Sürekli Döküm Prosesi	32
2.4.1. Genel Prensipler	32
2.4.1.1. Potadan Tandişe Döküm	34
2.4.1.2. Tandışten Kalıba Döküm	36
2.4.2. Sürekli Döküm Prosesinin Ana Bileşenleri	36
2.4.2.1. Pota Kaldırma ve Yönlendirme Sistemleri	36
2.4.2.2. Pota Tareti	36
2.4.2.3. Tandış	37
2.4.2.4. Kalıp	38
2.4.2.5. Sekonder Soğutma (Püskürtme Suları)	43
2.4.2.6. Elektro Manyetik Karıştırma (EMS)	45
2.4.2.7. Eğme - Doğrultma ve Kesme	46
2.4.3. Sürekli Döküm Prosesinde Isı Transferi	47
2.4.3.1. Katı Kabuk ile Kalıp Duvarı Arasında Hava Boşluğunun Oluşumu	49
2.4.4. Sürekli Döküm Prosesinde Katılaşma	50
2.4.4.1. Çil Bölgesi	53

2.4.4.2. Kolonsal (Dendrit) Bölge	54
2.4.4.3. Eş Eksenli Bölge	54
2.4.4.4. Katılma Sırasında Çeliğin Mekanik Özellikleri	55
2.4.5. Sürekli Döküm Makinesi Parametreleri	58
2.4.5.1. Tandış ve Pota Sıcaklıklarının Belirlenmesi	58
2.4.5.2. Tandış Nozülü Seçimi	59
2.4.5.3. Bakır Kalıp	60
2.4.5.4. Osilasyon	60
2.4.5.5. Kalıp Soğutması	61
2.4.5.6. Sekonder Soğutma	61
2.4.6. Sürekli Döküm Prosesinde Kütüklerde Meydana Gelen Kusurlar	62
2.4.6.1. Yüzey Gaz Boşlukları	63
2.4.6.2. Boyuna Yüzey Köşe Çatlağı	64
2.4.6.3. Enine Yüzey Köşe Çatlağı	66
2.4.6.4. Osilasyon İzi	67
2.4.6.5. İç Yapı Köşe Çatlağı	68
2.4.6.6. Diyagonal Çatlak	70
2.4.6.7. Merkezi Çatlak	71
2.4.6.8. Yarıyol Çatlağı	72
2.4.6.9. İç Yapı Gaz Boşluğu	73
2.4.6.10. Rombiklik	74
2.4.6.11. Depresyon	75
3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	77
3.1. Kullanılan Malzemeler	78
3.2. Kullanılan Alet ve Cihazlar	78
3.3. DeneySEL Yöntem	83
4. DENEY SONUÇLARI	84
4.1. Desülfürizasyon Oranına Etki Eden Parametreler	84
4.1.1. İşlem Süresinin Etkisi	85
4.1.2. Sıvı Çeliğin Serbest Oksijen Değerinin Etkisi	86
4.1.3. Curuf Bazikliğinin Etkisi	86
4.1.4. Curuf İçindeki FeO Miktarının Etkisi	87
4.1.5. Curuf İçindeki Al ₂ O ₃ Miktarının Etkisi	88
4.1.6. Al Dros Kullanımının Etkisi	89
4.2. Kütüklerin Makro Yapılarının Gözlemlenmesi	91
4.2.1. İç Yapı Gaz Boşluğu İncelemesi	91
4.2.1.1. Sıvı Çelik Serbest Oksijen İçeriğinin Etkisi	91
4.2.1.2. Çelik Azot ve Oksijen İçeriği Toplamının Etkisi	92
4.2.2. Rombiklik İncelemesi	94
4.2.2.1. %C İçeriğinin Etkisi	94
4.2.2.2. %S İçeriğinin Etkisi	94
4.2.2.3. Çeliğin Mn/S Oranının Etkisi	95
4.2.2.4. Döküm Sırasındaki Aşırı Isı Miktarının Etkisi	96
4.2.3. İç Yapı Köşe Çatlağı İncelemesi	96
4.2.3.1. %S İçeriğinin Etkisi	97
4.2.3.2. Çeliğin Mn/S Oranının Etkisi	98
4.2.3.3. Döküm Sırasındaki Aşırı Isı Miktarının Etkisi	100
4.2.3.4. Sekonder Soğutma Bölgesi Spesifik Su Tüketim Miktarının Etkisi	101

5. DENEY SONUÇLARININ İRDELENMESİ	103
6. GENEL SONUÇLAR	107
KAYNAKLAR	109
ÖZGEÇMİŞ	111



KISALTMALAR

EAO	: Elektrik Ark Ocağı
PO	: Pota Ocağı
SDM	: Sürekli Döküm Makinesi
EBT	: Eccentric Bottom Tapping
HMS	: Heavy Melting Scrap
DC	: Direct Current
AC	: Alternative Current
VD	: Vacuum Degassing
VOD	: Vacuum Oxygen Decarburization
IGP	: Inert Gas Purging
IM	: Injection Metallurgy
VAD	: Vacuum Arc Degassing
LF	: Ladle Furnace
BOF	: Basic Oxygen Furnace
NST	: Negative Strip Time
EMS	: Electro Magnetic Stirring
M – EMS	: Mould Electro Magnetic Stirring
S – EMS	: Strand Electro Magnetic Stirring
F – EMS	: Final Electro Magnetic Stirring
M+F – EMS	: Mould and Final Electro Magnetic Stirring
LIT	: Liquid Impenetrable Temperature
ZDT	: Zero Ductility Temperature
ZST	: Zero Strength

TABLO LİSTESİ

	Sayfa No
Tablo 2.1. Ark ocaklı bir tesiste istenen hurda özellikleri.....	4
Tablo 2.2. Çeşitli sekonder metalurji proseslerinde yapılan işlemler ve işlemlerin etkinliği.....	9
Tablo 2.3. Si ile deokside edilmiş çelikler için pota ocağı sentetil cürufunun kimyasal bileşimi	27
Tablo 2.4. Çeliğin %C içeriğine göre pota ve tandış sıcaklıkları	59
Tablo 3.1. Sürekli döküm makinesinin teknik özellikleri	79
Tablo 4.1. Al dros kimyasal analizi	89
Tablo 4.2. 1. grup örneklerin kimyasal analizleri	91
Tablo 4.3. 2. grup örneklerin kimyasal analizleri	93
Tablo 4.4. Deneylerde incelenen çelik cinslerinin kimyasal analiz aralığı	96
Tablo 4.5. 3. grup örneklerin kimyasal analizleri	97
Tablo 4.6. 4. grup örneklerin kimyasal analizleri	99
Tablo 4.7. 5. grup örneklerin kimyasal analizleri	100
Tablo 4.8. 6. grup örneklerin kimyasal analizleri	102

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 2.1 : Elektrik ark ocağı (EAO)-pota ocağı (PO)-sürekli döküm prosesi akım şeması	5
Şekil 2.2 : Modern bir DC elektrik ark ocağının genel görünüşü	6
Şekil 2.3 : Pota ocağı (Ladle Furnace)	10
Şekil 2.4 : Bazı elementlerin oksijen eğilim sıralaması	11
Şekil 2.5 : EAO’da 1600 °C ve 1 atm basınç için C – O dengesi	13
Şekil 2.6 : Döküm alma oksijen çözünürlüğüne göre alüminyum verimleri	18
Şekil 2.7 : 1550 °C – 1600 °C sıcaklık aralığında Mn-Si deoksidasyonu sonucu oluşan kalıntılar	21
Şekil 2.8 : Çeliğin %C içeriğinin sıvı/katı silikatların ayırım eğrisine etkisi (1550 °C – 1600 °C)	22
Şekil 2.9 : 130 x 130 mm kütüklerden üretilen 20-25 mm ϕ çubukların değişik oksijen giderme uygulamalarına göre $\leq 0,30$ C içeren çeliklerin iç yapı temizlik durumları	23
Şekil 2.10 : Pota ocağı işlemlerinde gaz karıştırmanın desülfürizasyon üzerindeki etkisi	26
Şekil 2.11 : Pota ocağı sentetik cürufu içerisindeki (FeO + MnO) % değerinin desülfürizasyon üzerindeki etkisi	28
Şekil 2.12 : Bazı kükürt cüruf kapasitesi üzerindeki etkisi	29
Şekil 2.13 : CaO – SiO ₂ – Al ₂ O ₃ üçlü faz diyagramı	30
Şekil 2.14 : Kalsiyum uygulaması ile elde edilen inklüzyon modifikasyonu ..	31
Şekil 2.15 : Çeşitli sürekli döküm makinesi tipleri	32
Şekil 2.16 : Kütük ve blum üretiminde kullanılan sürekli döküm makinesinin genel görünümü	33
Şekil 2.17 : Potadan tandişe döküm	35
Şekil 2.18 : Tandışten kalıba döküm	36
Şekil 2.19 : Çeşitli tipte pota taretleri	37
Şekil 2.20 : Sürekli döküm makinesinde kullanılan tandiş	38
Şekil 2.21 : Sürekli döküm prosesinde, kalıp içerisinde sıvı çelik ve kabuğun durumu	39
Şekil 2.22 : Kütük üretiminde kullanılan sürekli döküm kalıbının üstten görünüşü	40
Şekil 2.23 : Kalıp salınım hareketi, kalıp hızı-döküm hızı ilişkisi	42
Şekil 2.24 : Sürekli dökümde sekonder soğutma	44
Şekil 2.25 : Kalıp içinde elektro manyetik karıştırma ve inklüzyonların davranışı	45
Şekil 2.26 : EMS kullanımının kütük iç yapı üzerindeki etkisi	46
Şekil 2.27 : Kütük kaynak kesme işlemi	47
Şekil 2.28 : Sürekli döküm makinesinde üç ısı atım bölgesi	48
Şekil 2.29 : Kalıp içerisinde hava boşluğunun oluşumu	50

Şekil 2.30	: Kütüğün katılaşması sırasında mini ingot teorisine göre meydana gelen aşamalar	51
Şekil 2.31	: Sürekli döküm prosesinde katılaşma sırasında oluşan bölgeler	52
Şekil 2.32	: Kütükten alınmış enine kesit numunesinin makro dağlanmış görüntüsü	53
Şekil 2.33	: Aşırı ısının eş eksenli ve kolonsal bölge kalınlığı üzerindeki etkisi	55
Şekil 2.34	: Çamursu bölgede çeliğin mekanik özelliklerinin şematik gösterimi	56
Şekil 2.35	: 0,3 %C içeren çelikte %S içeriğinin kırılgeçirgenlik sıcaklık aralığına etkisi	57
Şekil 2.36	: Yüzeyde meydana gelen gaz boşlukları	63
Şekil 2.37	: Boyuna yüzey köşe çatlağı	65
Şekil 2.38	: Enine yüzey köşe çatlağı	66
Şekil 2.39	: Yüzeyde meydana gelen osilasyon izleri	67
Şekil 2.40	: Osilasyon izinin oluşum mekanizması	68
Şekil 2.41	: Kalıp içinde şişmenin meydana gelmesi ve çatlak oluşumu	69
Şekil 2.42	: İç yapı köşe çatlağı	69
Şekil 2.43	: Diyagonal çatlak	70
Şekil 2.44	: Merkezi çatlak	71
Şekil 2.45	: Yarıyol çatlağı	73
Şekil 2.46	: İç yapı gaz boşluğu	74
Şekil 2.47	: Aşırı rombik bir kütüğün enine kesit görünümü	75
Şekil 2.48	: Kütükte meydana gelen depresyon ve depresyona bağlı iç yapı çatlağı	76
Şekil 3.1.	: İzmit – Gebze bölgesinde yer alan çelik tesisine ait üretim akım şeması	77
Şekil 3.2	: Taşlama cihazı	80
Şekil 3.3	: ARL 3460 marka spektrometre	81
Şekil 3.4	: LECO EF300 Azot-Oksijen analiz cihazı	81
Şekil 3.5	: Zimba makinesi	82
Şekil 3.6	: Şerit testereli kütük dilimleme makinesi	82
Şekil 3.7	: Pota ocağı işlem süresince numune alma ve ölçüm zaman çizelgesi	83
Şekil 4.1	: Sürenin desülfürizasyon oranı üzerindeki etkisi	85
Şekil 4.2	: Sıvı çelik oksijen aktivitesinin desülfürizasyon oranı üzerindeki etkisi	86
Şekil 4.3	: Cüruf bazikliğinin desülfürizasyon oranı üzerindeki etkisi	87
Şekil 4.4	: Cüruf içindeki FeO miktarının desülfürizasyon oranı üzerindeki etkisi	88
Şekil 4.5	: Cüruf içerisindeki Al_2O_3 miktarının desülfürizasyon oranı üzerindeki etkisi	88
Şekil 4.6	: Kullanılan Al dros miktarı ile cüruf Al_2O_3 içeriği arasındaki ilişki	90
Şekil 4.7	: Al dros kullanılan ve kullanılmayan durumdaki desülfürizasyon oranı dağılımı	90
Şekil 4.8	: 0,18 – 0,33 %C içeren karbon çeliklerinde sıvı çelik serbest oksijen değerinin iç yapı gaz boşluğu şiddeti üzerindeki etkisi	92
Şekil 4.9	: 0,18 – 0,33 %C içeren karbon çeliklerinde katı çelik içerisindeki toplam azot ve oksijen değeri ile gaz boşluğu şiddeti ilişkisi	93

Şekil 4.10	: Karbon çeliklerinde %C içeriğinin rombiklik üzerindeki etkisi ...	94
Şekil 4.11	: 0,20 – 0,40 %C içeren karbon çeliklerinde %S içeriğinin rombiklik üzerindeki etkisi	95
Şekil 4.12	: 0,20 – 0,40 %C içeren karbon çeliklerinde Mn/S oranının rombiklik üzerindeki etkisi	95
Şekil 4.13	: Aşırı ısı ile rombiklik ilişkisi	96
Şekil 4.14	: 0,18 – 0,33 %C içeren karbon çeliklerinde %S içeriğinin iç yapı çatlağı üzerindeki etkisi	98
Şekil 4.15	: 0,18 – 0,33 %C içeren karbon çeliklerinde Mn/S oranının iç Yapı köşe çatlak şiddeti üzerindeki etkisi	99
Şekil 4.16	: 0,18 – 0,33 %C içeren karbon çeliklerinde aşırı ısı ile iç yapı Köşe çatlak şiddeti ilişkisi	101
Şekil 4.17	: 0,18 – 0,33 %C içeren karbon çeliklerinde sekonder soğutma bölgesindeki spesifik su tüketimi ile iç yapı köşe çatlak şiddeti ilişkisi	102



SEMBOL LİSTESİ

K	: Reaksiyon denge sabitleri
P_{CO}	: CO kısmi basıncı
T	: Sıcaklık
a	: Aktivite değeri
D_N	: Tandış nozül çapı
m	: Kütle
w	: Ağırlık
d	: Yoğunluk
η	: Malzeme verimi
L	: Derinlik
φ	: Tel, çubuk çapı
v	: Malzeme besleme hızı
ΔT	: Sıcaklık farkı
ΔG	: Gibbs serbest enerjisi
B	: Baziklik
C_s	: Cüruf kükürt kapasitesi
Fr	: Fransız su sertlik indeksi
s	: Strok
V	: Hız
t	: Süre
n	: Salınım sayısı
G	: Çelik debisi
g	: Yerçekimi ivmesi
A	: Kesit alanı
h	: Metal seviye yüksekliği
f	: Osilasyon frekansı
Q	: Isı
S	: Katılaşan kabuk kalınlığı
l	: Boy
Ç	: Çevre
μ	: Spesifik su tüketimi
R_{DS}	: Kükürt giderme oranı
N	: Numune kodu
I	: Köşe uzunlukları

İKİNCİL ÇELİK ÜRETİMİNDE KÜKÜRT GİDERME VE ÇELİK KALİTESİ

ÖZET

Türkiye’de 2003 yılında yaklaşık 18 milyon ton civarında olan çelik üretiminin yaklaşık 2/3’ü ikincil çelik üretimi ile gerçekleştirilmektedir. Hurda temini ve kontrolü, elektrik ark ocağı ergitmesi, pota metalurjisi ve sürekli döküm prosesi ile çalışan modern ikincil çelik tesislerinde, yüksek kalite çelik kütüklerinin elde edilmesi, çeliğin kimyasal ve fiziksel özellikleri ile çok yakından ilgilidir. Bu tez çalışmasında, İzmit Gebze’deki modern bir çelik tesisinde (KROMAN ÇELİK SANAYİ A.Ş.) karbon çeliklerinin kimyasal özellikleri ile kütüklerde meydana gelen çeşitli kusurlar arasındaki ilişki endüstriyel ölçekte yapılan deneylerle saptanmıştır.

Deney sonuçlarına göre, sıvı çeliğin rafinasyon adımlarından olan pota metalurjisindeki deoksidasyon ve desülfürizasyon işlemlerinin, çeliğin kalitesini doğrudan etkilediği tespit edilmiştir. Yapılan çalışmalara göre orta karbonlu karbon çeliklerinde, desülfürizasyon işlemi sonucunda, çeliğin kükürt içeriğinin %0,030’un altına indirilmesi gerekmektedir. Bu rafinasyon işleminde curuf yapıcıların ilavesi sonucunda, yeterli oranda kükürt giderilmesi için gereken şartlar sırasıyla; 35 – 40 dakikalık süre, 15-20 ppm arasında sıvı çelik serbest oksijen içeriği, maksimum %1 FeO ve % 9-11 Al₂O₃ içeren curuf, 2,5-3 civarında curuf bazikliğidir. DeneySEL sonuçlar, karbon ve kükürt miktarının karbon çeliklerinde kütüklerdeki rombiklik şiddeti ve içyapı köşe çatlak oluşumunda etkili olduğunu göstermiştir. Pota ocağı işlemleri sonucunda, bu çelik cinsleri için kabul edilebilir seviyeden daha yüksek kükürt olması durumunda, en az Mn/S oranını 30 kılacak şekilde, üretilen çeliğin standartlarına uygun seviyelerde Mn içeriğinin yüksek tutulmasının iyi bir kütük kalitesi için gerekli olduğu tespit edilmiştir. Bunun yanında, sürekli döküm prosesi sırasındaki aşırı ısı miktarının ve sekonder soğutma bölgesi spesifik su tüketim miktarının da kütük kalitesi üzerinde önemli etkileri saptanmıştır. Ayrıca çeliğin serbest oksijen miktarı ve toplam azot içeriğinin kütüklerin iç yapısında meydana gelen gaz boşluğu ile ilişkili olduğu tespit edilmiştir. Yeterli deoksidasyon ve kükürt giderme işlemleri yaparak ve azot yerine inert gaz (argon) ile karıştırma yapılarak, gaz boşluğu açısından kabul edilebilir kalitede kütük eldesi mümkündür.

DESULPHURIZATION AND STEEL QUALITY IN SECONDARY STEELMAKING

SUMMARY

Approximately 65% of total steel production (about 18 million ton in 2003) is realized by secondary steelmaking in Turkey. High quality steel billet production after melting, refinement and continuous casting is closely related with the chemical and physical structure of steel in modern secondary steel plants, containing scrap collection and control, electric arc furnace melting, ladle metallurgy and continuous casting processes. In this study, relationship between chemical and physical properties of carbon steel billets were experimentally determined in industrial scale at a modern secondary steelmaking plant (KROMAN ÇELİK SANAYİ A.Ş.) in Izmit, Gebze.

According to the experimental results, deoxidation and desulphurization processes during ladle metallurgy which means one of the refinement steps of liquid steel is directly related with the quality of steel. After the desulphurization, sulphur content must be reduced down to 0,030% for carbon steels. After the addition of fluxes during this refinement process, required conditions for the removal of sulphur are 35 – 40 minutes duration, 15 – 20 ppm of liquid steel free oxygen content, max. 1% of FeO and 9 – 11% of Al_2O_3 containing slag, 2,5 – 3 of slag basicity. Experimental results showed that the rhomboidity and off corner cracks of billets are effected by carbon and sulphur content. After the ladle furnace operation, in the case of more sulphur quantity than limits in steel Mn/S ratio must be kept at least 30. This is obtained by keeping the Mn content of the steel as possible as high in the limitations of standarts of produced steel. Furthermore, there are effects of quantities of superheat and specific water consumotion of secondary cooling zone on billet quality. It is also determined that formation of subsurface blowholes are related with free oxygen quantity and total nitrogen content of steel. It is possible to obtain suitable billet quality by adequate deoxidation and sulphur removal processes and by stirring with inert gas (argon) insted of nitrogen.

1. GİRİŞ VE AMAÇ

Demir çelik ürünleri insanoğlunun keşfettiği ve kullandığı ilk yedi metal arasında yer almaktadır. 19. yüzyıla kadar zengin parça cevherlerin direkt redüksiyonu ve demircilik sanatı ile oluşturulan çelik ürünlerinin kullanımı tarih boyunca giderek artmış, günümüzde 950 milyon ton civarına ulaşmıştır. Türkiye özelinde 18 milyon ton civarında olan bu üretim rakamı, yurdumuz şartlarında 2/3'ü ikincil çelik sanayi tarafından hurdaya dayalı olarak üretilmekte ve mamül haline getirilmektedir. Genel olarak, mini çelik tesislerindeki hakim teknoloji, ark ocağı ergitmesi, pota metalurjisi ve sürekli döküm ile kütük üretimi şeklindedir. Bu hakim teknoloji yurdumuzda da yıllık kapasitesi 1 milyon ton ve üstündeki tesislerde yaygın olarak uygulanmaktadır.

Kullanımından bu yana mini çelik tesislerinde izabe amacıyla çalıştırılan elektrik ark ocakları, teknolojik prensibi değişmemesine rağmen gerek boyut gerek fırın dizaynı gerekse çalışma şekli açısından zamanımıza kadar önemli değişikliklere uğramıştır. Son yıllarda bu değişikliklerden en önemlileri, alternatif akımlı (ac) yerine doğru akım (dc) kullanılması, oksitleyici gaz üflenmesi, katı sıvı veya gaz şeklinde ilave yakıt enjeksiyonu, refrakterlerdeki iyileştirmeler ve izabenin otomasyona bağlanması ve curufsuz döküm alma (EBT) teknikleridir. Bu yenilikler sayesinde 30 dakikaya varan sürelerde fosfor giderme de dahil döküm alınabilmektedir.

Ark ocağı ergitmesindeki modernleştirme çalışmaları klasik anlamda ergitilmiş hurda çeliğin rafinasyonu ve alaşımlandırılmasının ark ocağı içinde yapılması yerine, pota metalurjisi diye adlandırılan ikincil metalurjik reaktörlere alınmasını zorunlu kılmıştır. Pota metalurjisi uygulandığında, ark ocağı ergitme dışındaki işlemler amacıyla kullanılmamakta ve proseste süreklilik ve verimlilik sağlanmaktadır. Pota metalurjisinde kükürt ve oksijen giderme gibi rafinasyon işlemleri, alaşımlandırma, ısıtma ve de inklüzyon giderme işlemleri kısa sürede yapılabilmekte, böylelikle

hatasız ürün verecek sıvı çelik özellikleri sağlanabilmektedir. Pota metalurjisinde uygulanan işlemlerin sürekli döküm ile entegre edilmesi durumunda ise çok yüksek kapasitelerde seri ve kaliteli üretim yapılabilir. Modern ikincil çelik üretim tesislerinde, özellikle pota metalurjisi sırasında gerçekleştirilen deoksidasyon, desülfürizasyon işlemlerinin kontrolü son derece önemlidir. İstenilen şartlarda gerçekleştirilen bu rafinasyon işlemleri ile nihai kütükte meydana gelen gaz boşlukları, iç yapı köşe çatlakları ve rombiklik gibi kütüğe daha sonra uygulanacak plastik şekil verme işlemlerini doğrudan etkileyen temel fiziksel özellikler kontrol edilebilmektedir. Rafinasyon parametrelerinin optimizasyonu ile iyi kalite kütük, dolayısıyla da iyi işletme şartları ortaya çıkmaktadır.

Bu tez çalışmasında, İzmit Gebze yöresinde yer alan kapasitesi 1 milyon ton/yıl olan modern bir ikincil çelik tesisindeki pota ocağındaki deoksidasyon, desülfürizasyon işlemlerinin kütük kalitesine etkisi deneysel olarak incelenmiştir. Deneylerde, çelikte kalan serbest oksijen miktarı, toplam azot – oksijen miktarı, kükürt miktarı ölçülerek bunların kütüklerdeki gaz boşluğu oluşum şiddetine, iç yapı köşe çatlakları ve rombiklik derecesine etkileri deneysel verilere bağlı olarak saptanmıştır. Deneysel çalışmalarda yapılan ölçümlerin amacı, çelikte kalan serbest oksijen, toplam azot oksijen ve kükürt miktarını, gaz boşluğu derecesi, çatlak ve rombiklik şiddeti kabul edilebilir seviyelerde olan kütük üretecek şekilde optimize etmektir.

2. TEORİK BİLGİLER

2003 yılı sonu itibariyle 945.1 milyon ton mertebelerinde olan dünya sıvı çelik üretiminin yaklaşık %33,6'sı ikincil çelik üretimi ile sağlanmaktadır [1]. Genel olarak hurdadan ark ocaklı işletmelerde gerçekleştirilen ikincil çelik üretimi için verilen bu üretim payı dünya geneli için geçerlidir. Türkiye'de ise 18 milyon ton civarında olan sıvı çelik üretiminin %68,5'i ikincil çelik üretimi ile mini çelik tesislerinde üretilmektedir [1]. Türkiye'deki mini çelik tesislerindeki hakim teknoloji, ark ocağı ergitmesi, pota metalurjisi ve sürekli döküm ile kütük üretimi şeklindedir. Hakim teknolojiyi gösteren akım şeması Şekil 2.1'de verilmiştir. Günümüzdeki sekonder çelik üretiminde modern yöntem olarak uygulanan bu akım şemasına göre üretim yapıldığında, hurdadan başlayarak tüm ergitme, rafinasyon ve kütük döküm işlemleri kontrol edilebilmekte ve temiz ürün elde edilebilmektedir.

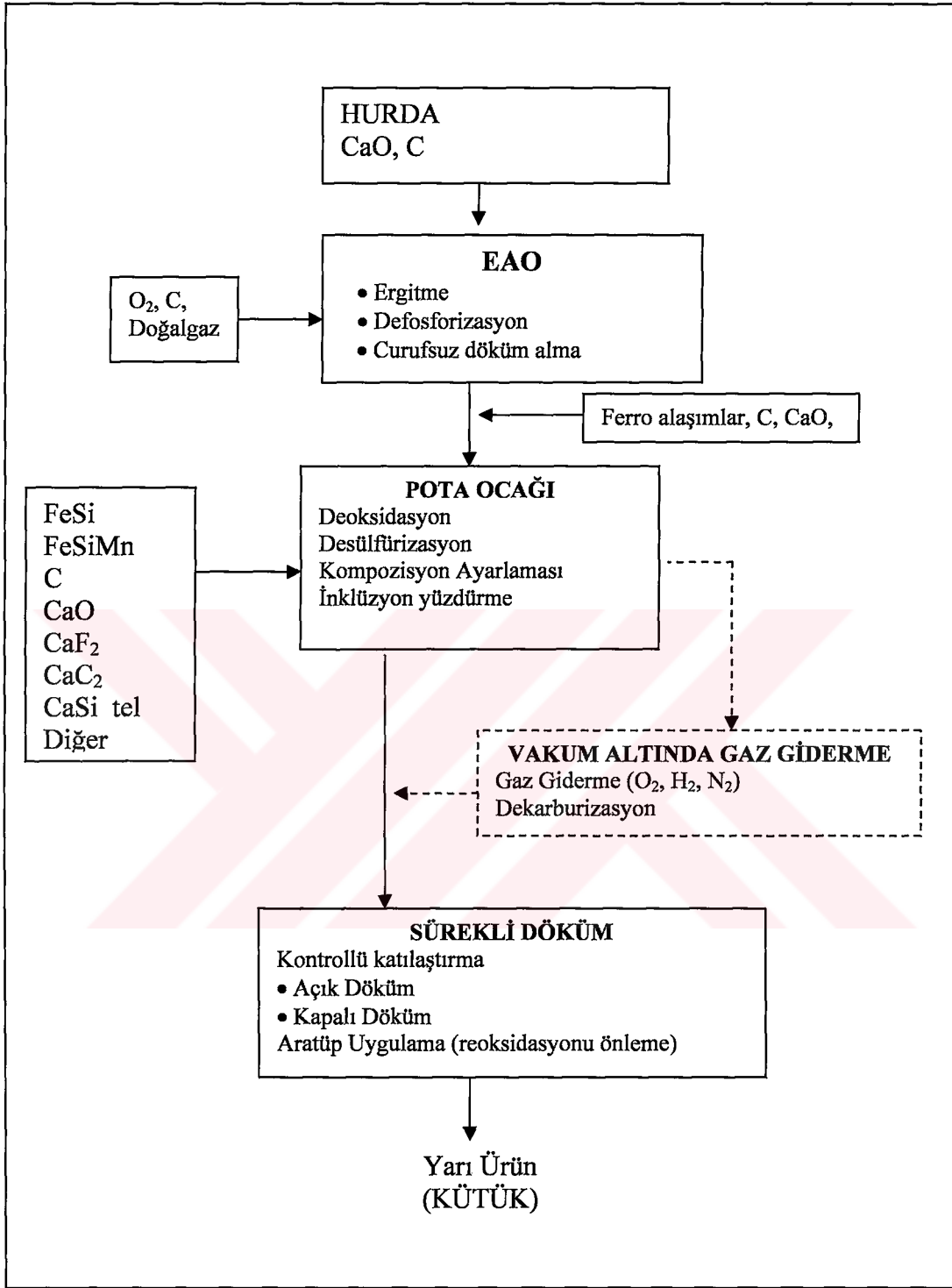
2.1. Hurdanın Önemi

İkincil çelik üretim tesislerinde ana çelik hammaddesi hurdadır. Çelik hurdaları, çelik malzemeyi kullanan çeşitli sektörlerden gelen korozyona uğramış veya kullanım süresi biterek atık duruma gelmiş malzemelerdir. Mini çelik tesisleri, bu tür hurda malzemeleri satın alıp işlerken üretmeyi planladıkları çelik türüne uygun hurdayı seçmek ve hurda sahasına gelen malzemeyi çok kontrol etmek durumundadır. Özellikle son yıllarda hurda kontrol işlemleri, sekonder çelik üretimi yapan tesislerde önemli bir uğraş alanı haline gelmiştir [2-4]. Örneğin, SAE 1040 kalite çelik üreten ark ocaklı bir çelik işletmesinde istenen hurda analizi ve kalitesi aşağıdaki tabloda verilmiştir.

Tablo 2.1.Ark ocaklı bir tesiste istenen hurda özellikleri

Hurda Cinsi	% Miktar	%Fe min	%C	%P max	%S max	%Cu max	%Sn max	Safsızlık (ağırlıkça)	Boyut, mm max
*HMS	60	98						%0,50	1500 x 500 x 500
Kırılmış	5	98				0,35	0,030		150
Talaş	5	98						%1	
Yerli	20	98						%0,50	1000 x 500 x 500
PİK Fe	5		2-4,5	0,070	0,090				600 x 250 x 150
Toplam	100,00								

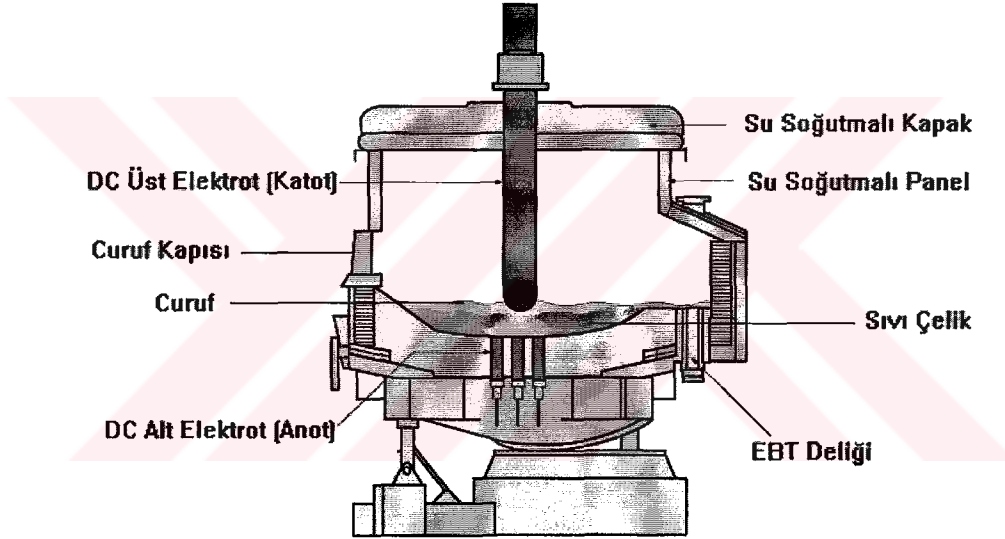
***HMS:** Ağır ergitme hurdası (Heavy melting scrap)



Şekil 2.1. Elektrik ark ocağı (EAO) – pota ocağı (PO) – sürekli döküm prosesi akım şeması [2-4].

2.2. Elektrik Ark Ocağı Ergitmesi

20. yüzyılın başından beri mini çelik tesislerinde izabe amacıyla kullanılan elektrik ark ocakları, temel çalışma prensibi değişmemesine rağmen gerek boyut gerek fırın dizaynı gerekse çalışma şekli açısından zamanımıza kadar önemli değişikliklere uğramıştır. Son yıllarda bu değişikliklerden en önemlileri, alternatif akımlı (ac) yerine doğru akım (dc) kullanılması, oksitleyici gaz üflenmesi, katı sıvı veya gaz şeklinde ilave yakıt enjeksiyonu, refrakterlerdeki iyileştirmeler ve izabenin otomasyona bağlanması ve curufsuz döküm alma (EBT) teknikleridir [2-4]. Bu gelişmelere sahip, tipik bir ark ocağının şematik görüntüsü Şekil 2.2’de görülmektedir.



Şekil 2.2. Modern bir DC elektrik ark ocağının genel görünüşü [4].

Bu yeni teknik gelişmelerin ark ocaklarına ilavesi ile, günümüzde 150 ile 200 t sıvı çelik kapasiteli ark ocakları yapmak ve bu miktardaki çelik üretilmesi için izabe süresini 45 ile 60 dakikalık sürelerle indirmek mümkün olmuştur [2,4].

Pota ocağında deoksidasyon ve alaşım veriminin arttırılabilmesi ve etkili bir kükürt giderme işlemi (destülfürizasyon) için yüksek miktarda FeO ve MnO içeren oksitleyici EAO (Elektrik Ark Ocağı) curufunun potaya gelmesinin önlenmesi gerekmektedir. Bu amaca yönelik çeşitli döküm alma ve curuf çekme yöntemleri uygulanmakla birlikte, en yaygın şekilde kullanılan sistem “Dipten döküm alma” sistemidir[2,3].

Ocak ekseninden daha ileride balkon şeklindeki bir çıkıntının ortasında bulunan bir t p yolluk ile döküm alınmakta (EBT) ve curufun potaya kaçması önlenmektedir ( ekil 2.2) [2,3].

Bu sistemin avantajları aşağıdaki şekilde özetlenebilmektedir.

1. En etkili curufsuz döküm alma sistemidir.
2. Her döküm sonunda ocakta bir miktar sıvı  elik bırakılarak bir sonraki ergitme işlemi hızlandırılmaktadır.
3. EBT balkonu nedeniyle ocak hacmi artmaktadır.
4. Döküm alma noz l  tamir ve temizliğinin ocak dışına kaydırılması tamir sürelerini azaltmaktadır.
5. Dar, düzgün ve kısa mesafeli sıvı metal akışı sonucunda 10 C’lik bir ısı kazancı sağlanmakta, çeliğin oksitlenmesi ve azot kapma riski azalmaktadır.
6. Sıvı metal akışının yan duvarlar yerine pota tabanına çarpması nedeniyle pota ömrü artmaktadır [20-22].

2.3. Pota Metalurjisi – Sekonder Metalurji

Yüzyılı aşkın zamandır uygulanan elektrik ark ocaklı hurdadan  elik ergitme proseslerinde gerçekleştirilen izabe işlemleri içinde en önemli kademelerden biri, üretilen çeliğin standardına uygun olarak rafine edilebilmesidir. Geleneksel uygulamalarda, özellikle ergimiş çelikten fosfor giderilmesi, deoksidasyon, kükürdün uzaklaştırılması çift curuf uygulaması ile gerçekleştirilmiştir. Bu rafinasyon işleminin sonra gene fırın içinde yapılan uygun ala ımlandırmadan sonra sıvı  elik döküme hazır hale getirilmiştir [3,4].

Ancak, geleneksel EAO prosesinde, ergitme dışındaki diğer metalurjik işlemlerin özelliği dolayısıyla, fırının kullanılmasında oldukça düşük trafo gücünden yararlanılmaktadır. Örneğin, rafinasyon periyodunda trafo gücünün yaklaşık %40’ı kullanılabilir. Bunun yanında, özellikle kükürt giderme sırasında oluşturulması gereken indirgeyici bazik curuf eldesindeki g   l kler nedeniyle klasik proseste ulaşılan maksimum kükürt seviyesi %0,015 mertebesindedir. Bu işlem bütünündeki diğer en büyük dezavantaj ise, ergitme dışındaki metalurjik uygulamaların hurda ergitme periyodundan daha uzun zaman alması ve bu nedenle fırının asıl işlevi dışında kullanılması, dolayısıyla uzun kampanya süresi ve düşük ergitme kapasitelerinin ortaya çıkmasıdır [2-4].

Geleneksel ark ocağı işletmeciliğindeki bu dezavantajlı durumun giderilmesi 1980’li yıllardan sonra deoksidasyon, desülfürizasyon, homojenleştirme ve ısıtma gibi metalurjik işlemlerin EAO’nın dışına kaydırılması ve EAO’nın yalnızca ergitme ve fosfor rafinasyonu için kullanılması düşüncesini gündeme getirmiş, böylelikle azami trafo gücünde hurda ergitmesinin daha ekonomik bir uygulama olacağı fikrine ulaşılmıştır. Bu uygulama şeklinin, endüstriye getirdiği yenilik “Pota Metalurjisi”dir. [2].

Ark ocağında ergitmeden sonra sıvı çeliğin pota’da ısıtılması, deoksidasyonu, desülfürizasyonu, homojenleştirme, kalıntıların yüzdürülmesi ve gaz giderilmesi gibi metalurjik işlemlerin tamamına “İkincil Metalurji, Sekonder Metalurji veya yaygın deyiimiyle “Pota Metalurjisi” denilmektedir. Tablo 2.2’de günümüzde üretimde olan bazı sekonder metalurji uygulamaları görülmektedir [3].

Elektrik ark ocağı (EAO) ile pota ocağının (PO) birlikte kullanılması (Pota Metalurjisi) sonucunda aşağıdaki olumlu sonuçlar elde edilebilmektedir [20-22];

1. EAO’da devirme sıcaklığı azaltılmaktadır.
2. EAO’nın üretim hızı, bütün metalurjik işlemlerin EAO’da yapıldığı geleneksel prosese göre arttırılmaktadır.
3. EAO’dan curufsuz döküm almanın sonucu olarak, bazik redükleyici curuf ($\% \text{FeO} + \% \text{MnO} < \%2$) potada sağlanmaktadır. Bu nedenle de, kükürt tasfiyesi için uygun şartlara ve daha düşük kükürt seviyelerine ulaşılabilir.
4. Pota tabanında sıvı çelik içerisine inert gaz üflenerek yapılan karıştırma sayesinde, hem sıcaklık hem de alaşım malzemelerinin homojenizasyonu sağlanmakta ve kükürt gidermeye yardımcı olunmaktadır. Ayrıca, metalik olmayan inklüzyonlar yüzdürülerek temiz çelik üretimi sağlanabilmektedir.
5. Çok dar aralıklarda kimyasal kompozisyona ulaşılabilir.
6. Pota Ocağı, EAO ve SDM (Sürekli Döküm Makinesi) arasındaki koordinasyonu sağlamaktadır

Tablo 2.2. Çeşitli sekonder metalurji proseslerinde yapılan işlemler ve işlemlerin etkinliği [3].

Yapılan İşlem	Proses					
	VD	VOD	IGP	IM	VAD	LF
Desülfürizasyon	az	az	az	+	+	+
Deoksidasyon	+	+	+	+	+	+
Dekarburizasyon	az	+	-	-	-	-
Isıtma	+ / -	+	-	-	+	+
Alaşımlandırma	az	+	az	az	+	+
Gaz Giderme	+	+	-	-	+	-
Homojenizasyon	+	+	+	+	+	+
İnklüzyon azaltma	+	+	+	+	+	+
İnklüzyon modifikasyonu	-	-	az	+	+	+

VD: Vakum altında gaz giderme (Vacuum Degassing)

VOD: Vakum altında oksijen ile dekarburizasyon (Vacuum Oxygen Decarburization)

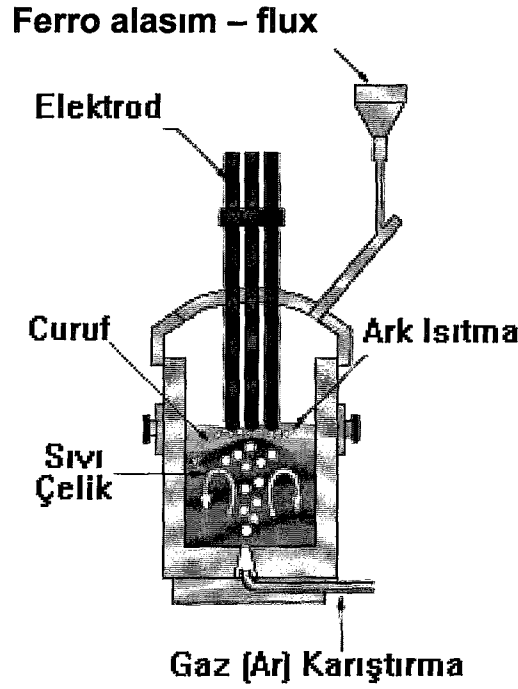
IGP: İnert gaz ile arındırma (Inert Gas Purging)

IM: Enjeksiyon metalurjisi (Injection Metallurgy)

VAD: Vakum altında ark ile gaz giderme (Vacuum Arc Degassing)

LF: Pota Ocağı (Ladle Furnace)

Pota Metalurjisinde kullanılan, tipik bir ocağı Şekil 2.3'te gösterilmektedir.



Şekil 2.3. Pota ocağı (Ladle Furnace) [10].

2.3.1. Deoksidasyon

Çelik üretim sürecinde, Elektrik Ark Ocağında ergitmeyi hızlandırmak ve defosforizasyon işleminin (bazik oksitleyici curuf ile) gerçekleştirilebilmesi için oksijen kullanımı zorunludur. Ancak, sıvı çelik (banyo) içine oksijen verilmesi durumunda, kaçınılmaz olarak sıvı çeliğin oksijen konsantrasyonu arttırılmaktadır [2,5].

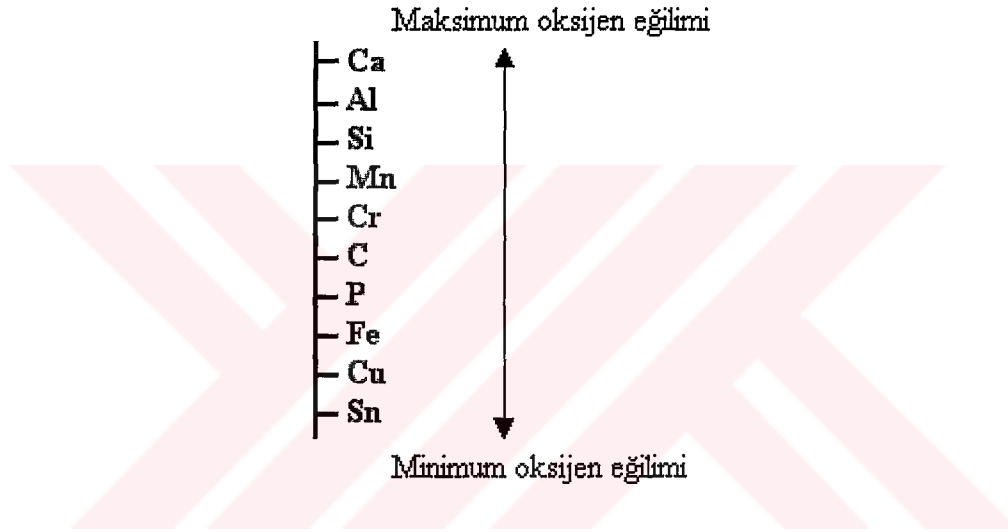
Sekonder metalurji prosesinin başlangıcında, sıvı çeliğin oksijen içeriği 400 – 1000 ppm (%0,004 – %0,1) arasında değişmektedir. Sıvı çelik içerisindeki oksijen çözünürlüğü 0,16% iken, katı çelik içerisindeki maksimum oksijen çözünürlüğü %0,003'dür. Bu nedenle; çelik katılaşmadan önce, gaz boşluğu (blowhole) oluşturmayacak şekilde oksijen içeriğinin azaltılması gerekmektedir. (<30ppm) [2].

Sıvı çelikteki oksijen konsantrasyonu aşağıdaki parametrelerle değişmektedir;

- Sıvı çelik sıcaklığı: Sıcaklık arttıkça oksijen çözünürlüğü artmaktadır.
- Sıvı çeliğin %C değeri : %C azaldıkça oksijen çözünürlüğü artmaktadır (Şekil 2.5).
- Tüketilen oksijen miktarı

- CO kısmi basıncı (P_{CO}): Vakum sistemleri için önemli olmaktadır. EAO atmosfere açık bir sistem olduğu için P_{CO} 'nın oksijen çözünürlüğüne etkisi ihmal edilebilmektedir.

EAO'dan döküm almadan hemen önce, sıvı çelik içerisindeki O_2 çözünürlüğü 1000 ppm değerinin üzerine çıkabilmektedir. Ancak, bir çok element demirden daha fazla oksitlenme eğilimine sahip olduğundan bu elementlerin sıvı çelik içerisine ilaveleri durumunda, sıvı çelik içerisinde çözünen oksijen ile reaksiyona girerek oksijen çözünürlüğünü azaltmaktadırlar. Şekil 2.4'te bazı elementlerin oksijen eğilimleri görülmektedir [2-5].



Şekil 2.4. Bazı elementlerin oksijen eğilim sıralaması [2].

Fe'den daha yüksek oksijen eğilime sahip Al, Si, Mn gibi elementlerin sıvı çelik içerisine oksijen çözünürlüğünü düşürmek amacıyla ilave edilmesi işlemlerine "deoksidasyon" denilmektedir. Deoksidasyon reaksiyonu genel olarak aşağıdaki gibidir [5].



($X=1,2 - Y=1,2,3 - M = Al, Si, Mn, C, Ca, Cr$ v.s.)

Oksijen gazının yanı sıra, sistemin atmosfere açık olması ve ark bölgelerinde havanın iyonizasyonu nedeni ile hidrojen ve azot gibi gazlar da banyo içerisinde çözünmektedir. Ancak katı çelik içerisinde bu gazların çözünürlüğü son derece az olup, katılaşma sırasında bu gazlar dışarıya atılabilmektedir [2,5].

Sürekli döküm prosesi, çok hızlı katılaşmayı gerektirdiğinden sözü edilen gazlar dışarı atılmadan katı çelik içerisinde kalarak “ gaz boşluğu” adı verilen döküm kusurlarına neden olmaktadır. Bu nedenle oksijen çözünürlüğünün gaz boşluğu oluşturmayacak kritik değerin altına düşürülmesi gerekmektedir. Bu işlem de deoksidasyon ile yapılmaktadır [3,5].

İyi bir deoksidasyon gerçekleşmediği takdirde aşağıdaki problemler meydana gelmektedir.

- Katılaşma sırasında gaz boşlukları oluşarak, hem çeliğin mukavemeti ve fiziksel özellikleri olumsuz yönde etkilenmekte hem de haddeleme sırasında problemler meydana gelmektedir.
- Ferro alaşımların alaşımlandırma verimleri düşmekte ve tüketimleri artmaktadır.
- Refrakter tüketimi olumsuz yönde etkilenmektedir.

Deoksidasyonun yapılabilmesi için öncelikle Pota Ocağı’nda malzeme ilavesi öncesi banyonun oksijen çözünürlüğü ile bu değerin nereye kadar düşürüleceğinin ve ayrıca katılaşma sırasında gaz boşluğu oluşturmayacak kritik oksijen çözünürlüğünün bilinmesi gerekmektedir [5].

2.3.1.1. EAO’dan Döküm Alma Öncesi Sıvı Çeliğin Oksijen Çözünürlüğü

EAO’da sıvı çeliğe: ergitmeyi hızlandırmak ve defosforizasyon işlemi için oksijen verilmektedir. Bu oksidasyon işlemi sırasında şarj malzemeleri (hurda, kireç, karbon v.s.) içerisinde yer alan, ergitme işlemi sonucunda sıvı çeliğe geçen ve demirden daha yüksek oksijen eğilimine sahip olan Al, Si, Mn, C, P gibi elementler oksitlenmektedir. Böylece bu elementlerin sıvı çelik içerisindeki konsantrasyonları çok küçük miktarlara inmektedir. Fosfor rafinasyonu (defosforizasyon) için C’nun oksitlenmesi ve konsantrasyonunun düşürülmesi gerekmektedir. C’nun oksitlenme eğiliminin Fe’in biraz üzerinde olduğu bilinmektedir. Bu nedenle sıvı çelik içerisindeki oksijen çözünürlüğü aşağıdaki reaksiyon uyarınca C tarafından belirlenmektedir [2,5].



Bu reaksiyonun denge sabiti ise şöyledir;

$$K = P_{CO} / (\%C \times \%O) \quad (2.3)$$

ve denge sabitinin sıcaklığa göre değişimi ise;

$$\log K = (1168 / T) + 2,07 \quad (2.4)$$

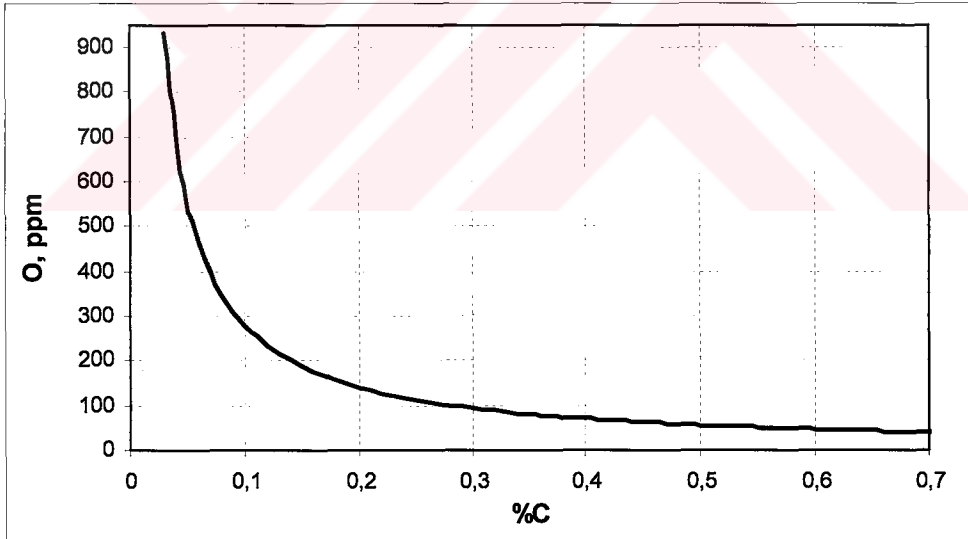
şeklinde gösterilmektedir [5].

Burada; P_{CO} , CO kısmi basıncını, T ise °K cinsinden sıvı çelik sıcaklığını göstermektedir.

2.3 ve 2.4 no'lu eşitlikler, 1600 °C (1823°K) için çözülürse; 1600°C sıvı çelik sıcaklığı ve 1 atm basınç altında karbon – oksijen dengesi aşağıdaki şekilde olmaktadır [3].

$$\%C \times \%O = 0,0028 \quad (2.5)$$

Yukarıda belirtilen 2.5 no'lu eşitlik, sıvı çelik içerisinde çözünen %C değerine göre oksijen çözünürlüğünü bulma imkanı vermektedir. Karbon – oksijen dengesi, 1600 °C sıcaklık ve 1 atm basınç için Şekil 2.5'te görülmektedir.



Şekil 2.5. EAO'da 1600 °C ve 1 atm basınç için C – O dengesi .

Yukarıdaki şekle göre; özellikle %0,1 C değerinin altında oksijen çözünürlüğünün şiddetli olarak arttığı ve pratikte %0,03 C değerinin altında ise sonsuza doğru gittiği görülmektedir. Bu nedenle EAO ile çelik yapımında %0,03 C değerinin altına ulaşmak mümkün değildir ve vakum sistemi gerekmektedir [2].

Sıvı çelik % C değerinin düşmesi ile oksijen çözünürlüğü artmakta ve Fe'in oksitlenmesi de artmaktadır. Bu nedenle EAO'dan döküm alma öncesinde sıvı çelik içerisindeki en az %0,1 C değeri hedef alınmaktadır [5].

EAO – PO sisteminde iki çeşit deoksidasyon yapmak mümkündür;

1. Birincil Deoksidasyon: EAO'dan potaya akış esnasında potaya verilen ferro alaşım ve katkı malzemeleri (Al, FeSiMn, FeSi, C, CaO v.s.) ile yapılan ön deoksidasyon
2. İkincil Deoksidasyon: EAO'dan döküm potaya alındıktan sonra PO'da ferro alaşım ve katkı malzemelerinin ilavesi ile yapılan deoksidasyondur [6].

Birincil deoksidasyon sayesinde aşağıdaki avantajlar sağlanmaktadır;

- EAO'dan döküm alma süresince yapılması nedeniyle, PO prosesinde deoksidasyon ve dolayısıyla desülfürizasyon için zaman kazancı sağlanmaktadır.
- Akış esnasında yapıldığından dolayı, katkı malzemelerinin sıvı çelik ile teması çok iyi sağlanarak deoksidantların verimi artmaktadır.
- Deoksidasyon erken yapıldığı için, deoksidasyon ürünleri olan metal oksitlerin (inklüzyonlar) yüzdürülmesi için zaman kazancı sağlanmaktadır.

Genellikle endüstriyel uygulamalarda birincil ve ikincil deoksidasyon birlikte kullanılmaktadır [5,6].

2.3.1.2. Mn İle Deoksidasyon

Mn, kuvvetli bir oksijen giderici element değildir. Buna rağmen Al ve özellikle Si ile beraber deoksidasyon için yoğun olarak kullanılmaktadır [5].

Manganın çelik içerisine, mukavemet ve sertlik vermek amacıyla ilave edilmektedir. Ancak demirden daha yüksek oksijen eğilimine sahip olduğu için, ister istemez deoksidasyon işlemi yapmaktadır. Döküm alma sırasında EAO'dan potaya akışta ve pota ocağında mangan ilave edilmektedir ve aşağıdaki reaksiyon meydana gelmektedir [2,5].



Bu reaksiyonun denge sabiti ve denge sabitinin sıcaklıkla değişimi;

$$K = a_{\text{MnO}} / ([\% \text{Mn}] \times [\% \text{O}]) \quad (2.7)$$

$$\text{Log } K = (14950 / T) - 6,68 \quad (2.8)$$

şeklindedir [5].

Bu reaksiyonda, deoksidasyon ürünü saf olarak katı veya sıvı MnO'dir. Reaksiyonun meydana geldiği sıcaklık genel olarak 1550 °C olarak kabul edilirse ve 2.7 ile 2.8 numaralı denklemlerden Mn – O dengesi şu şekilde hesaplanmaktadır.

$$\% \text{Mn} \times \% \text{O} = 0,0302 \quad (2.9)$$

2.3.1.3. Si ile Deoksidasyon

Deoksidasyon amacıyla en yaygın kullanıma sahip elementlerden birisi olan silis, mangandan daha kuvvetli ancak, alüminyum kadar kuvvetli olmayan bir deoksidasyon elementidir [5].

Sıvı çelik içerisine Si ilave edildiğinde, aşağıdaki reaksiyon meydana gelir ve katı deoksidasyon ürünü SiO₂ meydana gelmektedir.



2.10 numaralı reaksiyonun denge sabiti ve denge sabitinin sıcaklıkla değişimi ise aşağıdaki gibidir.

$$K = a_{\text{SiO}_2} / ([\% \text{Si}] \times [\% \text{O}]^2) \quad (2.11)$$

$$\text{Log } K = (30410 / T) - 11,59 \quad (2.12)$$

2.11 ve 2.12 numaralı eşitlikler yine 1550°C için için çözülürse, Si – O dengesi aşağıdaki şekilde hesaplanmaktadır [5].

$$\% \text{Si} \times \% \text{O} = 8,1 \cdot 10^{-6} \quad (2.13)$$

2.9 ve 2.13 numaralı eşitlikler karşılaştırıldığında, silisin mangana göre daha kuvvetli deoksidasyon yaptığı görülmektedir. Ancak, silis tek başına yeterli deoksidasyonu sağlayamamaktadır. Bu nedenle uygulamalarda silis ile mangan beraber deoksidant olarak kullanılmaktadır.

2.3.1.4. Si – Mn ile Deoksidasyon

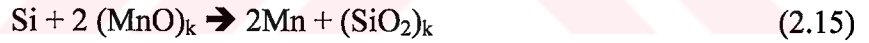
Daha önce de bahsedildiği gibi, Mn kuvvetli bir deoksidasyon elementi değildir ve silisin deoksidasyon gücü mangandan daha fazladır. Ancak, mangan silis ile birlikte kullanıldığı zaman silisin deoksidasyon gücü artmaktadır. Yani, metalde çözünmüş halde bulunan belirli bir Si konsantrasyonu için denge oksijen konsantrasyonu, silisin tek başına kullanıldığı durumdakinden daha düşük olmaktadır. Bunun nedeni, silisin mangan ile beraber kullanılması halinde deoksidasyon ürünü saf ve katı SiO_2 olmayıp, içinde az miktarda FeO bulunan sıvı bir MnO-SiO₂ oksit çözeltisi olması ve bu duruma bağlı olarak da deoksidasyon ürünü içerisindeki silikanın aktivitesinin 1 olmayıp 1'den küçük bir değer olmasıdır.

2.10 no'lu reaksiyonun denge sabitinden;

$$\%O = (a_{\text{SiO}_2} / (K \times \%Si))^{1/2} \quad (2.14)$$

yazılabilmektedir. Reaksiyon ürünü saf SiO_2 olmadığı zaman $a_{\text{SiO}_2} < 1$ olacak ve buna bağlı olarak da deoksidasyon sonucunda metalde kalacak belli bir silis konsantrasyonu için denge oksijen konsantrasyonu azalacaktır [5].

Deoksidasyon işleminde Si ve Mn birlikte kullanıldığı zaman aşağıdaki reaksiyon meydana gelmektedir.



Bu reaksiyonun denge sabiti;

$$K = (\% \text{Mn}^2 a_{\text{SiO}_2}) / (\% \text{Si} a_{\text{MnO}^2}) \quad (2.16)$$

yazılabilmektedir ve sıcaklıkla değişimi;

$$\log K = (510 / T) + 1,77 \quad (2.17)$$

eşitliği ile belirlenmektedir [3].

2.3.1.5. Al ile Deoksidasyon

Alüminyum, deoksidasyon amacıyla yaygın olarak kullanılan bir elementtir. Bunun nedeni, kuvvetli bir oksijen giderici element olması ve diğer kuvvetli oksijen giderici elementlere göre teminin kolay olması ve çok pahalı olmamasından kaynaklanmaktadır [5].

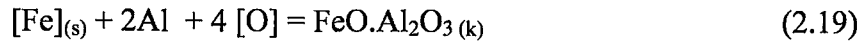
Alüminyum, açıkta (pota – tandiş ve tandiş – kalıp arası korumasız) döküm yapılan koşullarda oksijen ile reaksiyona girerek katı Al_2O_3 oluşturmakta, tandiş nozüllerinde birikerek daraltmakta ve bunun sonucu olarak sürekli döküm prosesini imkansız hale getirebilmektedir. Bu nedenle, açıkta döküm alınan koşullarda alüminyum kullanımı sınırlandırılmaktadır. Kritik alüminyum çözünürlüğü aşağıdaki eşitlik uyarınca nozul çapı ile doğrudan ilişkilidir.

$$\text{Log } (\%Al \times 10^{-3}) = -1,25 + 1,74 \times \text{Log } (D_N) \quad (2.18)$$

Burada; %Al kritik alüminyum çözünürlüğünü, D_N ise tandiş nozul çapını (mm) ifade etmektedir.

Hesaplanan kritik alüminyum çözünürlüğünün üstünde nozul daralması yaşanabilmektedir. Uygulamada bu değer, %0,004'e kadar emniyetli görülmektedir [3,4].

Sıvı çelik içerisinde, alüminyum ile oksijenin reaksiyonu sonucu ortaya çıkacak kararlı faz, çok düşük alüminyum konsantrasyonlarında $FeO.Al_2O_3$ bileşiği, ve daha yüksek alüminyum konsantrasyonlarında ise Al_2O_3 bileşiğidir. Bu reaksiyonlar ve denge sabitleri şu şekildedir.



$$\text{Log } K = (71600 / T) - 23,28 \quad (2.20)$$

ve,



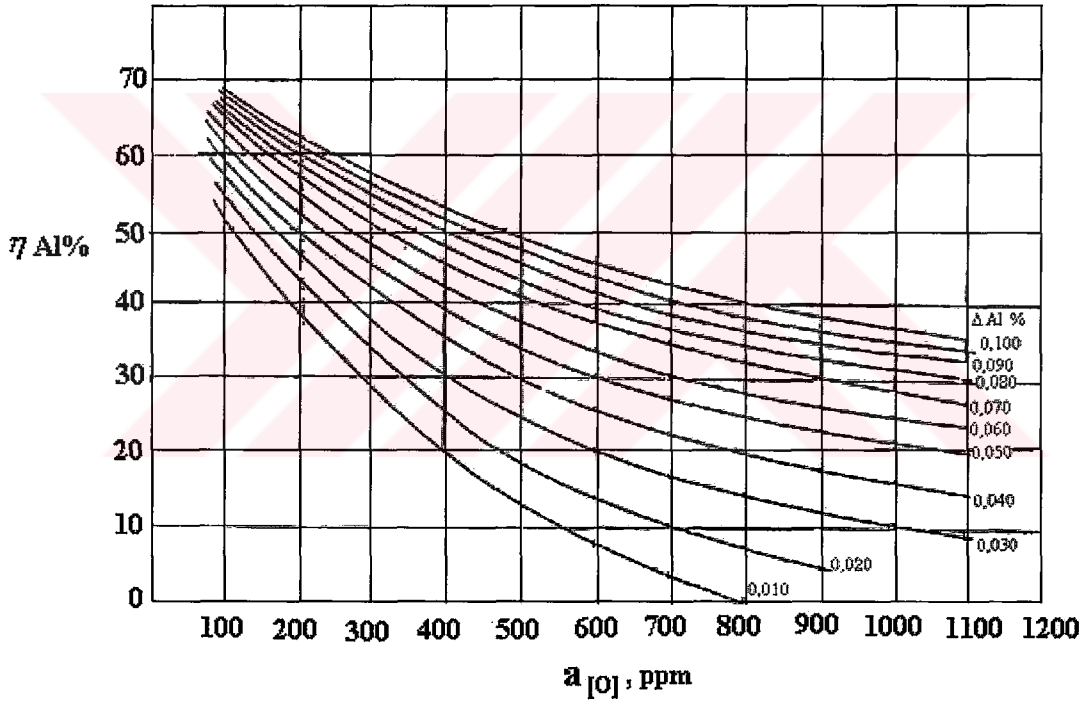
$$\text{Log } K = (62780 / T) - 20,41 \quad (2.22)$$

Deoksidasyon için gerekli Al miktarı, EAO'dan döküm alma %C, dolayısıyla %O çözünürlüğüne bağlı olarak şu şekilde hesaplanabilmektedir.

$$m_{Al} = [0,0011 \times (O_t - 150) \times w] / (\%Al \times \eta) \quad (2.23)$$

Burada; m_{Al} ilave edilecek alüminyum miktarı (kg), O_t EAO'dan döküm alma öncesi oksijen çözünürlüğü (ppm), w sıvı çelik ağırlığı (t), $\%Al$ alüminyum içeren malzemenin Al tenörü, η ise alüminyum içeren malzemenin alüminyum verimi şeklindedir.

Ancak pratikte, emniyet açısından, bu eşitlikle hesaplanan değer in altında alüminyum ilave edilmektedir. Çünkü, alüminyum verimi döküm alma oksijen çözünürlüğü ile değişmekte ve verimdeki bu değişiklik sonucu kritik Al çözünürlüğün üstüne çıkma olasılığı bulunmaktadır. Şekil 2.6'da alüminyum veriminin oksijen çözünürlüğü ile ilişkisi görülmektedir [3,4].



Şekil 2.6. Döküm alma oksijen çözünürlüğüne göre alüminyum verimleri [4].

Al, deoksidasyon amacıyla özellikle külçe olarak (%95Al içeren) ilave edildiğinde verimi düşük olmakta ve veriminde büyük değişiklikler göstererek istenen Al% değerine ulaşmakta sıkıntılar ortaya çıkmaktadır [2].

Al'un tel halinde beslenmesinde kontrol hem daha kolay, hem de verimi daha yüksek olduğundan istenilen değerlere ulaşmak daha kolaylaşmaktadır. Çünkü, tel Al, yüksek besleme hızında pota dibine daha yakın bir bölgede sıvı hale gelmekte ve

yoğunluk farkından dolayı yukarı çıkarken daha kolay çözünerek deoksidasyon kontrolünü kolaylaştırmaktadır. Böylece, alüminyumun curuf ile reaksiyona girmesi önlenerek yüksek verim elde edilmektedir. Genel uygulamada, döküm alma sırasında (EAO'dan EBT ile potaya akış esnasında) külçe Al kullanılmakta, hassas ayar ise tel besleme ile yapılmaktadır [3,4].

Al telin, pota dibine yakın bir alanda sıvı hale gelmesi aşağıdaki faktörlere bağlıdır.

- Al tel çapı, (mm)
- Tel besleme hızı, (m/dak)
- Sıvı çelik sıcaklığı, (°C)

Tel çapı ve besleme hızının artması, telin daha derinlerde erimesine neden olmaktadır. Buna karşılık, sıvı çelik sıcaklığının yüksek olması erimenin daha erken yani daha yukarılarda olmasına yol açmaktadır.

Al telin erime derinliği aşağıdaki eşitlikle belirlenmektedir;

$$L = 145 \times \left(\frac{\phi^{0,86} \times v^{0,52}}{\Delta T^{0,34}} \right) \quad (2.24)$$

Burada; L Al tel erime derinliği (m), ϕ tel çapı (mm), v besleme hızı (m/dak), ΔT aşırı ısı (°C) şeklindedir [2].

2.3.1.6 Deoksidasyon Sonucu Oluşan İnklüzyonlar (Kalıntılar)

Çeliklerin temizlik yada kirlilik durumu, birincil olarak iç yapılarındaki kalıntılara (inklüzyon) göre değişmektedir. Bunların türleri, büyüklükleri, biçimleri ve dağılımları çeliğin mekanik özelliklerini doğrudan etkilemektedir. Modern mühendislik uygulamalarında, çeliklerin mukavemet düzeyleri, tokluk ve yorulma özellikleri ön plana çıkmaktadır. Çeliğin iç yapısında oluşan kalıntılar, bu özellikleri etkileyerek çelikleri, üstün ya da düşük nitelikli yapmaktadır [6].

Kalıntılar, çelik üretim süreçleri sırasında oluşmuş ve kaçınılmaz olarak çeliğin iç yapısında kalmış kimyasal bileşiklerdir. Bunlar, çeliğin bileşimindeki empürite elementlerinden olan kükürt ve oksijenden oluşmaktadır. Kükürt, sülfür kalıntılarının (MnS, FeS v.s.) oluşmasına yol açmakta, oksijen ise deoksidasyon işlemi sonucunda oksitleri, alüminatları ve silikatları oluşturmaktadır. Ayrıca, reoksidasyon ve refrakterler ile kimyasal etkileşim sonucunda da kalıntılar oluşmaktadır [6,9].

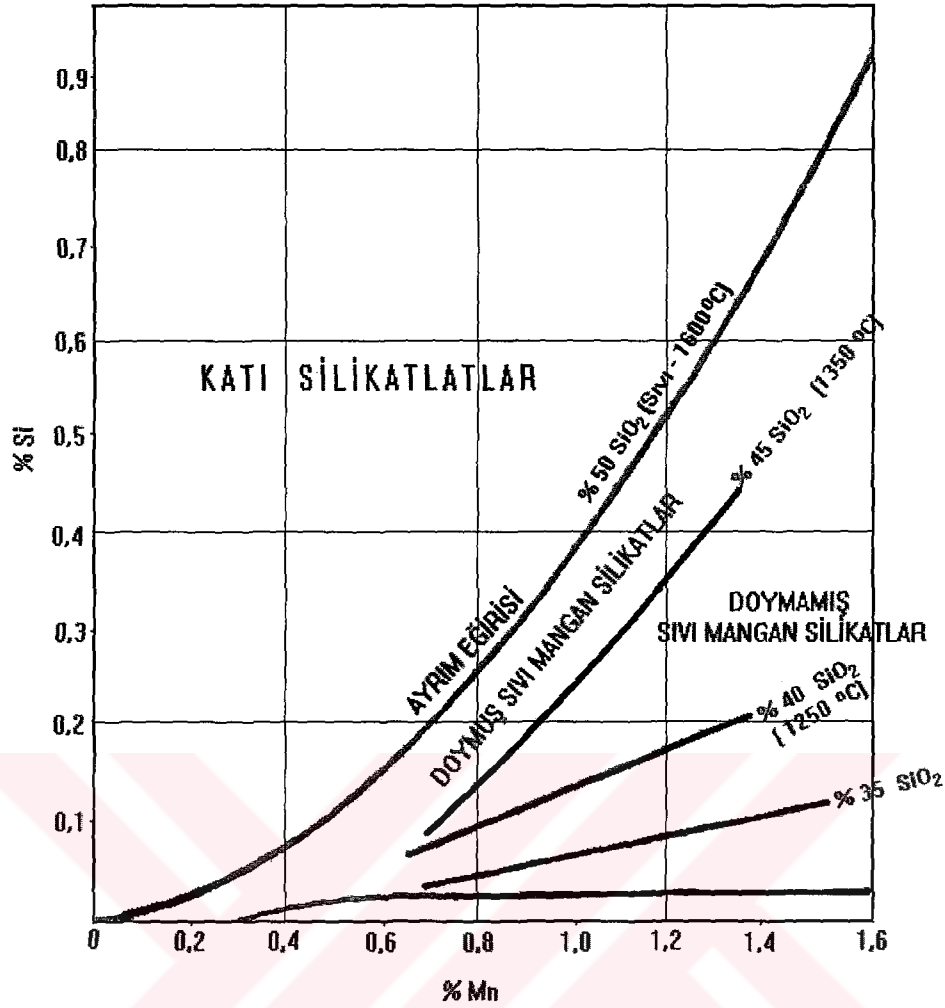
Temiz elik üretiminde en etkin yöntemlerden biri, elik üretiminin deoksidasyon sürecini denetleyerek oluşan kalıntılar tür, büyüklük, biçim ve dağılımlarını değiştirmektedir.

Günümüzde birçok işletmede, deoksidasyon işlemi uygulanmış sıvı elik, koruma altına (pota – tandiş arası ara tp / tandiş – kalıp arası daldırma nozl veya argon gazı ile perdeleme) alınmadan dökülmektedir. Dökümlerin her zaman hava ile teması söz konusu olduğundan, genellikle çeliğin deoksidasyon işlemi tıkanmaları önlemek amacıyla Mn – Si ile yapılmaktadır. Ca veya CaSi tel uygulamaları yapılıyorsa, deoksidasyon kısmen Al ile gerçekleştirilebilmektedir[9].

Deoksidasyon (birincil ve ikincil) rnleri kapsamında, sıvı eliğin Mn/Si oranına bağımlı olarak iki ana tür oluşması söz konusudur. şekil 2.7 incelendiğinde; “ayırım eğirisi”nin sol yanında “katı silikatlar”, sağ yanında ise “sıvı silikatlar” oluştuğu görülmektedir. Sıvı silikatlar için, Mn içeriği arttıkça oluşan kalıntıların ergime sıcaklıkları ve viskoziteleri düşmekte, yoğunlukları ise artmaktadır [6].

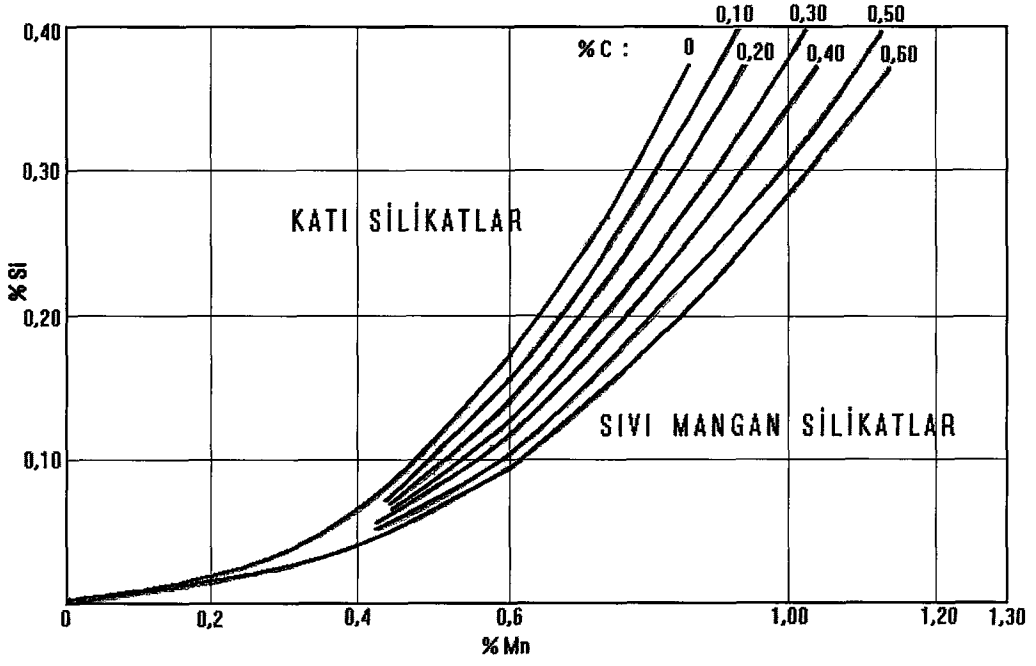
Kalıntılar arasında, sıvı elik içerisinden en kolaylıkla yüzüp ayrılabilenler “katı silikatlar” dır. Sıvı mangan silikatlar, sıvı çelikten güçlükle ayrılabilmektedir. Mn/Si oranı arttıkça, kalıntıların yoğunluğu artıp, viskozite ve ergime sıcaklıkları düşeceğinden bu kalıntıların yüzdürülmesi daha da zorlaşmaktadır [6,9].

şekil 2.7’de, ayırım eğrisinin sağ yanında ve bu eğriye yakın bölgelerde oluşan kalıntıların SiO₂ içeriği yüksek ve yoğunluğu az ve viskoziteleri daha yüksektir. Bu zellikler, onları daha yüksek Mn/Si oranına sahip sıvı çeliklerde oluşan kalıntılara göre daha kolaylıkla ortamdan ayrılabilmelerini sağlamaktadır [6].



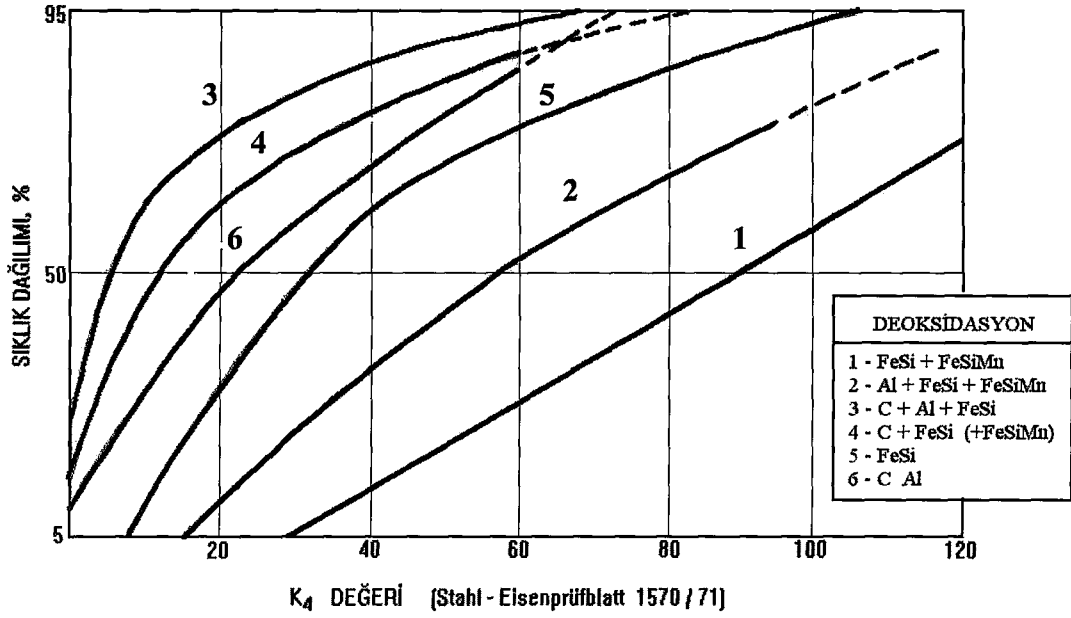
Şekil 2.7. 1550 °C – 1600 °C sıcaklık aralığında Mn – Si deoksidasyon sonucu oluşan kalıntılar [6].

Şekil 2.7’de gösterilmiş olan ayırım eğrisi, çeliğin kimyasal bileşimindeki %C içeriğine bağlı olarak konumunu değiştirmektedir. Bu değişim, Şekil 2.8’de gösterilmektedir. C’nun sıvı çelikteki oksijen aktivitesini azaltıcı yönündeki etkisi sonucu; katı silikat bölgesi çeliğin %C içeriği arttıkça genişlemektedir. Bu nedenle, EAO’dan döküm alma sırasında, üretilecek çelik cinsinin standartlarda verilen alt %C değeri tutturulmayı amaçlanarak ilk olarak C verici katımlar yapılmaktadır. Böylece, çeliğin oksijen aktivitesi azaltılarak “katı silikat” bölgesi genişlemektedir. Bunun sonucu olarak da, daha temiz çelik üretilmesi imkanı sağlanmaktadır [6].



Şekil 2.8. Çeliğin C% içeriğinin sıvı/katı silikatların ayırma eğrisine etkisi (1550 °C – 1600 °C) [6].

Şekil 2.9’da, çeşitli deoksidasyon uygulamaları ve bu uygulamaların sıvı çelik temizliği üzerindeki etkisi görülmektedir. Şekil 2.9’daki grafiğe göre; elde edilen en temiz çelik, deoksidasyonun ilk olarak akış esnasında ve C ile yapıldığı 3, 4 ve 6 numaralı uygulamalar olduğu görülmektedir. Deoksidasyon ürünü $CO_{(g)}$ olduğu için, kirlenme söz konusu olmamaktadır. Kalan oksijenin de Al veya FeSi ile giderilmesi katı ürünler ortaya çıkarmakta; bunlarında sıvı çelikten uzaklaştırılması kolay olmaktadır [6,9].



Şekil 2.9. 130 x 130 mm kütüklerden üretilen 20 – 25 mm Ø çubukların değişik oksijen giderme uygulamalarına göre $\leq 0,30$ C içeren çeliklerin iç yapı temizlik durumları [6].

2.3.2. Desülfürizasyon

Kükürt (sülfür), çelik içerisinde tane sınırlarında FeS formunda çökerek sıcak yırtılmaya sebep olması, kalıntı olarak sıcak haddeleme sırasında uzayarak çeliğin üzerine binen dik yüklerde kırılmaya neden olmasından dolayı çeliğin fiziksel ve mekanik özelliklerini olumsuz yönde etkileyen istenmeyen bir elementtir. Sıvı curuf içerisinde kükürt sülfid (S^{2-}) halde bulunmaktadır [2-4, 7].

Pota ocağında; metal (çelik) içerisindeki kükürtün, çeşitli ilaveler (CaO , CaF_2 , CaC_2) sayesinde meydana gelen kimyasal reaksiyonlar (CaF_2 hariç) ile pota ocağı sentetik curufuna katılarak giderilmesi veya azaltılması işlemlerine “desülfürizasyon” denilmektedir [4].

Kükürdün curuf – metal arasında paylaşımı aşağıdaki üç denge reaksiyonuna bağlı olmaktadır;

$$[MS] = (MS) \quad (2.25)$$

$$[MS] + CaO = (CaS) + (MO) \quad (2.26)$$

$$(MO) + \underline{X} = \underline{M} + (XO) \quad (2.27)$$

Burada; M Fe veya Mn, X ise Al, Si veya C olabilmektedir.

Ancak, curuf – metal reaksiyonları aşağıda verilen reaksiyona göre iyonik karakter de gösterebilmektedir.



Sonuçta S reaksiyonu iyonik olarak şu reaksiyon ile gerçekleşmektedir.



Bu reaksiyona ait serbest enerji denklemi ve reaksiyon sabiti şöyledir;

$$\Delta G = 72000 - 38 T \text{ joule / mol} \quad (2.31)$$

$$K = ([a_O] [a_{S^{-2}}]) / ([a_S] [a_{O^{-2}}]) \quad (2.32)$$

$$\text{Log } K = (-3750 / T) + 1,996 \quad (2.33)$$

($[a_{S^{-2}}] / [a_S]$) oranı, kükürtün curuf ile metal arasında paylaşımını ifade etmektedir ve aşağıdaki şekilde gösterilmektedir [4].

$$\text{Log } ([a_{S^{-2}}] / [a_S]) = \text{Log } ([a_{O^{-2}}] / [a_O]) - (-3750 / T) + 1,996 \quad (2.34)$$

2.34 numaralı eşitliğe bakıldığında, iyi bir kükürt tasfiyesi yapılabilmesi, yani $[a_{S^{-2}}] / [a_S]$) oranının yüksek olabilmesi için aşağıda sıralanan işlemlerin gerçekleşmesi gerekmektedir.

- Reaksiyon endotermik (ısı alan) bir reaksiyon olduğu için, yüksek sıcaklıklarda gerçekleşmelidir ki ($-3750 / T$) oranı yüksek olacaktır.
- Curuftaki oksijen iyonu yüksek, buna karşın çelik içerisinde çözünen serbest oksijen değeri küçük olmalıdır ki ($[a_{O^{-2}}] / [a_O]$) > 1 olacaktır. Bu oranın 1'den büyük olması, pota ocağında “bazik indirgeyici curuf” oluşturularak sağlanmaktadır.
- ($[a_{O^{-2}}] / [a_O]$) oranının yüksek olabilmesi için, a_O değerinin mümkün olduğunca düşük olması gerekmektedir. Bu nedenle, desülfürizasyon öncesi, iyi bir deoksidasyon yapılması gerekmektedir.

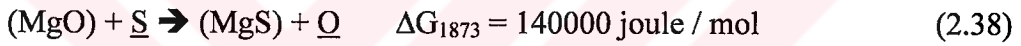
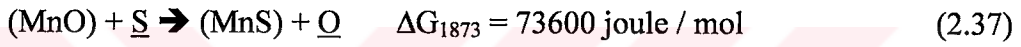
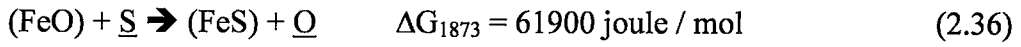
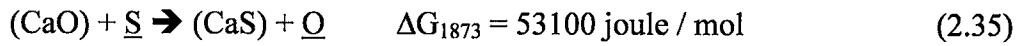
- Kükürtün aktivite katsayısını arttırıcı Al, Si, C gibi elementlerin ilavesi ile hem $[a_S]$ değeri artmakta hem de $[a_O]$ değeri azalmaktadır. Dolayısıyla da kükürt tasfiyesi artmaktadır [2-4, 7].

Ayrıca, kükürt tasfiyesi için gerekli diğer şartlar aşağıda sıralanmaktadır.

2.3.2.1. CaO (Sönmemiş Kireç) Kullanımı

Bilindiği gibi, CaO, pota ocağında desülfürizasyon işlemi için ve curuf bazikliğinin istenilen ölçüde sağlanabilmesi için en gerekli curuf yapıcı oksit fazdır.

Çeşitli oksitlerin kükürt ile reaksiyonları aşağıda görülmektedir.



Yukarıdan da görüldüğü gibi, kükürt tasfiyesi için en az enerji gerektiren faz CaO'tir [3].

2.3.2.2. CaF₂ (Fluşpat) Kullanımı

Desülfürizasyon, curuf-metal reaksiyonları ile sağlandığı için, curuf sıvı ve akışkan olmalıdır. Böylece reaksiyonlar etkin, hızlı gerçekleşmektedir.

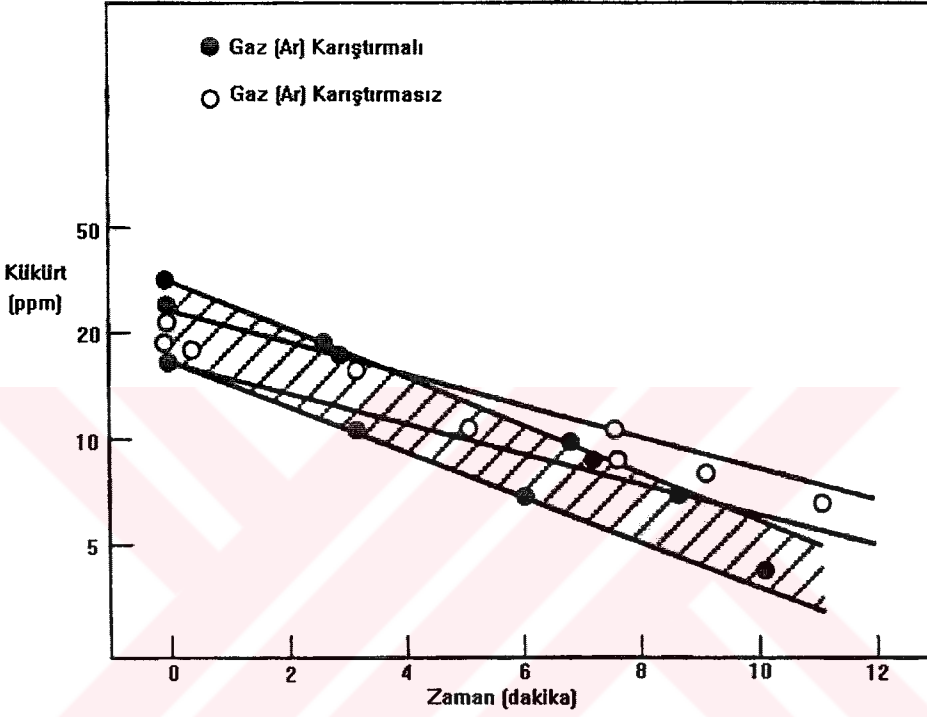
Baziklik sağlamak amacıyla ilave edilen CaO'in ergime sıcaklığı (2514 °C) çok yüksektir ve dolayısıyla curufun ergime sıcaklığını yükseltmektedir. CaF₂, curufun ergime sıcaklığını düşürerek viskozitesini azaltmaktadır ve dolayısıyla akışkan bir curuf elde edilmesini sağlamaktadır. Etkisi yalnızca fiziksel olmakla birlikte baziklik üzerinde hiçbir etkisi yoktur [2-4].

2.3.2.3. İnert Gaz (Ar) Altında Karıştırma

Desülfürizasyon reaksiyonları difüzyon kontrollüdür ve curuf – metal arayüzeyinde gerçekleşmektedir. S'ün sıvı çelik içerisinde curuf – metal ara yüzeyine difüzyonu, orada curuf ile reaksiyona girmesi ve oluşan kükürtlü bileşiğin curuf içerisine difüzyonu sıvı çeliğin karıştırılması ile doğru orantılıdır. Bu nedenle sıvı çeliğin, asal

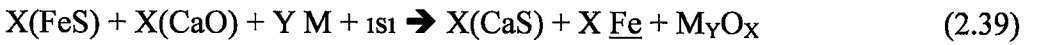
gaz (Ar) ile karıştırılması, hem difüzyon hızlarını hem de curuf metal arayüzeylerini artırarak reaksiyonu geliştirmektedir [7].

Şekil 2.10'da, çelik içerisinde S değerinin pota ocağı işlem süresi ile, Ar karıştırma yapılan ve yapılmayan durum için ilişkisi görülmektedir. Şekilden de görüldüğü gibi, zamana bağlı olarak kükürt giderme hızı Ar karıştırma yapıldığı durumda daha fazla gerçekleşmektedir [4].



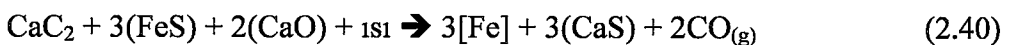
Şekil 2.10. Pota ocağı işlemlerinde gaz karıştırmanın desülfürizasyon üzerindeki etkisi. [4]

Gerçek anlamda desülfürizasyon, tam olarak aşağıdaki reaksiyon ile gerçekleşmektedir [3].



Burada; X 1, 2 ve 3, Y 1 ve 2 sayılarını, M ise Al, Si veya C'ü ifade etmektedir.

Desülfürizasyon amacıyla, ayrıca, karpit (CaC_2) de kullanılabilir. Karpit ilavesi sonucunda, 2.40 numaralı reaksiyon uyarınca CO gazı açığa çıkmakta ve sıvı çelik içerisinde ek bir karışma sözkonusu olmaktadır. Ancak, etkili bir kükürt tasfiyesi yapılmakla birlikte, pahalı olduğu için tercih edilmemektedir [2-4].



2.3.2.4. Pota Ocağı Sentetik Curufu ve Desülfürizasyon İle İlişkisi

Curuf, oksit ve sülfür fazların karışımından oluşan sıvı bir bileşimdir ve baziklik (B) denilen kritere göre sınıflandırılmaktadır.

$$B = \%CaO / \%SiO_2 \quad (2.41)$$

Kükürt giderme işleminin etkin yapılabilmesi için ve refrakterlerin de bazik karakterli olması nedeniyle baziklik oranı 2,5 değerinin üzerinde olması gerekmektedir.

Eğer bazik curuf içinde $FeO + MnO < \%5$ olursa bu curuflar “Bazik İndirgeyici Curuf” olarak adlandırılır ve desülfürizasyon yani Pota Ocağı işlemlerinde kullanılmaktadır. Si ile deokside edilmiş çelikler için tipik bir bazik indirgeyici curuf bileşimi aşağıdaki tabloda verilmektedir.

Tablo 2.3. Si ile deokside edilmiş çelikler için pota ocağı sentetik curufunun kimyasal bileşimi

FAZ	%
CaO	50 – 55
SiO ₂	20 – 25
Al ₂ O ₃	8 – 10
MgO	8 – 11
FeO + MnO	< 5
Baziklik	> 2,5

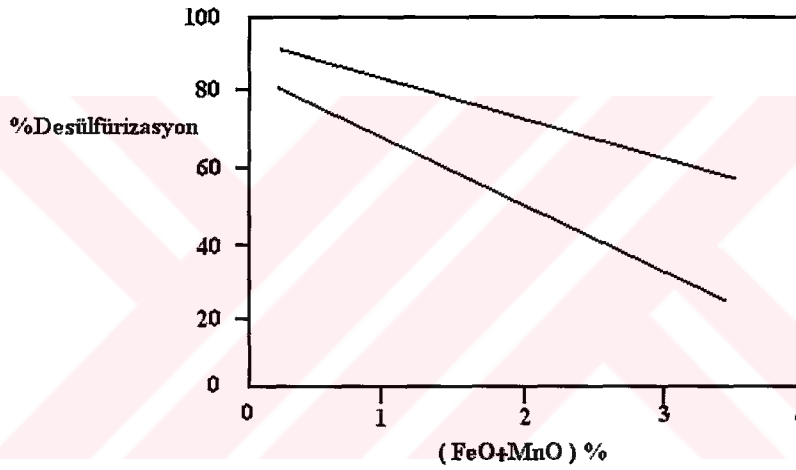
İyi bir kükürt giderme (desülfürizasyon) için gerekli şartlar aşağıdaki gibi sıralanabilmektedir.

- Bazik redükleyici curuf: $B > 2.5$ ve $FeO\% + MnO\% < 5$
(Ancak, $< 1\%$ istenmektedir.)
- Yüksek sıcaklık: Reaksiyon ısı alan olduğu için sıcaklık arttıkça hızlanmaktadır.
(> 1570 °C tavsiye edilmektedir.)
- Akışkan ve sıvı bir curuf : Sıvı (curuf) – sıvı (çelik) reaksiyonu katı (curuf) – sıvı (çelik) reaksiyonuna göre hızlıdır.

CaO Kükürt gidermede ve baziklik için en gerekli curuf yapıcı oksit fazdır. Ancak ergime sıcaklığı çok yüksektir (2514 °C). Çelik üretim sıcaklıklarında ergimiş curuf elde edilebilmesi için fluks (flux) ve curuf sulandırıcı kullanımı gerekmektedir. En uygun fluks oksitler silika (SiO_2) ve Alümina (Al_2O_3)'dır. En iyi curuf sulandırıcı faz da fluşpat (CaF_2)'tır. Silika ve alümina fazlarının bir kısmı deoksidasyon ve reoksidasyon ürünü olarak meydana gelmektedir.

Çelik üretiminde desülfürizasyon işlemleri curuf – metal reaksiyonları ile yapıldığı için curuf sıvı ve akışkan olmalıdır. Böylece reaksiyonlar hızlı gerçekleşmektedir.

FeO ve MnO'in kükürt giderime üzerinde olumsuz etkisi olduğu bilinmektedir. Bu ilişki Şekil 2.11'den de açıkça görülmektedir.

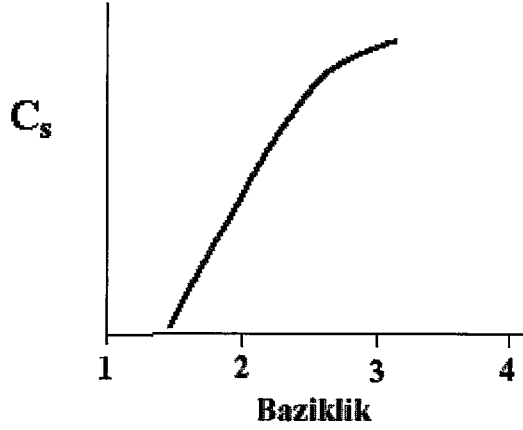


Şekil 2.11. Pota ocağı sentetik curufu içerisindeki (FeO+MnO)% değerinin desülfürizasyon üzerindeki etkisi.

Desülfürizasyon, deoksidasyon ile çok ilgilidir. Kükürt dağılım oranı “($\%S$) / [$\%S$]” kükürdün curufla metal arasında paylaşımını ifade etmektedir. Bu oran; S kapasitesi (C_s) ile metal içinde çözünmüş bulunan oksijenle ($\%O$) aşağıdaki eşitlikteki gibi doğru orantılıdır.

$$(\%S) / [\%S] = C_s / \%O \quad (2.42)$$

Şekil 2.12'de görülen baziklik oranı ile S kapasitesi arasındaki ilişkiye bakıldığında, en iyi noktanın baziklik değerinin 2,5 olduğu nokta olduğu görülmektedir.



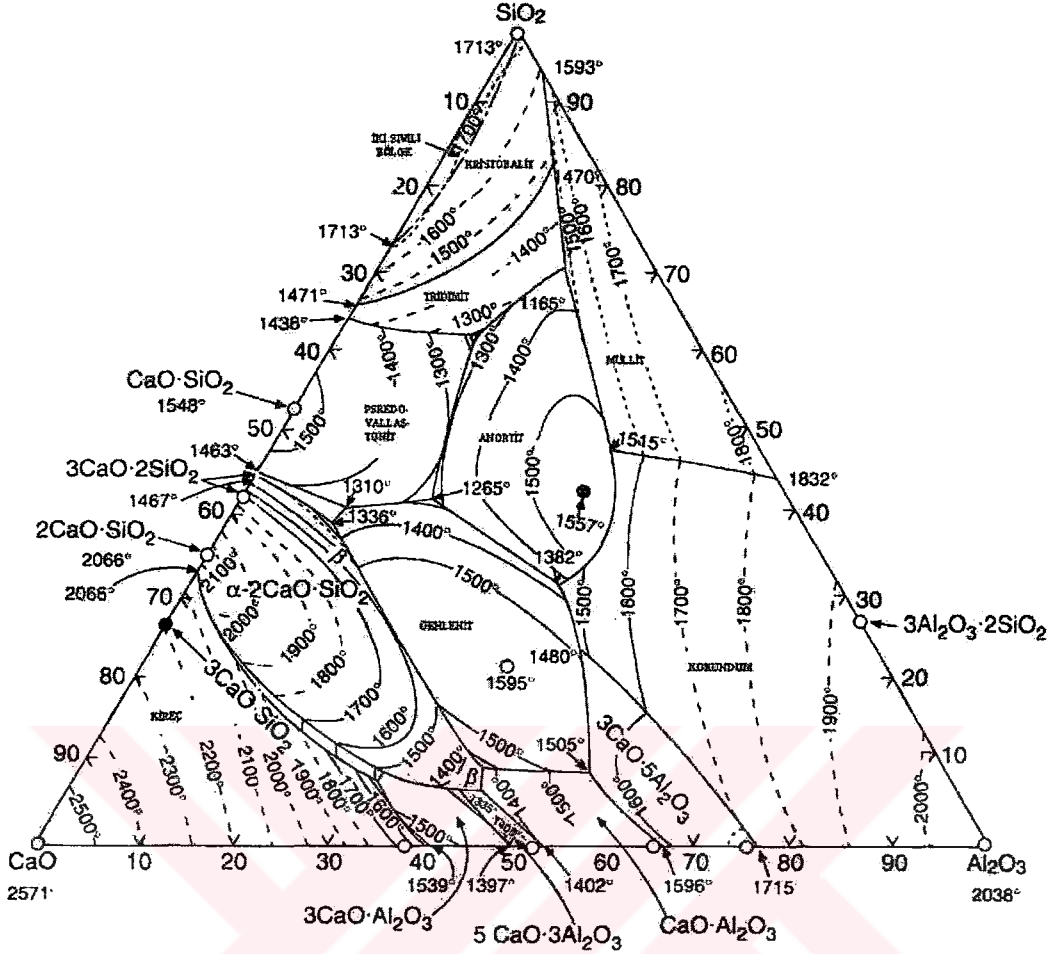
Şekil 2.12. Bazikliğin curuf kükürt kapasitesi üzerindeki etkisi

Sıvı curuf elde etmek için çalışılan sıcaklıkta sıvı fazda olan curuf bileşimine ulaşılması gerekmektedir. Bu nedenle curufun en temel bileşenleri olan $\text{CaO} - \text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3$ 'ün üçlü faz diyagramına bakılmalıdır.

Şekil 2.13'te görülen $\text{CaO} - \text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3$ üçlü faz diyagramına bakıldığında 1500 – 1600 °C sıcaklıklarında sıvı oluşturan ötektik bölgeler iki tanedir. Bunlar; Pseudo – Vallastonit ve Gehlenit bölgeleridir. Curufun ergime sıcaklığı düşük olduğu taktirde desülfürizasyon için gerekli curuf – metal reaksiyonları hızlı olmaktadır. Pota ocağında kullanılan curuf sistemi aşağıda tanımlanan bölgelerden birine dahil olduğu taktirde curuf çalışma sıcaklığı olan 1500 – 1600 °C'de sıvı fazda olmaktadır.

Pseudo – Vallastonit Bölgesi (Kalsiyum-silikat esaslı curuf), % 50 – 55 CaO , % 20 – 25 SiO_2 , % 8 – 10 Al_2O_3 ve diğer fazları içermektedir. Bu curuf sistemi açıkta döküm alan tesislerde kullanılmaktadır. Deoksidasyon temel olarak Silisyum ile yapılmaktadır.

Gehlenit Bölgesi (Kalsiyum-alüminat esaslı), % 50 – 55 CaO , % 25 – 30 Al_2O_3 , % 5 – 8 SiO_2 ve diğer fazları içermektedir. Bu curuf sistemi ise yalnızca Al deoksidasyon yapıldığında oluşmaktadır. Bu curuf sistemi ile çalışan tesislerde açıkta döküm almak mümkün değildir.



Şekil 2.13. CaO – SiO₂ – Al₂O₃ üçlü faz diyagramı.

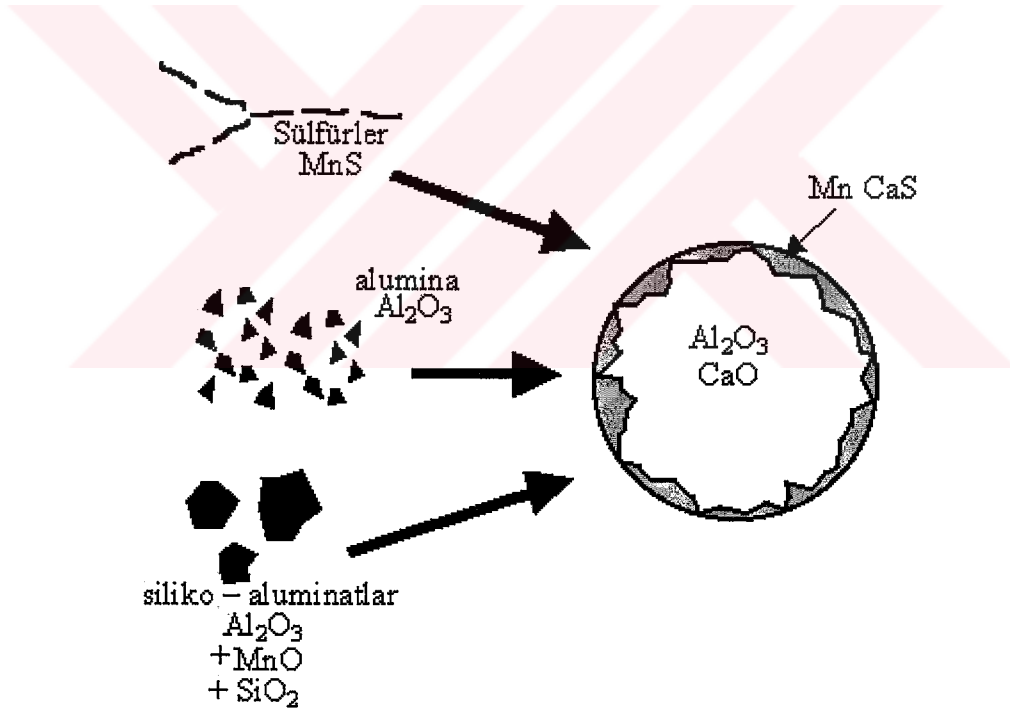
CaO - SiO₂ - Al₂O₃ toplam curuf bileşiminin % 90'nını oluşturmaktadır. İlave edilen kireç ve fluşpat içinde bulunan empürite oksitler (MgO, SiO₂, FeO), refrakter aşınması ile curufa geçen MgO ve çok az da olsa EAO'dan potaya karışan FeO, MnO gibi oksit fazlar da bulunmaktadır. Bu durumda curuf sistemimiz 6 – 7 oksit fazdan oluşmaktadır. Bilindiği gibi faz diyagramları denge koşullarında 2 veya 3 çeşit oksit fazlar için kullanılabilir. 6 – 7 oksit fazın birlikte bulunduğu ve şartların kompleks olduğu işletme koşullarında geçerliliklerini yitirmektedir. Ancak gene de denge koşullarının ne olabileceği konusunda bir fikir verebilmektedir.

Yukarıda da belirtildiği gibi pota ocağı curuf kompozisyonu deoksidasyon ürünleri, refrakter malzemeden ve reoksidasyon sonucu meydana gelen fazlardan oluşmaktadır.

2.3.2.5. Ca Tel Uygulaması ile İnküzyon Şekil Kontrolü

Pota metalurjisinde, hafif ve reaktif (kolay oksitlenebilen) elementlerin sıvı çeliğe eklenmesi gerekmektedir. Kalsiyum bu elementlerden biridir. Düşük yoğunluğa sahip ($d = 1,5\text{g/cm}^3$) olduğundan sıvı çelik içerisinde yüzmeye ve hemen oksitlenmeye meyillidir. Sıvı çelik içerisinde düşük çözünürlüğe sahip olmakla birlikte $1600\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de $1,8\text{ atm}$ buhar basıncına sahiptir. Bunun gibi elementlerin pota dibinde ilavesi ile, hava ve curuf ile oksidasyon önlenmiş olmaktadır. Ayrıca, sıvı çelik ile temas yüzeyi ve zamanı arttırılmaktadır [3,4,8].

Kalsiyum, deoksidasyon sonucunda meydana gelen katı alumina ve siliko-aluminanın döküm sıcaklığında sıvı olan kalsiyum aluminatlara dönüşmesini sağlamaktadır. Temiz çeliklerde bu aluminatlar Mn ve Ca kompleks sülfürler tarafından çevrelenmiştir (Şekil 2.14) [8].



Şekil 2.14. Kalsiyum uygulaması ile elde edilen inküzyon modifikasyonu [8].

Kalsiyum tel, çelik kalitesine bağlı olarak ton çelik başına $0,15 - 0,5\text{ kg Ca}$ olarak uygulanmaktadır.

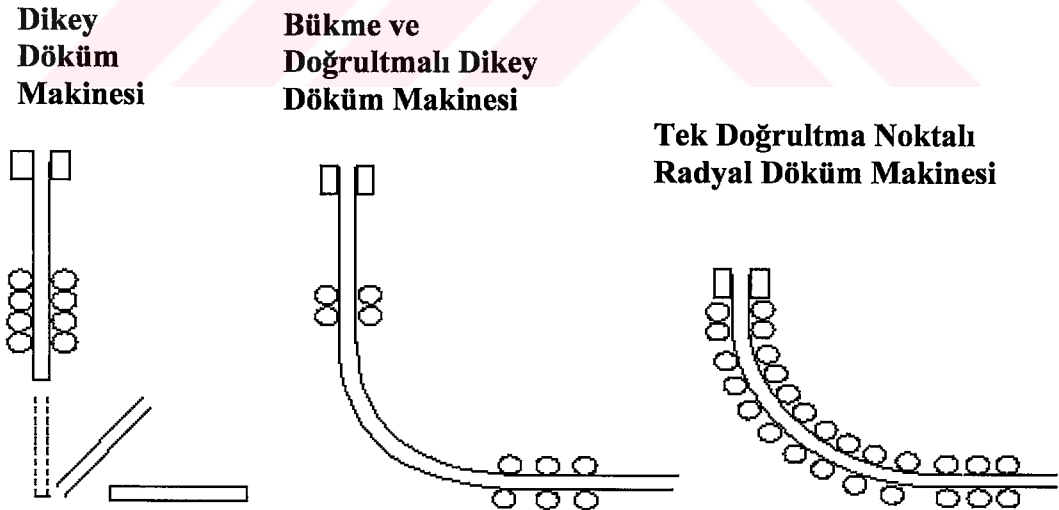
Bu uygulamaların başarılı olması, kalsiyum enjeksiyonu esnasında çelik içerisinde kalan alumina inklüzyonlarının miktarı ile çok yakından ilgilidir. Pota metalurjisinde buna bağlı olarak şunlar tavsiye edilmektedir;

- Deoksidasyon için Al ilavesi mümkün olduğunca erken ilave edilmelidir.
- Sıvı, bazık ve iyi deokside edilmiş curuf altında sıvı çelik yavaş karıştırılmalıdır.
- Ca ya da CaSi tel mümkün olduğunca geç verilmelidir.
- Çelik reoksidasyona karşı iyi korunmalıdır.

2.4. Sürekli Döküm Prosesi

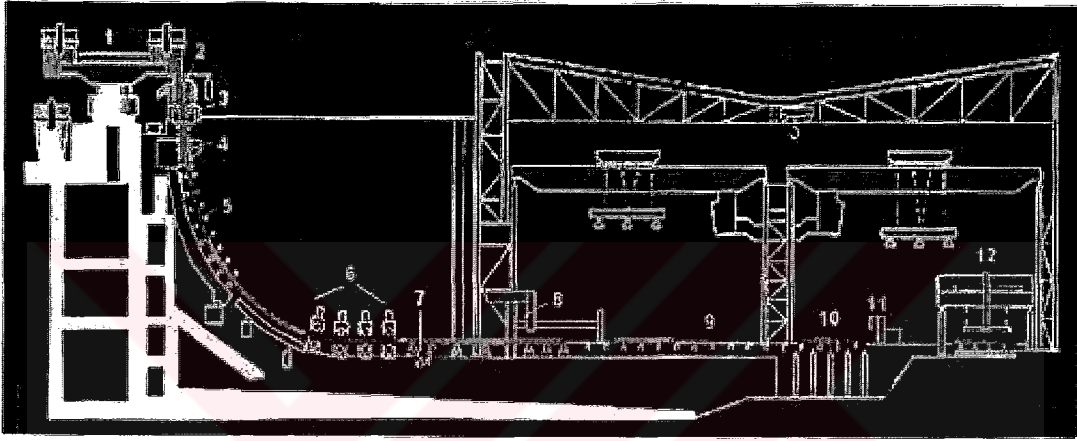
2.4.1. Genel Prensipler

Sürekli döküm, sıvı çeliğin kütük, blum veya slab olarak adlandırılan yarı mamül haline getirilecek şekilde kontrollü olarak katılaştırıldığı bir prosestir. Sürekli döküm öncesine bakıldığında (1950’li yıllar), sıvı çelik ingot şeklinde dökülmekteydi. Daha sonra, üretim miktarı, kalite ve verimliliğin artırılması amacıyla sürekli döküm prosesine geçilmiştir. Şekil 2.15’te çeşitli sürekli döküm teknikleri görülmektedir [11].



Şekil 2.15. Çeşitli sürekli döküm makinesi tipleri [10].

EAO yada BOF (Bazik Oksijen Fırını) 'ndan çelik potaya aktarılmakta ve sürekli döküm makinesine götürülmektedir. Pota, tandışın üstünde döküm pozisyonuna getirilmesi için döndürüleceği taretin üstüne getirilmektedir. Şekil 2.16'ya göre, sıvı çelik potadan (1) tandışın (2) içine akıtılmakta, daha sonra su soğutmalı bakır kalıba (3) gelmektedir. Katılaşma kalıp içinde başlamakta ve spreyci soğutma bölgesi (4) ve yol destek röleleri (5) içinde devam etmektedir. Son olarak kütük doğrultulmakta (6) ve torç (8) ile kesilmektedir. Daha sonra haddeleme işlemi için sıcak ürün olarak depolanmaktadır (12).



Şekil 2.16. Kütük ve blum üretiminde kullanılan sürekli döküm makinesinin genel görünümü [10].

Döküme başlamak için, bir çelik manken çubuk ile (dummy bar) kalıp altı kapatılarak sızdırmazlık sağlanmaktadır. Bu çubuklar çekme – doğrultma ünitesi tarafından hidrolik olarak kontrol edilmektedir. Bu çubuk, sıvı çeliğin döküme ilk başladığında kalıp altından çekme – doğrultma ünitesine kadar ilerlemesini sağlamak ve bu bölgeye ulaşıldığında kütükten ayrılmaktadır. Kalıp içine dökülen çelik, kısmen katılaştırılır ve katı kabuk ile sıvı çelikten oluşan döküm ilk şeklini almaktadır. Bu primer soğutma bölgesinde kabuk yeterli kalınlıktadır (10-20mm). Çekme – doğrultma ünitesi, manken çubuk boyunca kısmen katılaşmış ürünü kalıp dışına ve aşağı doğru çekmektedir. Sıvı çelik kalıp içine akmaya devam etmekte ve aşağıya çekilen kütüğün üstü eşit hızda beslenmeye devam etmektedir. Döküm hızı (çekme hızı), üretilecek çeliğin cinsine, kalitesine ve kesidine bağlıdır. Döküm süresi, potada ısı kayıplarını önlemek amacıyla 1 – 1,5 saat olmaktadır.

Kalıp çıkışında kütük destek rölelerine ve sekonder soğutma bölgesine girmektedir (Şekil 2.16 / 4-5). Burada, katılaştıran döküme su püskürtülerek (yada hava-su karışımı) katılaştıranın ilerlemesi sağlanmaktadır. Bu bölgede, döküm şeklinin bütünlüğü ve döküm kalitesi korunmaktadır. Tamamen katılaştıran döküm, çekme – doğrultma ünitesinin içinden geçmekte ve istenen boyda kesilerek depolanmaktadır.

Elde edilen ürün, kesit şekline ve boyutuna göre şu şekilde isimlendirilmektedir [11].

Kütük, 150 x 150 mm'ye kadar kare kesitli ve 150 mm'ye kadar çapa sahip dairesel kesitli üretilen yarı mamüllerdir. Blum, kare, dairesel ve dikdörtgen kesitli olabilmektedir. 150 x 150 mm'den büyük kare kesitli, 150 mm 'den büyük çapa sahip dairesel kesitli ve 800 x 400 mm'ye kadar dikdörtgen kesitli ürünlerdir. Dikdörtgen kesit için, en / boy oranı 2'den küçük olmaktadır. Slab ise blumdan daha büyük kesitli ve en / boy oranı 2'den büyük olan ürünlerdir [11].

Özetlenecek olursa; sürekli döküm prosesi aşağıdaki kademelerden oluşmaktadır.

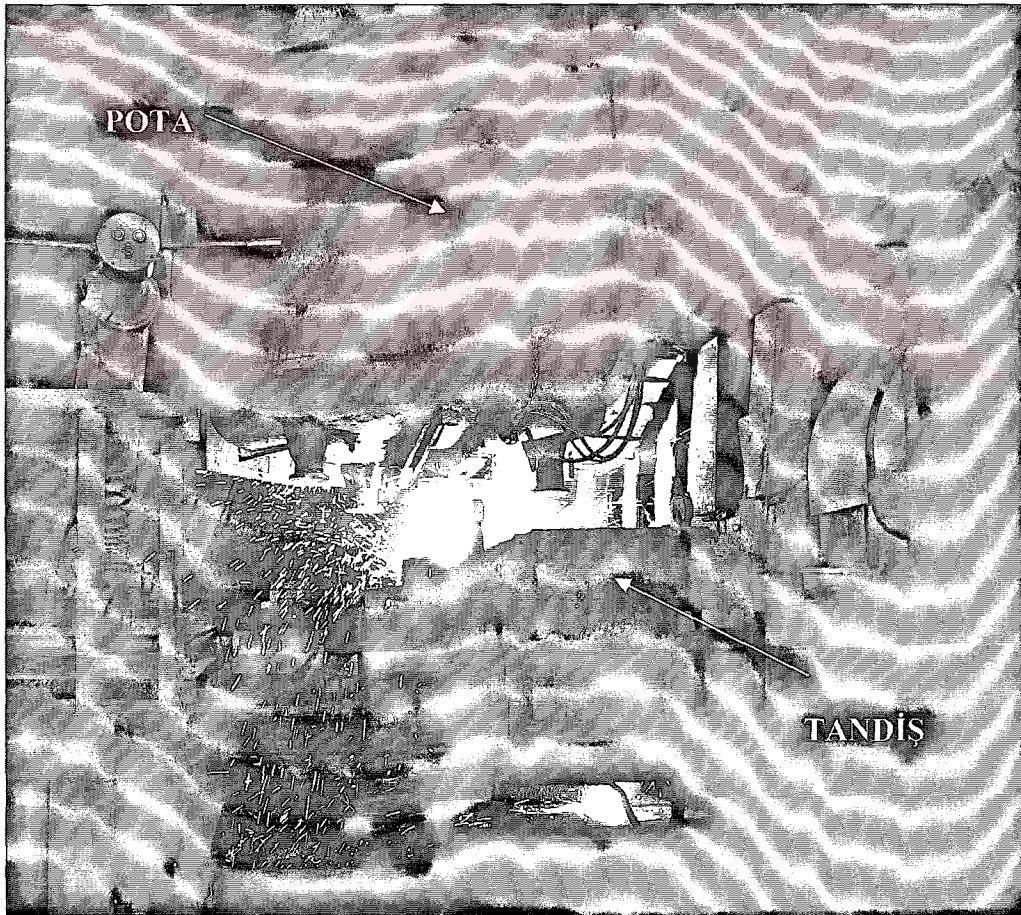
1. *Tandış*: Kalıbın üstünde belirli bir hızda sıvı çeliği kalıba beslemektedir.
2. *Primer Soğutma Bölgesi / Su Soğutmalı Kalıp*: Kalıbın içine gelen sıvı çelik, burada yeterli dayanıma sahip kabuğun oluşturulması ile ilke şeklini alarak sekonder soğutma bölgesine geçmektedir.
3. *Sekonder Soğutma Bölgesi*: Kalıp altında ve dökümün ilerleyeceği kadar yeterli genişlikte bir bölgedir. Hala sıvı çelik içeren döküm buradan geçerek püskürtme suları ile tamamen katılaştırılmaktadır.
4. *Çekme – Doğrultma Ünitesi*: Dökümün yatay konuma getirilmesini ve ilerlemesini sağlamaktadır.
5. *Kesme Ünitesi*: Aktarma ve depolama işlemleri için istenen boyda kaynak kesme veya mekanik kesme ile kesilmektedir [10].

2.4.1.1. Potadan Tandışe Döküm

Potadan tandışe sıvı çelik akışı, pota tabanında bulunan sürgülü plaka tipi akış kontrol sistemleri ile gerçekleşmektedir. Sürgülü plaka sistemleri 2 ve 3 plakalı olmak üzere iki çeşittir. Her iki tip için de olmak üzere, plakalardan altta olanı hidrolik kol yardımıyla yatay olarak hareket ettirilerek çelik akışı sağlanmaktadır [12].

Uzun yıllar, potadan tandiše akışın oksidasyona karşı korunması ihmal edilmiş ya da göz ardı edilmiştir. Ancak, 1970’li yılların ortalarında, temiz ürün elde etmek için etkili bir şekilde pota akışının atmosfere kapatılması gündeme gelmiş ve bir ara tüp yardımıyla bu sağlanmışır. Günümüzde bir çok çelik kalitesinde düşük kükürt ve azot seviyelerine ihtiyaç duyulması sebebiyle bu uygulama önem kazanmıştır. Ayrıca, Al ile deokside edilmiş çeliklerde sıvı çelik içerisindeki Al’un oksidasyonu ile katı alüminatların tandiştten kalıba akışı sağlayan nozüllerde birikerek daraltması ve döküm hızlarının aşırı düşmesi de önlenmektedir [11,12].

Potadan tandiše akış sistemini oksidasyona karşı korumaya ek olarak, potadan tandiše curuf gelmesinin önlenmesi de önemlidir. Döküm boyunca potadaki sıvı çelik seviyesinin kontrol edilmesi ile bu sağlanabilmektedir [11]. Şekil 2.17’de potadan tandiše akış görülmektedir.



Şekil 2.17. Potadan tandiše döküm

2.4.1.2. TandıŖten Kalıba Döküm

TandıŖten kalıba döküm, açıkta döküm alma tekniğinde sürgü plaka sistemi, kapalı döküm alma sisteminde ise stoper sistemi kullanılmaktadır. Burada kullanılan sürgü plaka sistemi, potada kullanılan ile aynı ancak daha küçük boyuttadır. Açıkta döküm alma sisteminde, istenilen çapta nozüller kullanmak yardımıyla döküm hızı kontrol edilebilmektedir. Stoper kullanılan kapalı döküm sisteminde ise, döküm hızı daima sabit kalacak şekilde döküm alınmaktadır [10-12]. Şekil 2.18’de tandıŖten kalıba döküm görülmektedir.



Şekil 2.18. TandıŖten kalıba döküm

2.4.2. Sürekli Döküm Prosesinin Ana Bileşenleri

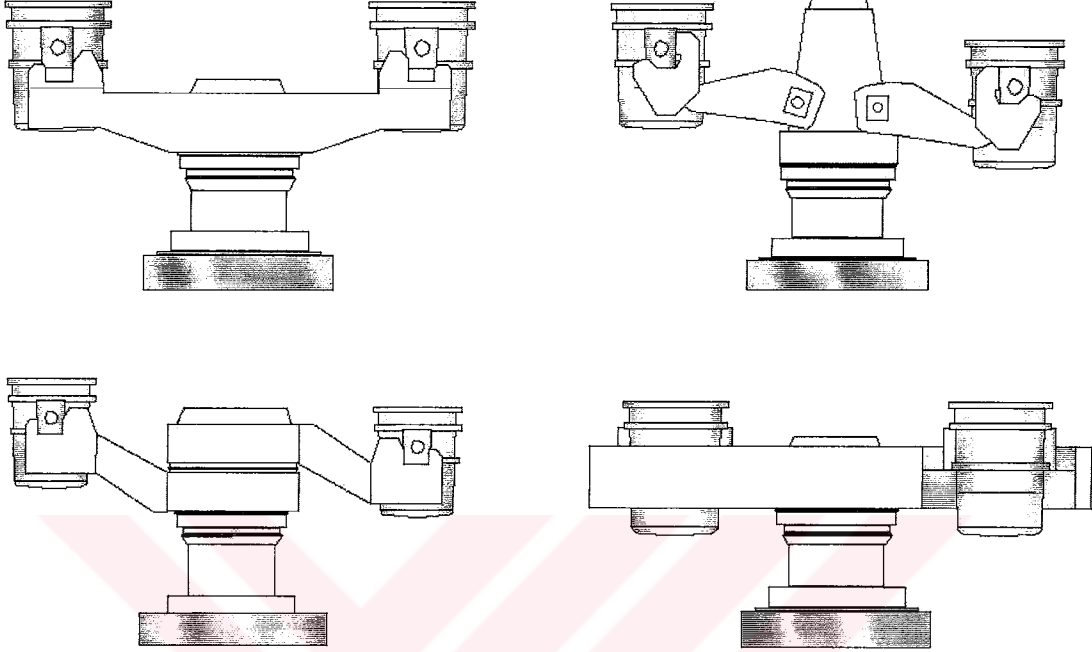
2.4.2.1. Pota Kaldırma ve Yönlendirme Sistemleri

Pota kaldırmada kullanılan vinçler, pota ocağında tüm metalurjik işlemleri tamamlanıp döküme hazır hale getirilen sıvı çeliğin bulunduğu potayı sürekli döküm makinesine götürmektedirler. Pota, vinç vasıtasıyla “pota taretı”ne konulmakta ve döküme hazır hale gelmektedir. Döküm işlemi biten pota, yine bu vinç yardımıyla önce curufu boşaltılmakta, daha sonra pota temizleme ve hazırlama istasyonuna götürülmektedir [12].

2.4.2.2. Pota Taretı

Pota taretinin görevi, dolu potayı döküm konumuna (tandıŖin üstüne), boş potayı da vincin kaldırıp götürebileceğı konuma getirmektir. Taret, iki kolludur ve iki tam dolu

potayı aynı anda taşıyabilmektedir. Kendi eksenini etrafında 360° dönebilmekte ve böylece bir pota boşaldıktan sonra kısa sürede dolu potayı döküme hazır hale getirebilmektedir [11,12]. Şekil 2.19. 'da çeşitli türde taretler görülmektedir.



Şekil 2.19. Çeşitli tipte pota taretleri [10].

2.4.2.3. Tandiş

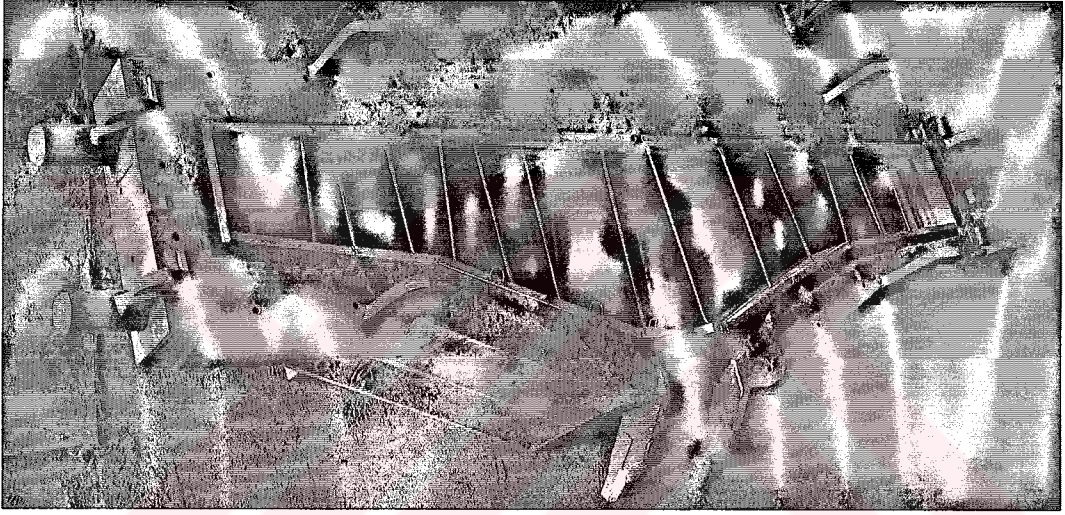
Tandiş, kalıp ile pota arasında sıvı çelik miktarını sabit tutarak, kalıba düzenli ve mümkün olduğunca sabit hızda metal akışını sağlayan bir ara teknedir. Tandişin diğer görevleri ise aşağıda sıralanmıştır.

1. Taret vasıtasıyla pota değişimi esnasında, kalıba sürekli çelik akışı sağlayarak rezerv görevi görmektedir.
2. İnklüzyonların yüzdürülmesi sağlanarak, tandiş üstünde ısı kayıplarını önlemek amacıyla kullanılan örtü tozu tarafından tutulmasını sağlamaktadır.
3. Atmosfere açık alınan dökümler için, tandişin altında bulunan nozüllerin üstünde sabit metal seviyesi sağlayarak çelik akışını sabit tutmakta ve döküm hızını kontrol etmektedir.

Yukarıda sıralanan bu görevlerin yerine getirilebilmesi için, tandiş hacmi ve derinliğinin iyi seçilmesi gerekmektedir [11].

Pota değişim zamanları, döküm hızları ve tandiş kapasitesi arasında koordinasyon oldukça önemlidir. Pota değişim esnasında kütük kalitesini korumak için şu kriterlere dikkat edilmelidir: normal döküm hızı mümkün olduğunca sabit tutulmalıdır ve tandişteki sıvı çelik seviyesi belirli bir minimum değerin altına düşmemelidir [12]. şekil 2.20’de tandiş görölmektedir.

Tandişte ani sıcaklık değişimleri sürekli döküm prosesini etkilemektedir. Ani sıcaklık yükselmeleri kalıpta kanamalara, ani sıcaklık düşüşleri ise nozullerde donmalara sebep olarak dökümün kesilmesine neden olmaktadır. Tandişte döküm esnasında rutin olarak sıcaklık ölçölmektedir. En yaygın yöntem, manuel olarak bir termokupulun sıvı çelik içine daldırılmasıyla sıcaklığın ölçölmesidir [12].

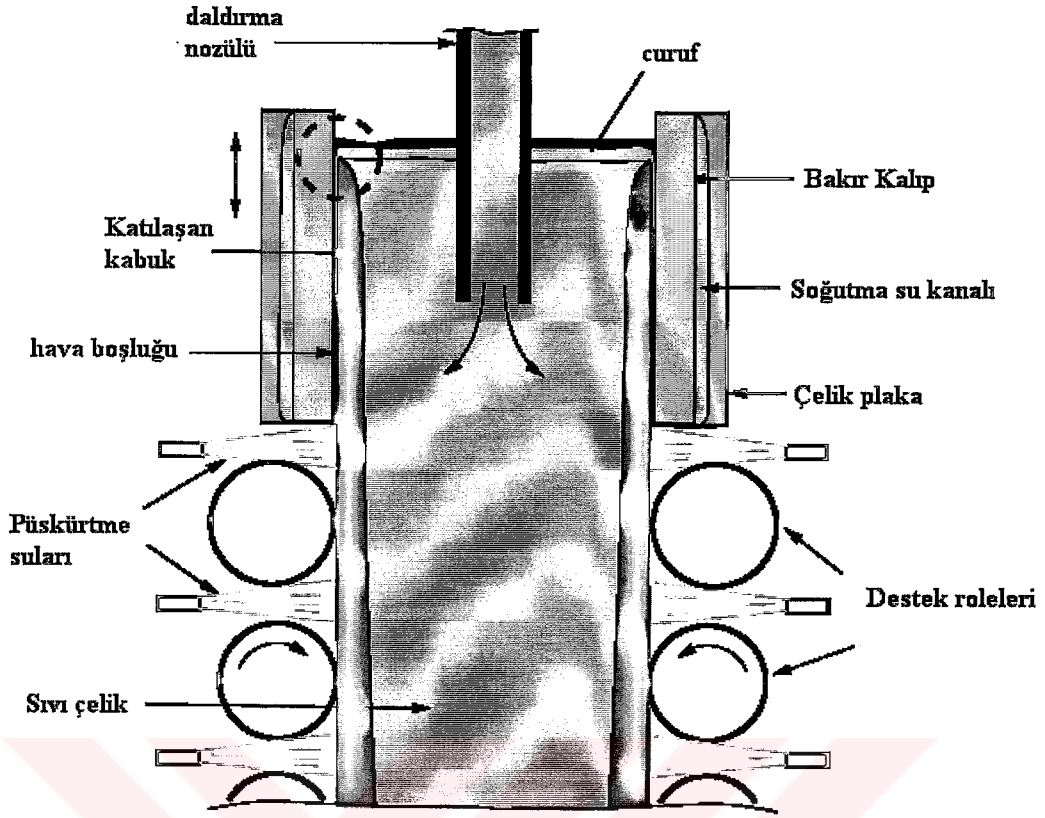


şekil 2.20. Sürekli döküm makinesinde kullanılan tandiş

2.4.2.4. Kalıp

Kalıp, sürekli döküm makinesinin, sıvı çelikle temasta bulunan tek mekanik parçasıdır. Kalıp, etkili ve uniform ısı transferi ile homojen bir kabuk oluşumunu sağlamaktadır. Böylece sekonder soğutma bölgesine (püskürtme su ile) gelmeden önce döküm yeterli dayanıma sahip yarı katı ürün haline gelmektedir [11].

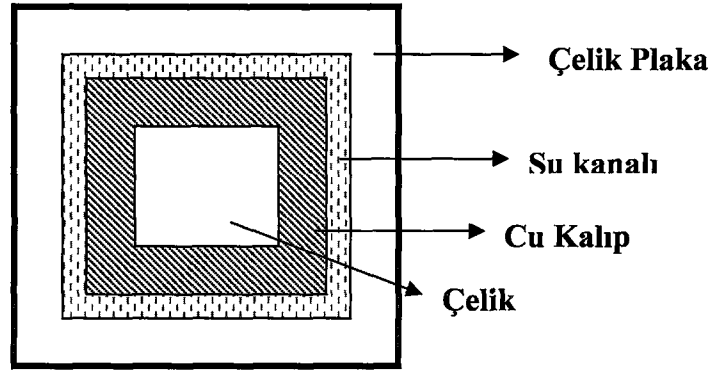
Sürekli dökümde, kalıp içinde sıvı çelik ve katılaşan kabuğun durumu şekil 2.21’de görölmektedir.



Şekil 2.21. Sürekli döküm prosesinde, kalıp içinde sıvı çelik ve kabuğun durumu [10].

Kalıp, temel olarak alt kısmı açık kutu biçimindedir ve su soğutmanın yapıldığı yüksek saflıktaki bakır plaka iç kısımda sıvı çelikle temas etmektedir. Soğutma suyu, demineralize edilmiş yüksek saflıkta olmakla birlikte kapalı devre beslenmektedir. Kalıp su kalitesi maksimum 1 Fr (maksimum 10 mg/lt CaCO_3) olacak şekilde ayarlanmalıdır. Kalıplar, çeliğin geometrik şeklini alması amacıyla aşağıya doğru daralmaktadır. Bu daralma (koniklik), ürünün kesidine ve döküm hızına bağlıdır [11].

Cu kalıp, su kanalı ve kütüğün konumu aşağıdaki şekilde görülmektedir.



Şekil 2.22. Kütük üretiminde kullanılan sürekli döküm kalıbının üstten görünüşü [11].

Kalıbın dört temel özelliği, sürekli döküm prosesinde ısı transferi ve katılaşmayı, dolayısıyla da kütük kalitesini etkilemektedir. Bunlar, kalıp konikliği, kalıp boyu, kalıp köşe yarıçapı ve kalıp malzemesidir.

Çelik kalıp içerisinde aşağı doğru ilerlerken, katılaşmadan dolayı büzülme – çekilme nedeniyle kalıp duvarı ile arasında boşluk oluşmaktadır. Kalıp konikliği sayesinde, kalıp kesidi aşağı doğru daralarak bu boşluklar önlenmekte ve ısı transferi iyileştirilmektedir. Kare kütüklerde koniklik değeri 0,5 – 1,0 %/m dolayındadır [11,13]

Sıvı çelik içinden alınan ısıнын %50'den fazlası kalıbın üst yarısında gerçekleşmektedir. Bu nedenle, kalıbın alt yarım kısmı, katı kabuğu destekleme görevini üstlenmektedir. Döküm hızının artırılacağı durumda katı kabuğun kalınlığının sabit oluşturulması amacıyla, kalıp boyunun da aynı oranda artırılması gerekmektedir. En çok tercih edilen kalıp boyu 900 – 1200 mm arasındadır [11,13].

Kalıp köşe yarıçapının fazla olması (12 – 16 mm) boyuna yüzey köşe çatlaklarının oluşmasına neden olmaktadır. Bu durumda, katılaşma esnasında gerilmeler köşe ve köşelere yakın yerlerde yoğunlaşarak çatlak oluşmasına neden olmaktadır. Kalıp köşe yarıçapının azaltılmasıyla (3 – 4 mm), boyuna yüzey köşe çatlağı oluşumu önemli miktarda azaltılmıştır [18]

Kalıp malzemesi, döküm sıcaklıklarında deformasyona uğramamalı ve iyi ısı transfer özellikleri göstermelidir. Bu nedenle ilk akla gelen malzeme yüksek saflıkta bakırdır. Ancak, düşük akma mukavemetine sahip olması nedeniyle, termal gerilmeler sonucu

kalıcı deformasyonlar, yırtılmalar meydana gelmektedir. Bunu önlemek amacıyla günümüzde bakır kalıpların iç kısımları ince Cr ve/veya Ni ile kaplanmaktadır [18].

İlk sürekli döküm makine tipi olan dikey döküm makinelerinde kullanılan kalıp tipi düz kalıp tipidir. Daha sonra, yüksek döküm hızı ve daha ince kesitte üretimlerin gereksinimi nedeniyle yükseklik probleminden dolayı, eğme-doğrultma sistemi ve kavisli kalıp kullanımı ile bu sorunlar çözülmüştür.

Kalıbın düz veya kavisli olmasına bakılmaksızın temel dizaynları aynı olmakla birlikte 3 an tipte kalıp dizayn edilmiştir. İlk tip kalıp, “masif blok kalıp”tır. Kalıp boşluğu, haddelenmiş ya da dökülmüş bakır bloktan oluşmaktadır. Soğutma su kanalları kalıp çevresi boyunca uniform olarak açılmıştır. Bu kalıp tipi, üretim prosesi için güvenlidir ancak, ilk yatırım masraflarının fazla olması ve kesit değişiminin zor olması nedeni ile dezavantajları vardır. Masif kalıplar genellikle profil (beam blank) ve blum dökümünde kullanılmaktadır. İkinci tip kalıp ise “plaka kalıp”lardır. Çelik destek plakalarına bağlanmış 4 adet bakır plakadan oluşmaktadır. Burada, istenen boyutta kalıp boşluğu elde etmek mümkündür. Soğutma su kanalları, bakır plakalar veya çelik plakalar içine dikey olarak açılmıştır. Plaka kalıplar genellikle slab döküm için kullanılmaktadır. Tüp kalıplar (boru tipi) üçüncü ana tip kalıptır ve diğerlerine göre daha ince kalıp duvarına sahiptir. Bu nedenle daha kolay deforme olmaktadır. Bu tip kalıpların kullanımı daha küçük kesitli ürünlerin (kütük) dökülmesi ile sınırlandırılmıştır. Bakır tüp, soğutma su ceketini ile çevrelenmiştir [11,13].

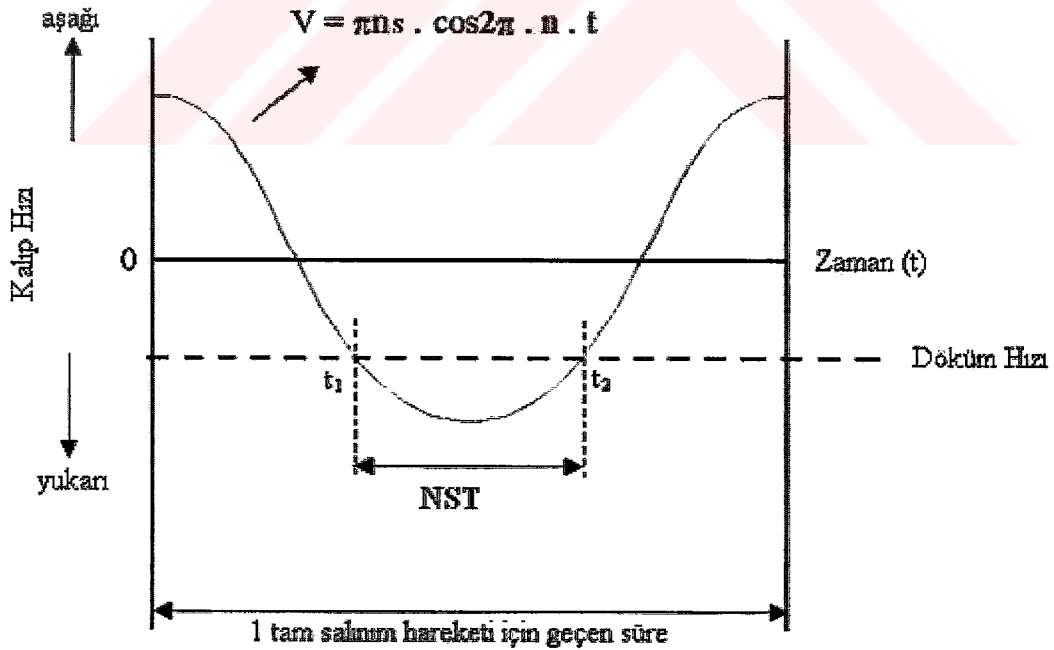
Sürekli döküm kalıbının diğer bir önemli özelliği de yağlamadır. Kütük gibi küçük kesitlerin üretiminde bitkisel veya sentetik yağlar kullanılmaktadır. Yağ, kalıp duvarı çevresinde uniform olarak yağı dağıtan plakalara pompalanarak sürtünme azaltılmaya çalışılmaktadır [13]. Yağ, kalıp duvarında ince bir yağ filmi oluşturarak minisküsün hemen yanında parçalanmaktadır (piroliz). Bu sayede kütüğün kalıba yapışmasını önleyen bir gaz yastığı oluşturulmaktadır [11].

Yağlama sayesinde, sıvı çeliğin ilk katılaştıran kabuğunun oluşmasından hemen önce kalıba yapışmaması sağlanarak, kalıp salınımı (osilasyon) ve dökümün ilerlemesi sağlanabilmektedir. Diğer bir yağlama türü ise kalıp tozunun kullanıldığı tekniktir. Burada kullanılan toz, minüsküs seviyesinde ergiyerek bir çeşit curuf oluşturmakta çelik ile kalıp arasına sızarak ve yağlamayı sağlamaktadır. Kalıp tozunun

oluşturduğu curuf, çelik ile herhangi bir kimyasal etkileşimde bulunmamaktadır. Kalıp tozu slab, blum gibi daha büyük kesitli ürünlerin üretiminde kullanılmaktadır [11].

Sürekli döküm kalıbı döküm esnasında durağan değildir. Döküm hızı ile senkronize edilmiş dikey bir salınım hareketi yapmaktadır. Osilasyon adı verilen bu kalıp hareketi, kalıp duvarı ile katı kabuk ara yüzeyinde sürtünme katsayısını düşürmeye, yapışma ve yırtılmaları önlemeye yöneliktir [12].

Çoğu kalıp osilasyonu sinüzoidal karakterde olup (Şekil 2.23), iki temel parametre olan strok ve frekans ile tanımlanmaktadır. Strok; salınım hareketinin derinliğini, frekans; birim zamandaki salınım sayısını ifade etmektedir. 3-16 mm strok ve 60-300 cpm frekans değerleri tipik uygulama değerleridir. Kalıp osilasyonuna ilişkin bir diğer kavram ise negatif sıyrma zamanıdır (Negative Strip Time). Bu oran, kalıbın aşağı doğru döküm yönündeki hareketinin, kütük çekim hızından fazla olduğu zaman aralığını ifade eder. Bu süre içerisinde kütük kabuğu basma kuvvetleri altındadır. Dolayısıyla yeni oluşan kabuğun daha önce oluşmuş kabuk ile kaynaması sağlanarak kopmalarak önlenmektedir [12].



Şekil 2.23. Kalıp salınım hareketi, kalıp hızı – döküm hızı ilişkisi

(s = strok, V= kalıp hızı, NST = Negatif sıyrma zamanı, n = t sürede yapılan salınım sayısı) [11].

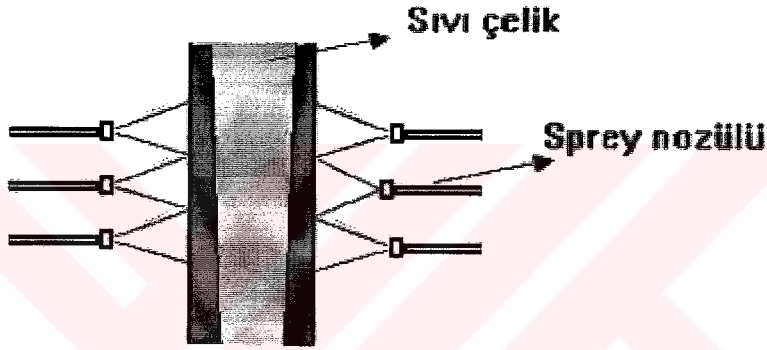
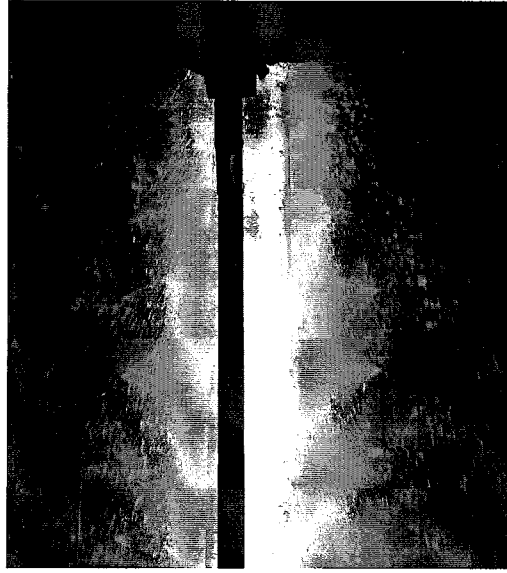
Kalıp osilasyonu, slab, blum ve kütük gibi sürekli döküm ürünlerinin, yüzeyinde birbirine paralel olarak düzenli aralıklarla yer alan osilasyon izlerinin oluşmasına yol açar. Osilasyon izlerinin derin ve düzensiz olması, enine yüzey çatlakları olmak üzere bazı kusurlara neden olmaktadır [12].

2.4.2.5. Sekonder Soğutma (Püskürtme Suları)

Kalıp altında destek röleleri arasında kullanılan, püskürtme suları ile katılma hızlandırılmakta ve kontrolü sağlanmaktadır. Sekonder soğutmanın sağladığı yararlar aşağıda sıralanmıştır [11-13].

1. Katılma hızını kontrol etmek ve arttırmak (Bazı sürekli döküm makinelerinde bu bölümde tamamen katılma sağlanmaktadır).
2. Sprey su dizaynını uygun şekilde düzenlemek suretiyle döküm sıcaklığının ve kütük yüzey sıcaklığının kontrolü sağlanmaktadır.
3. Püskürtme su sayesinde makine içi soğutma da sağlanmaktadır.

Şekil 2.24’de püskürtme su nozüllerinin konumu görülmektedir.



Şekil 2.24. Sürekli dökümde sekonder soğutma [11].

Bu bölgede 3 ana ısı transferi ile katılaşma sağlanmaktadır. Bunlar, radyasyon, iletim ve konveksiyon şeklindedir.

Radyasyon, genellikle sekonder soğutma bölgesinin üst kısımlarında meydana gelmektedir. Bu bölge atmosfere açık olması nedeniyle soğumanın bir kısmı kendiliğinden gerçekleşmektedir. İlerleyen yarı katı ürün, destek röleleri ile temasta olması nedeniyle bu parçalara ısı iletir ve soğumanın bir kısmı da burada gerçekleşmektedir. Konveksiyon mekanizması, su damlacıklarının çabuk hareketinden kaynaklanmaktadır. Burada, su damlacıkları kütük yüzeyine gelerek buharlaşmaktadır. Kütükten alınan ısı suyun buharlaşmasında kullanılmaktadır. Isı transferinin çoğu burada gerçekleşmektedir.

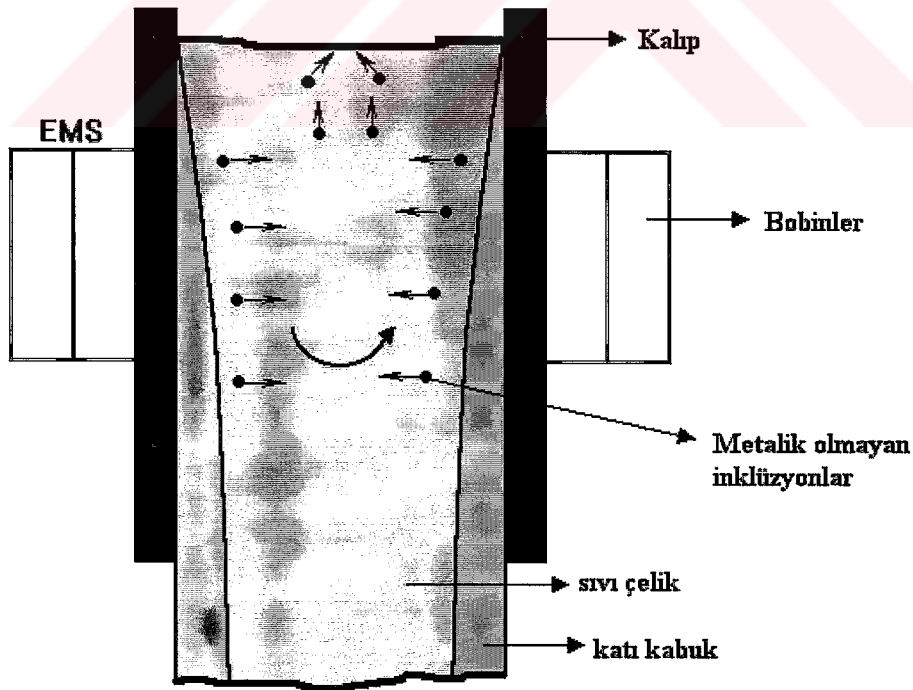
Sekonder soğutma dizaynı yüzey ve iç yapı kusurlarının oluşumunu çok etkilemektedir. Nozül tipi, nozüller arası mesafe, nozül ile kütük arasındaki mesafe,

su basıncı gibi değişken parametrelerin elik cinsi, kesit ve döküm hızına göre seçilmesi; istenen kütük kalitesini elde etmede hayati önem taşımaktadır [13].

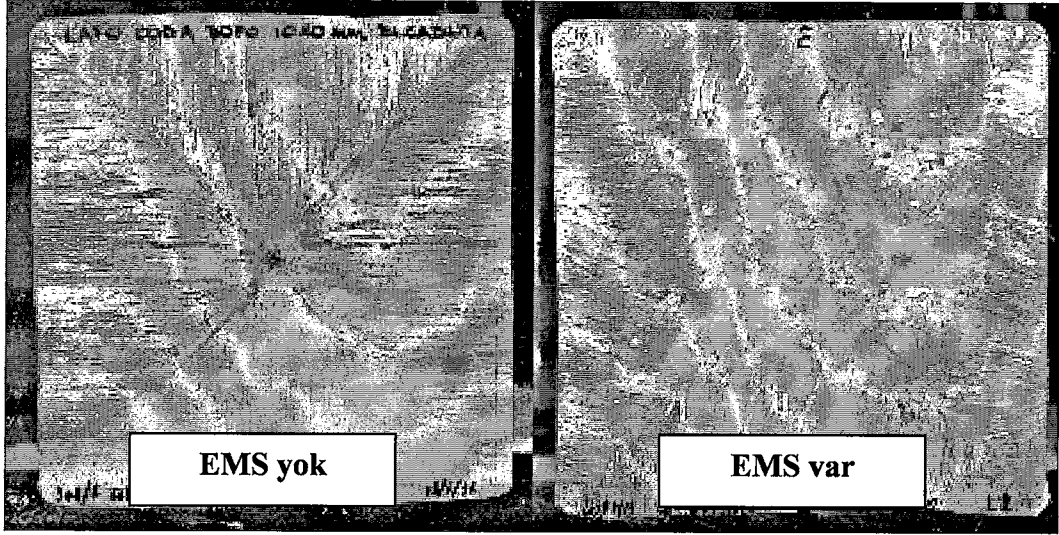
2.4.2.6. Elektro Manyetik Karıştırma (EMS)

Elektro manyetik karıştırma yıllardır çeliğin sürekli dökümünde kullanılmaktadır. Uygulama ve etkinliği; kesit, elik bileşimi ve üretim tekniğine göre değişmektedir.

Elektro manyetik karıştırmanın temel prensibi, hareketli elektromanyetik alandan faydalanılarak, katılaşma cephesinin önünde ve sıvı çeliğin içinde bir konveksiyon akımı oluşturmaya dayanmaktadır. Alanın hareketi ile eddy akımı oluşmaktadır. Eddy akımı ile de manyetik alanın etkileşimi sonucu sıvı çeliği hareket ettiren bir kuvvet yaratılmaktadır. Sıvı eliğin bu hareketi, katılaşma sırasında yararlar sağlamaktadır. Kalıp içinde santrifüj hareketin etkisiyle, inklüzyonların kalıp duvarından uzaklaşarak yüzmeleri ve iç yapı temizliği sağlanmaktadır. Şekil 2.25'te bu olayın prensibi görölmektedir. Ayrıca, döküm yapısında eş eksenli bölgeyi, dendrit kollarını parçalayarak genişletmektedir. Şekil 2.26'da EMS kullanılan ve kullanılmayan durumdaki kütüklerin makro yapıları görölmektedir.EMS kullanılan kütükte eş eksenli bölge diğerine göre oldukça geniştir [11].



Şekil 2.25. Kalıp içinde elektro manyetik karıştırma ve inklüzyonların davranışı [11].



Şekil 2.26. EMS kullanımının kütük iç yapı üzerindeki etkisi [11].

Elektro manyetik karıştırma, temel olarak üç farklı türde uygulanmaktadır. Bunlar;

M – EMS : Kalıp içinde elektro manyetik karıştırma,

S – EMS : Sekonder soğutma bölgesi içinde elektro manyetik karıştırma,

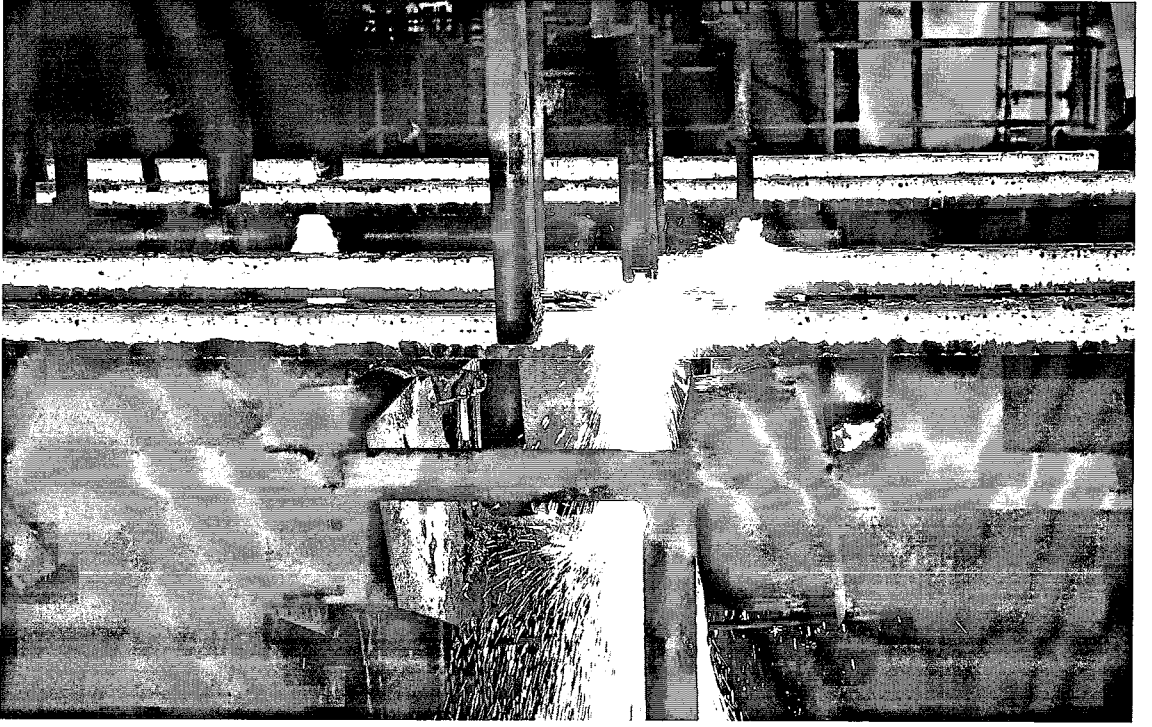
F – EMS : Son katılaşma bölgesi içinde elektro manyetik karıştırma şeklindedir.

Günümüzde, bu uygulamalar tek başına veya iki uygulamanın birlikte kullanılması ile gerçekleşmekte ve iç yapı kalitesinde maksimum iyileşmeler görülmektedir. En çok kullanılan uygulama türleri ise, tek karıştırma için M – EMS, kombinasyonlu karıştırma için ise M+F –EMS (hem kalıp içi hem de son katılaşma bölgesinde karıştırma) uygulamalarıdır [11].

2.4.2.7. Eğme – Doğrultma ve Kesme

Döküm ilerlerken yatay pozisyona getirilmesi eğme ve doğrultma kuvvetleri altında gerçekleştirilmektedir. Eğme gerçekleştiğinde, katı kabuğun dış yarıçapı çekme, iç yarıçapı basma kuvvetleri altındadır. Burada oluşan gerilmeler, çeliğin cinsine göre çatlak oluşumuna sebep olabilmektedir [10,11].

Bu işlemlerden sonra kütük, yatay olarak ilerletilerek istenen boyda kesilmektedir. Kesme işlemi, torç (kaynak kesme, Şekil 2.27.) ile veya mekanik (makas, v.s.) olarak gerçekleştirilmektedir. Kesme işleminden sonra kütük, satılmak üzere depolanır ya da sıcak ürün olarak haddeleme işlemlerine girer [10].

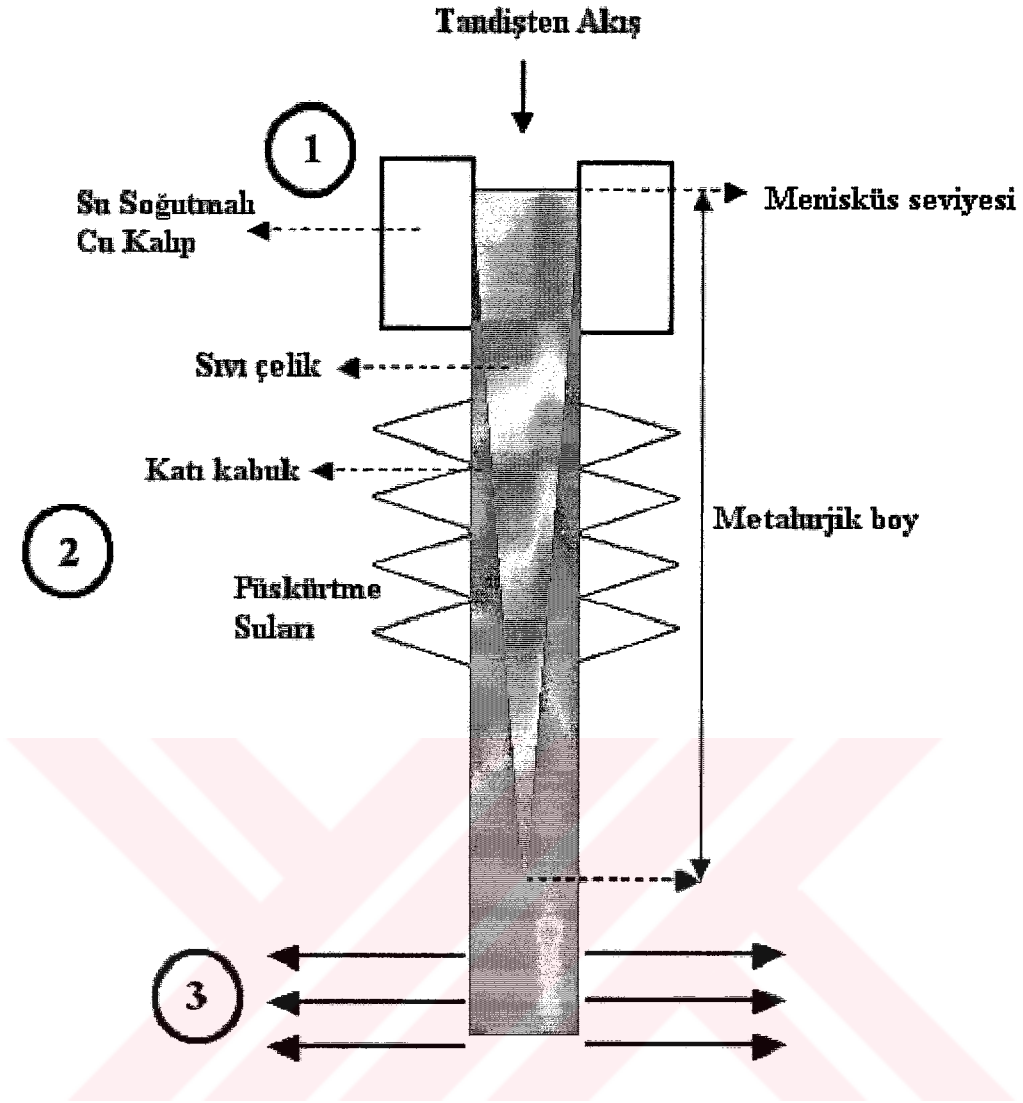


Şekil 2.27. Kütük kaynak kesme işlemi

2.4.3. Sürekli Döküm Prosesinde Isı Transferi

Sürekli döküm prosesi temel olarak, sıvı çeliğin barındırdığı ısıyı dışarı alınması işlemidir. Tandırtan kalıba giren sıvı çeliğin, süper ısısının (Döküm sıcaklığı ile katılaşma sıcaklığı arasındaki fark), katılaşma cephesindeki gizli ısısının ve son olarak katı kabuktan hassas ısının alınması (katılaşma sıcaklığının altındaki soğuma) ile katılaşma sağlanmaktadır.

Temel olarak ısı transferi; kalıp (primer soğutma), sekonder soğutma bölgesi (destek röleleri dahil) ve çevreye doğru radyasyon soğuması şeklinde üç ana bölgede meydana gelmektedir. Şekil 2.28’de bu bölgeler görülmektedir [13].



Şekil 2.28. Sürekli döküm makinesinde üç ısı atım bölgesi [13].

1. bölgede; sıvı çelikten katılaşan kabuğa, kabuktan bakır kalıp yüzeyine ve oradan soğutma suyuna ısı transferi meydana gelmektedir. 2. bölgede bölüm 2.4.2.4 'te belirtilen ısı akışları gerçekleşmektedir. 3. bölgede ise çevreye doğru radyasyon yoluyla ısı atımı söz konusudur.

Kalıp içerisinde, menisküs seviyesinde ısı transferi hemen başlamaktadır. Ancak gerçekte, ısı transferi çelik kalıba girmeden başlamaktadır. Pota ve tandış refrakterlerine ısı iletimi ve atmosfere doğru ısı kayıpları söz konusudur [13]. Pota ocağı çıkış sıcaklığı döküm sıcaklığını belirlemekte ve döküm sıcaklığı da çelik kalitesini etkilemektedir. Bu nedenle, pota ocağından çıkmadan önce sıvı çeliğin sıcaklığı bu ısı kayıpları düşünülerek ayarlanmalıdır. Pota ve tandışın ön ısıtması,

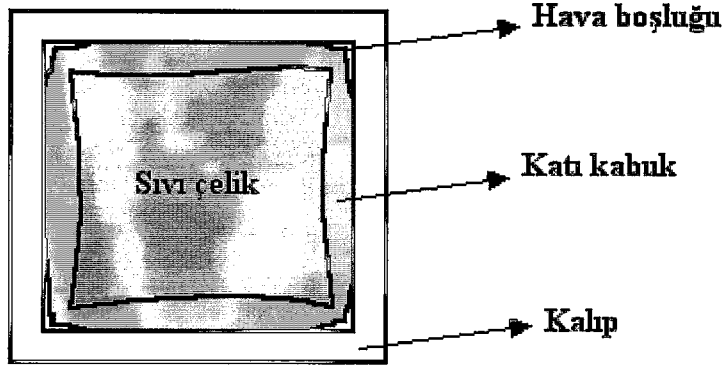
pota ocağından pota çıktıktan sonra sıvı çeliğin üzerinin çeşitli malzemelerle kapatılması bu ısı kayıplarını azaltmaktadır [20-22].

Isı transferi, sürekli dökümde meydana gelen en önemli olay olması sebebiyle makinenin işletme parametrelerinin seçiminde önemli rol oynamaktadır. Metalurjik boya göre oluşan sıvı çelik derinliği, menüsküs seviyesinden çeliğin tamamen katılaştığı mesafeye kadar inmektedir. Kütük, metalurjik boy geçildikten hemen sonra kesilmektedir. Sıvı çelik derinliği, katı kabuğa ısı iletim hızına bağlı olmakla birlikte, metalurjik boyu geçmemelidir ve kesme işlemi içeride sıvı çelik varken yapılmamalıdır. Bu nedenle, sıvı çekirdekten ısı alımı için gerekli sürenin sağlanabilmesi amacıyla döküm hızı sınırlandırılmaktadır [13].

Isı transferi, çelik kalitesini (yüzey ve iç yapı kusurları) etkileyen en önemli olaydır. Çelik de diğer metaller gibi, ısıtıldığında genleşmekte ve soğuduğunda çekilmektedir. Bu nedenle katı kabuk içindeki sıcaklık gradyanlarındaki ani değişimler, ısı transferinde de ani değişimler meydana getirerek farklı termal gerilmelere ve çekme gerilmelerinin oluşmasına sebep olmaktadır. Gerilmelerin büyüklüğüne bağlı olarak katı kabukta çatlak oluşmaktadır. Isı transfer hızı ayrıca, ferrostatik basıncın neden olduğu şişmelere (bulging) karşı çeliğin dayanımı üzerinde de etkisi vardır [13].

2.4.3.1. Katı Kabuk ile Kalıp Duvarı Arasında Hava Boşluğunun Oluşumu

Hava boşluğunun oluşumu, katılaştıran kabukta ferrostatik basınçtan kaynaklanan şişme kuvvetlerinden kaynaklanmaktadır. Sıcaklık ve çelik kompozisyonu gibi katı kabuğun dayanımını etkileyen değişkenlerden dolayı, hava boşluğunun oluşma mekanizması tam olarak anlaşılamamaktadır [13-15]. Şekil 2.29'da kalıp içerisinde hava boşluğunun oluşumu görülmektedir.



Şekil 2.29. Kalıp içerisinde hava boşluğunun oluşumu [13].

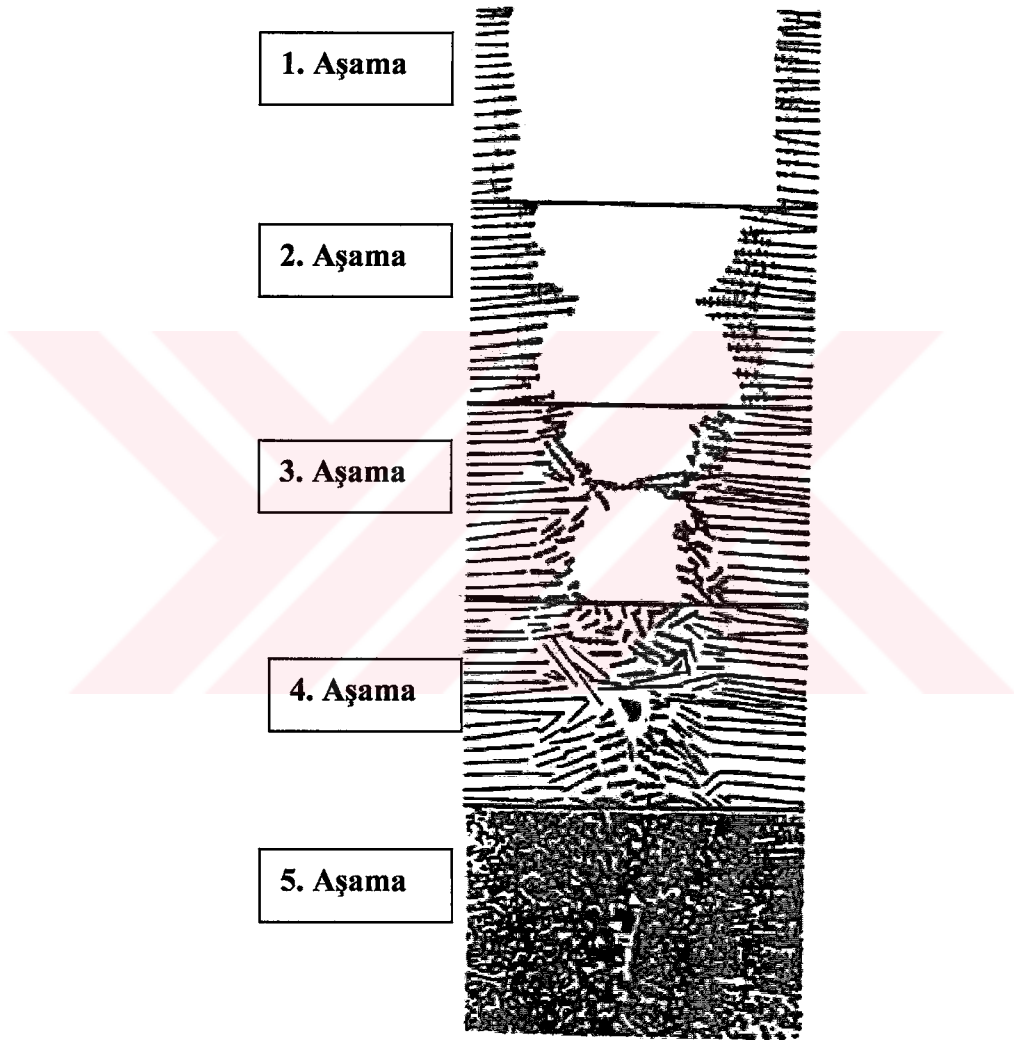
Menüsküs seviyesi yakınlarında, katılaştan kabuk ile kalıp arasında iyi temas varken kalıbın sadece alt bölgelerinde hava boşluklarının oluştuğu belirlenmiştir. Bu bölgelerde, kabuk ile kalıp arasında aralıklı temas mevcuttur. Hava boşlukları, enine yüzeylerde uniform oluşmamakla birlikte, köşelerden oluşumun başladığı kesindir.

Kalıp duvarında yapılan sıcaklık ölçümleri ve hesaplamalara göre, ısı transferine en çok direnç gösteren bölgenin hava boşlukları olduğu elde edilmiştir. Toplam direncin %84'ü burada oluşmaktadır. Bu nedenle ısı atım olayı, hava boşluğunun oluşumuna oldukça bağlıdır. Hava boşluğunun oluşumu menüsküs seviyesinin altında tüm yüzeylerde meydana gelmekte ve köşelerde maksimuma ulaşmaktadır. Hava boşluğun genişliği ve bu boşlukta açığa çıkan gazların türü (yağlama sırasında yağın yanması v.s.) ısı transferini etkilemektedir [13].

2.4.4. Sürekli Döküm Prosesinde Katılaşma

Kalıp ve kalıp altında meydana gelen katılaşma olayları, kütük kalitesini tamamen etkilemektedir. Sıvı çelik içinden kaynaklanan ferrostatik basınca karşı koymak için, kalıp çıkışında gerekli kabuk kalınlığı sağlanmalıdır. Kalıp içinde kabuk oluşumu, çok nadiren uniform olmakla birlikte, enine ve boyuna yönde değişkenlik göstermektedir. Kabuk oluşumu ve uniform olması; çelik kompozisyonu, süper ısı, nozül dizaynına bağlı olarak kalıp içine alışı şartları ya da elektromanyetik karıştırma, kalıp yağlama ve kalıp dizaynına göre değişmektedir. Kalıp çıkışında, ferrostatik basıncın sebep olduğu gerilmelere karşı kabuğun en ince kalınlıktaki kısmının karşı koyabilmesi için döküm hızı dolayısıyla da üretim miktarı sınırlandırılmaktadır [11,14,16].

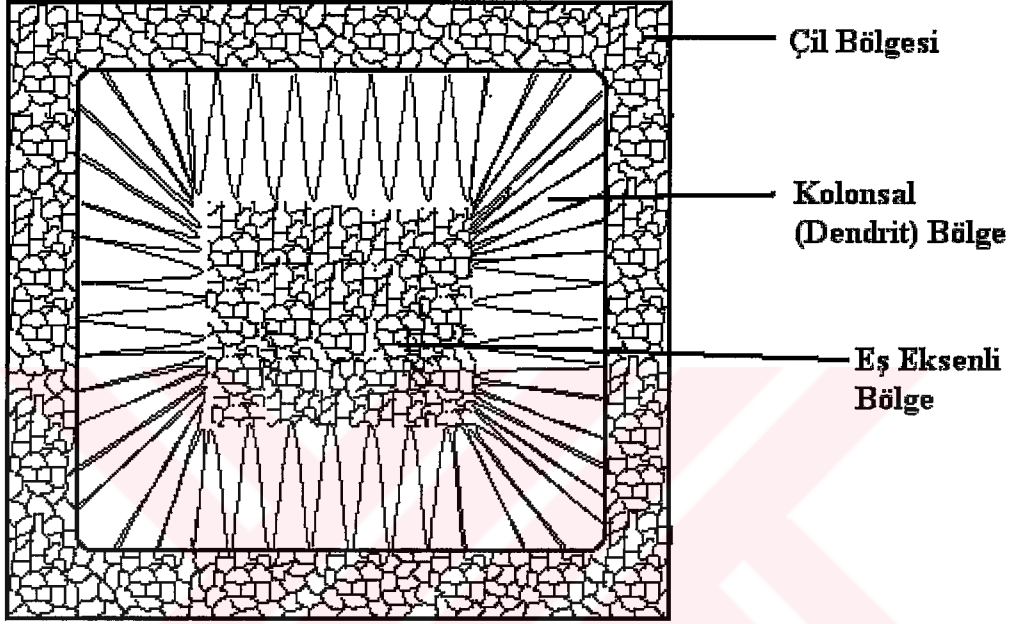
Katılma süresince, meydana gelen aşamalar mini ingot teorisine göre meydana geldiği kabul edilmektedir. Bu aşamalar, Şekil 2.30'da görülmektedir. 1. aşamada, dendritler büyümekte ve 2. aşamada orta bölgelerden dendritlerin bir kısmı karşılıklı olarak birbirine doğru yönelmektedir. 3. aşamada katılma köprüsü meydana gelmekte ve 4. aşamada ise çekilme boşluğu ile mini ingot tamamlanmaktadır. 5. ve son aşamada ise mikro yapı en son halini almaktadır [11].



Şekil 2.30. Kütüğün katılma sırasında mini ingot teorisine göre meydana gelen aşamalar [11].

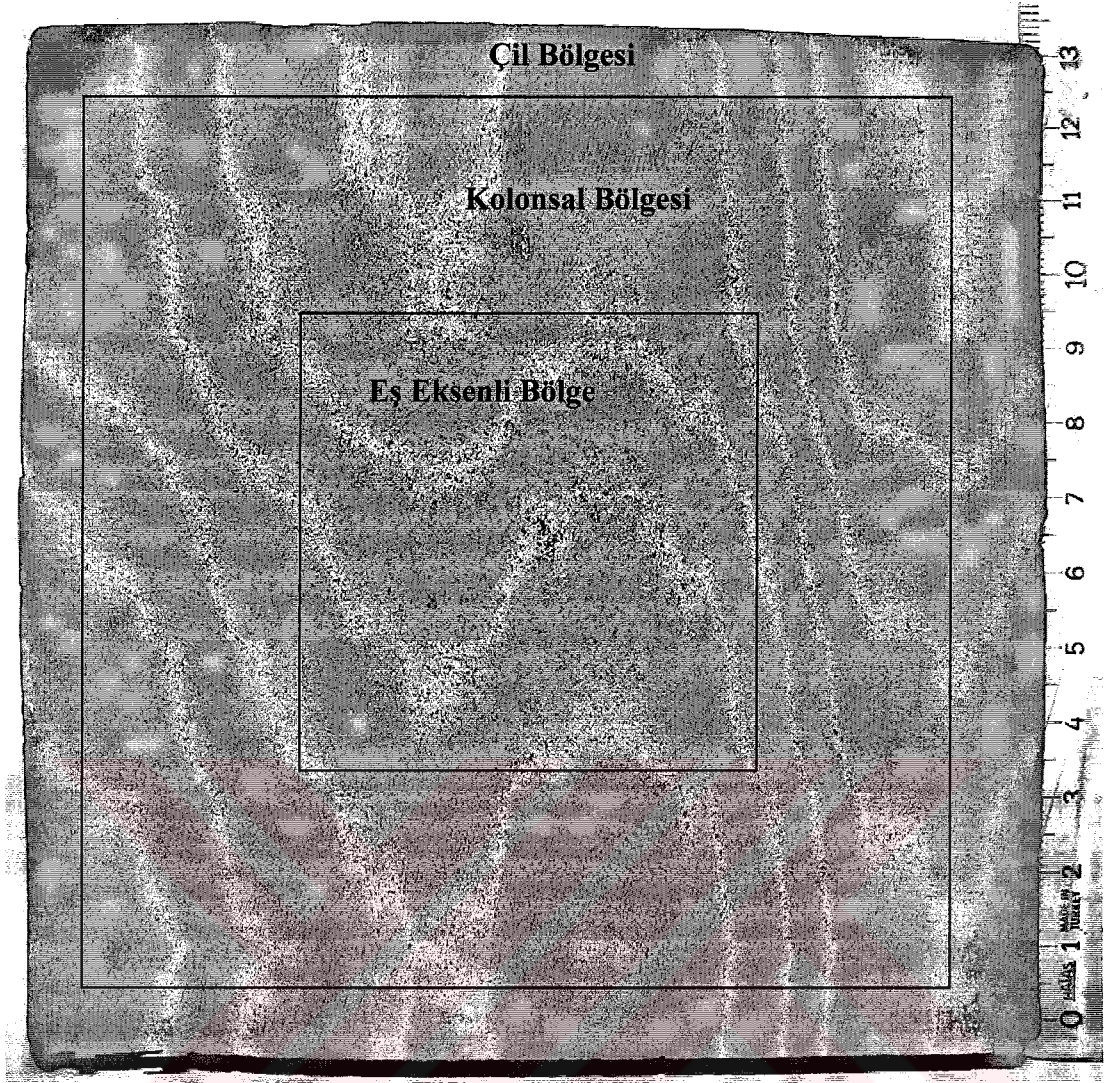
Sürekli döküm prosesinde, primer ve sekonder soğutma bölgelerinde şiddetli bir soğuma gerçekleşmektedir. Çok şiddetli soğumanın getirdiği yüksek ısı transfer hızı sonucunda bakır kalıp içerisinde kabuk oluşumu çok kısa sürede gerçekleşmektedir.

Kütüklerin katılaşması sırasında üç ayrı bölge oluşmaktadır. Sırası ile çil, kolonsal (dendrit) ve eş eksenli bölgeler Şekil 2.31’de görülmektedir.



Şekil 2.31. Sürekli döküm prosesinde katılaşma sırasında oluşan bölgeler [11].

Kütükten kesilecek ince bir enine kesitin makro dağlanmasından sonra, katılaşma evrelerini (bölgelerini) görmek mümkündür (Şekil 2.32).



Şekil 2.32. Kütükten alınmış enine kesit numunesinin makro dağlanmış görüntüsü.

2.4.4.1. Çil Bölgesi

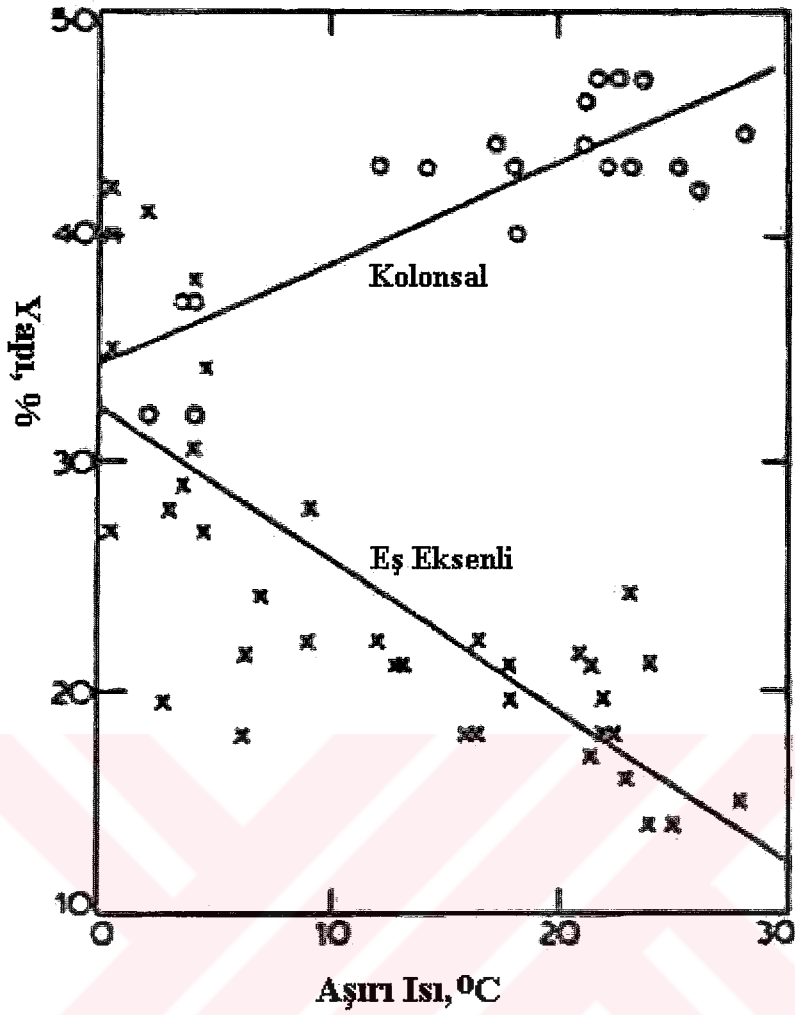
Sıvı çeliğin su soğutmalı bakır kalıpla temas ederek katılaştığı bölgeye Çil Bölgesi denilmektedir. Bakırın ısı transfer hızının çok hızlı olması ve bunun sonucunda çok şiddetli bir soğutma bulunması sonucunda sıvı çelik kalıba girer girmez ani bir katılaşma meydana gelmektedir. Katılaşmanın hızı, tanelerin belirli bir yönde katılaşmasına izin vermeyecek düzeyde yüksek gerçekleşmektedir. Katılaşan bu ilk bölge kütüğü çevreleyen bir kabuk şeklindedir [13,14].

2.4.4.2. Kolonsal (Dendrit) Bölge

Çelik, kalıbı terk ettikten sonra sekonder soğutma (püskürtme suları) ile soğutulmaktadır. Bu alanda ısı transfer hızı, dolayısıyla da soğutma hızı bakır kalıp içine göre daha yavaş gerçekleşmektedir. Çünkü, dışarıdan püskürtme suları ile soğutma olurken, içeriden sıvı çelik çil bölgesini ısıtmaya çalışmaktadır (yeniden ısınma). Bu nedenle iki yönlü ve sürekli bir ısı transferi söz konusudur. Çil bölgesinin hemen arkasında yer alan sıvı çeliğin katılaşabilmesi için, ısının önce çil bölgesine transfer edilmesi ve oradan da püskürtme suları ile alınması gerekmektedir. Isı transfer yönü içeriden dışarıya olduğundan katılaşan taneler, dal şeklinde ısı transfer yönüne ters olarak merkeze doğru ilerlemektedirler. Bu alan, tanelerin şekli (dendrit) esinlenerek “kolonsal (dallanmış) bölge” olarak adlandırılmaktadır [13,14].

2.4.4.3. Eş Eksenli Bölge

Katılaşmanın son evrelerinde, katılaşan alan kütük merkezine kadar ulaşmış, merkezde az bir sıvı çelik kalmıştır. Merkezde kalan sıvı çeliğin katılaşabilmesi, ısının katı kabuk boyunca transfer edilmesine bağlıdır. Ancak kalınlık çok fazla olduğundan ısı transfer hızı, diğer bölgelere göre çok daha azalmıştır. Bu bölgede katılaşma sırasında taneler, aynı çil bölgesinde olduğu gibi geliş güzel sıralanmaktadırlar. Ancak burada, geliş güzel sıralanmanın nedeni hızlı soğuma değil, çok yavaş soğumadır. Eş eksenli bölge kalınlığı; çeliğin kimyasal kompozisyonuna (özellikle %C), soğutma parametrelerine (spesifik su tüketimi, lt/kg çelik) ve süper ısıya bağlıdır. Kütük iç yapı kalitesi, bu bölgenin kalınlığı ile doğru orantılıdır. Bu bölge ne kadar geniş ise, çatlak hassasiyeti o kadar azdır. Çünkü, kolonsal bölgede çatlak oluşumu ve ilerleme riski daha fazladır. Aşırı ısı ile kolonsal ve eş eksenli bölgenin kalınlığının değişimi Şekil 2.33’de görülmektedir. Buna göre, aşırı ısı arttıkça kolonsal bölge genişlemekte ve eş eksenli bölge daralmaktadır. Sonuç olarak aşırı ısının artması, çatlak hassasiyetini dolaylı olarak kolonsal bölgeyi genişleterek arttırmaktadır [11,13,14].



Şekil 2.33. Aşırı ısıнын eş eksenli ve kolonsal bölge kalınlığı üzerindeki etkisi [11].

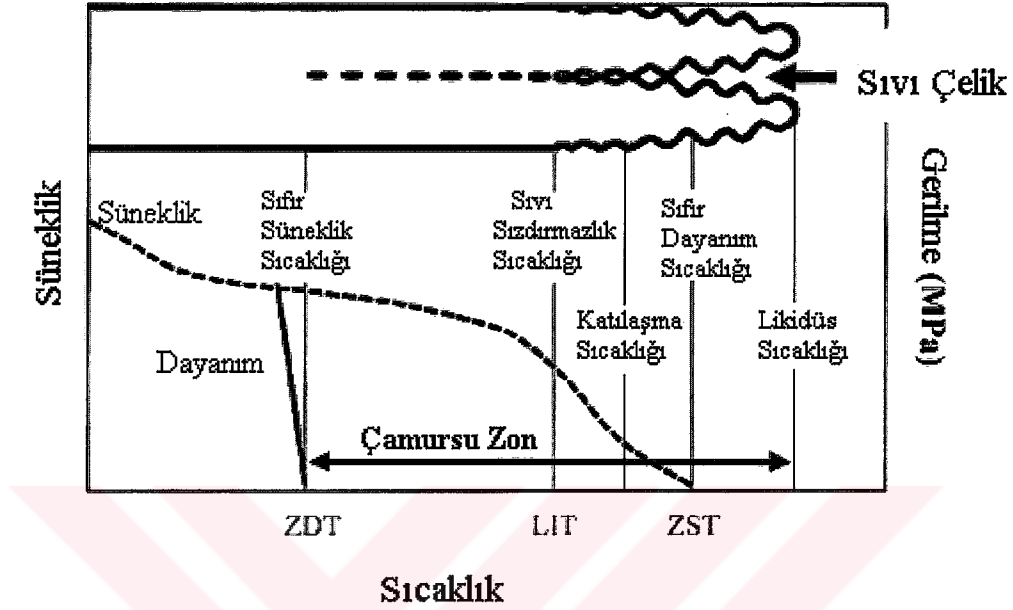
2.4.4.4. Katılaşma Sırasında Çeliğin Mekanik Özellikleri

Sürekli Döküm prosesi boyunca, yüksek sıcaklıklarda çeliğin mekanik özellikleri çatlak oluşumunda çok önemli bir rol oynamaktadır. Çatlak oluşumunun, düşük plastik özellik gösteren yarı katı-sıvı bölgede (mushy) oluştuğu bilinmektedir. Çünkü, bu bölgede kırılma maksimum seviyelerdedir [15].

Sürekli döküm ile üretilmiş çeliklerde oluşan bir çok çatlak, düşük süneklik gösteren bu çamursu bölgede meydana gelmektedir. Çatlaklar, bu bölgede iç içe gelişmiş dendritler boyunca oluşup ilerlemektedir [15].

Katılaşan kabuk içerisinde elde edilen mekanik özelliklerin seviyesi, çamursu bölgedeki katı fazın sıvı faza hacimsel oranı ile ilgilidir. Çatlak oluşumu için sınır değer, bu bölgede hacimce en az %90 katı fazın bulunmasıdır. Bu şartlar altında, sıvının içeri sızmadığı bir aşamaya gelinmektedir. Dendritler birbirine çok yakın

olduğundan sıvının girmesini engellerler ve daha katı bir bölge meydana gelir. Bu olayların oluştuğu sıcaklığa, “sıvının penetre olamadığı sıcaklık” (liquid impenetrable temperature), (LIT) denilmektedir (Şekil 2.34) [15].



Şekil 2.34 Çamursu bölgede çeliğin mekanik özelliklerinin şematik gösterimi [15].

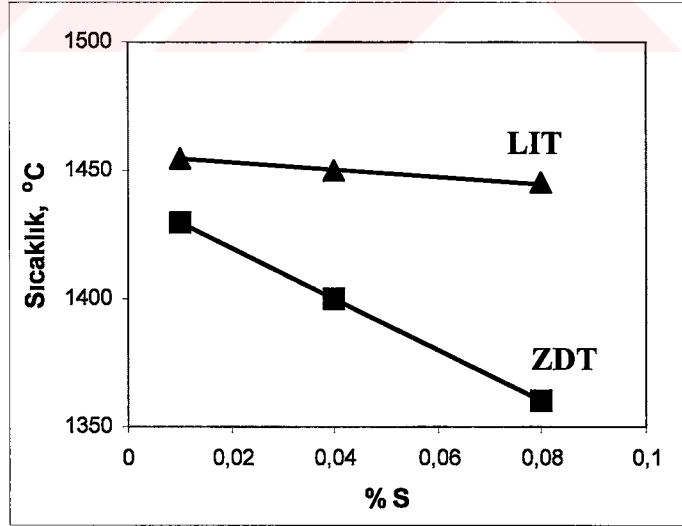
Çelik tamamen katılaşmaya başladığında, dendritler arası meydana gelen sıvı film meydana gelmemekte ve çatlak hassasiyeti azalmaktadır. Katılaşmanın tamamlandığı sıcaklık “sıfır süneklik sıcaklığı” (zero ductility temperature) – (ZDT) ’dır. Dolayısıyla çeliğin kırılma sıcaklık aralığı ZDT ile LIT arasındadır (Şekil 2.34).

Bu açıklamalara ek olarak, kimyasal kompozisyon ve katılaştıran matrikste mikrosegregasyon gelişimini de göz önünde bulundurmak gerekmektedir. Bu etmenler, katılaşma sıcaklığını etkilemekte ve sıcaklığa bağlı olarak katı fazın hacimsel oranını etkilemektedir. Östenit fazı ile δ -ferrit fazlarının hacimsel oranları arasındaki ilişki katılaşmayı etkilemektedir. Bu ilişki, özellikle δ -ferritin östenite dönüşümü kırılma sıcaklığı aralığında gerçekleşiyorsa çatlak hassasiyeti açısından önemlidir [15,16].

0,13 %C içeren çeliklerde; δ -ferritin östenite dönüşümü, katılaşmanın son aşamasında gerçekleşmektedir. 0,06 %C içeren çeliklerde, bu faz dönüşümü katılaşma tamamlandıktan sonra gerçekleşmektedir. 0,35’e kadar %C içeren çeliklerde ise faz dönüşümü katılaşma sırasında meydana gelmektedir [15].

Sonuç olarak; 0,13 %C 'dan daha az içeren çelikler için, faz dönüşümü katılaşma tamamlandıktan sonra, sünekliğin var olduğu sıcaklık bölgelerinde meydana gelmektedir. Dolayısıyla faz dönüşümü sırasında meydana gelen gerilmelere karşı daha fazla mukavemet göstermektedir. Kırılmalık sıcaklık aralığında sadece termal çekilme nedeniyle meydana gelen gerilmeler etkilidir. %0,13 ile %0,35 arasında C içeren çelikler için ise, faz dönüşümü katılaşma sırasında meydana gelmektedir. Bu nedenle, faz dönüşümü ve termal çekilme nedeniyle meydana gelen gerilmeler toplamı , kırılmalık sıcaklık aralığında meydana gelmekte ve çatlak hassasiyeti artmaktadır.

Karakteristik sıcaklıkların (ZDT ve LIT) pozisyonu çelik içinde çözünen iz elementlerin içeriğine göre değişmektedir. Bu elementlerden en önemlisi S olmakla birlikte diğlerleri P ve N, H'dir. Kırılmalık sıcaklık aralığı, kükürt içeriği arttıkça artmaktadır. Çünkü, katılaşmanın son aşaması olan bu sıcaklık aralığında, kükürt segregasyonu meydana gelmekte ve katılaşma sıcaklığı bölgesel olarak değişerek termal zorlamaların artmasına neden olmaktadır. Örneğin; 0,3 %C içeren bir çelik cinsi için, 0,01 %S içerdği durumda kırılmalık sıcaklık aralığı 25°C iken, 0,08 %S içerdği durumda bu sıcaklık aralığı yaklaşık 80°C'dir (Şekil 2.35) [15].



Şekil 2.35. 0,3 %C içeren çelikte S% içeriğinin kırılmalık sıcaklık aralığına etkisi [15].

Bu bilgiler ışığında, çeliğin döküm esnasında %S içeriği, kütükte meydana gelebilecek çatlakları önlemek ya da şiddetini azaltmak açısından önemlidir. Bu nedenle kükürt, bazı çelik cinsleri hariç işletme şartları altında mümkün olduğunca azaltılmalıdır. İkincil yolla çelik üretiminde kükürt rafinasyonu daha önce de açıklandığı gibi pota metalurjisi ile sağlanmaktadır. Dolayısıyla, kükürt gidermeye etki eden faktörlerin belirlenmesi ve bunların optimizasyonu kütük yüzey ve iç yapısında çatlak oluşması açısından en önemli faaliyettir [20,21].

2.4.5. Sürekli Döküm Makinesi Parametreleri

Sürekli döküm makinesinde üretkenlik artışı genel olarak, büyük kapasiteli makine seçimi ve makine kullanım oranının arttırılmasına bağlıdır. Ayrıca, büyük kesitte kütük üretimi, kaliteden ödün vermeden döküm hızının arttırılması, bindirme döküm sayısının (kesintisiz alınan döküm sayısı) arttırılması, koruyucu ve önleyici bakım uygulaması, yol patlamalarının en aza indirilmesi gibi birbirini tamamlayan faktörler yüksek üretkenliğin vazgeçilmez unsurlarıdır. Aşağıda SDM ile ilgili oynanabilecek temel değişken parametreler özetlenmiştir [2,11].

2.4.5.1. Tandış ve Pota Sıcaklıklarının Belirlenmesi

Pota ve tandış sıcaklıkları katılaşma sıcaklıklarına göre değişiklik göstermekte ve katılaşma sıcaklığı da çeliğin kimyasal kompozisyonuna bağlı olmaktadır. Çeliğin kimyasal kompozisyonuna göre katılaşma sıcaklığı (T_K), ± 4 °C hassasiyetle aşağıdaki formül ile hesaplanabilmektedir [2,11].

$$T_{K(\%1)} = 1536 - (78.\%C + 7,6.\%Si + 4,9.\%Mn + 34.\%P + 30.\%S + 5.\%Cu + 3,1.\%Ni + 1,3\%Cr + 3,6.\%Al + 2.\%Mo + 2.\%V + 18.\%Ti) \quad (2.43)$$

1536 °C saf demirin katılaşma sıcaklığı olup bu değer içereceği elementlere bağlı olarak düşmektedir. 2.43 no'lu (yukarıdaki) formül, katılaşmanın ilk evresini, yani %1 katılaşmanın olduğu sıcaklığı tarif etmekte ve pota-tandış sıcaklıkları bu değer baz alınarak belirlenmektedir. Çeliğin %C değerine bağlı olarak minimum pota ve tandış sıcaklıkları aşağıdaki tabloda verilmektedir.

Tablo 2.4. Çeliğin %C değerine göre pota ve tandiş sıcaklıkları [2].

% C	Tandiş Sıcaklığı	Pota Sıcaklığı
≤ 0,20	$T_K (\%) + 35\text{ }^{\circ}\text{C}$	$T_K (\%) + 75\text{ }^{\circ}\text{C}$
0,20 – 0,30	$T_K (\%) + 30\text{ }^{\circ}\text{C}$	$T_K (\%) + 70\text{ }^{\circ}\text{C}$
0,30 – 0,40	$T_K (\%) + 25\text{ }^{\circ}\text{C}$	$T_K (\%) + 65\text{ }^{\circ}\text{C}$
0,40 – 0,50	$T_K (\%) + 20\text{ }^{\circ}\text{C}$	$T_K (\%) + 60\text{ }^{\circ}\text{C}$
≥ 0,50	$T_K (\%) + 15\text{ }^{\circ}\text{C}$	$T_K (\%) + 55\text{ }^{\circ}\text{C}$

Pota ve tandiş sıcaklıkları, çeliğın kimyasal kompozisyonuna, pota ve tandişin yeni olup olmamasına ve çalışılan yol sayısına göre farklılık göstermektedir. Yeni döküme başlanması (yeni tandiş), yeni pota kullanılması ve bindirmenin yakalanabilmesi için az sayıda yol ile çalışılması durumlarında pota ocağı çıkış sıcaklıkları (pota sıcaklığı) ısı kayıplarını telafi edecek şekilde 15 – 20 °C yüksek tutulabilmektedir [2].

2.4.5.2. Tandirş Nozölü Seçimi

Tandiş nozölü; kütük kesidi, döküm hızı ve tandişteki metal seviyesi dikkate alınarak belirlenmektedir. Aşağıdaki formüle göre; döküm hızı, nozöl çapı ve tandişteki metal metal seviyesine göre yol başına yapılan çelik üretimi hesaplanabilmektedir [2, 20-22].

$$G = \alpha \times [2 \times g \times (h/1000)]^{1/2} \times A \times d \times 60 \times 1000 \quad (2.44)$$

Burada;

G = Nozöl çelik debisi, (kg/dak)

g = Yerçekimi ivmesi, (9,81 m/s²)

A = Nozöl kesit alanı, (dairesel, m²)

α = katsayı (= 0,97)

h = Tandirş metal seviyesi, (mm)

d = Sıvı çelik yoğunluğu, (7,8 t/m³)

ifade etmektedir.

2.4.5.3. Bakır Kalıp

Bakır kalıp, kütüğe şeklini veren, su soğutma ile hızlı katılaşma sağlayan ve en zor koşullarda çalışan parçalardan birisidir.

Su soğutma sisteminde bir sınırlama olmaması durumunda bakır kalıbın uzunluğuna göre ortaya çıkabilecek azami döküm hızı aşağıdaki eşitlikle hesaplanabilir.

$$V_C = (1 / K) \times l_k \quad (2.45)$$

Burada;

V_C = döküm hızı, (m/dak)

K = sabit (0,2 – 0,22)

l_k = Kalıp boyu, (m)

şeklindedir.

Kalıp içindeki yarı katı çelik, soğuma ve katılaşma sonucunda çeker ve kalıptan uzaklaşır. Bu durumda, bakır kalıp tüpü katılaşan çeliğe destek olamaz ve ısı transfer hızı düşer. Bunu önlemek amacıyla bakır kalıbın alt kısmına doğru çekmeyi karşılayacak şekilde kalıp ölçüsü düşürülür ve buna kalıp konikliği denir [2, 20-22].

2.4.5.4. Osilasyon

Kalıp osilasyonu, ısı transferini arttırmak, kalıba yapışmayı önlemek ve yol patlamalarını kontrol altında tutmak amacıyla yapılması zorunlu olan bir işlemdir. Osilasyon için bakır kalıba daha önceki bölümlerde açıklanan sinüs dalgası şeklinde hareket verilmektedir. Kalıp, aşağı doğru hareketinde döküm hızından daha hızlıdır ve rölatif hıza negatif sıyırma denilmektedir. Negatif sıyırma, strok, döküm hızı ve osilasyon frekansının bir fonksiyonudur ve aşağıdaki eşitlikle hesaplanmaktadır.

$$\text{Negatif Sıyırma (\%)} = [(V_C - V_M) / V_C] \times 100, \quad V_M = (2 \times s \times f) / 1000 \quad (2.46)$$

Burada;

V_C = Döküm hızı, (m/dak)

s = strok, (mm)

V_M = Ortalama kalıp hızı, (m/dak)

f = Osilasyon frekansı, (cpm)

2.4.5.5. Kalıp Soğutması

Bakır kalıplardan alınan ısı miktarı aşağıdaki formülle bulunabilmektedir.

$$Q = (G_s/18) \times 18,03 \times \Delta T \quad (2.47)$$

Burada;

$Q = I_{s1}$, (kcal/dak)

G_s = Kalıp soğutma suyu debisi, (lt/dak)

18,03 = Suyun ısı kapasitesi, (kcal/mol°C)

18 = Suyun mol ağırlığı

ΔT = Kalıp suyu giriş - çıkış sıcaklık farkı, (°C)

şeklindedir.

Bakır kalıp içersinde zamana bağlı olarak katılaşan kabuğun kalınlığı (S, mm) şu formül ile bulunabilmektedir.

$$S = K \times t^{1/2} \quad (2.48)$$

Burada t zamanı (sn) temsil etmekte ve K katılaşma sabiti olup, 23 ile 31 arasında değişmektedir.

Tamamen katılaşan yarı mamulün boyu (metalurjik boy ise şu formül ile hesaplanmaktadır.

$$L = k^2 \times V_C / (4K^2) \quad (2.49)$$

Bu formülde L katılaşma boyu ya da metalurjik boyu (mm), k kare kütüğün kenarı veya dairesel kesitli kütüğün çapı ve ya yassı (slab) ürünler için kalınlığı ifade etmektedir. Katılaşma sabiti K ise; kare kütük ve blum için 28, yassı ürünler için 31 değerini almaktadır [2, 20-22].

2.4.5.6. Sekonder Soğutma

Sekonder soğutma suyu debisi, sıcaklık ve basıncın bir fonksiyonudur. Etkili bir soğutma için, su basıncı yeteri kadar yüksek olmalıdır. Ancak şiddetli soğutma, iç gerilmeler meydana getirerek iç yapı çatlaklarının oluşmasına neden olmaktadır. Verilecek su miktarı, çelik cinsine ve kesite göre değişiklik göstermektedir. Genel

uygulama, yüksek karbonlu çeliklerde daha az, düşük karbonlu çeliklerde ise daha yüksek su debisi kullanımına yöneliktir [2, 20].

Sekonder bölge su soğutma şiddeti şöyle tarif edilmektedir.

$$I = Q / (l \times \text{Ç} \times V_C) \quad (2.50)$$

Bu ifadede;

I = Soğutma şiddeti, (birimsiz)

l = Soğutma bölgesi uzunluğu, (m)

Q = Su debisi, (m³/dak)

Ç = Yol çevresi, (m)

şeklindedir.

Sekonder bölgede su soğutma şiddetinin 0,15 – 0,20 arasında olması iyi bir soğutmayı tarif etmektedir.

Bu bölgede, soğutma şiddetinin diğer bir tarifi ise spesifik su tüketimi ile belirlenmektedir. Spesifik su tüketimi, 1 ton çelik başına harcana su miktarını tarif etmekte ve aşağıdaki formülle hesaplanmaktadır.

$$\mu = Q_t / (\delta \times A \times V_C) \quad (2.51)$$

Bu ifadede;

μ = Spesifik su tüketimi, (lt/kg)

δ = Çelik yoğunluğu, (7,8 t/m³)

Q_t = Sekonder bölge toplam su debisi, (lt/dak)

A = Kütük (yarı mamül) kesit alanı, (m²)

V_C = Döküm hızı, (m/dak)

şeklindedir [2].

2.4.6. Sürekli Döküm Prosesinde Kütüklerde Meydana Gelen Kusurlar

Sürekli döküm tekniği ile üretilen kütüklerde meydana gelen kusurların cinsi ve şiddeti sonuç ürün üzerinde kullanımı ve ömrünü etkileyebilecek problemlerin oluşmasına yol açmaktadır. Genel olarak bu kusurlar üç ana gruba ayrılmaktadır.

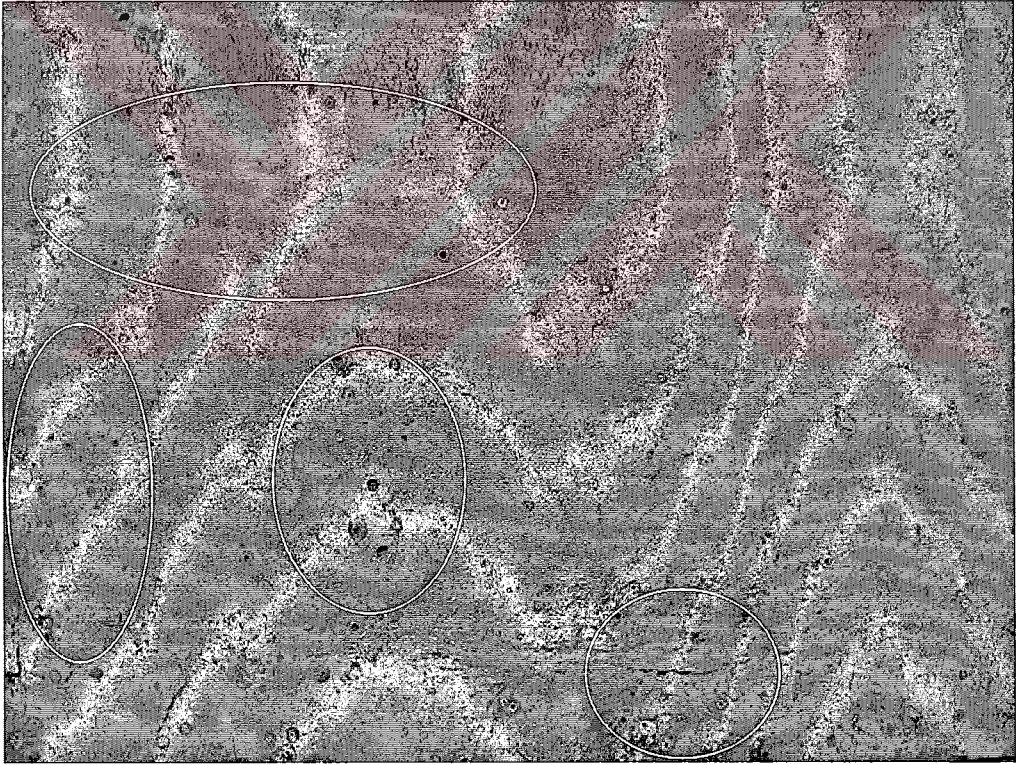
1. *Yüzey Hataları:* Gaz boşluğu, boyuna yüzey köşe çatlağı, enine yüzey köşe çatlağı, osilasyon izi,

2. *İç Yapı Hataları:* İç yapı köşe çatlağı, diyagonal çatlak, gaz boşluğu, merkezi çatlak ve yarıyol çatlağı,
3. *Şekil Hataları:* Rombiklik ve depresyon.

Bilindiği gibi, uzun yıllardır sürekli döküm tekniği ile üretim yapılmakta ve kütüklerde daha bir çok çeşitte kusur meydana gelmektedir. Ancak bunların birçoğu, ilerleyen teknoloji sayesinde ortadan kaldırılmıştır. Yukarıda, sadece günümüz teknolojisi ile üretimde olan sürekli döküm prosesinde meydana gelen kusurlar sınıflandırılmıştır.

2.4.6.1. Yüzey Gaz Boşlukları

Bu tür hatalar, kütük yüzeyinde, kumlama ve/veya taşlama işlemleri yapıldıktan sonra rahatlıkla gözle görülebilen ve Şekil 2.36'da bir kütükten alınan yüzey kesit numunesinde örneklenen hatalardır [19-22].



Şekil 2.36. Yüzeyde meydana gelen gaz boşlukları.

Çelik bünyesi içindeki gaz boşluğu hataları, sıvı çeliğin kalıba akışı sırasında kullanılan yağlamanın aşırı olması, rafinasyon sırasında yetersiz deoksidasyon işlemi, döküm sırasında meydana gelen reoksidasyon ve de çeliğin içerisinde çözünebilen azot ve hidrojen gibi gazların etkisi ile olmaktadır [2, 19-21].

Aşırı yağlama sebebiyle oluşan CO, CO₂, H₂O buharı gibi gazların oluşumu ve bu parçalanma ürünlerinin sıvı çelik içerisinde çözünüp katılaşma sırasında bünyeyi terk etmeleri, çelikte görülen gaz boşluklarında önemli bir faktördür. Aynı şekilde bu kusura sebep olan en önemli bir olay da, çeliğin rafinasyonu sırasında yetersiz deoksidasyon yapılmasıdır. Yeterli deoksidasyon yapılmamışsa, çeliğin içinde çözünmüş oksijen denge konsantrasyonu tamamladıktan sonra katılaşma sırasında C ile reaksiyona girerek CO gazı oluşturmakta ve açığa çıkmaya çalışmaktadır. Bu olay da bünye içinde gaz boşlukları yaratmaktadır. Ayrıca buna ilaveten, döküm sırasında meydana gelen reoksidasyon sonucu çelik içinde çözünen oksijen gazı da gaz boşluğu oluşumunda ilave etki yapmaktadır. Döküm sırasında kullanılan yağ ve hidrokarbon esaslı yardımcı maddelerin yanmasından oluşan hidrojenin sıvı çelik içerisinde çözünmesi ve açığa çıkma isteği, az da olsa gaz boşlukları oluşumunda katkı yaratmaktadır. Pota metalurjisi uygulamalardaki aşamalardan biri olan sıvı çeliğin gaz ile karıştırılması sırasında azot kullanıldığı zaman bu gazın da gerek gaz boşluğu oluşumunda gerekse bazı metal nitürler oluşturarak çeliğin bünyesinde inklüzyon oluşumuna neden olabilmektedir [2,19].

2.4.6.2. Boyuna Yüzey Köşe Çatlağı

Bu tür çatlaklar, yüzeyde köşeye çok yakın yerlerde meydana gelmekte ve genellikle 1-2 mm derinlikteki çatlaklardır (Şekil 2.37). Birçok çalışmanın sonucuna göre bu tür çatlakların rombiklikle ilişkili olduğu açıklanmasına rağmen, bu çatlak rombiklik oluşmadan da meydana gelmektedir [18].



Şekil 2.37. Boyuna yüzey köşe çatlağı [18].

Boyuna yüzey köşe çatlağının oluşmasının en önemli nedeni, kalıp köşe yarıçapının büyük olmasıdır. Büyük köşe yarıçapına sahip kalıplarda katılma sırasında gerilmelerin gelişimi yüzeyde ve köşelerde gerçekleşmekte ve bu bölgelerde çatlak oluşmaktadır. Kalıp köşe yarı çapının bu tür çatlakların oluşmasında etkili olmaması için kütük kenar boyu ile arasındaki oranın minimum 1/10 olması gerekmektedir.

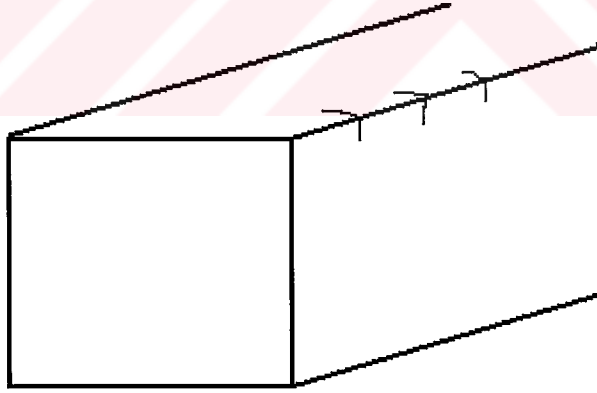
Diğer bir etken ise yetersiz kalıp konikliğidir. Katılmanın başlamasından hemen sonra kütük çekilmekte ve kalıp duvarından uzaklaşmaktadır. Bu ilk katılma evresinde kabuk ince ve zayıftır. Yetersiz koniklik olduğu durumda, bu çekilmeye bağlı olarak ısı transfer hızı düşmekte ve kabuk gelişmemektedir. Kabuk ferrostatik basıncın yarattığı gerilmelere karşı koyamamakta ve çatlak oluşmaktadır. Yetersiz dayanımda ve kalınlıkta kabuk oluşmasına neden olabilecek yüksek döküm hızı ve sıcaklığı da bu çatlakların oluşmasına yardımcı olmaktadır. Ayrıca, deforme olmuş kalıp ve kalıp altı rölelerin ayarsızlığı da bu çatlakların oluşmasında rol oynamaktadır [13,18,19]

2.4.6.3. Enine Yüzey Köşe Çatlağı

Bu tür çatlaklar, Şekil 2.37'den de görüldüğü gibi köşelerde ve enine yönde meydana gelmektedir.

Çeliğin kompozisyonu enine yüzey köşe çatlağının oluşmasında en önemli faktörlerden biridir. Yapılan çalışmalara göre, bu çatlaklar alüminyumca zenginleşmiş östenit tane sınırlarında meydana geldiği ve çatlak yüzeyine bakıldığında ise AlN çökelmelerinin oluştuğu belirlenmiştir [13].

Yüzeyde meydana gelen boyuna çekme gerilmeleri de bu çatlakların oluşmasına neden olmaktadır. Doğrultma bölgesinde kütük sıcaklığının çok düşük olması (700 – 900 °C) halinde yüzeyde bu tür gerilmeler meydana gelmektedir. Sekonder soğutma şiddetli olduğunda, katılaştıran yüzey ile sıvı çekirdek arasında büyük sıcaklık değişimleri meydana gelerek yüzeyde çekme gerilmelerini arttırmakta ve çatlaklar oluşmaktadır. Ayrıca derin osilasyon izlerinin meydana gelmesi de bu çatlakların oluşmasına neden olmaktadır [13,19].

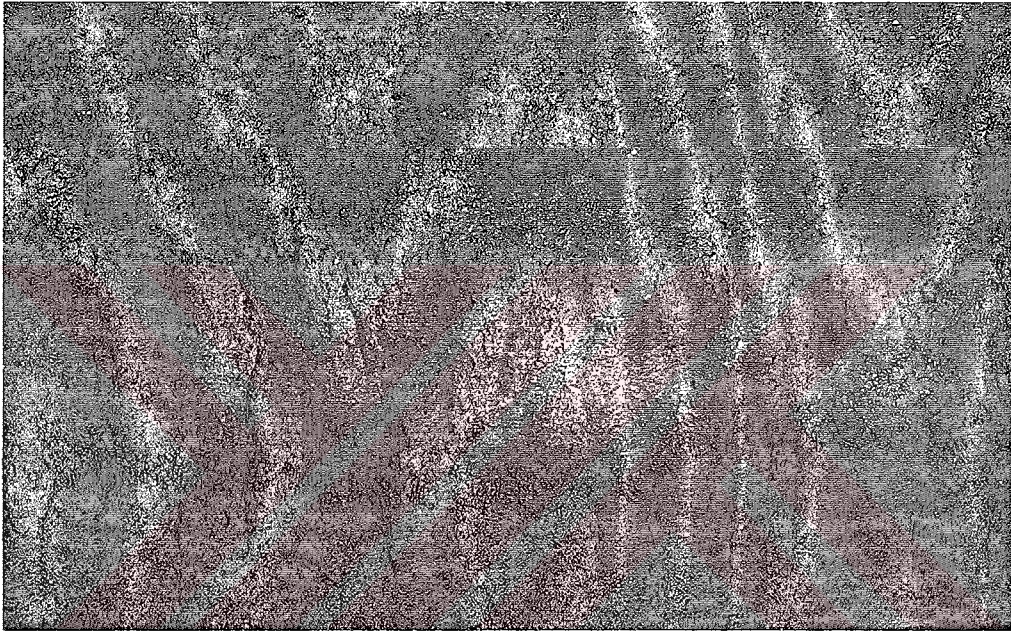


Şekil 2.38. Enine yüzey köşe çatlağı

Sekonder soğutma şiddeti azaltılarak doğrultma bölgesinde gerekli yükseklikte sıcaklığa (>900 °C) sahip kütük yüzeyi elde ederek, hem gerilme ve zorlamalar azaltılmakta hem de AlN çökmesi en aza indirilmektedir [13].

2.4.6.4. Osilasyon İzi

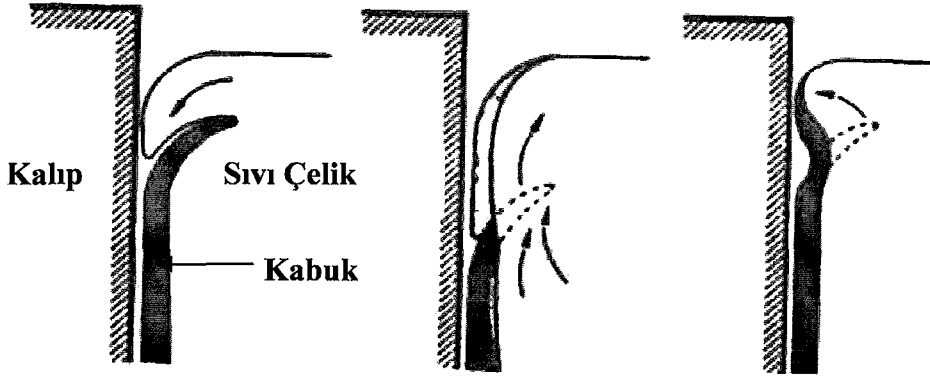
Osilasyon izi, kalıp salınım hareketinin doğal sonucu olan ve kütük yüzeyinde meydana gelen dalga şeklindeki izlerdir. Bu izlerin kütük yüzeyinde tamamen oluşmasını önlemek imkansızdır. Ancak derin ve düzensiz olması durumunda, kütük yüzeyinde çatlak oluşturmakta ve haddelme sırasında izlerin birbirine temas noktalarından açılarak sorunlara yol açmaktadır. Osilasyon izleri Şekil 2.39'da görülmektedir.



Şekil 2.39. Yüzeyde meydana gelen osilasyon izleri

Bu izlerin derin oluşmasında en büyük faktör, üretilen çeliğin karbon içeriğidir. %0,10 C içeren bir çelikteki izin derinliği, %0,20 C içeren çeliğine göre 3 kat fazladır. Diğer bir etken ise, menüsküs seviyesine aşırı curufun gelmesidir. Curuf, menüsküs seviyesinde kalıba değer değmez donar ve çok küçük de olsa katı bir curuf kütlesi oluşturur. Bu katı partiküller, kalıbın salınımı sırasında aşağı doğru hareketinde katılan kabuğu sıvı çeliğe doğru itmekte ve bir tür kanca oluşturmaktadır. Kalıp yukarı harekete başladığında katı curuf ile kabuk teması kesilmekte ve kancanın üstüne sıvı çelik gelmektedir. Kancanın uç kısmı sıvı çelik ile temas eden kısmına kadar ergimekte ve bu mekanizma devam etmektedir (Şekil 2.40). Katılan kabuğu içeri iten bir diğer kuvvet ise kalıp konikliğinden kaynaklanmaktadır. Yetersiz koniklik olduğu durumda, ince kabuğa sahip olan kütük

kalıp duvarları arasında sıkışarak köşelerden içeri doğru itilmekte ve yine kanca oluşmaktadır. Döküm hızı ile osilasyon frekansının arasındaki oranın yanlış seçilmesi ve düzensiz salınım hareketleri de bu izlerin derin oluşmasına neden olmaktadır [11,17,19].



Şekil 2.40. Osilasyon izinin oluşum mekanizması [11]

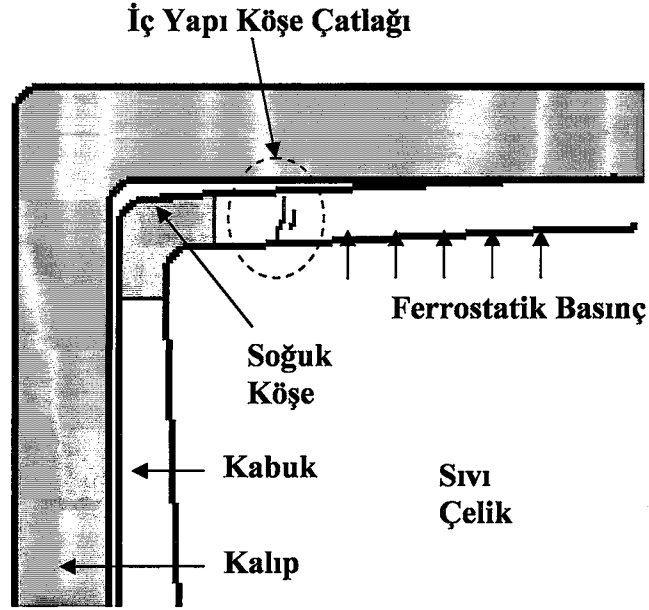
2.4.6.5. İç Yapı Köşe Çatlağı

Bu tür çatlaklar, kütüklerde iç yapıda köşeye yakın bölgelerde ve yüzeyden 1-2 cm içeride meydana gelmektedir. Kütüğün enine kesitinde tek bir köşede meydana geldiği gibi, karşılıklı iki köşede de meydana gelebilmektedir.

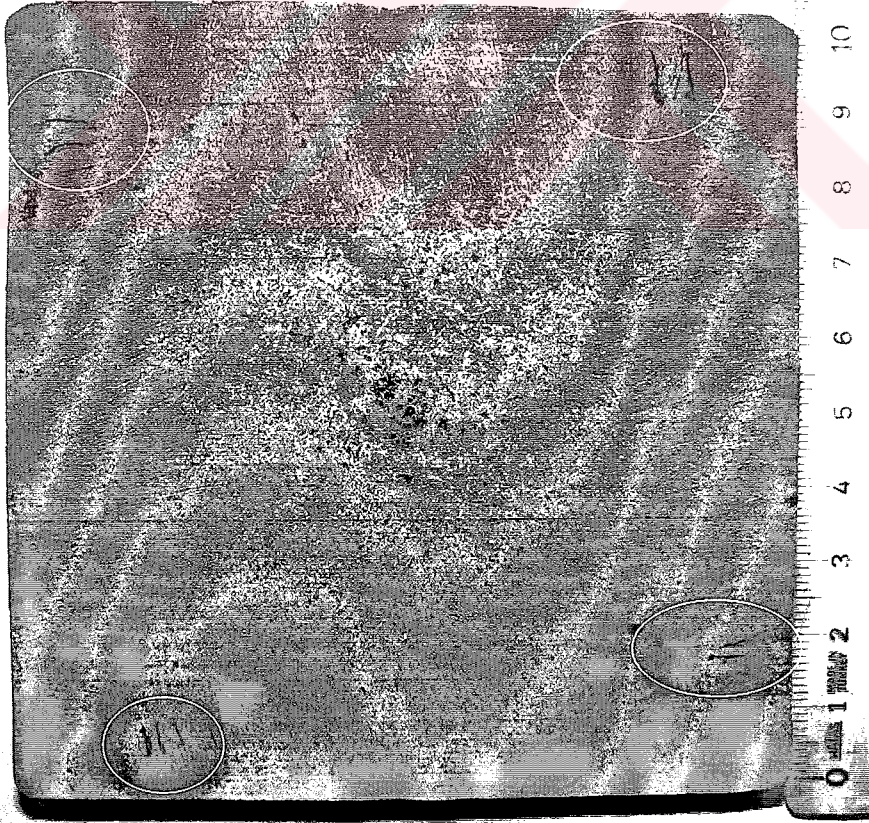
Bu çatlağın oluşumu, kalıbın alt kısımlarında veya kalıp çıkışında meydana gelebilen katılaşma bölgelerinde meydana gelmektedir. Köşeye yakın bölgelerde kabuk, orta bölgelere göre daha ince gelişmekte ve köşelere göre daha sıcaktır. Bu nedenle bu bölge kabukta çatlak oluşma hassasiyeti bakımından en zayıf bölgedir. Kütük orta yüzeyinde ferostatik basınçtan dolayı bir şişme meydana geldiği durumda, köşeye yakın bu bölgelerde zorlamalar (çekme gerilmeleri) meydana gelmektedir. Ve böylece çatlak oluşmaktadır (Şekil 2.41). Kalıbın distorsiyonu ve kalıp içinde hava boşluğunun uniform oluşmaması şişmenin aşırı derecede meydana gelmesine neden olmaktadır [13,19].

Ayrıca bu tür çatlakların şiddetli oluşmasında, yüksek tandış sıcaklığı ve döküm hızı, aşırı rombiklik, depresyon ve çeliğin kimyasal kompozisyonu etkili olmaktadır. Aşırı depresyonun görüldüğü ürünlerin yaklaşık %90'ında bu tür çatlaklar meydana gelmektedir. Çeliğin kimyasal içeriği bakımından, $\%P > 0,030$, $\%S > 0,025$, $0,17 <$

$\%C < 0,24$ içeren çelikler meydana gelen diğer çatlaklar gibi bu çatlak oluşumu açısından da hassastırlar [19]. Şekil 2.42’de bu tür çatlak görülmektedir.



Şekil 2.41. Kalıp içinde şişmenin meydana gelmesi ve çatlak oluşumu [13].

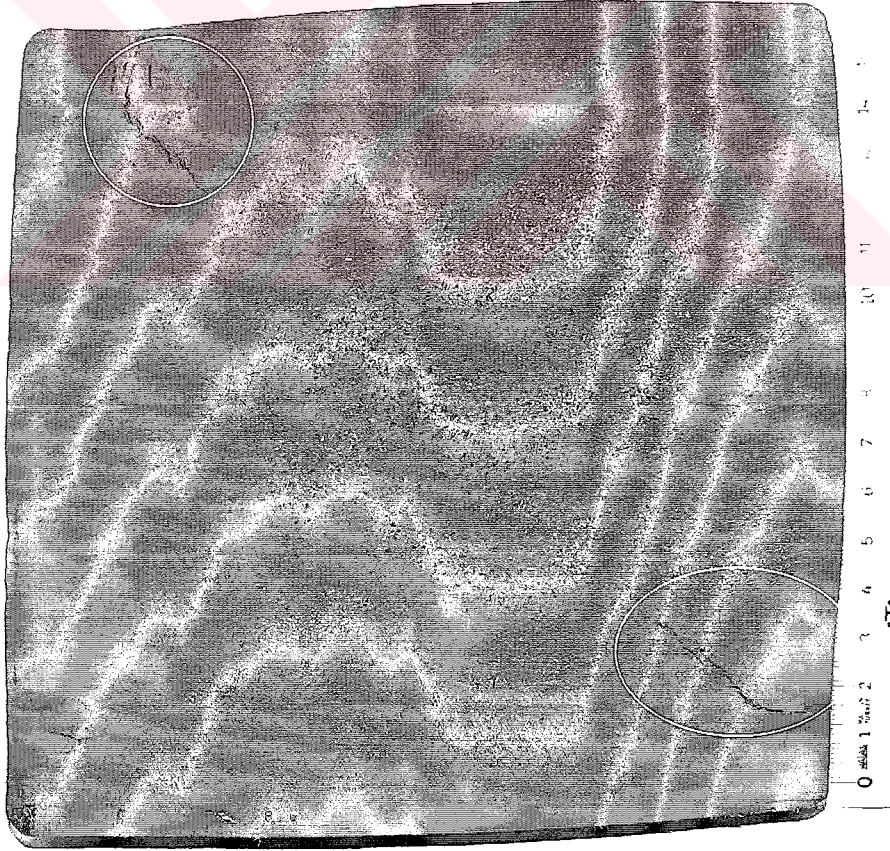


Şekil 2.42. İç yapı köşe çatlağı

2.4.6.6. Diyagonal Çatlak

Bu tür çatlaklar kare kütüklerde rombiklik ile ilişkilidir. Diyagonal çatlaklar; kalıp içinde veya sekonder soğutma bölgesinde, birbirine komşu iki yüzeyin diğer yüzeylere göre daha hızlı soğuması ile kütükte meydana gelen çarpılma sonucu meydana gelmektedir. Daha soğuk yüzeylerde çeliğin büzülmesi ile bu yüzeyler arasında diyagonal olarak çekme gerilmeleri meydana gelmektedir. Eğer bu gerilmelerin şiddeti yüksekse, çarpımalara ve çatlak oluşumuna sebep olmaktadır. Çatlaklar, düşük süneklik gösteren yüksek sıcaklık bölgelerinde meydana gelmekte ve gerilme şiddetine bağlı olarak dışarıdan içeriye doğru ilerlemektedir [13].

Bu çatlakların oluşmasını engellemek amacıyla, kütük yüzeylerinin dördünde de eşit soğumanın sağlanması gerekmektedir. Bu da, kalıp su ceketinin uniform olması, kalıp ile röleler arası doğrultmanın sağlanması ve püskürtme nozüllerinde tıkanmanın önlenmesi ile sağlanabilmektedir [13,19]. Şekil 2.43'te diyagonal çatlak görülmektedir.



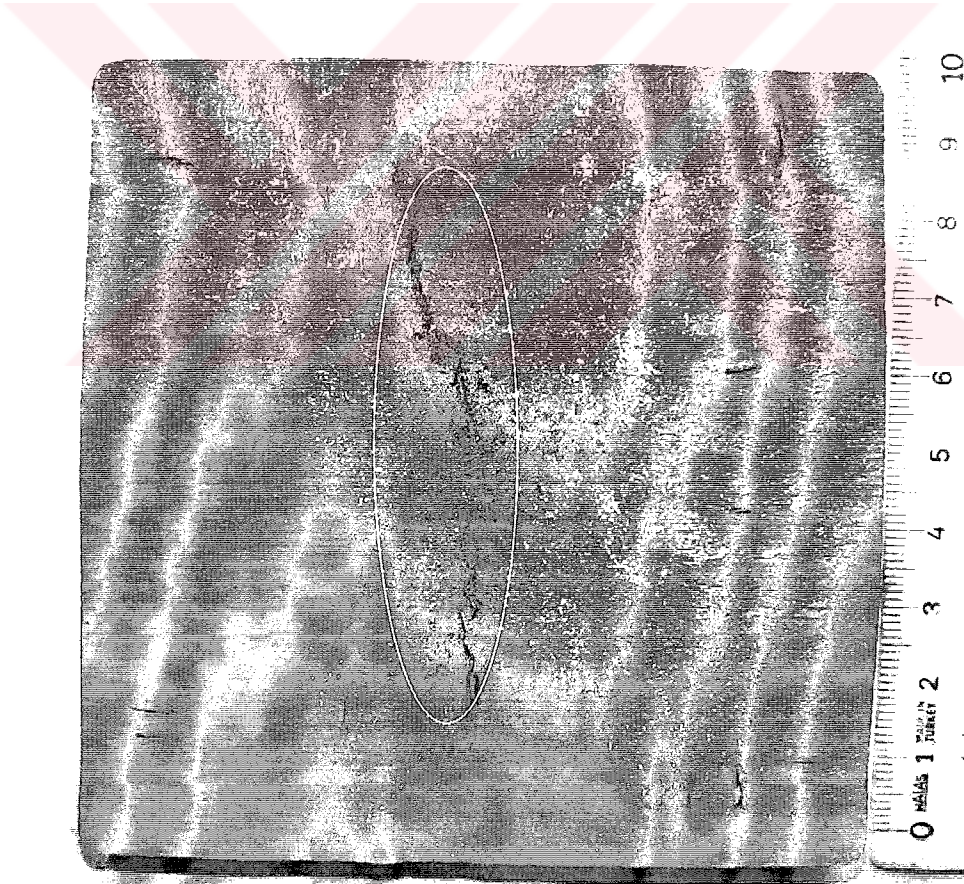
Şekil 2.43. Diyagonal çatlak

2.4.6.7. Merkezi Çatlak

Merkezi çatlaklar, dökümün içinde merkezi bölgede ve katılaşmanın sonuna yakın oluşmaktadır. Katılaşma tamamlanırken, merkez sıcaklığındaki ani düşüş, çatlak oluşturan gerilme ve zorlamaları meydana getirmektedir. Merkez sıcaklığındaki bu ani düşme, doğal bir olaydır ve merkezden gizli ısının çıkma aşamasının sonlarında artmaktadır. Merkezde meydana gelen sıcaklık düşmesi, yüzeylere göre daha hızlı olmakta ve merkezi bölgede, çekilme ile sonuçlanmaktadır. Merkez, büzülme nedeniyle ve soğuk çelik ile çevrelendiğinden zorlanmaktadır [13].

Yüksek döküm sıcaklığı ve aşırı sekonder soğutmanın bu tür çatlakların oluşmasında etkisi vardır. Böylece tekrar ısınma olayı şiddetli meydana gelerek çatlak meydana gelmektedir [19].

Şekil 2.44'te bu tür çatlak görülmektedir.



Şekil 2.44. Merkezi çatlak

2.4.6.8. Yarıyol Çatlağı

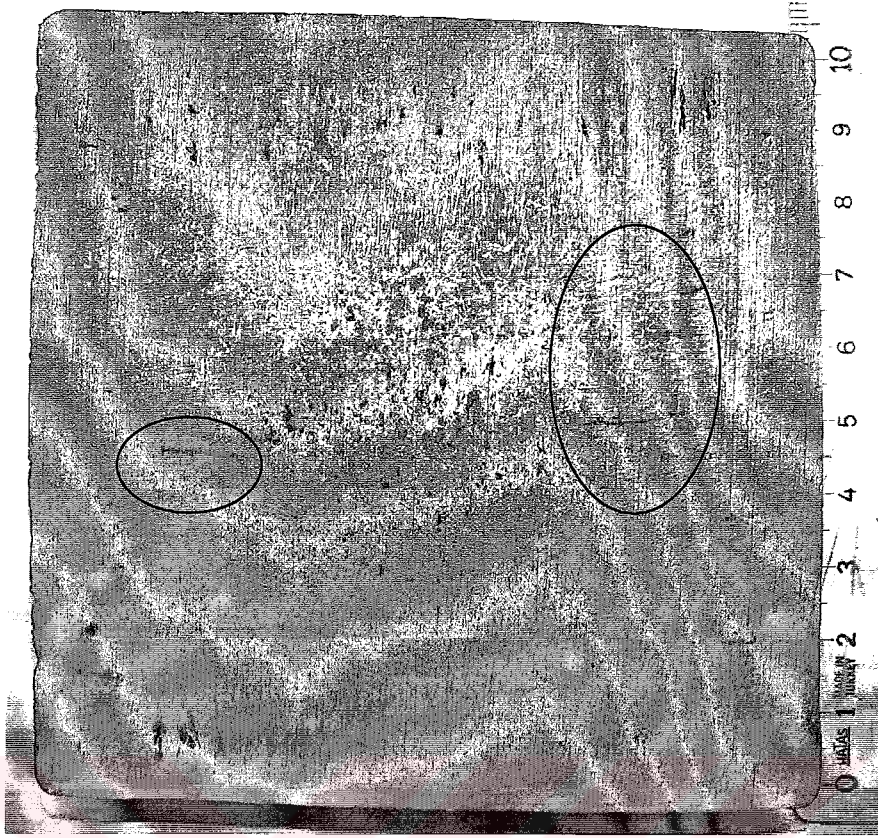
Aşırı spray soğutma, yüksek döküm (tandış) sıcaklığı ve çeliğin kimyasal kompozisyonu bu tür çatlakların oluşmasında en önemli etkilendir. Çelik içindeki P ve S, bu çatlak oluşumunu ve şiddetini etkilemektedir [13, 19].

Aşırı spray soğutma sonucunda, yüzeyin sıvı çekirdek tarafından tekrar ısıtılması şiddetli meydana gelmektedir. Tekrar ısınma, yüzeyin genişlemesine ve bu genişleme de katı kabuğun iç bölgelerinde çekme gerilmeleri meydana getirmektedir. Bu gerilmeler, daha sıcak ve zayıf olan yüzey altında, yüzeye paralel meydana gelmekte ve bu nedenle çatlak yüzeye dik oluşmaktadır.

Yüksek döküm sıcaklığı, döküm yapısını etkilemesi nedeni ile yarıyol çatlaklarının oluşmasını büyük ölçüde etkilemektedir. Bu tür çatlaklar, kolonsal bölgedeki dendritler arasında daha kolay oluşmaktadır. S ve P'un ise, dayanım ve sünekliği azaltıcı etkisi bulunmaktadır.

Bu tür çatlakların oluşmasını engellemek amacıyla, kalıp – spray soğutma ve spray nozüller arası soğuma hızını ani şekilde düşürecek etkileri ortadan kaldırmak gerekmektedir. Bu amaçla, spray soğutma şiddeti kalıp soğutma şiddeti ile ilişkili olarak dizayn edilmeli ve spray soğutma bölgesinde nozül tıkanmalarının önüne geçilmesi gerekmektedir. Çeliğin mekanik özelliklerini iyileştirmek amacıyla da döküm sıcaklığını düşürerek eş eksenli bölge genişliğini arttırmak ve $P, S\% < 0,02 - 0,025$ arasında tutmak gerekmektedir [13].

Şekil 2.45'te yarıyol çatlağı görülmektedir.



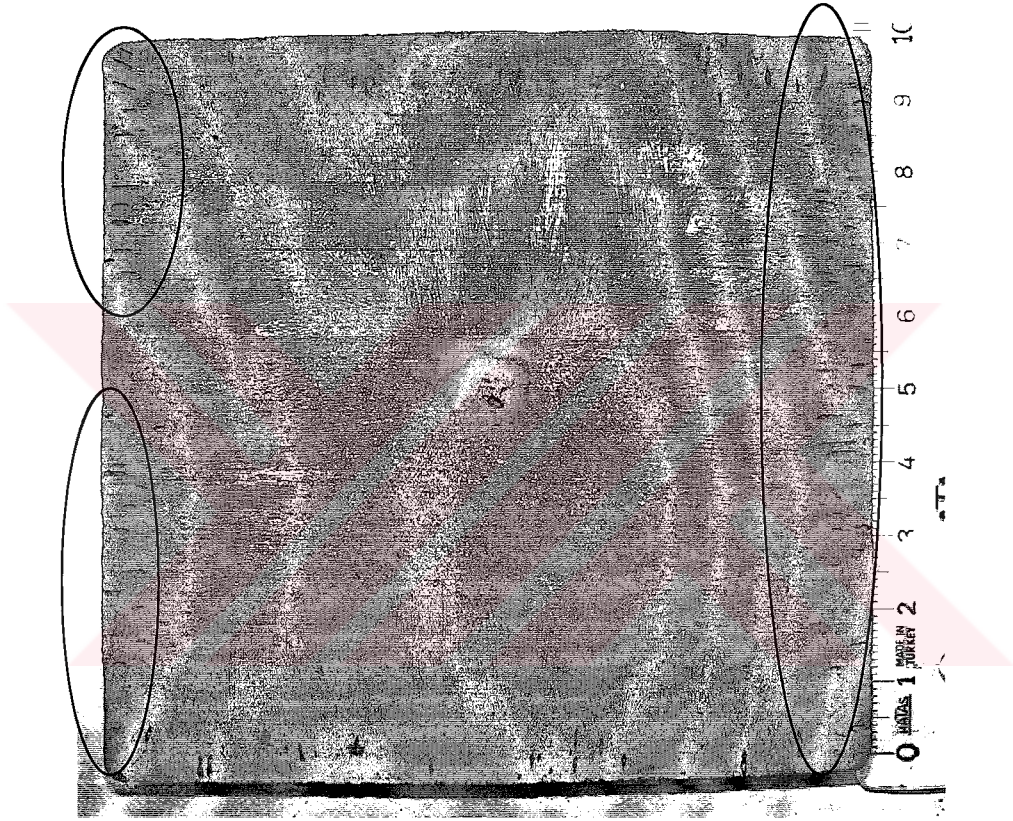
Şekil 2.45. Yarıyol çatlağı

2.4.6.9. İç Yapı Gaz Boşluğu

Yüzeyde meydana gelen gaz boşluklarından farklı olarak bu kusurun oluşumu, çelik içerisinde çözünen gazlar ile ilgilidir. Çelik üretiminin açık atmosferde gerçekleştirilmesi, çok yüksek sıcaklıklarda çalışılması ve oksijen gazı ile rafinasyona dayanması nedeniyle, kaçınılmaz olarak, sıvı çelik içerisinde oksijen, azot ve hidrojen gibi gazlar çözünmektedir. Gaz çözünürlükleri sıcaklığın bir fonksiyonu olduğundan, özellikle oksijen gazı çözünürlükleri büyük boyutlara kadar çıkabilmektedir. Ancak, katılaşmış çelik içerisinde gazların çözünürlükleri çok azdır ve katılaşma sırasında dışarı atılmaktadırlar. Sürekli döküm prosesinde çok şiddetli soğuma olması nedeniyle, bu gazlar dışarı çıkma fırsatı bulamadan gaz boşluğu oluşturarak katılaştıran kabuk içerisinde hapsolmaktadırlar [20-22].

Hidrojen gazının çözünürlüğü, havanın neminden ve ıslak malzeme kullanımından kaynaklanmaktadır. Azot çözünürlüğü ise, elektrik arkının havayı iyonize etmesi sonucunda ve pota ocağında azot ile karıştırma yapıldığı durumda meydana gelmektedir.

Pota metalurjisinde gaz giderme işlemleri dışında hidrojen ve azot gazlarının sıvı çelik içerisindeki çözünürlüklerini düşürmek mümkün değildir. Oksijen gazının çözünürlüğü ise daha önceki bölümlerde açıklanan deoksidasyon işlemi ile azaltılabilmektedir. Oksijen değeri, çeliğin %C içeriğine bağlı olarak değişen kritik değerin altına indirilemezse, katılaşma sırasında CO gazı oluşturmakta ve dendritler arasında sıkışarak yüzeye çıkamamaktadır [19-22]. Böylece iç yapıda gaz boşluğu oluşmaktadır. Şekil 2.46’da iç yapıda meydana gelen gaz boşlukları görülmektedir.



Şekil 2.46. İç yapı gaz boşluğu

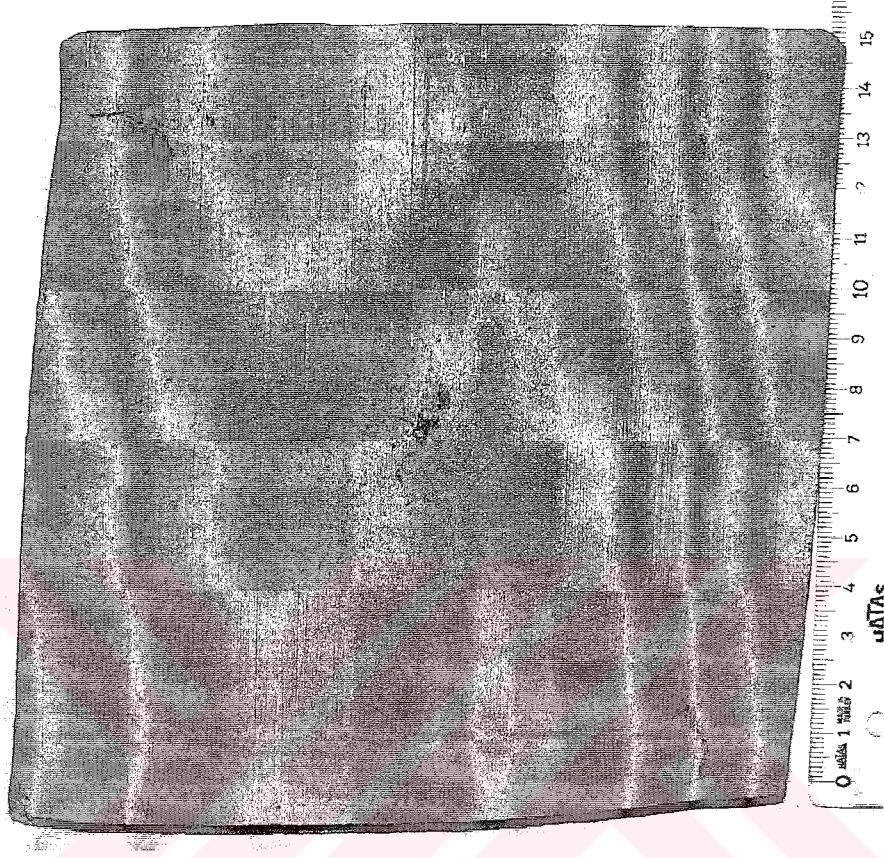
2.4.6.10. Rombiklik

Rombiklik, çelik soğurken, yüzeylerde eşit olmayan ısı transferi nedeniyle oluşmaktadır. Oluşma mekanizması ve şiddetine etki eden parametreler daha önce Bölüm 4.2.2.’de açıklanmıştır. Şekil 2.47’de rombiklik görülmektedir.

Kütük rombikliğı aşağıdaki formüle göre hesaplanabilmektedir.

$$\% \text{ Rombiklik} = 2 (I_2 - I_1) / (I_1 + I_2) \quad (2.52)$$

Burada I_1 kütüğün kısa köşegen uzunluğu, I_2 ise uzun köşegen uzunluğunu ifade etmektedir [19].



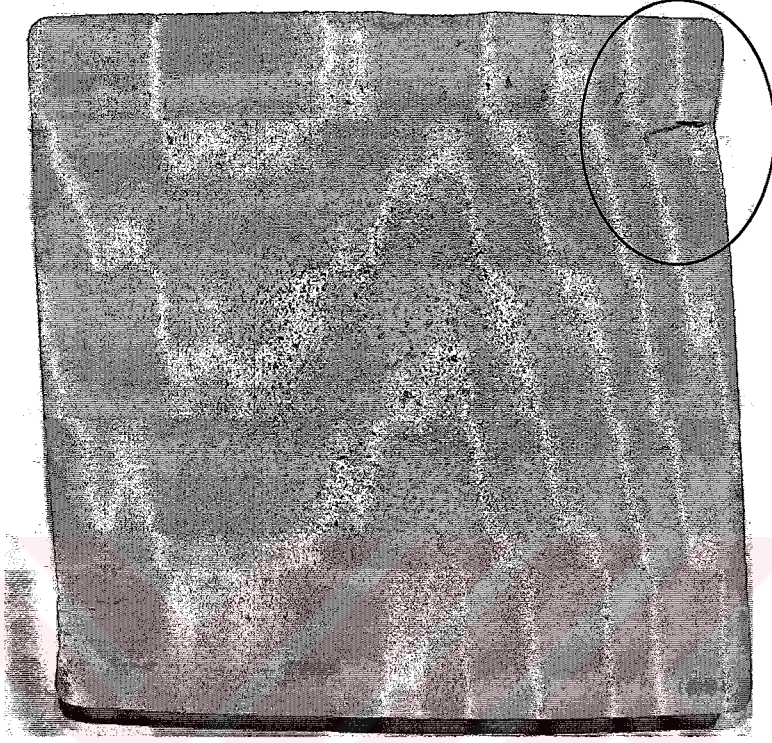
Şekil 2.47. Aşırı rombik bir kütüğün enine kesit görünümü

Uniform olmayan bu soğumanın etkisi, özellikle kalıp içinde ısı atımının yüksek ve donma sıcaklık aralığı dar olan çelik cinsleri için daha zararlı meydana gelmektedir. 0,18 – 0,40 %C içeren çelikler bu özelliklere sahip olması nedeniyle, rombiklik en şiddetli bu cinslerde meydana gelmektedir. 0,08 – 0,14 %C içeren çelik cinsleri için, ısı transfer hızı düşük, >0,5 %C (yüksek karbonlu) içeren çelik cinsleri için ise donma sıcaklık aralığı geniş olması sebebiyle bu sorun daha az şiddetli meydana gelmektedir [17].

2.4.6.11. Depresyon

Kütüklerde meydana gelen depresyon, yüzeylerden biri üzerinde meydana gelen homojen olmayan soğuma sonucu meydana gelmektedir. Kütük yüzeyinde, özellikle köşe bölgelerde meydana gelmektedir. Yüzeyin bir bölümünün daha erken soğuması sonucu bu bölge erken çekilerek depresyon meydana getirmektedir. Şekil 2.48’de bu

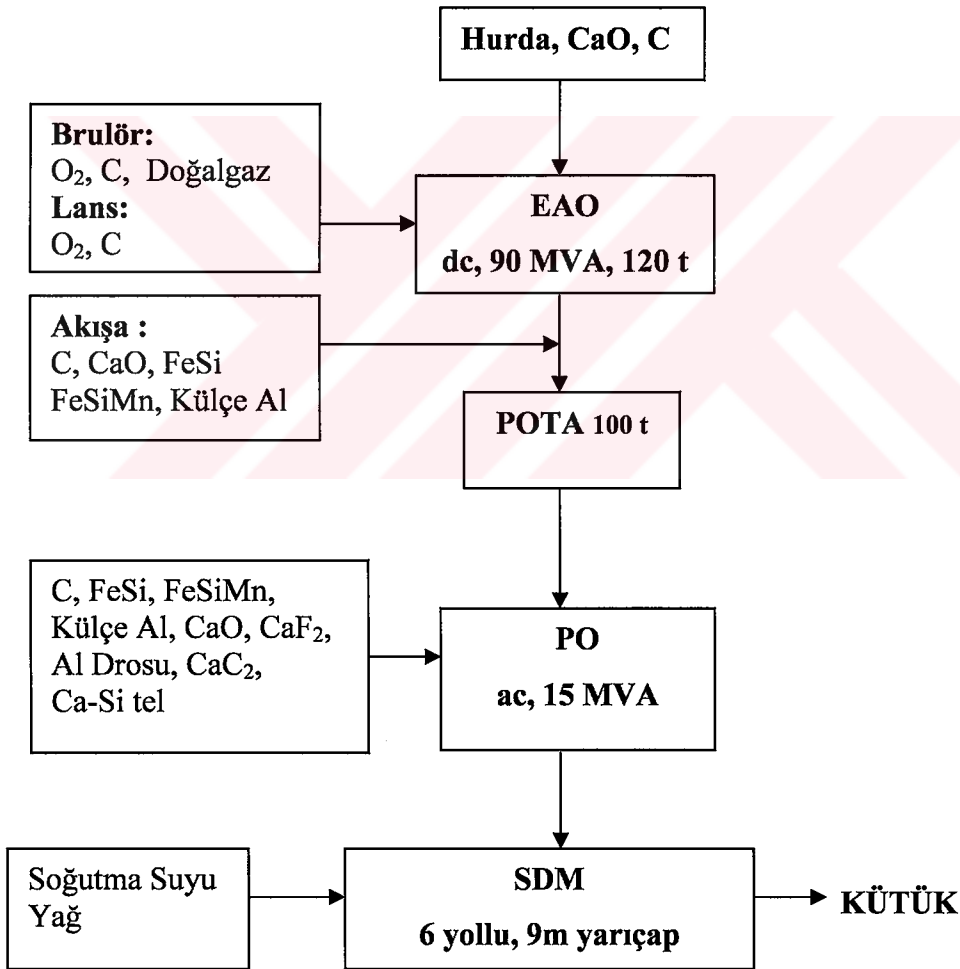
kusur görülmektedir. Kütüklerin %95'inde depresyonun meydana geldiği yüzeyin hemen altında iç yapı köşe çatlağı meydana gelmektedir [17, 20-22].



Şekil 2.48. Kütükte meydana gelen depresyon ve depresyona bağlı iç yapı çatlağı

3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Tez ile ilgili olarak gerçekleştirilen deneysel çalışmalar, İzmit Gebze bölgesinde yer alan ikincil üretim yapan bir çelik tesisinde KROMAN Çelik San. A.Ş. gerçekleştirilmiştir. Çalışılan tesis, hurda kontrol ünitesi, elektrik ark ocağı ergitmesi, pota metalurjisi ve sürekli döküm porsesi ile, ağırlıklı olarak çeşitli kalitelerde inşaat çeliği üretmektedir. Tesiste uygulanan çelik üretim prosesine ait genel akım şeması Şekil 3.1’de gösterilmektedir.



Şekil 3.1. İzmit – Gebze bölgesinde yer alan çelik tesisine ait üretim akım şeması

3.1. Kullanılan Malzemeler

Deneyisel çalışmalarda, daha önceki bölümlerde kimyasal kompozisyonu verilen hurda malzemeler, başlangıç hammaddesi olarak kullanılmaktadır. Ark fırınlarındaki ergitmeler sırasında, fırın içi brulörler ve/veya curuf kapısından lans ile oksijen ve karbon, ilave yakıt (doğal gaz), hurda ile birlikte şarj sepetinin içinde sönmemiş kireç ve karbon verilmektedir. Sıvı çeliğin ark ocağından ön rafinasyon amacıyla potaya alınması sırasında, C, FeSi, FeSiMn, külçe Al ve CaO katılmaktadır.

Pota metalurjisi sırasında ilave edilen şarj malzemeleri, alaşımlandırma ve deoksidasyon için C, FeSi, FeSiMn, külçe Al; kükürt gidermek amacıyla sentetik curuf elde etmek için sönmemiş kireç (CaO), CaF₂, Al drosu, gerekirse küküldü istenen seviyeye indirebilmek için karpit (CaC₂) ilave edilmektedir. Bunlara ilaveten, ergimiş üründe Al içeriği fazla olduğu takdirde (>%0,005) Ca-Si tel uygulaması yapılmaktadır. Sürekli döküm makinesine sıvı çeliğin verilmesinden önce ve pota ocağı işlemleri boyunca, inklüzyon yüzdürme, kimyasal ve fiziksel homojenleştirme için argon gazı ile karıştırma uygulanmaktadır. Alınan çelik kütüğün, fiziksel ve kimyasal karakterizasyonu için ise, standart kimyasallar ve makro dağılayıcılar kullanılmaktadır.

3.2. Kullanılan Alet ve Cihazlar

Tesisteki rutin üretim sırasında, kullanılan alet ve cihazların tamamı endüstriyel boyuttadır. Hurda, önce kepçeli vinç ile sepetlere, oradan da ark ocağına boşaltılmaktadır. Ark ocağı, 90MVA gücünde, DC (doğru akım ile çalışan) ve 120 tonluk bir ark ocağıdır. Ergitme sonrası sıvı çelik, dolomit refrakter astarlı ve sürgü plakalı akış sistemine sahip 100 tonluk potalarla ark ocağından alınmaktadır. Pota metalurjisinde kullanılan pota fırını, 15 MVA gücünde, AC (alternatif akımlı), üç elektrotlu ve ark ısıtmalı bir fırındır. Çelik rafinasyonu sırasında gerekli katkı malzemeleri, otomatik bunkerler yardımı ile şarj edilebilmektedir. Gaz karıştırma için bir argon gaz üfleme sistemi bulunmaktadır.

Tesiste üretim yapan sürekli döküm makinesine ait teknik veriler Tablo 3.1’de verilmektedir. Döküm makinesindeki tandiş bölümü, 35 t kapasiteli olup, sıvı çelik ile temas eden kısmı reçine bağlı manyezit esaslı refrakterden yapılmıştır. Tandışten kalıba metal, zirkon esaslı nozülünden akıtılmaktadır.

Tablo 3.1. Sürekli döküm makinesinin teknik özellikleri

Makine Tipi	DANIELI 3BLC 906
Yol Sayısı	6
Yarı çap	9 m
Kesit	100 x 100 / 180 x 180 mm
Döküm Hızı	0,6 – 6,0 m/dak
Kalıp tipi	Multi konik
Kalıp boyu	1000 mm
EMS	Kalıp içi (M – EMS)
Kütük Kesim	Oksi-asetilen torç ile
Kütük Boyu	4 – 14 m
Osilasyon Frekansı	25 – 250 cpm
Strok	0 – 16 mm

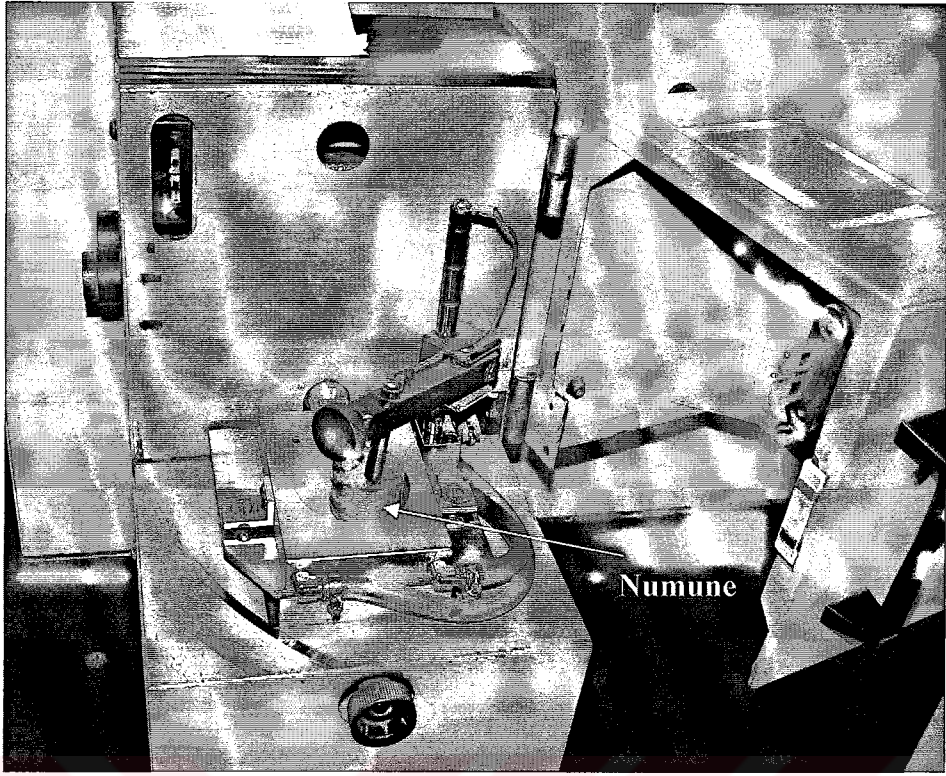
Kütük alındıktan sonra, kütük üstündeki kimyasal ve fiziksel testler, tesisin kalite-kontrol laboratuvarlarında yapılmaktadır. Kalite kontrol laboratuvarlarında, kimyasal analiz amacıyla alınan çelik numunelerin, spektrometreye girmeden önce Şekil 3.2’de görülen taşlama cihazında yüzeyleri pürüzsüz hale getirilmektedir. Kimyasal analizler için Şekil 3.3’de görülen ARL 3460 marka spektrometresi, curuf analizleri için İTÜ Kimya Metalurji Fakültesindeki Perkin Elmer 1100 B AAS cihazı kullanılmıştır. Toplam azot – oksijen ölçümleri Şekil 3.4’te görülen LECO EF300

azot-oksijen cihazında yapılmıştır. Bu analizler için katı çelikten Şekil 3.5'te görülen zımba makinesi ile numuneler alınmıştır.

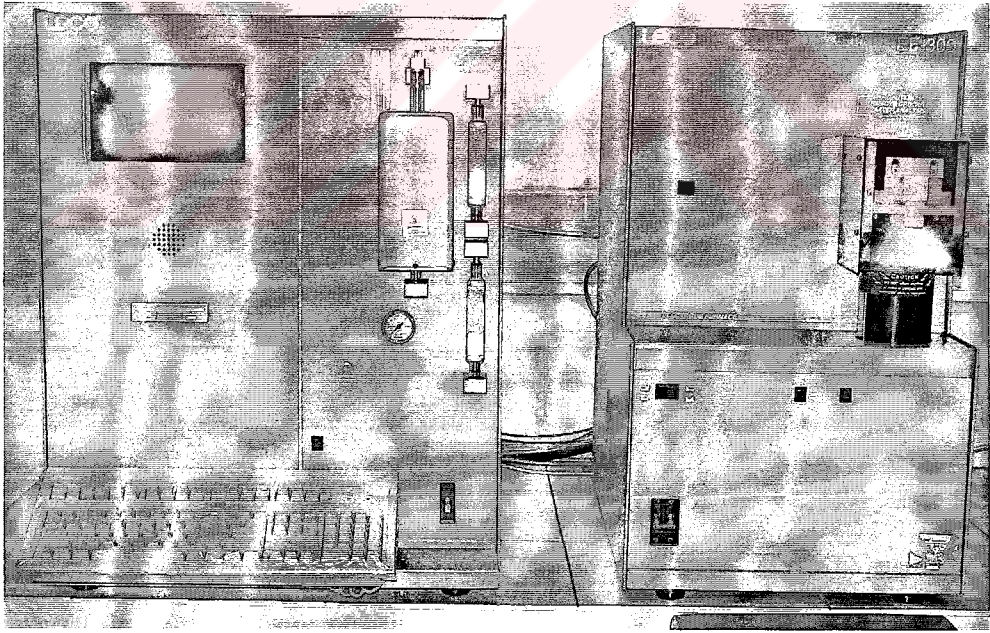
Sıcaklık ölçümleri için Sider Kemco marka problar, oksijen ölçümleri için Electro Nite marka problar, ve sıvı çelik kimyasal analiz için yine Sider Kemco marka numune alma kartuşları kullanılmıştır.



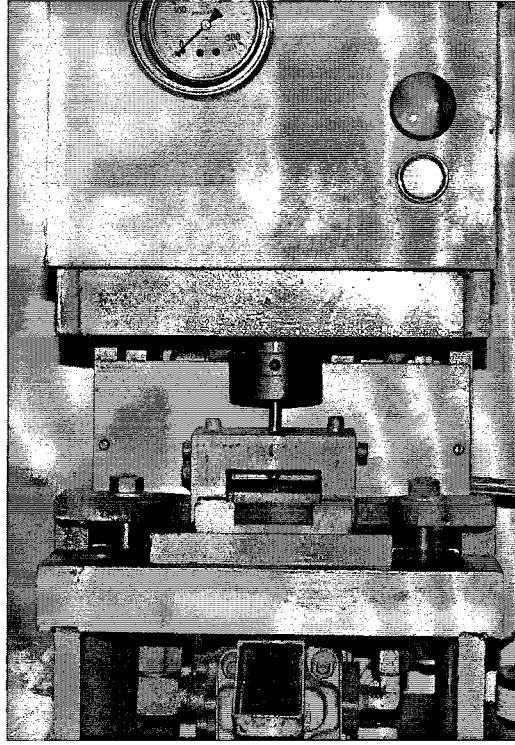
Şekil 3.2. Taşlama cihazı



Şekil 3.3. ARL 3460 marka spektrometre

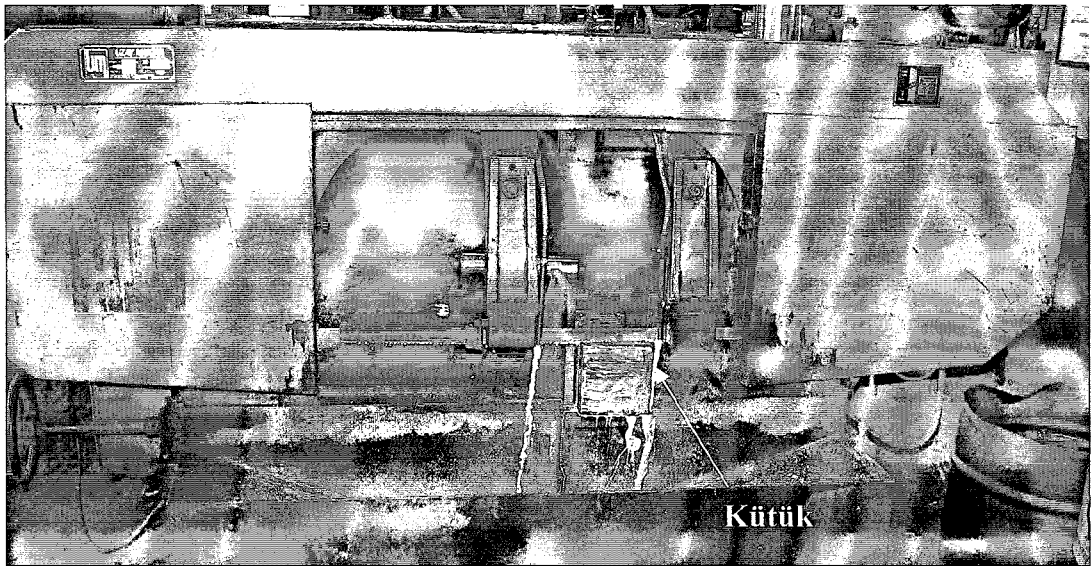


Şekil 3.4. LECO EF300 Azot-Oksijen analiz cihazı



Şekil 3.5. Zimba makinesi

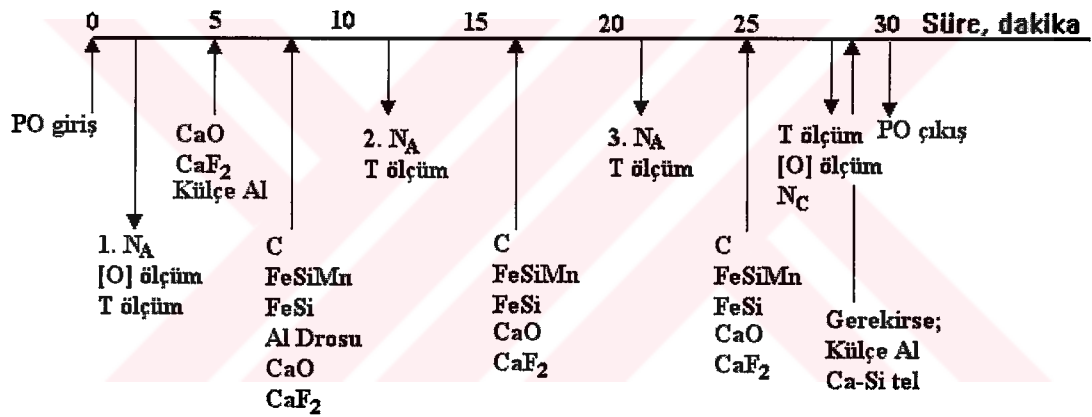
Kütük enine kesit numunelerinin incelenmesi için ise, üretilmiş kütükten 15-20 cm kalınlıkta parçalar kaynak kesme ile alındıktan sonra bu numuneden, şerit testereye sahip Uzay Makine şirketine ait Şekil 3.6'da görülen makinede kesme işlemi ile 2-3 cm kalınlığında kesit numunesi alınmakta ve %50 HCl ve %50 su içeren çözeltide 1-1,5 saat kaynatılarak makrodağlama gerçekleştirilmektedir.



Şekil 3.6. Şerit testereli kütük dilimleme makinesi

3.3. Deneysel Yöntem

Deneysel çalışmalarda, ikincil çelik üretimi yapan bir tesisteki pota metalurjisi uygulamaları ile kütük kalitesi arasındaki ilişki, kükürt giderme (%S değeri) ve kükürt gidermeye etki eden parametreler (süre, sıvı çeliğin serbest oksijen değeri, curuf bazikliği, curuf kompozisyonu) ile deoksidasyon (serbest [O] değeri) üzerine kurulmuş, ayrıca sürekli döküm sırasındaki döküm sıcaklığının da kütük kalitesi üzerine etkileri incelenmiştir. Pota metalurjisi sırasında, alınan metal ve curuf analiz örnekleri üzerinde kimyasal analizler yapılmış ve bu kimyasal analizlere bağlı olarak, ilgili çelik kütüğün döküm sıcaklıkları ve hızı da dikkate alınarak kütük kalitesi, makro gözlemlerle saptanmıştır. Pota Ocağı işlem süresince alınan numuneler, yapılan ölçümler ve ilave edilen malzemeler Şekil 5.7.'de görülmektedir.



N_A = Sıvı çelik kimyasal analiz numunesi, N_C = Curuf kimyasal analiz numunesi

Şekil 3.7. Pota ocağı işlem süresince numune alma ve ölçüm zaman çizelgesi

4. DENEYSEL SONUÇLAR

Deneysel çalışmalar iki kısımdan oluşmaktadır. İlk bölümde pota metalurjisinde kükürt gidermeye etki eden parametreler incelenmiştir. İkinci bölümde ise alınan kütük enine kesit numunelerinin makro gözlemi sonucu, meydana gelen çeşitli kusurlara etki eden parametreler araştırılmıştır.

4.1. Desülfürizasyon Oranına Etki Eden Parametreler

Yapılan deneysel çalışmalar, pota ocağında kükürt giderme işlemlerine etki eden parametreleri kapsamaktadır. Bu değişkenler aşağıdaki şekilde sıralanmaktadır.

1. Pota ocağı işlem süresi,
2. Sıvı çeliğin dökümden önceki serbest oksijen değeri,
3. Pota ocağı sentetik curuf kompozisyonu (baziklik, %FeO ve %Al₂O₃ içeriği),
4. Kullanılan malzeme miktarı (Al Dros),

Yukarıda bahsedilen bu parametrelerin kükürt giderme oranı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Kükürt giderme oranı aşağıdaki formülle gösterilmektedir:

$$\%R_{DS} = [(\%S_i - \%S_f) / \%S_i] \times 100 \quad (4.1)$$

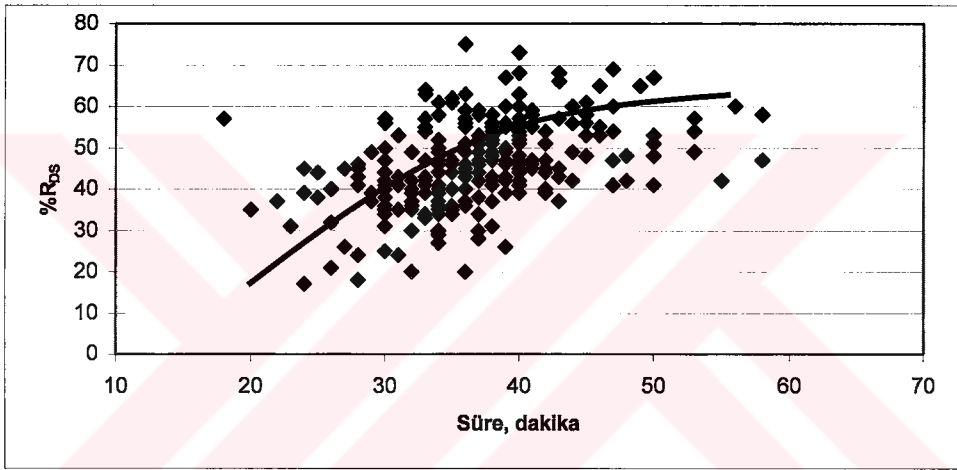
Burada; %R_{DS} desülfürizasyon oranı, %S_i sıvı çelik ilk kükürt değeri, %S_f ise işlem sonu kükürt değerini göstermektedir.

Bu bölümde verilerin elde edildiği dökümlerde, pota ocağı işlemlerinde 5-7 kg/t çelik CaO ve 1,5-2,5 kg/t çelik CaF₂ kullanılmıştır. Çalışmanın yürütüldüğü işletmede pota ocağına gelen sıvı çeliğin ilk kükürt konsantrasyonu %0,060 civarındadır. % 0,030 S değeri de bir çok kalite için istenen maksimum değerdir. Ayrıca bu değer, kütüklerde meydana gelen rombiklik, çatlak gibi kusurların şiddetli oluşmaması için de kritiktir.

Bu nedenle parametrelerin optimizasyonu ile minimum %50 kükürt giderme oranına ulaşılmaya çalışılmıştır.

4.1.1. İşlem Süresinin Etkisi

İşlem süresinin desülfürizasyon oranı üzerindeki etkisi şekil 4.1’de görülmektedir. Şekilden de görüldüğü gibi, sürenin kükürt giderme üzerinde önemli bir etkisi vardır. Ancak, yaklaşık 50 dakikadan sonra kükürt giderme yavaşlamaktadır. Pota ocağı işlemleri atmosfere açık yapılması nedeniyle deoksidasyon sınırlı seviyede yapılmaktadır. Kükürt gidermenin de oksijen aktivitesi ile ilişkili olduğu bilindiğine göre, pota ocağı işlemlerinde sürenin artmasıyla ancak belirli kükürt seviyelerine inilmektedir.

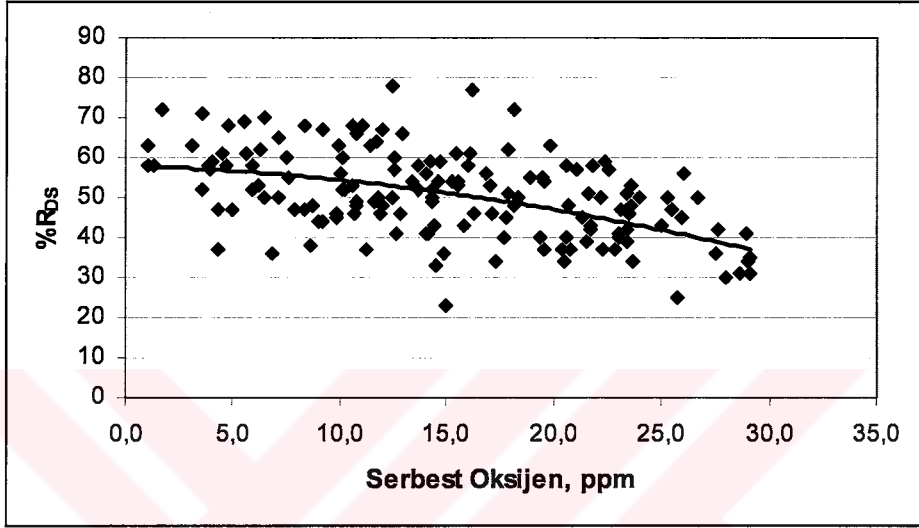


Şekil 4.1. Sürenin desülfürizasyon oranı üzerindeki etkisi

Pota ocağının EAO ile SDM arasında koordinasyonu sağladığı düşünüldüğünde, burada süreyi uzun tutmak üretimi geciktirecektir. Bunun yerine kükürt gidermeye etki eden diğer parametrelerin optimizasyonu gerekmektedir. EAO’da işlem süresi yaklaşık 45 dakika sürmektedir. Bu nedenle diğer zaman kayıpları da dikkate alınarak işlem süresi en fazla 40 dakika, kükürt gidermenin de hızlı yapılabilmesi için de en az 30 dakika olarak seçilmiş ve kükürt gidermeye etki eden diğer parametrelerde bu işlem süreleri dikkate alınmıştır.

4.1.2.Sıvı Çeliğin Serbest Oksijen Değerinin Etkisi

Kükürt gidermede sıvı çeliğin oksijen aktivitesinin etkisi, daha önceki bölümlerde açıklandığı desülfürizasyonu azaltıcı yöndedir. Bu ilişkiyi elde etmek amacıyla 30-40 dakika işlem süresine sahip dökümler incelenmiş ve sıvı çeliğin oksijen aktivitesi (serbest oksijen değeri) dikkate alınmıştır.

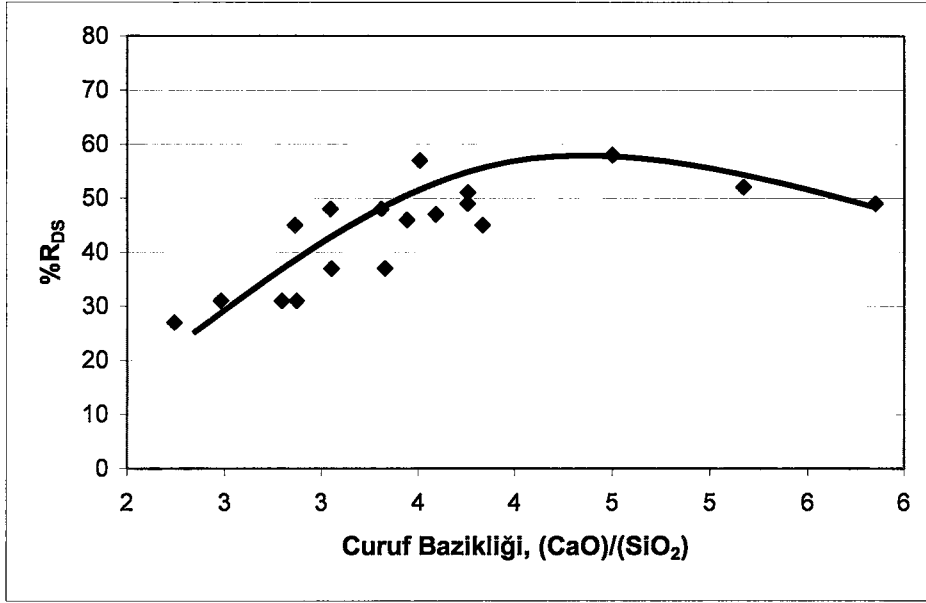


Şekil 4.2. Sıvı çelik oksijen aktivitesinin desülfürizasyon oranı üzerindeki etkisi

Şekil 4.2'den de görüldüğü gibi, sıvı çelik oksijen aktivitesi artması durumunda desülfürizasyon oranının azaldığı ortaya çıkmaktadır. Sıvı çelik içerisindeki oksijen aktivitesi 15 ppm'den 25 ppm'e artması halinde desülfürizasyon oranında %10'luk bir azalma meydana gelmektedir. Çelik içerisindeki kükürdün yarısının rafinasyonu için ($\%R_{DS} = \%50$), sıvı çelik serbest oksijen değerinin en fazla 20 ppm olması gerektiği görülmektedir.

4.1.3 Curuf Bazikliğinin Etkisi

Pota Ocağı işlemlerinde kükürt gidermenin yapılabilmesi için bazik ve indirgeyici curufun oluşturulma zorunluluğu bilinmektedir. Bu ilişki Şekil 4.3'ten de görüldüğü gibi elde edilmiştir.

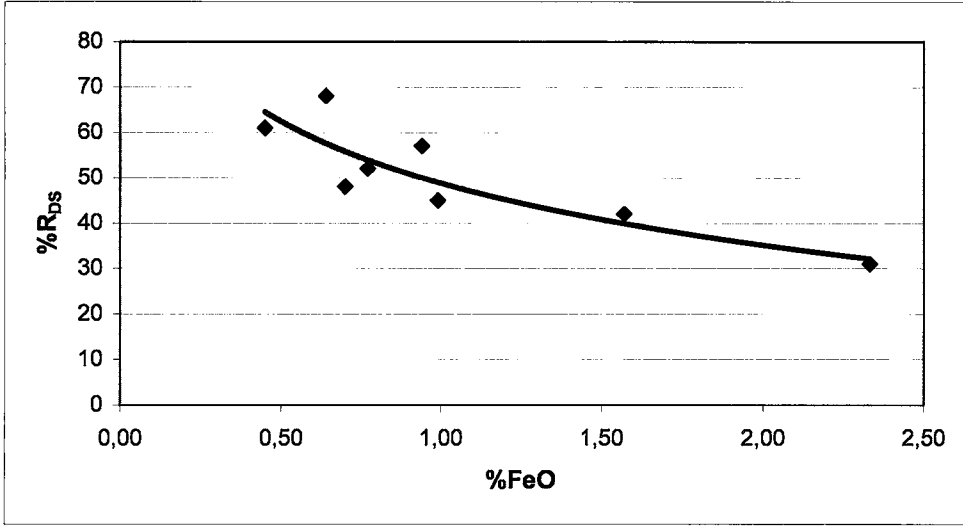


Şekil 4.3. Curuf bazikliğinin desülfürizasyon oranı üzerindeki etkisi

Şekil 4.3'e göre, bazikliğin artması sonucunda kükürt giderme oranında da artış gözlemlenmektedir. Ancak, baziklik oranının yaklaşık 4'ten büyük olması durumunda desülfürizasyon oranında bir artış olmamakta ve hatta azalma görülmektedir.

4.1.4. Curuf İçindeki FeO Miktarının Etkisi

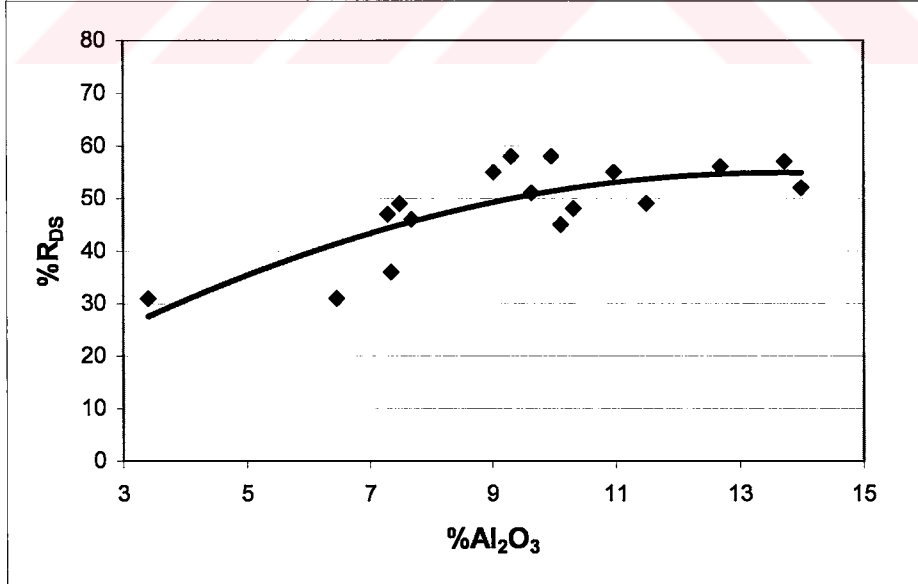
Curuf içerisindeki FeO miktarı arttıkça, çeliğin oksijen aktivitesi de artmakta ve kükürt giderme oranı azalmaktadır. Şekil 4.4'te bu ilişki elde edilmiştir. Şekle göre, desülfürizasyon oranının %50 olabilmesi için, curuf içindeki %FeO < 1 olması gerekmektedir. Bunu sağlamak için de iyi bir deoksidasyon yapılmalıdır.



Şekil 4.4. Curuf içindeki FeO miktarının desülfürizasyon oranı üzerindeki etkisi

4.1.5. Curuf İçindeki Al₂O₃ Miktarının Etkisi

Curuf içerisindeki Al₂O₃ miktarı, çalışılan sıcaklıkta sıvı bir curuf elde edilebilmesi için, özellikle Si ile deokside edilmiş çelikler açısından önemlidir. Si ile deokside edilmiş çelikler için, %55-60 CaO ve %20-25 SiO₂ içeren curuf içerisindeki Al₂O₃ miktarına bağlı olarak kükürt giderme oranındaki değişim Şekil 4.5'te görüldüğü gibi elde edilmiştir.



Şekil 4.5. Curuf içerisindeki Al₂O₃ miktarının desülfürizasyon oranı üzerindeki etkisi

Yukarıdaki şekilden de görüldüğü gibi, curuf içerisindeki alümina miktarı %10 mertebelerinde olduğunda desülfürizasyon %50 oranında gerçekleşmektedir. Daha

önceki bölümlerde açıklandığı şekilde, bu değerler sıvı curuf elde etmek için yeterlidir.

Deneysel çalışmaların yürütüldüğü işletmede curuf içinde Al_2O_3 miktarı % 3-6 seviyelerinde elde edilmiştir. Bilindiği gibi bu değer % 8-10 seviyelerine yükseltilmesi desülfürizasyon açısından faydalıdır. Bu amaçla işletmede pota ocağı işlemlerinde; açıkta döküm alınması nedeniyle külçe Al yerine Al dros ilavesi denenmiş ve sonuçları bir sonraki bölümde açıklanmıştır.

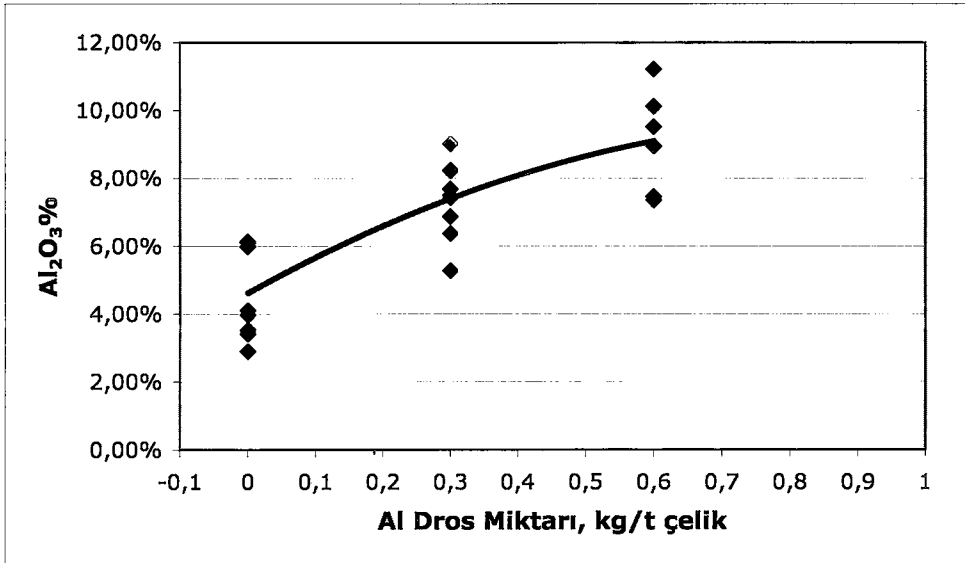
4.1.6. Al Dros Kullanımının Etkisi

Kullanılan Al Dros malzemesinin kimyasal kompozisyonu Tablo 4.1’de verilmektedir.

Tablo 4.1. Al dros kimyasal analizi

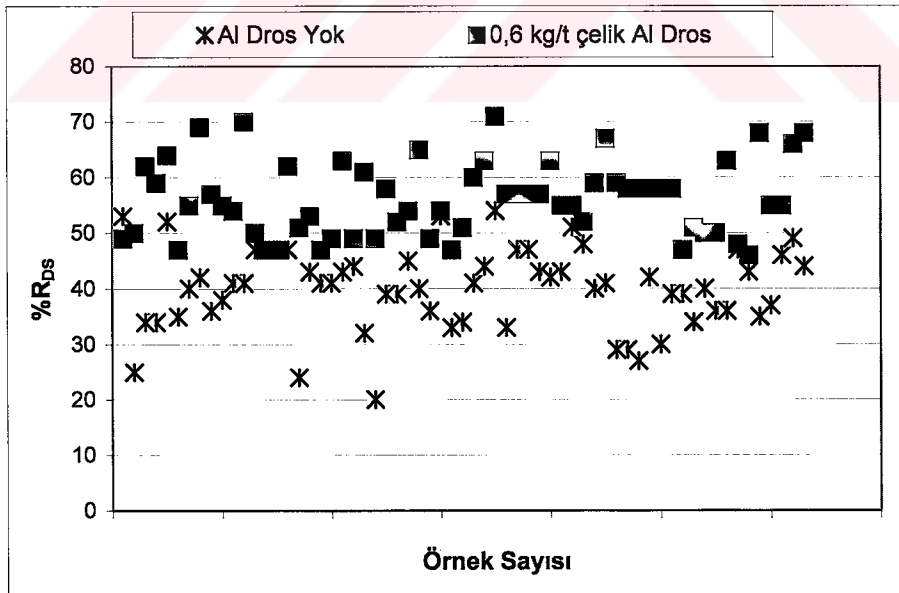
Bileşen	%
Al_2O_3	77,51
Al (Metalik)	% 5
Fe_2O_3	1,80
SiO_2	6,29
CaO	7,21
MgO	2,81

Al Dros kullanımının desülfürizasyon üzerindeki etkisini görmek amacıyla öncelikle Al Dros miktarı ile cuuf içerisindeki Al_2O_3 miktarı arasındaki ilişki tespit edilmiş olup, bu ilişki Şekil 4.6’da görülmektedir.



Şekil 4.6. Kullanılan Al dros miktarı ile curuf Al_2O_3 içeriği arasındaki ilişki

Şekil 4.6'da göre yaklaşık olarak %10 Al_2O_3 içeriği, Al drosun 1 ton sıvı çelik başına 0,6 kg kullanıldığı durumda elde edildiği görülmektedir. Şekil 4.5 ve 4.6 birlikte incelendiğinde 0,6 kg/t çelik Al dros kullanımının uygun olduğu tespit edilmiştir. Al dros kullanımının desülfürizasyon oranına etkisi Şekil 4.7'de görülmektedir.



Şekil 4.7. Al dros kullanılan ve kullanılmayan durumdaki desülfürizasyon oranı dağılımı

Şekil 4.7'ye göre, Al dros kullanılmadığı zaman kükürt giderme oranı %40 mertebelerinde iken, 0,6 kg/t çelik Al dros kullanıldığı durumda kükürt giderme oranı artmış ve %50 seviyelerine çıkmıştır. Bu durum, Al drosun curuftaki Al_2O_3 içeriğini arttırıcı rolü sebebiyle gerçekleşmektedir.

4.2. Kütüklerin Makro Yapılarının Gözlemlenmesi

Yapılan çalışmalarda kütük kusurlarından iç yapı gaz boşluğu, rombiklik ve iç yapı köşe çatlağı ele alınmıştır. Rombiklik şiddeti sayısal olarak kütük iki köşegen arasındaki fark ile ifade edilmiştir.

4.2.1. İç Yapı Gaz Boşluğu İncelemesi

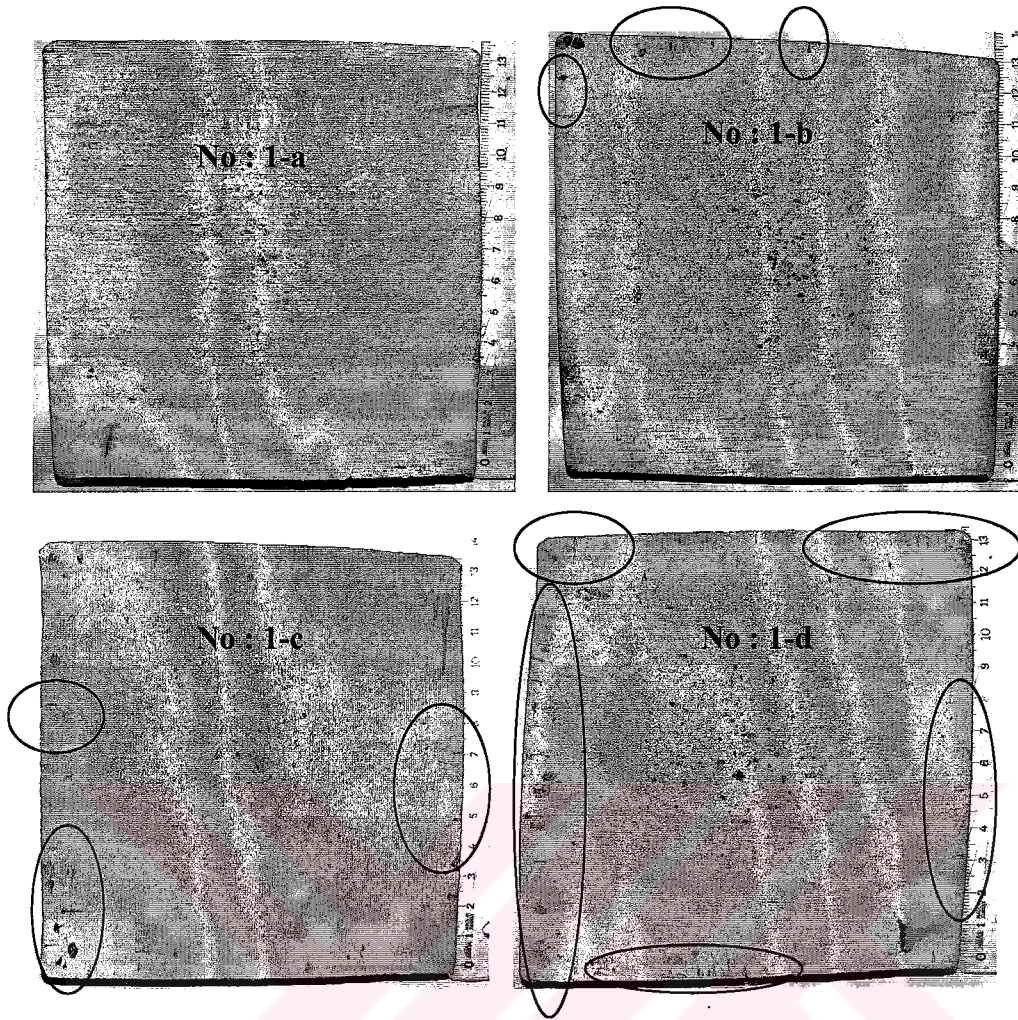
İç yapıda meydana gelen gaz boşluğu şiddetinin incelenmesinde, sıvı çeliğin sürekli dökümünden önceki serbest oksijen içeriği, toplam azot $[N_T]$ ve toplam oksijen $[O_T]$ değerleri dikkate alınmıştır.

4.2.1.1. Sıvı Çelik Serbest Oksijen İçeriğinin Etkisi

Tablo 4.2'de Şekil 4.8'de yer alan örneklerin kimyasal analizleri ve çeşitli üretim parametreleri görülmektedir. Şekil 4.8'de, sıvı çeliğin serbest oksijen değeri ($\underline{O}$) ile gaz boşluğu şiddetinin değişimi 0,18 – 0,33 %C içeren karbon çelikleri için görülmektedir. Şekilden de görüldüğü gibi yaklaşık 20 ppm serbest oksijen değeri gaz boşluğu oluşumu için sınır değer olmaktadır. 25 ppm değerinden sonra ise kusurun şiddeti artmakta ve 30 ppm'den büyük olduğu durumda aşırı şiddetlenmektedir.

Tablo 4.2. 1. grup örneklerin kimyasal analizleri.

Örnek No	%C	%Mn	%Si	%P	%S	%Cu	$\underline{O}$ (ppm)	AşırıIsı °C	Vc m/dak
1-a	0,20	0,76	0,24	0,010	0,027	0,17	18,7	28	3,3
1-b	0,22	0,76	0,18	0,020	0,022	0,24	23,4	22	3,1
1-c	0,30	0,65	0,15	0,017	0,008	0,28	30,2	32	3,1
1-d	0,25	0,63	0,13	0,020	0,022	0,18	37,9	30	3,1



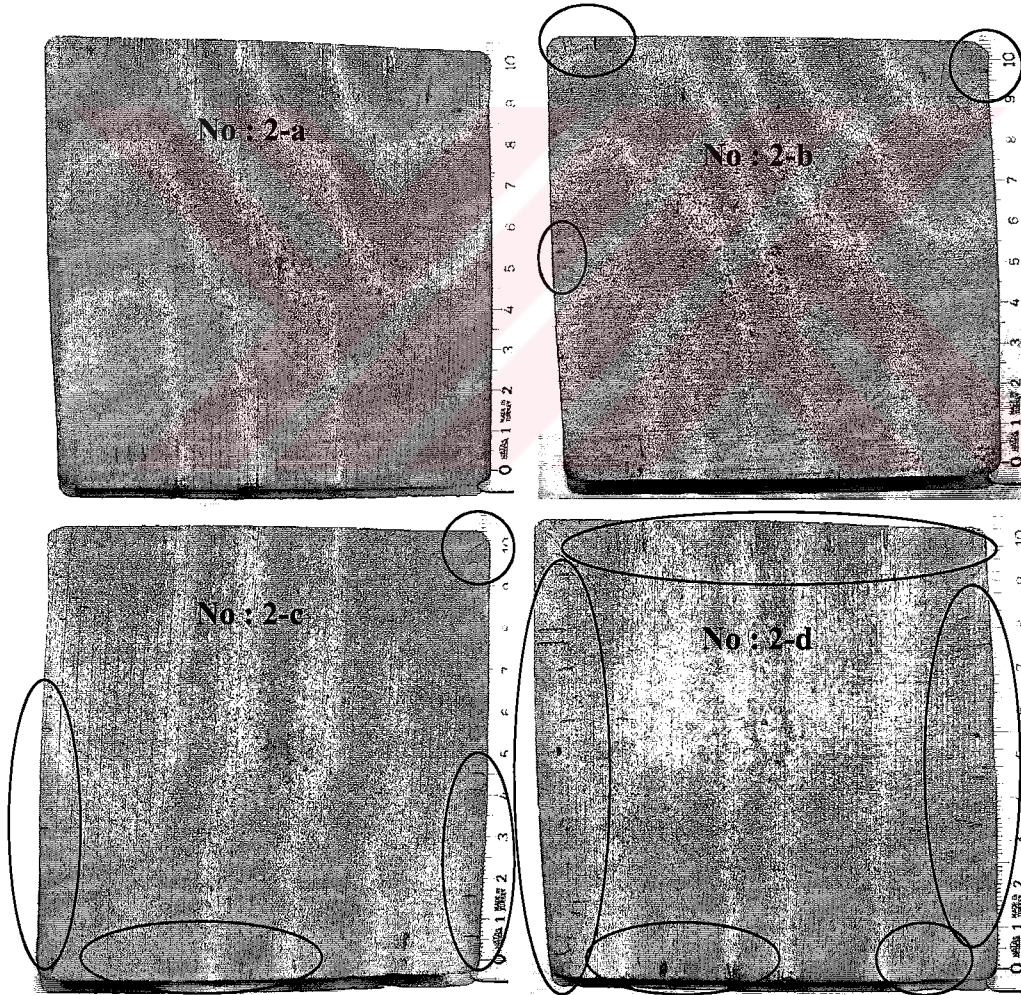
Şekil 4.8. 0,18 – 0,33 %C içeren karbon çeliklerinde sıvı çelik serbest oksijen değerinin iç yapı gaz boşluğu şiddeti üzerindeki etkisi

4.2.1.2. Çelik Azot ve Oksijen İçeriği Toplamının Etkisi

Tablo 4.3'te Şekil 4.9'da yer alan örneklerin kimyasal analizleri ve çeşitli üretim parametreleri verilmiştir. Şekil 4.9'da ise katı çelik içerisindeki toplam azot ve oksijen içeriğinin gaz boşluğu şiddeti üzerindeki etkisi görülmektedir. Şekil 4.9 incelendiğinde, gaz boşluğu oluşumu için kritik değerin yaklaşık 200 ppm olduğu anlaşılmaktadır. Çelik içerisindeki azot ve oksijen içeriğinin toplamının 200 ppm'i aşması durumunda, kütük iç yapısında gaz boşlukları meydana gelmekte ve bu değer arttıkça şiddetlenmektedir.

Tablo 4.3. 2. grup örneklerin kimyasal analizleri.

Örnek No	%C	%Mn	%Si	%P	%S	%Cu	<u>O</u> (ppm)	Aşırı Isı °C	[N]+[O] (ppm)
2-a	0,18	0,70	0,19	0,019	0,018	0,24	13,8	33	185
2-b	0,22	0,65	0,19	0,015	0,025	0,19	8,9	33	216
2-c	0,32	0,68	0,22	0,026	0,028	0,22	15,8	20	232
2-d	0,20	0,64	0,13	0,020	0,025	0,24	8,5	29	265



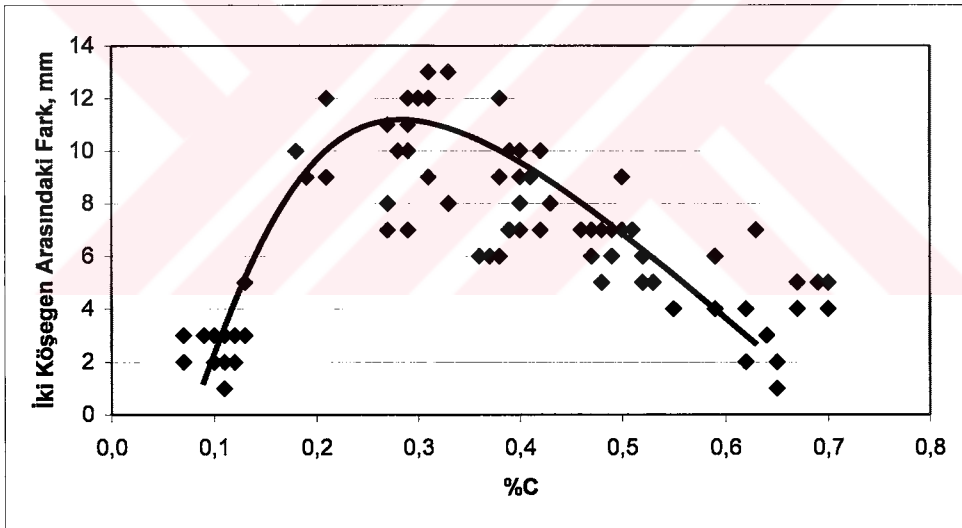
Şekil 4.9. 0,18 – 0,33 %C içeren karbon çeliklerinde katı çelik içerisindeki toplam azot ve oksijen değeri ile gaz boşluğu şiddeti ilişkisi.

4.2.2. Rombiklik İncelemesi

Kütüklerde meydana gelen rombikliğin şiddetine etki eden parametreler literatürde de belirtildiği gibi çeliğin %C ve %S içeriği, Mn/S oranı ve aşırı ısı olarak seçilmiştir. Rombikliğin şiddeti, kütüğün iki köşegeni arasındaki fark olarak ifade edilmiştir. Çeliğin %C içeriğinin rombiklik üzerindeki etkisini görmek amacıyla 130x130 mm kesitli kütükler dikkate alınmış ve aşırı ısı 25-35 °C, çeliğin kimyasal bileşiminde %S < 0,030, %Mn ise %65-80 içeren dökümler dikkate alınmıştır.

4.2.2.1. %C İçeriğinin Etkisi

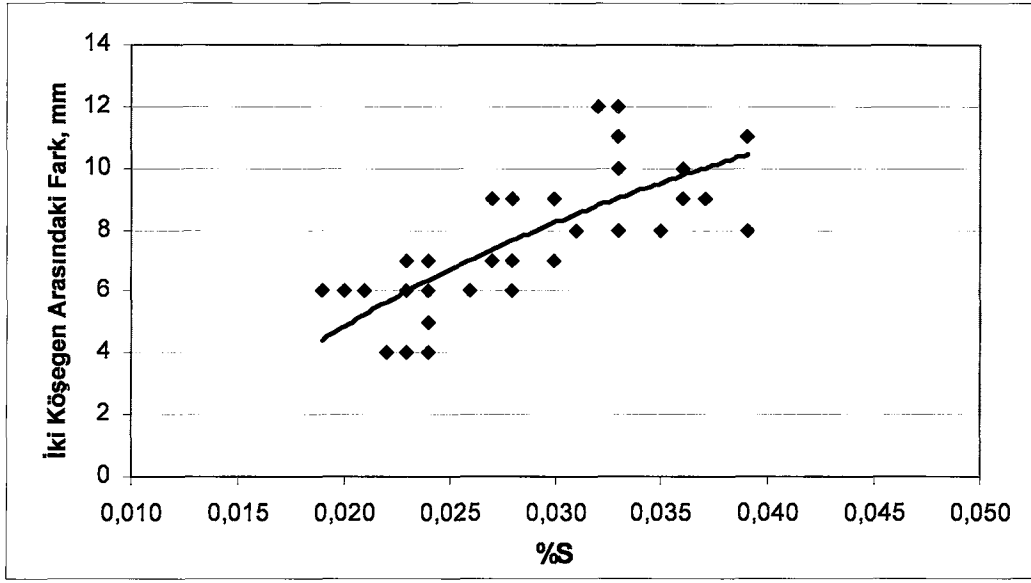
%C içeriğinin rombiklik üzerindeki etkisi Şekil 4.10'da görülmektedir. Bu şekle göre, rombikliğin şiddeti %0,20 ile %0,40 karbon içeren karbon çeliklerinde en fazla meydana gelmiştir. En şiddetli rombiklik %0,30 C içeriğinde meydana gelirken, en hafif rombiklik %C < 0,12 ve %C > 0,60 içeren dökümlerde meydana gelmiştir.



Şekil 4.10. Karbon çeliklerinde %C içeriğinin rombiklik üzerindeki etkisi

4.2.2.2. %S İçeriğinin Etkisi

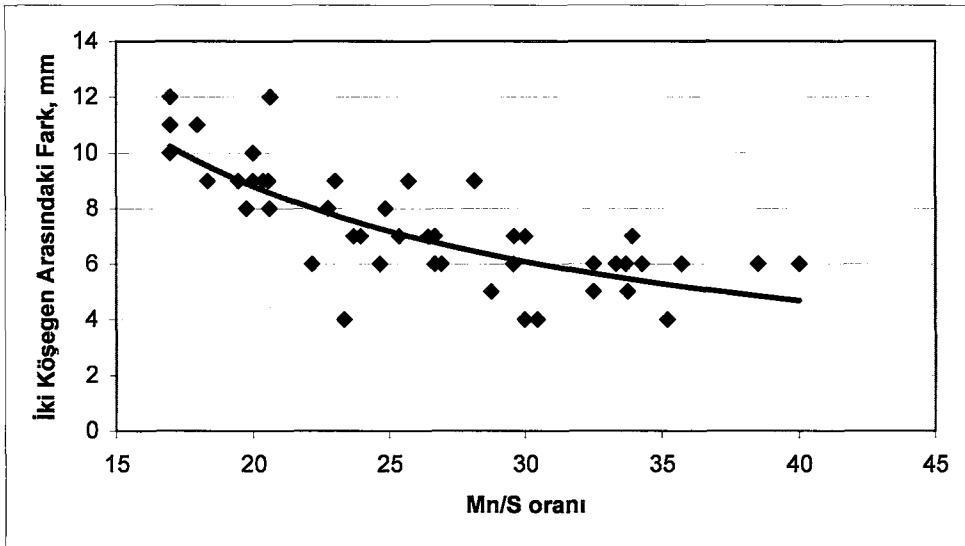
Şekil 4.11'de ise, rombikliğe en hassas olan %0,2-0,4 C içeren karbon çeliklerde %S içeriğinin rombiklik şiddeti üzerindeki etkisi tartışılır. Aşırı sıcaklığının 25-35 °C arasında olduğu durum için görülmektedir. Şekilden de görüldüğü gibi, çeliğin %S içeriği arttıkça rombiklik de şiddetlenmektedir. Özellikle %0,03 S değerinden sonra kütüklerde iki köşegen arasındaki fark 8 mm'nin altına düşmemektedir. Bu fark, %S 0,03'dan küçük olduğu durumlarda ise ortalama 6 mm olmaktadır.



Şekil 4.11. 0,2 – 0,4 %C içeren karbon çeliklerinde %S içeriğinin rombiklik üzerindeki etkisi

4.2.2.3. Çeliğin Mn/S Oranının Etkisi

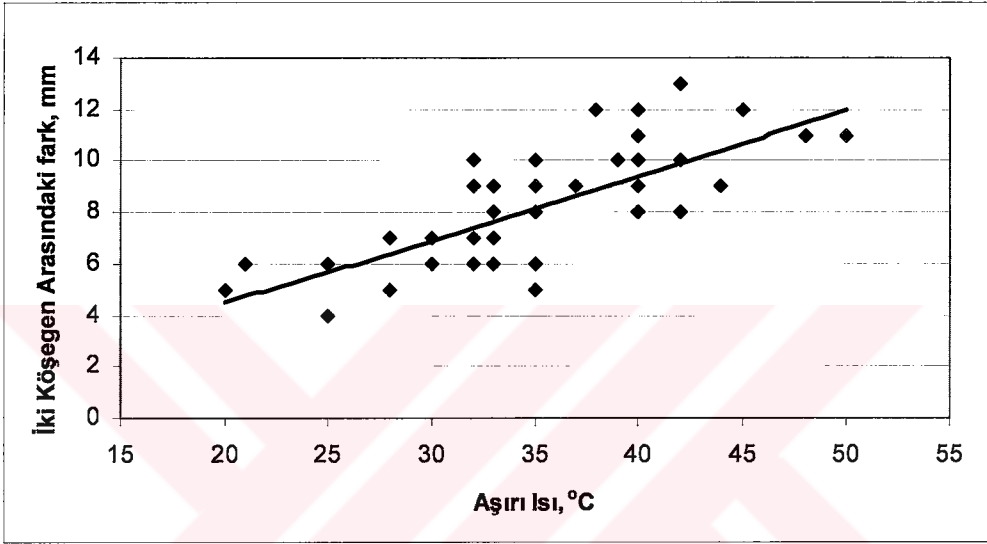
Şekil 4.12’de ise çelik kompozisyonundaki Mn/S oranını ile rombiklik ilişkisi görülmektedir. Mn/S oranı 25’ten küçük olduğu durumda rombiklik hızla artmakta iken 30 değerinden sonra azalmaktadır. Mn/S oranının minimum 30 olması bu cins çelikler için rombiklik açısından faydalı olduğu görülmektedir.



Şekil 4.12 0,2 – 0,4 %C içeren karbon çeliklerinde Mn/S oranının rombiklik üzerindeki etkisi

4.2.2.4. Döküm Sırasındaki Aşırı Isı Miktarının Etkisi

Şekil 4.13'te aşırı ısıнын rombiklik şiddeti üzerindeki etkisi görülmektedir. Buna göre, iki köşegen arasındaki farkın şiddetli sayılmayacak <6 mm olabilmesi için sürekli döküm esnasında tandiş aşırı sıcaklığının 25-30 °C aralığında olması gerektiği anlaşılmaktadır. 35 °C'de büyük aşırı ısı ile alınan dökümlerde köşegenler arasındaki farkın minimum 8 mm olduğu görülmektedir.



Şekil 4.13. Aşırı ısı ile rombiklik ilişkisi

4.2.3. İç Yapı Köşe Çatlağı İncelemesi

Kütüklerin makro incelenmesi çalışmalarının bu bölümünde iç yapı çatlak oluşumu için, hem çatlak hassasiyeti yüksek olması hem de ilgili işletmede en çok problem yaşanan kaliteler olması sebebiyle SAE 1020, SAE 1025 ve SAE 1030 kalite karbon çelikleri incelenmiştir. İncelenen bu çelik cinslerinin kimyasal analizleri Tablo 4.4'de görülmektedir. Kütük kesiti olarak, yine işletmede en çok hataların olduğu 130x130 mm kesit incelenmiştir.

Tablo 4.4. Deneylerde incelenen çelik cinslerinin kimyasal analiz aralığı

%C		%Mn		%Si		%S		%P		%Cu		%Sn	
min	max	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max
0.18	0.33	0.55	0.75	0.15	0.25	0.015	0.04	0.01	0.03	0.15	0.30	0.01	0.025

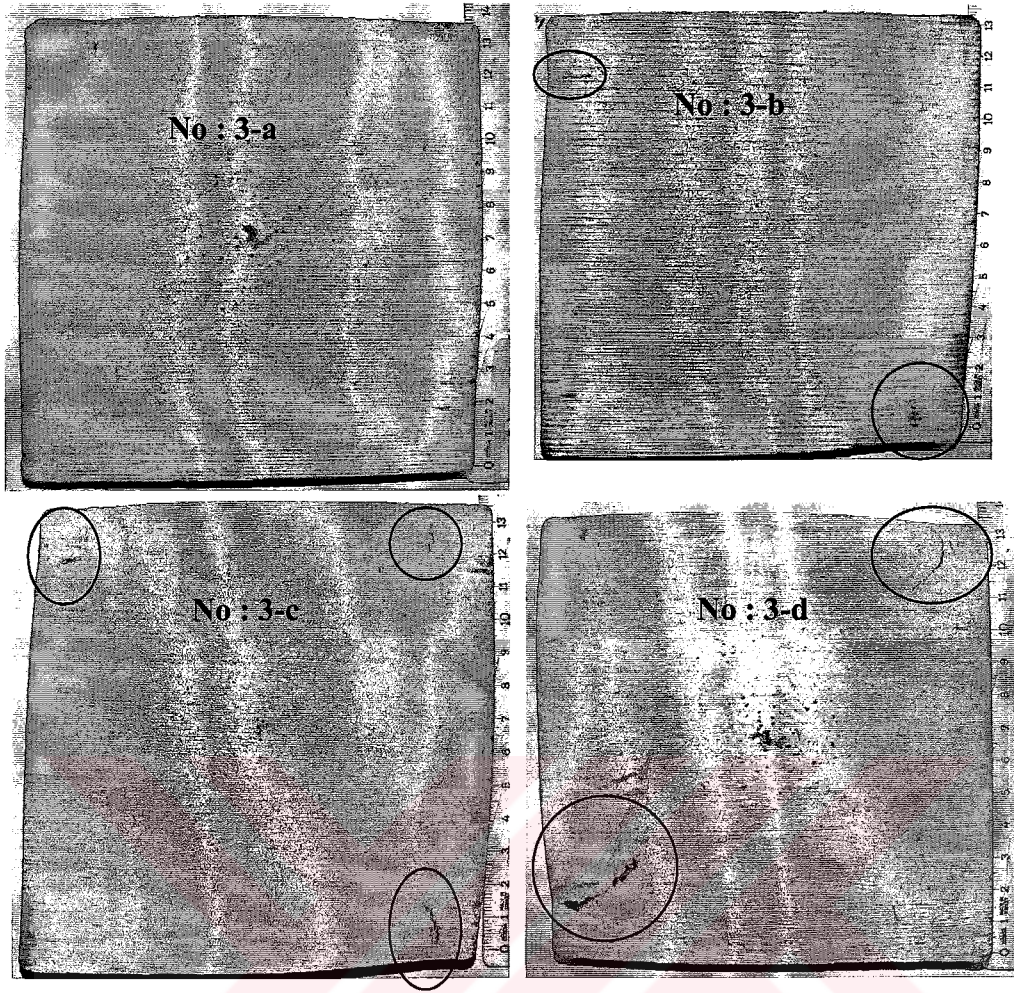
Kütüklerde meydana gelen bu tür çatlakların şiddetine etki eden parametreler 0,18 – 0,33 %C içeren karbon çelikleri için, çeliğin %S içeriği, Mn/S oranı, döküm sürecindeki aşırı ısı ve sekonder soğutma bölgesindeki spesifik su tüketimi olarak belirlenmiş ve incelenmiştir.

4.2.3.1. %S İçeriğinin Etkisi

Tablo 4.5'te Şekil 4.14'te yer alan örneklerin kimyasal analizleri ve çeşitli üretim parametreleri görülmektedir. Şekil 4.14'e göre, çatlak şiddeti %S içeriği ile birlikte artmaktadır. Buna göre, yaklaşık olarak %0,025 S değerinden sonra çatlak oluşumu meydana gelmekte ve % 0,030 S değerinden sonra şiddetlenmektedir.

Tablo 4.5. 3. grup örneklerin kimyasal analizleri.

Örnek No	%C	%Mn	%Si	%P	%S	%Cu	Aşırı Isı °C	Vc m/dak	μ lt/kg
3-a	0,32	0,66	0,23	0,018	0,022	0,22	31	3,0	1,16
3-b	0,26	0,68	0,19	0,011	0,028	0,23	24	2,9	1,13
3-c	0,19	0,67	0,20	0,013	0,035	0,23	29	2,9	1,17
3-d	0,29	0,64	0,19	0,012	0,049	0,19	21	3,1	1,21



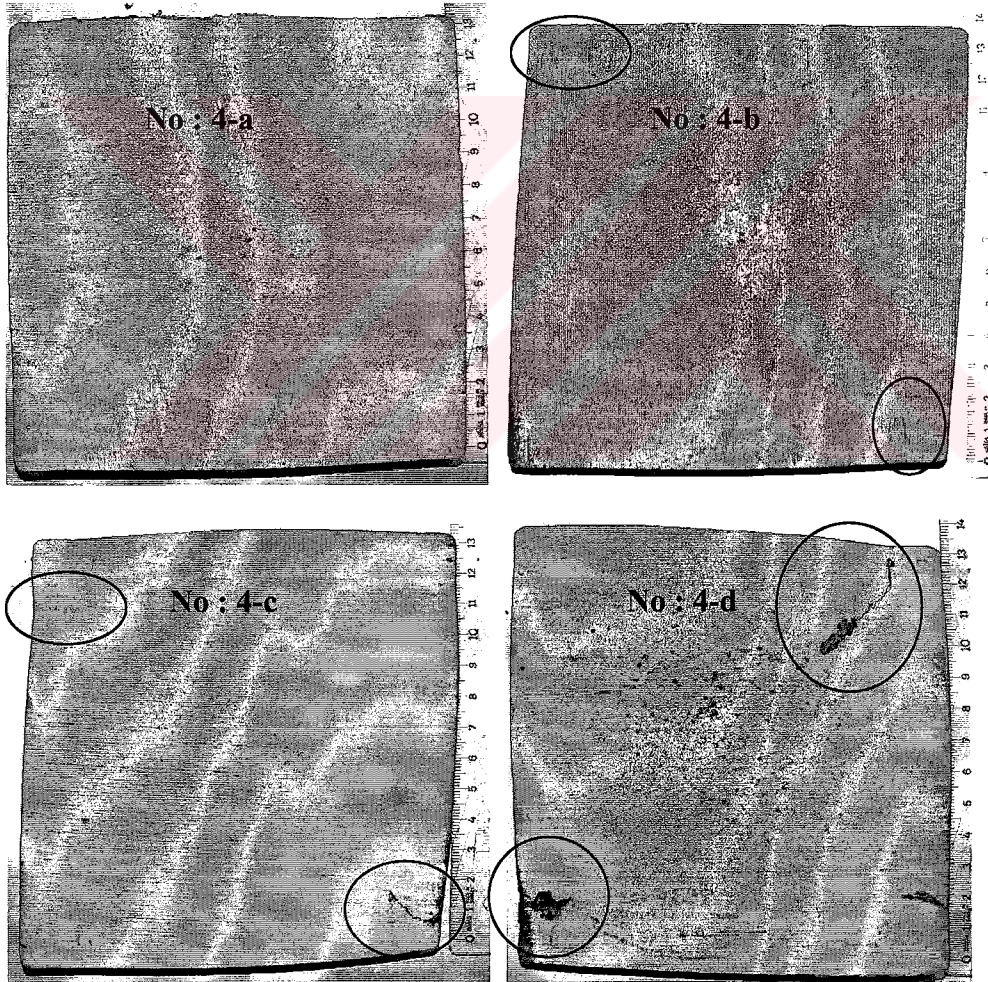
Şekil 4.14. 0,18 – 0,33 %C içeren karbon çeliklerinde %S içeriğinin iç yapı köşe çatlağı üzerindeki etkisi.

4.2.3.2. Çeliğin Mn/S Oranının Etkisi

Çeliğin Mn/S oranı ile iç yapı köşe çatlağı ilişkisi ise Şekil 4.15'te görülmektedir. Tablo 4.6'da Şekil 4.15'te yer alan örneklerin kimyasal analizleri ve çeşitli üretim parametreleri görülmektedir. Şekilden de görüldüğü gibi, çeliğin kompozisyonundaki Mn/S oranı arttıkça çatlak şiddetinde azalma ve Mn/S oranı 30'dan büyük olduğu durumda çatlak oluşumu gözlemlenmemiştir. En şiddetli çatlaklar Mn/S oranının 20 ve daha küçük değerlerde meydana gelmektedir.

Tablo 4.6. 4. grup örneklerin kimyasal analizleri.

Örnek No	%C	%Mn	%Si	%P	%S	%Cu	Aşırı Isı °C	Vc m/dak	μ lt/kg
4-a	0,25	0,70	0,26	0,015	0,022	0,21	28	3,2	1,10
4-b	0,18	0,75	0,23	0,020	0,028	0,18	30	2,9	1,18
4-c	0,18	0,63	0,26	0,011	0,027	0,23	33	3,2	1,10
4-d	0,31	0,73	0,18	0,020	0,051	0,19	28	2,9	1,20



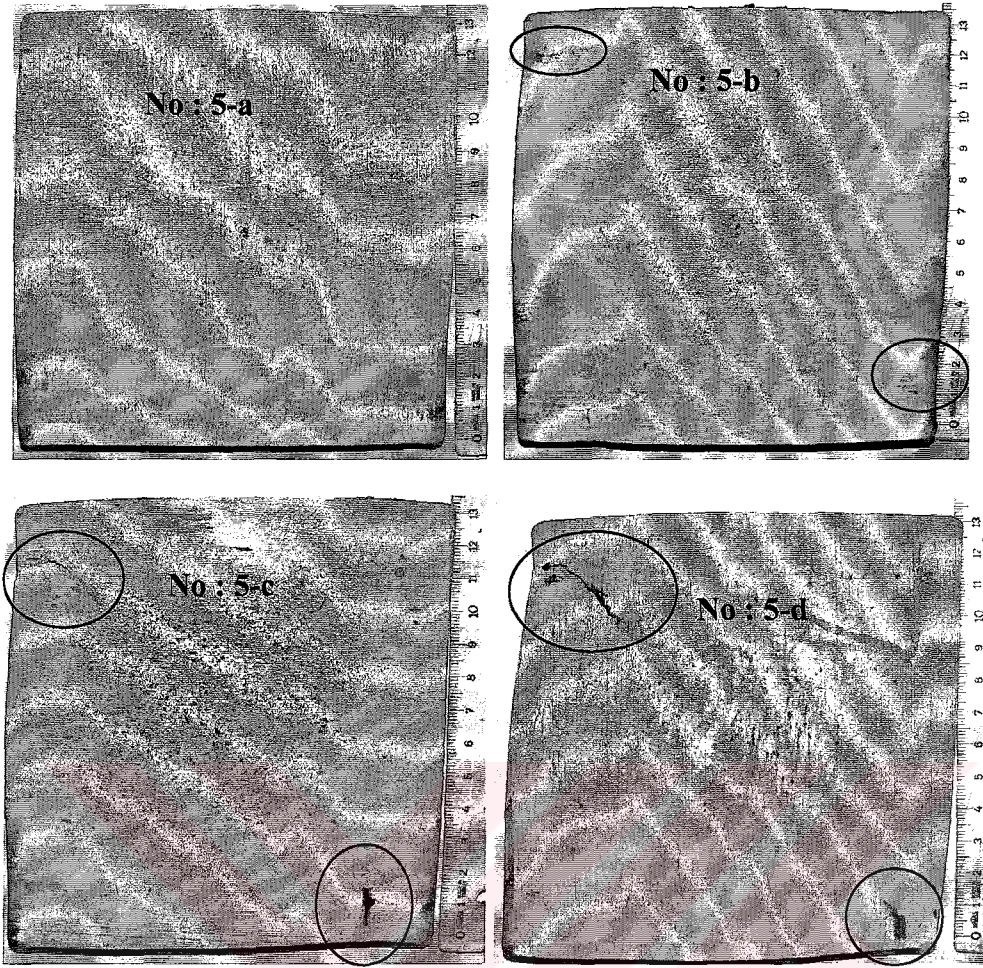
Şekil 4.15. 0,18 – 0,33 %C içeren karbon çeliklerinde Mn/S oranının iç yapı köşe çatlak şiddeti üzerindeki etkisi

4.2.3.3. Döküm Sırasındaki Aşırı Isı Miktarının Etkisi

Şekil 4.16’da sürekli döküm esnasında aşırı ısının çatlak şiddeti üzerindeki etkisi görülmektedir. Tablo 4.7’de ise Şekil 4.16’da yer alan örneklerin kimyasal analizleri ve çeşitli üretim parametreleri yer almaktadır. Çatlak oluşumu yaklaşık 35 °C’ye ulaştığında başlamakta ve 40 °C’den sonra şiddetlenmektedir.

Tablo 4.7. 5. grup örneklerin kimyasal analizleri.

Örnek No	%C	%Mn	%Si	%P	%S	%Cu	AşırıIsı °C	Vc m/dak	μ lt/kg
5-a	0,24	0,66	0,20	0,012	0,021	0,19	25	3,2	1,09
5-b	0,22	0,64	0,19	0,022	0,019	0,22	32	3,1	1,14
5-c	0,25	0,65	0,22	0,015	0,026	0,15	39	3,2	1,17
5-d	0,29	0,65	0,18	0,015	0,024	0,19	44	3,2	1,16



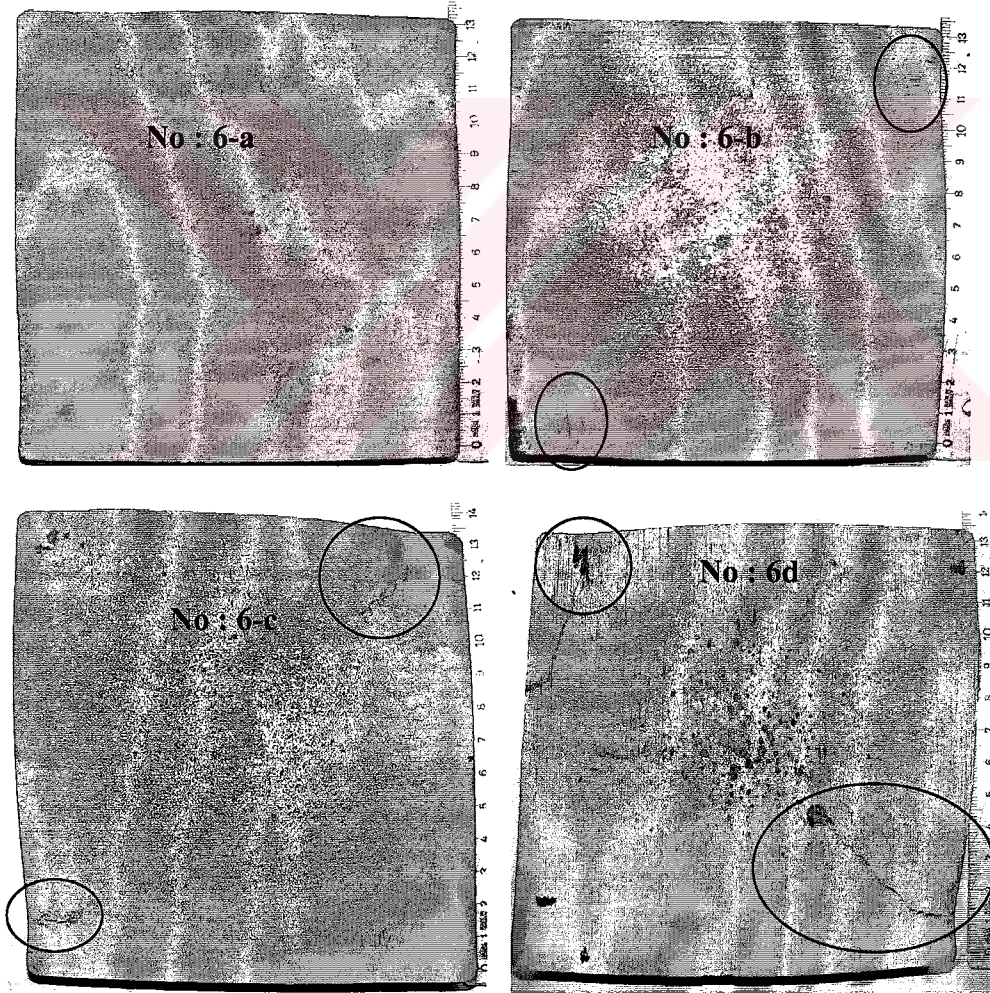
Şekil 4.16. 0,18 – 0,33 %C içeren karbon çeliklerinde aşırı ısı ile iç yapı köşe çatlak şiddeti ilişkisi.

4.2.3.4. Sekonder Soğutma Bölgesi Spesifik Su Tüketim Miktarının Etkisi

Sürekli dökümde sekonder soğutma bölgesindeki spesifik su tüketiminin (μ) çatlak şiddeti ile ilişkisi Şekil 4.17’de verilmiştir. Tablo 4.8’de ise Şekil 4.17’de yer alan örneklerin kimyasal analizleri ve çeşitli üretim parametreleri yer almaktadır. Şekle göre, sekonder soğutma bölgesinde yaklaşık 1,15 lt/kg çelik püskürtme su tüketim değeri çatlak oluşumu açısından kritik noktadır. Soğutma şiddeti (spesifik su tüketimi) arttıkça çatlak şiddeti de artmaktadır.

Tablo 4.8. 6. grup örneklerin kimyasal analizleri.

Örnek No	%C	%Mn	%Si	%P	%S	%Cu	Aşırılısı °C	Vc m/dak	μ lt/kg
5-a	0,25	0,66	0,22	0,012	0,020	0,19	26	3,2	1,09
5-b	0,19	0,76	0,20	0,012	0,020	0,17	28	3,3	1,22
5-c	0,24	0,77	0,19	0,012	0,021	0,22	30	3,0	1,34
5-d	0,20	0,75	0,20	0,023	0,024	0,20	22	3,4	1,45



Şekil 4.17. 0,18 – 0,33 %C içeren karbon çeliklerinde sekonder soğutma bölgesindeki spesifik su tüketimi ile iç yapı köşe çatlak şiddeti ilişkisi.

5. DENEY SONUÇLARININ İRDELENMESİ

Desülfürizasyon işleminde işlem süresinin kükürt giderme oranı üzerinde etkisi önemli oranda görülmektedir. Yapılan ölçümlerde, optimal ilavelerden sonra 50. dakikaya kadar kükürt giderme oranında azalma kaydedilmekte, bu süreden sonra zamanın etkisi ihmal edilebilir ölçülerde olmaktadır (Şekil 4.1). İşlem pratiği açısından 50. dakika, kükürt gidermede denge şartlarına erişilen süredir. Tesis şartlarında elde edilen bu optimal süre, ark ocağındaki 40 – 45 dakikalık ergitme süresi dikkate alındığında 35 – 40 dakikaya indirilmelidir [20-22]. Kükürt gidermedeki bu süre kısıtlamasının nedeni, ark ocağı ile pota ocağı arasındaki sıvı metal akışının sürekliliğinin sağlamak amacına yöneliktir.

Kükürt giderme sırasında çelik banyosunda kalan serbest oksijen miktarının da önemli etkileri görülmektedir. Çelikteki serbest oksijen miktarı azaldığında kükürt giderme oranında iyileşmeler kaydedilmektedir. Dolayısıyla, kükürt gidermeden önce yapılan deoksidasyon işleminin yeterli düzeyde olması desülfürizasyon açısından çok önemli bir parametredir. Pratik uygulamada serbest oksijen miktarının maksimum 15 ppm olmasıyla, istenilen mertebede kükürt giderme sağlanmaktadır. Verilen bu değerden daha yüksek oksijen oranlarında sıvı çelikteki kükürdün azaltılmasındaki güçlük, Bölüm 2.3.2.'deki 2.30 numaralı reaksiyonun dengesi incelendiğinde açıklanabilmektedir. Çelikteki fazla oksijen kalıntısı, çelik içerisinde çözünmüş kükürdü redüklemekte ve -2 değerlikli hale gelen kükürt demir metaliyle FeS oluşturmakta ve bu bileşikten kükürdün ilaveler yardımıyla curufa çekilmesi, serbest çözünmüş kükürde nazaran zorlaşmaktadır [4]. Nitekim bu eğilim Şekil 4.2'de görülmektedir.

Pota metalurjisi uygulamalarında sıvı çelikten kükürt gidermede; kullanılan sentetik curufun bileşim aralığı, diğer bir deyişle baziklik oranı da önemli bir etki yaratmaktadır. Yapılan deneysel çalışmalarda $\%CaO/\%SiO_2$ olarak hesaplanan

baziklik oranının 3,5 – 4 civarında olması ile kükürt gidermede, curufun kükürt alma kapasitesi en iyi verime ulaşmaktadır (Şekil 4.3). Ancak, kalsiyum silikat esaslı curuflarda, baziklik derecesinin 4'ün üzerine çıkması durumunda, curufun akışkanlığında önemli azalmalar kaydedilmektedir. İncelenen curufların bileşiminde Al_2O_3 ve MgO de bulunmakta ve dolayısıyla bu bileşenler de göz önüne alındığında curuf bazikliğinin tarifi, $(\%CaO + \%MgO) / (\%SiO_2 + \%Al_2O_3)$ olarak değişmektedir [3,4]. Böylelikle 2,5 – 3 civarında baziklik oranlarında yeterli kükürt giderme miktarları elde edilebilmektedir. Nitekim bu etki, curuf içindeki Al_2O_3 miktarının kükürt giderme üzerindeki etkisi incelendiğinde de (Şekil 4.5) ortaya çıkmaktadır. Özellikle curufa Al_2O_3 ilavesinin kükürt giderme oranlarını iyileştirmesi, curufu sıvılaştırması ve ayrıca curuftaki serbestleşen ve kükürdü bağlayacak Ca iyonlarının miktarının artması ile meydana gelmektedir (Şekil 2.13).

Sıvı çelikte kükürt giderme sırasında, curuftaki ana bileşenler olan CaO ve SiO_2 dışındaki ilavelerin etkileri de incelenmiştir. Örneğin, curuf içindeki FeO miktarının %1'in üzerine çıkması durumunda curufun oksitleyici etkisi arttığı için kükürt giderme oranlarında önemli düşüşler kaydedilmektedir (Şekil 4.4).

Curuftaki Al_2O_3 miktarının artırılması amacıyla curufa Al Drosu ilave edilmesi de kükürt giderme verimlerinde önemli etki yapmaktadır. Şekil 4.6'ya göre, pratik ölçümler ton sıvı çelik başına 0,6 kg Al Dros ilavesinin yeterli olduğunu göstermiştir. Curufa Al dros ilvesinin kükürt gidermedeki olumlu etkisi, çalışılan sıcaklıkta curuf içerisindeki alümina miktarının kontrol edilmesi ile daha sıvı ve akışkan bir curuf elde edilmesi nedeniyledir [3]. Ayrıca, dros içerisinde bulunan metalik alüminyumun curufta artan oksidasyon potansiyelini düşürmesi diğer bir anlamda curufu dolayısıyla da metali deokside etmesidir.

Deoksidasyon sonrası çelikte kalan serbest oksijen miktarının, kütük iç yapısında meydana gelen gaz boşlukları şiddeti üzerinde önemli etkisi vardır. Yapılan makro gözlemlerde, 20 ppm oksijen miktarı sınır değerdir (Şekil 4.8). Bu değerin üzerindeki oksijen çözünürlükleri, çelik kütüklerde önemli şiddette kabul edilemeyen gaz boşluklarına yol açmaktadır. Bu ölçümler, % 0,18 – 0,33 C içeren karbon çelikleri için geçerlidir. Aşırı oksijenin çelik kütük içerisinde boşluk yaratmasının en önemli sebebi, oluşan CO gazının bünyeden ayrılması ve bünyeden ayrılması sırasında boşluklar oluşturmasıdır. Dolayısıyla sıvı çeliğin aşırı oksidasyonla sürekli döküm makinesine girmesi önlenmeli ve ilave deoksidantlar yapılmalıdır. Gaz boşluğu

oluşumu için kritik serbest oksijen değeri, çeliğin %C içeriğine göre değişmektedir [5].

Deneysel bulgular ve pratik gözlemler bazı durumlarda çelikteki, serbest oksijen içeriği 20 ppm'in altında olsa bile, gaz boşluklarının oluşabileceğini göstermiştir. Bunun nedeni sıvı çelik içerisinde oksijen ile birlikte çözünen azot gazıdır. Azot gazının çelik bünyesine girmesinin en önemli nedeni pota metalurjisi sırasında azot gazı ile yapılan karıştırma işlemleridir. Yapılan ölçümlere göre, toplam azot ve oksijen kalıntı miktarı için kritik sınır 200 ppm civarındadır (Şekil 4.9). Bu nedenle, karıştırma işlemlerinin Ar gazı ile yapılması önemlidir.

Tesis şartlarında, kükürt gidermenin kütük yapısı üzerindeki etkisini gösteren en önemli parametrelerden birisi de rombiklik şiddeti olduğu gözlemlenmiştir. Kütüğün karesel kesidinde çarpılma olarak da tarif edilen bu etki, kütüğe daha sonra uygulanacak plastik şekil verme işlemlerini önemli oranda etkilemektedir. Karenin köşegenleri arasında kabul edilebilir çarpılma değeri genellikle maksimum 8mm'dir. İlk olarak karbon çeliklerinde rombikliğe hassas karbon aralığı belirlenmiş ve %0,20 – 0,40 olarak tespit edilmiştir (Şekil 4.10). Bu çelik cinsleri için, çelikte kalan kükürt miktarının %0,030'dan fazla olması durumunda, kütükte çarpılma şiddeti arttığı ölçülmüştür (Şekil 4.11). Kükürdün rombikliği artırıcı etkisi, çeliğin yüksek sıcaklıklardaki mekanik özelliklerini azaltması ile ilgilidir. Proses şartlarında, bu değerden daha fazla kükürt kalması durumunda standart değerlere uygun olarak mangan ilavesi rombiklik şiddetini azaltıcı bir çare olarak önerilmektedir. Deneysel çalışmalarda yapılan ölçümlerde Mn/S oranının 30'dan büyük tutulması ile kabul edilebilir sınırlarda rombiklik şiddeti elde edilebilmektedir (Şekil 4.12). Mekanik özelliklerde olumsuz özellikler yaratan kükürde karşılık mukavemet artırıcı Mn'nın ilavesi ile bu olumlu etki meydana gelmektedir. Çeliğin Mn içeriğinin artması ile; iç yapıda meydana gelebilecek sülfür inklüzyonları, daha geç katılaşan ve yapının kararlılığını bozan FeS yerine erken katılaşan MnS inklüzyonları şeklinde meydana gelmektedir.

Sürekli döküm makinesinden alınan çelik kütüklerdeki çarpılma derecesine etki eden önemli bir fiziksel büyüklük de aşırı ısı miktarıdır. Tandışteki sıvı çeliğin sıcaklığı ile çelik bileşimine uygun likidüs sıcaklığı arasındaki fark olarak ifade edilen aşırı ısının, 30 °C'den fazla olması durumunda rombikliğin kabul edilebilir değerlerden daha fazla oluştuğu tespit edilmiştir (Şekil 4.13). Üretilen çeliğin katılaşma sıcaklığı ile

işlem döküm sıcaklığı arasındaki fark olarak ifade edilen aşırı ısı miktarının, ifade edilen değerden daha fazla olması durumunda katılaşma sırasında meydana gelen katı-sıvı fazın varlık süresinin daha fazla olması nedeniyle çelikte meydana gelen çarpılma etkisi daha da artmaktadır.

Çelikteki S yüzdesi, Mn/S oranı ve aşırı ısı miktarlarının belli değerlerden fazla olması ve sekonder soğutma bölgesi spesifik su tüketiminin aşırı olması durumunda, katılaşan kütükte görünür çatlak oluşumu da meydana gelmektedir. Deneysel çalışmalarda; bu tür çatlaklara hassas %0,18 – 0,33 C içeren karbon çelikler için 130 x 130 mm kesitli kütüklerden alınan makro görüntüler kükürt miktarının %0,025'ten fazla olması (Şekil 4.14) veya Mn/S oranının 30'dan düşük olması (Şekil 4.15) , aşırı ısının 30 °C'den fazla tutulması (Şekil 4.16) ve de kütüğün nihai soğutulması sırasında su spray şiddetinin 1,15 lt/kg çelik'den yüksek tutulması (Şekil 4.17) durumunda kütüklerde çatlak oluşumunun arttığı gözlemlenmiştir. Kükürt, Bölüm 2.4.4.4'te de açıklandığı gibi çeliğin katılaşma sırasındaki kırılmalık sıcaklık aralığını genişletmekte ve çatlak oluşumuna ve şiddetlenmesine sebep olmaktadır. Çelik içerisindeki manganın yükselmesi ile daha önce de açıklandığı gibi FeS ile MnS inklüzyonlarının yer değiştirmesi sayesinde iç yapı daha kararlı olmakta ve dolayısıyla da mekanik özellikleri iyileştirmektedir. Yine aşırı ısı miktarının fazla olması durumunda, soğuma sırasında termal genleşmeler artacağından çatlak oluşumu meydana gelmektedir. Sürekli döküm makinesindeki, çok kritik olan katılaşma hızına katkı amacıyla yapılan spray su soğutma işleminin, standart ayarda tutulması durumunda bile, eğer çelikte kimyasal bileşim ve aşırı ısı miktarları istenen değerlerde değil ise, katı-sıvı bölgesindeki bekleme süresi uzadığı için spray su sistemiyle çelikten çekilmesi gereken ısı miktarı artmakta bu da termal gerilmelerin artmasına neden olmaktadır.

6. GENEL SONUÇLAR

1. Yapılan ölçümlerde, gerekli ilavelerden sonra 50. dakikadan sonra kükürt giderme oranı artış hızında azalma görülmüştür. Tesis şartlarında elde edilen bu optimal süre, ark ocağındaki 40 – 45 dakikalık ergitme süresi dikkate alındığında 35 – 40 dakikaya indirilmelidir.
2. Çelik içerisindeki serbest oksijen miktarı azaldığında kükürt giderme oranında iyileşmeler görülmektedir. Literatürde ve pratik uygulamada serbest oksijen miktarının maksimum 15 ppm olmasıyla, istenilen mertebede kükürt giderme sağlanmaktadır.
3. Yapılan deneysel çalışmalarda $\%CaO/\%SiO_2$ olarak ölçülen baziklik oranının 3,5 – 4 civarında olması ile kükürt gidermede, en iyi değerlere ulaşılmaktadır. Ancak, curufta Al_2O_3 ve MgO de olduğundan, curuf bazikliğinin tarifi, $(\%CaO + \%MgO) / (\%SiO_2 + \%Al_2O_3)$ olarak değişmekte, böylelikle 2,5 – 3 civarında baziklik oranlarında yeterli kükürt giderme oranları elde edilebilmektedir.
4. Curuf içindeki FeO miktarının $\%1$ 'in üzerine çıkması durumunda kükürt giderme oranlarında önemli düşüşler kaydedilmektedir. Curuftaki Al_2O_3 miktarının artırılması amacıyla curufa Al Drosu ilave edilmesi kükürt giderme oranına olumlu etki yapmaktadır. Pratik ölçümler ton sıvı çelik başına 0,6 kg Al Dros ilavesinin yeterli olduğunu göstermiştir.
5. Deoksidasyon sonrası çelikte kalan serbest oksijen miktarının, kütük iç yapısında meydana gelen gaz boşlukları şiddeti üzerinde önemli etkisi vardır. Yapılan makro gözlemlerde, 20 ppm serbest oksijen miktarı sınır değerdir.
6. Çelikteki, serbest oksijen içeriği 20 ppm'in altında olsa bile, pota metalurjisi sırasında azot gazı ile yapılan homojenleştirme işleminden elde edilen nihai

kütüklerde de gaz boşluklarına rastlanmaktadır. Gerçekleştirilen ölçümlerde, toplam azot ve oksijen kalıntı miktarının 200 ppm'i aşması durumunda kütükte gaz boşlukları görülmektedir. Bu nedenle, homojenleştirme işleminin Ar gazı ile yapılması gerekmektedir.

7. Yapılan çalışmalarda rombiklik şiddeti en fazla %0,20 – 0,40 C içeren karbon çeliklerinde meydana geldiği belirlenmiştir. Bu çelik cinsleri için çelikte kalan kükürt miktarının %0,030'dan fazla olması durumunda, kütükte çarpılma şiddeti arttığı görülmüştür. Proses şartlarında, bu değerden daha fazla kükürt kalması durumunda standart değerlere uygun olarak mangan ilavesi rombiklik şiddetini azaltıcı bir çare olarak önerilmektedir. Deneysel çalışmalarda yapılan ölçümlerde Mn/S oranının 30'dan büyük tutulması ile istenilen rombiklik derecesi elde edilebilmektedir.

8. Sürekli döküm makinesinden alınan çelik kütüklerdeki çarpılma derecesine etki eden önemli bir parametre de aşırı ısı miktarıdır. Aşırı ısının 30 °C'den fazla olması durumunda, rombikliğin kabul edilebilir değerlerden daha fazla oluştuğu tespit edilmiştir.

9. Çelikteki S yüzdesi, Mn/S oranı ve aşırı ısı miktarlarının belli değerlerden fazla olması durumunda, katılaşan kütükte görünür çatlak oluşumuna da neden olmaktadır. Deneysel çalışmalarda çeşitli kütüklerden alınan makro görüntüler kükürt miktarının %0,025'ten fazla olması veya Mn/S oranının 30'dan düşük olması , aşırı ısının 30 °C'den fazla tutulması ve bunlara ek olarak kütüğün nihai soğutulması sırasında sprey su şiddetinin 1,15 lt/kg çelik'den yüksek tutulması durumunda kütüklerde çatlak oluşumu ve şiddetinin arttığı gözlemlenmiştir.

KAYNAKLAR

- [1] **ISI**, 2003. *Steel Statistical Yearbook*, Committee on Economic Studies, Brussels.
- [2] **İDÇ**, 1998. **KARDEMİR A.Ş.** Pota Ocağı ve Sürekli Döküm Makinesi, *Eğitim Semineri*, Karabük.
- [3] **GHOSH, A.**, 2001. Secondary Steelmaking, Principles and Applications, CRC Press, London.
- [4] **TÜRKDOĞAN, E.T.**, 1996. Fundamentals of Steelmaking, *The Institute Of Materials*, London.
- [5] **SEVİNÇ, N.**, 1987. Çelikte Oksijen Giderme, *T.C. Sanayi ve Ticaret Bakanlığı, Sanayi Eğitim ve Geliştirme Merkezi Genel Müdürlüğü*, Bursa
- [6] **KÖLLER, O.**, 1987, Influence of Mn-Si Deoxidation on the type of Inclusion of a Steel Cast in a Billet Caster in dependence on Deoxidation and/or Alloying Time, *International Conference Secondary Metallurgy*.
- [7] **MERTOĞAN, A. and SEVİNÇ, N.**, 1990. Ladle Metallurgy Seminar Part Two, METU, Ankara.
- [8] **GUEUSSIER, A. L., BALDWIN, W.J., PEGNATO, R.J. and VACHIER, E.V.**, 1987. Cored Wire Technique for Liquid Steel Treatment, *AFFIVAL brochure*.
- [9] **ÜNAL, L. M.**, 2001. Çelik Üretiminde İnküzyon ve Azaltılması, *ERDEMİR Bilim / Teknoloji Serisi*, Zonguldak.
- [10] <http://www.steel.org>
- [11] **IRWING, W. R.**, 1993. Continuous Casting Of Steel, *The Institute of Materials*, The University Press, Cambridge.
- [12] **GÜNDÜZ, O.**, 1999, Sürekli Döküm Proses Parametrelerinin Makroenküzyon Oluşumuna Etkileri ve Gerçek Zamanlı Bir Kalite Tahmin Modelinin Oluşturulması, *Doktora Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

- [13] **BRIMACOMBE, J. K., SAMARASEKERA, I. V. and LAIT, J. E.,** 1984, Continuous Casting Volume Two, *Heat Flow, Solidification and Crack Formation*, Iron and Steel Society of AIME, USA.
- [14] **MAZDUMAR, S. and RAY, S. K.,** 2001. Solidification Control in Continuous Casting of Steel, *Sadhana*, **26**, 179-198.
- [15] **JONSTA, Z., HERNAS, A. and MAZANEC, K.,** 1998. Contribution to Mechanical Metallurgy Behaviour of Steel During Continuous Casting, *Journal of Materials Processing Technology*, **78**, 90-94.
- [16] **SUZUKI, M. and YAMAOKA, Y.,** 2003, Influence of Carbon Content on Solidifying Shell Growth of Carbon Steels at the Initial Stage of Solidification, *Materials Transactions*, **44**, No. 5, 836-844.
- [17] **SAMARASEKERA, I. V. and BRIMACOMBE, J. K.,** 1999. Evolution or Revolution?-A New Era in Billet Casting, *Canadian Metallurgical Quarterly*, **38**, No.5, 347-362.
- [18] **PARK, J. K., LI C., THOMAS, B. G. and SAMARASEKERA, I. V.,** 2002. Analysis of Thermo-Mechanical Behavior in Billet Casting, *60th Electric Furnace Conference*, San Antonio, TX, USA, November 10-12.
- [19] **STS,** 1993. Continuous Casting of Steel, Some Principles and Practical Notes, Udine, Italy
- [20] **PEKUYSAL, L.,** 2003-2004., Kişisel görüşme.
- [21] **KURAN, O.,** 2003-2004., Kişisel görüşme.
- [22] **ÖZAKSOY, A. İ.,** 2003-2004., Kişisel görüşme.

ÖZGEÇMİŞ

1978 yılında İstanbul'da doğdu. İlk ve orta öğrenimini İzmir ve İstanbul'da tamamladı. 1995 yılında İTÜ Maden Fakültesi, Maden Mühendisliği Bölümü'ne girdi. 1996 yılında İngilizce hazırlık eğitimini tamamlayıp 2000 yılında Maden Mühendisliği bölümünden mezun oldu. Küre Projesi kapsamında yapılan lisans tezi çalışmalarını içeren uluslar arası bir yayını bulunmaktadır. 2000 yılında İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Kimya Metalurji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Üretim Metalurjisi programında yüksek lisans öğrenimine başladı ve halen öğrenimine devam etmektedir.

Yayını:

O. KANGAL, G. BULUT, A. GÜL, G. ÖZAKSOY, F. ARSLAN, "Cupric Chloride Leaching of Sulphidic Copper Ores", VI. SHMMT – XVIII. ENTMH-2001, Rio de Jenario, Brazil, pp. 445 - 450