

133432

**TANDIŞ REFRAKTERİ (MgO)-SIVI ÇELİK ARAYÜZEY ISLATMA
ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

Yunus TÜREN

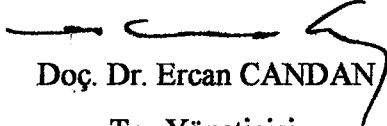
**DOKTORA TEZİ
(METAL EĞİTİMİ)**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**Kasım 2003
ANKARA**

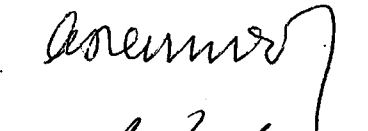
133432

Yunus TÜREN tarafından hazırlanan TANDIŞ REFRAKTERİ (MgO)-SIVI ÇELİK ARAYÜZEY ISLATMA ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI adlı bu tezin doktora tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.


Doç. Dr. Ercan CANDAN
Tez Yöneticisi


Yrd. Doç. Dr. Kadir KOCATEPE
Tez Yöneticisi

Bu çalışma, jürimiz tarafından Metal Eğitimi Anabilim Dalında Doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan: : Prof. Dr. Ekrem SELÇUK 
Üye : Prof. Dr. Mehmet TÜRKER 
Üye : Doç. Dr. Adem KURT 
Üye : Yrd. Doç. Dr. Kadir KOCATEPE 
Üye : Yrd. Doç. Dr. Elmas SALAMCI 

Bu tez, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygundur.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	iii
TEŞEKKÜR.....	v
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	vi
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	viii
RESİMLERİN LİSTESİ.....	xi
EKLERİN LİSTESİ.....	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xiv
1. GİRİŞ	1
2. SIVI METALLER TARAFINDAN KATILARIN ISLATILABİLİRLİĞİ.....	4
2.1. Giriş	4
2.2. Yüzey Enerjisi ve Yüzey Gerilimi	4
2.3. Katı-Sıvı Islatması	6
2.4. İlerleme ve Gerileme Islatma Açısı	10
2.5. Katının Yüzey Pürüzlülüğünün Islatma Açısına Etkisi	11
2.6. Islatmanın Kimyasal Reaksiyonlarla İlişkisi.....	14
2.7. Islatma Açısı Üzerine Yerçekiminin Etkisi	16
2.8. Katı-Sıvı Islatma Açısı Ölçüm Metotları.....	16
2.8.1. Kapiler yükselme veya düşme metodu	16
2.8.2. Maksimum kabarcık basıncı metodu	18
2.8.3. Sıvı damla metodu	18

2.9. Islatma Açısı Ölçüm Sistemi.....	21
3. SÜREKLİ DÖKÜMDE REFRAKTER-SIVI ÇELİK ARAYÜZEY İLİŞKİSİ....	22
3.1. Çeliğin Sürekli Döküm İşlemi	22
3.2. Pota	23
3.3. Tandış	25
3.4. Tandışte Kullanılan Refrakterler	26
3.4.1. Bazik refrakterler	26
3.5. Bazik Tandış Astarı	29
3.6. Püskürtülebilir Bazik Tandış Astar	29
3.7. Sürekli Dökümde Metal Olmayan İnküzyonlar	32
3.8. Sürekli Dökümde Arayüzey İlişkileri.....	34
3.9. Refrakter Astar Korozyonu	35
3.9.1. Islatma	35
3.9.2. Sıvı çeliğin gözeneklere dolması	36
3.9.3. Sıvı çeliğin refrakter taneleri korozyonu.....	37
3.10. Çeşitli Refrakter Malzemelerin Demir Esaslı Ergiyiklerle Islanabilirliği Çalışmaları	41
4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	55
4.1. Malzeme.....	55
4.1.1. Tandış astar (MgO) malzemesi.....	55
4.1.2. Katkı maddeleri.....	57
4.1.3. Tandış astar numunelerinin hazırlanması.....	59
4.1.4. Erdemir tandış astar (MgO) malzemesi ve hazırlanması	63
4.1.5. Çelik malzeme ve hazırlanması	64

4.1.6. Atmosfer kontrollü fırın	65
4.1.7. ıslatma açısı ölçümü.....	66
4.1.8. SEM çalışması	67
5. DENEYSEL SONUÇLAR.....	69
5.1. ıslatma Açısı (θ)	69
5.1.1. MgO+SiO ₂ fiber /sıvı çelik ıslatma açısının temas süresine bağlı değişimi	69
5.1.2. Erdemir tandış astarları (Erdemir A, B) / sıvı çelik ıslatma açısı ..	70
5.1.3. MgO+SiO ₂ fiber / sıvı çelik ıslatma açısı.....	72
5.1.4. MgO+SiO ₂ fiber+alternatif fiber /sıvı çelik ıslatma açısı	74
5.1.5. MgO+SiO ₂ fiber+Fe ₂ O ₃ /sıvı çelik ıslatma açısı	76
5.1.6. MgO+SiO ₂ fiber+kil /sıvı çelik ıslatma açısı	78
5.1.7. Farklı toz tane boyutundaki MgO+SiO ₂ fiber /sıvı çelik ıslatma açısı	81
5.1.8. MgO+SiO ₂ fiber /farklı sıvı çelik türü ıslatma açısı	83
5.1.9. MgO+SiO ₂ fiber /sıvı çelik ıslatma açısının sıcaklığa bağlı değişimi	85
5.2. MgO Tandış Astar /Sıvı Çelik Arayüzey SEM İncelemeleri.....	87
5.2.1. Erdemir tandış astarı /sıvı çelik arayüzey SEM incelemesi	87
5.2.2. MgO+SiO ₂ fiber /sıvı çelik arayüzey SEM incelemesi	89
5.2.3. MgO+SiO ₂ fiber+Fe ₂ O ₃ /sıvı çelik arayüzey SEM incelemesi	91
5.2.4. MgO+SiO ₂ fiber+kil /sıvı çelik arayüzey SEM incelemesi	93
5.2.5. Farklı toz tane boyutundaki MgO+SiO ₂ fiber /sıvı çelik arayüzey SEM incelemesi	94

6. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ	97
6.1. Temas Süresi / Islatma Açısı Sonuçlarının Değerlendirilmesi	97
6.2. Erdemir Astarı / Sıvı Çelik Islatma Açısı Sonuçlarının Değerlendirilmesi	97
6.3. MgO+SiO ₂ Fiber / Sıvı Çelik Islatma Açısı Sonuçlarının Değerlendirilmesi	98
6.4. MgO+Alternatif Fiber/Sıvı Çelik Islatma Açısı Sonuçlarının Değerlendirilmesi	99
6.5. MgO+Fe ₂ O ₃ / Sıvı Çelik Islatma Açısı Sonuçlarının Değerlendirilmesi .	100
6.6. MgO+Kil / Sıvı Çelik Islatma Açısı Sonuçlarının Değerlendirilmesi.....	101
6.7. MgO Toz Tane Boyutu/Sıvı Çelik Islatma Açısı Sonuçlarının Değerlendirilmesi	102
6.8. Çelik Türü /Islatma açısı Sonuçlarının Değerlendirilmesi	102
6.9. Sıcaklık Değişimi /Islatma açısı Sonuçlarının Değerlendirilmesi.....	103
7. SONUÇ ve ÖNERİLER	104
KAYNAKLAR	106
EKLER	111
ÖZGEÇMİŞ	117

TANDIŞ REFRAKTERİ (MgO)-SIVI ÇELİK ARAYÜZEY ISLATMA ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI

(Doktora Tezi)

Yunus TÜREN

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

Kasım 2003

ÖZET

Bu çalışmada, tandış astar (MgO) ve sıvı çelik arasındaki ıslatılabilirlik sıvı damla metodu kullanılarak araştırılmıştır. Çalışma aşağıdaki parametreler değiştirilerek yapılmıştır:

- **MgO'e fiber ilaveleri (cam fiber, karbon fiber, kaya yünü, alumina fiber, kağıt fiber ve kestamit fiber)**
- **MgO'e toz ilaveleri (kil ve hematit)**
- **MgO toz boyutu**
- **Temas süresi**
- **Sıcaklık**
- **Çelik bileşimi**

Deneyisel sonuçlar, MgO'e % 1'e kadar cam fiber ilavesi ile ıslatma açısında (θ) değişiklik olmazken % 2 ve üzerindeki ilavelerde ıslatma açısında belirgin bir azalmanın olduğunu göstermiştir. θ 'daki artış C fiber ilavesi ile başarılmamasıyla birlikte, kestamit fiber, kaya yünü, alümina fiber ve kağıt fiber kullanılması durumunda θ 'da değişim gözlemlenmemiştir. Kil ve Fe_2O_3 ilavesi θ 'yı önemli bir şekilde azaltırken, Fe_2O_3 'ün etkisi daha şiddetli olmuştur. Islatma açısı MgO

tane boyutunun artması ile birlikte belirgin bir şekilde artmıştır. Artan temas zamanı ve sıcaklıkla birlikte ıslatma açısında dikkate değer bir azalma olmuştur. % 0,04'e kadar C içeren sıvı çeliğin θ 'sı değişmezken % 0,04'ün üzerinde C içeren sıvı çeliğin θ 'sında artış gözlemlenmiştir. Diğer taraftan, sıvı çelik içerisindeki Mn miktarı arttıkça θ 'da azalma tespit edilmiştir.

Bilim Kodu : 710
Anahtar Kelimeler : Refrakter Malzeme, Sıvı Çelik, Islatma Açısı, Katı/Sıvı Arayüzeyi
Sayfa Adedi : 117
Tez Yöneticisi : Doç. Dr. Ercan CANDAN
Yrd. Doç. Dr. Kadir KOCATEPE

**AN INVESTIGATION ON WETTING PROPERTIES OF TUNDISH
REFRACTORY (MgO)-MOLTEN STEEL INTERFACE
(Ph. D. Thesis)**

Yunus TÜREN

**GAZI UNIVERSITY
INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY
November 2003**

ABSTRACT

In this study, wettability between tundish lining (MgO) and molten steel was investigated by using sessile drop method. The research, was carried out by altering the variables below;

- **Fiber addition to MgO (glass fiber, carbon fiber, rock wool, alumina fiber, paper fiber, castamide fiber)**
- **Powder addition to MgO (clay, hematite)**
- **Particle size of MgO powder**
- **Contact time**
- **Temperature**
- **Composition of steel**

Experimental results revealed that wetting angle (θ) of sessile drop on the MgO was not altered by the addition of glass fiber up to 1wt.% whereas above 2 wt.% addition decreased the θ considerably. Increase in θ was achieved by addition of C fiber, however, no change in θ was observed by using castamide, rock wool, alumina or paper fiber. Additions of clay or Fe_2O_3 powders reduced the θ significantly, however, effect of the latter in reduction of θ was more

pronounced. Wetting angle, θ , increased considerably with increasing MgO particle size. Increasing contact time and test temperature reduced the θ notably. Wetting angle, θ , of molten steel, containing up to 0,04 wt.% C, was not altered. Considerable increase in the θ was observed as the C content exceeded the level of 0,04 wt. %. On the other hand, addition of Mn also reduced the θ considerably.

Science Code : 710
Key Words : Refractory Materials, Liquid Steel, Wetting Angle
Solid/Liquid Interface
Page Number : 117
Adviser : Assoc. Prof. Ercan CANDAN
Assist. Prof. Kadir KOCATEPE

TEŞEKKÜR

Çalışmam süresince değerli katkı ve yardımları ile beni yönlendiren hocalarım Doç. Dr. Ercan CANDAN ve Yrd. Doç. Dr. Kadir KOCATEPE'ye, yine kıymetli yardımlarından faydalandığım GÜTEF Metal Eğitimi Bölüm Başkanı Prof. Dr. Mehmet TÜRKER, Yrd. Doç. Dr. Ferhat GÜL ve Yrd. Doç. Dr. Elmas SALAMCI'ya, deney çalışmalarım sırasında yardımlarından dolayı Prof. Dr. İbrahim KADI, Yrd. Doç. Dr. Mustafa ACARER, Öğrt. Gör. Celal YÖRÜR, Öğrt. Gör Ender NALÇACIOĞLU, Arş. Gör. Halil DEMİR ve Arş. Gör. Dr. Bilge DEMİR'e, değerli katkı ve yardımlarından dolayı ERDEMİR AR-GE müd. Erol BAŞ, Dr. Oktay ELKOCA ve Lütfullah ÜNAL'a, ayrıca deneyler süresince huzurlu bir çalışma ortamının sağlanmasında emeği geçen ZKÜ Karabük Eğitim Fakültesi Metal Eğitimi Bölümü ve GÜ Teknik Eğitim Fakültesi Metal Eğitimi Bölümü akademik ve idari personeline, bu günlere gelmeme maddi ve manevi destek veren AİLEME, sabrından dolayı EŞİME teşekkürlerimi arz ederim.

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Islatma türleri	9
Çizelge 3.1. Kaliteli bir sinter manyezitin kimyasal kompozisyonu	28
Çizelge 3.2. CaO / SiO ₂ oranına göre oluşan silikat bileşimleri.....	39
Çizelge 3.3. Sıvı çelikte temas halindeki refrakter malzemeler	42
Çizelge 4.1. Tandış astar (MgO) tozu kimyasal kompozisyonu.....	56
Çizelge 4.2. Temas süresine göre deney parametresi	61
Çizelge 4.3. Fiber katkı elemanları ve oranlarına göre deney parametreleri	61
Çizelge 4.4. Toz katkı elemanları ve oranlarına göre deney parametreleri.....	61
Çizelge 4.5. Toz tane boyutu değişimine göre deney parametreleri.....	62
Çizelge 4.6. Çelik türü değişimine göre deney parametreleri	62
Çizelge 4.7. Sıcaklık değişimine göre deney parametreleri	62
Çizelge 4.8. Erdemir T.A.Ş.'nin kullandığı tandış astar malzemelerinin kimyasal kompozisyonları	63
Çizelge 4.9. Erdemir tandış astar uygulamalarına göre deney parametresi	64
Çizelge 4.10. Deneylerde kullanılan düşük karbonlu çelik malzemelerin kimyasal kompozisyonları (% ağırlık).....	64
Çizelge 5.1. Islatma açısının temas süresine bağlı değişim değerleri.....	69
Çizelge 5.2. Erdemir tandış astarları / 7114K sıvı çelik θ değerleri.....	70
Çizelge 5.3. MgO'e SiO ₂ fiber ilaveleri ile θ 'nın zamana bağlı değişim değerleri...	72
Çizelge 5.4. Alternatif fiber türü ile θ 'nın zamana bağlı değişim değerleri	74
Çizelge 5.5. MgO'e Fe ₂ O ₃ ilaveleri ile θ 'nın zamana bağlı değişim değerleri	76
Çizelge 5.6 MgO'e kil ilaveleri ile θ 'nın zamana bağlı değişim değerleri	79

Çizelge 5.7. MgO toz tane boyutu ile θ 'nın zamana bağlı değişim değerleri	81
Çizelge 5.8. Farklı çelik türü ile θ 'nın zamana bağlı değişim değerleri	83
Çizelge 5.9. Farklı sıcaklıklarda θ 'nın zamana bağlı değişim değerleri.....	85



ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Bir katının yüzey enerjisini tanımlamak için atomlar arasındaki etkileşimi gösteren şematik diyagram	5
Şekil 2.2. Yüzey gerilmesi ile yüzey enerjisi arasındaki ilişkiyi açıklamak için çizilen şematik diyagram	6
Şekil 2.3. Üç arayüzey gerilimi ve ıslatma açısı arasındaki ilişki	7
Şekil 2.4. Sıvının bir miktar yer değiştirmesi ile arayüzey alanındaki değişme	8
Şekil 2.5. Bir gerileme ıslatma açısının reaktif bir sistemdeki durumu	11
Şekil 2.6. Johnson'un idealize ettiği pürüzlü yüzey	13
Şekil 2.7. Periyodik yüzeydeki yarı denge durumu	14
Şekil 2.8. Aksay modeli	15
Şekil 2.9. Kapiler yükselme veya azalma	17
Şekil 2.10. Maksimum kabarcık basıncı	18
Şekil 2.11. Sıvı damla koordinatları	19
Şekil 2.12. Metalik sıvıların ıslatma açılarını belirlemek için atmosfer kontrollü fırın ve bölümleri	21
Şekil 3.1. Çelik yapımında kullanılan sürekli döküm işlemi	23
Şekil 3.2. Tandış resmi	25
Şekil 3.3. Tandışın duvar boyunca kesit görünüşü	29
Şekil 3.4. Sürekli dökümde sıvı metale inklüzyonların geçiş bölgeleri	33
Şekil 3.5. Farklı temas açılarının şematik gösterimi	36
Şekil 3.6. Kapiler etki	36
Şekil 3.7. Refrakter malzeme gözeneklerine sıvı çelik dolmasının şematik gösterimi	37

Şekil 3.8. Refrakter taneleri arasındaki açının (ϕ) şematik olarak gösterimi	38
Şekil 3.9. Sıvı çeliğin refrakter taneleri arasına sızması	38
Şekil 3.10. Bazı refrakterlerde CaO/SiO_2 mol oranının taneler arası açığa etkisi	40
Şekil 3.11. Saf demirin basınç-sıcaklık denge diyagramı	45
Şekil 3.12. $\text{SiO}_2\text{-FeO}$ denge diyagramı	46
Şekil 3.13. Silika kumu toz tane büyüklüğünün ıslatma açısına etkisi	47
Şekil 3.14. İki farklı yüzeye sahip malzemede katı-sıvı arayüzey alanı değişimi	47
Şekil 3.15. Alümina-sıvı çelik ıslatma açısı üzerine sıvı demir içerisinde çözülmüş olan oksijen, kükürt, selenyum, teleryumun etkisi	51
Şekil 3.16. Sıvı demir içerisinde çözülmüş olan oksijenin farklı sıcaklıklarda yüzey gerilimi üzerine etkisi	52
Şekil 3.17. Sıvı demirin yüzey gerilimi üzerine oksijen, kükürt ve karbon miktarının etkisi	53
Şekil 3.18. Sıvı demirin yüzey gerilimi üzerine karbon miktarının etkisi	54
Şekil 4.1. Tandış astar (MgO) tozu tane dağılımı.....	56
Şekil 4.2. Tandış astar malzemesi hazırlık işlemleri	60
Şekil 4.3. Tandış astar kalıbı (a) ve kalıptan çıkmış numune (b)	63
Şekil 4.4. İki farklı Erdemir tandış astar tozu tane dağılımı	64
Şekil 4.5. Deney çalışmalarında kullanılan sıvı damla metodunun uygulandığı atmosfer kontrollü yüksek sıcaklık fırını ve bölümleri.....	65
Şekil 4.6. SEM çalışmasının yapıldığı sıvı çelik-tandış astar arayüzeyi	68
Şekil 5.1. ıslatma açısının temas süresine bağlı değişimi	69
Şekil 5.2. Erdemir MgO tandış astarları-7114K sıvı çelik θ 'nın zamana bağlı değişimi.....	71
Şekil 5.3. MgO 'e SiO_2 fiber ilaveleri ile θ 'nın zamana bağlı değişimi	72

Şekil 5.4. MgO içerisindeki SiO ₂ fiber miktarına bağlı θ değişimi (Temas süresi: 60 dakika)	73
Şekil 5.5. Alternatif fiber türü ve zamana bağlı θ değişimi	75
Şekil 5.6. Alternatif fiber türüne bağlı θ değişimi (Temas süresi: 60 dakika)	75
Şekil 5.7. MgO'e Fe ₂ O ₃ ilaveleri ile θ 'nın zamana bağlı değişimi	77
Şekil 5.8. MgO'e ilave edilen Fe ₂ O ₃ miktarına bağlı θ değişimi (Temas süresi: 60 dakika)	77
Şekil 5.9. MgO'e kil ilaveleri ile θ 'nın zamana bağlı değişimi	79
Şekil 5.10. MgO'e ilave edilen kil miktarına bağlı θ değişimi (Temas süresi: 60 dakika)	80
Şekil 5.11. MgO toz tane boyutu ile θ 'nın zamana bağlı değişimi	81
Şekil 5.12. MgO toz tane boyutuna bağlı θ değişimi (Temas süresi: 60 dakika)	82
Şekil 5.13. Çelik türü ve zamana bağlı θ 'nın değişimi	84
Şekil 5.14. Çelik türüne bağlı θ değişimi (Temas süresi: 60 dakika)	84
Şekil 5.15. Farklı sıcaklıklarda θ 'nın zamana bağlı değişimi	86
Şekil 5.16. Sıcaklığa bağlı θ değişimi (Temas süresi: 60 dakika)	86

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 4.1. Tandış astar (MgO) tozu SEM görüntüsü.....	56
Resim 4.2. SiO ₂ fiber SEM görüntüsü.....	57
Resim 4.3. Refrakter astar-sıvı çelik arayüzey fotoğraflarından ıslanma düzleminin yanındaki damlacık kenarına tanjant çizilmesi ve ıslatma açısı hesaplanması	67
Resim 5.1. Islatma açısının temas süresine bağlı değişim görüntüleri	70
Resim 5.2. Erdemir MgO tandış astarları-7114K sıvı çelik θ görüntüleri (Temas süresi: 60 dakika)	71
Resim 5.3. MgO içerisindeki SiO ₂ fiber miktarına bağlı θ görüntüleri (Temas süresi: 60 dakika)	73
Resim 5.4. Alternatif fiber türüne bağlı θ görüntüleri (Temas süresi: 60 dakika)	76
Resim 5.5. MgO'e ilave edilen Fe ₂ O ₃ miktarına bağlı θ görüntüleri (Temas süresi: 60 dakika)	78
Resim 5.6. MgO'e ilave edilen kil miktarına bağlı θ görüntüleri (Temas süresi: 60 dakika)	80
Resim 5.7. MgO toz tane boyutuna bağlı θ görüntüleri (Temas süresi: 60 dakika)..	82
Resim 5.8. Çelik türüne bağlı θ görüntüleri (Temas süresi: 60 dakika)	85
Resim 5.9. Sıcaklığa bağlı θ görüntüleri (Temas süresi: 60 dakika)	87
Resim 5.10. Erdemir(A) tandış astarı/sıvı çelik arayüzey SEM görüntüsü (x100) ...	88
Resim 5.11. Erdemir(A) tandış astarı/sıvı çelik arayüzey SEM görüntüsü (x1000) .	88
Resim 5.12. MgO+ % 1 SiO ₂ fiber/sıvı çelik arayüzey SEM ve EDS görüntüsü	89
Resim 5.13. MgO+ % 8 SiO ₂ fiber/sıvı çelik arayüzey SEM ve EDS görüntüsü	90
Resim 5.14. MgO+ % 2 SiO ₂ fiber +% 8 Fe ₂ O ₃ /sıvı çelik arayüzey SEM ve EDS görüntüsü.....	91
Resim 5.15. MgO+ % 2 SiO ₂ fiber +% 8 Fe ₂ O ₃ /sıvı çelik arayüzey SEM ve EDS görüntüsü.....	92

Resim 5.16. MgO+ % 2 SiO ₂ fiber +% 8 Fe ₂ O ₃ /sıvı çelik arayüzey SEM görüntüsü.....	93
Resim 5.17. MgO+% 1 SiO ₂ fiber+% 4 kil / sıvı çelik arayüzey SEM ve EDS görüntüsü.....	94
Resim 5.18. MgO (150 µm) + % 2 SiO ₂ fiber /sıvı çelik arayüzey SEM görüntüsü.	95
Resim 5.19. MgO (25 µm)+ % 0 SiO ₂ fiber /sıvı çelik arayüzey SEM görüntüsü....	95
Resim 5.20. MgO (25 µm)+ % 2 SiO ₂ fiber /sıvı çelik arayüzey SEM görüntüsü....	96



EKLERİN LİSTESİ

Ek	Sayfa
Ek-1. Islatma Açısı Hesaplaması.....	111
Ek-2. Bashforth ve Adams Tabloları.....	113



SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler

Açıklama

μm	Mikron
θ	Islatma açısı
γ	Yüzey gerilimi
γ_{sg}	Sıvı-gaz arayüzey gerilimi
γ_{ks}	Katı-sıvı arayüzey gerilimi
γ_{kg}	Katı-gaz arayüzey gerilimi
W_s	Yayılma ıslatması işi
W_i	Dalma ıslatması işi
W_a	Yapışma ıslatması işi
r	Yarı çap
g	Yerçekimi ivmesi
h	Yükseklik
ρ	Sıvı yoğunluğu
P	Basınç

Kısaltmalar

Açıklama

AFS	Amerikan Dökümcüler Birliği
EAF	Elektrik Ark Fırını
BOF	Bazık Oksijen Fırını
SEM	Scanning Electron Microscopy

1. GİRİŞ

Günümüzde refrakter malzemelerin en büyük tüketim alanlarından biri metalurji sanayiidir. Özellikle çelik üretiminde fırın tipi, üretim teknolojisi ve çelik cinsine göre fırınlarda uygulanan işlemler değişmekte ve her değişen işlem, değişik tip ve kalitede refrakterler gerektirmektedir. Refrakter sanayii değişen ve modernleşen çelik üretimi karşısında daima kendini yenilemek ve daha kaliteli refrakter malzemeler üretmek zorunda kalmıştır. Bu, refrakter malzemelerin kalitesinin yükseltilmesi, kullanıcı kuruluşlarda işlem yönteminin değişmesi, işleme uygun refrakter seçimi ve personelin daha bilinçli çalışmasına dayanmaktadır (1,2).

Demir-çelik sektöründe görülen işlem değişiklikleri; ark ocaklarında çelik üretiminin yaygınlaşması (1), su soğutma paneli kullanılması (2), pota ve ark ocaklarının alttan boşaltılması, pota metalurjisine geçiş ve sürekli dökümdür (3,4). Çelik üretimindeki bu değişiklikler, seramik oksit ve karbondan oluşan kompozit malzemelerin önemli refrakter uygulama alanları bulmasına neden olmuştur. Oksit seramikler, yüksek sıcaklıkta kullanılmaya müsait metallerin oksijenle yaptıkları bileşiklerdir. Birçok oksit seramik iyonik bağlı olup, iyonik bağlı malzemelerin genel karakteristiklerine sahiptir. Bu özellikler; kimyasal kararlılık, elektrik ve ısı iletimine dirençtir. Bu özelliklerin yanı sıra oksit seramikler, yüksek elastik modül, yüksek sertlik, gevreklik, refrakterlik, düşük termal genleşme ve korozyona karşı direnç gösterirler. Berilya (BeO), Magnezya (MgO), Zirkonya (ZrO_2), Alümina (Al_2O_3), Silika (SiO_2) ve CaO bu tür oksitlere örnek gösterilebilir (3).

Çelik üretiminde bazik cüruf-bazik refrakter, asidik cüruf-asidik refrakter uygulaması esastır. Günümüzde çelik üretimi büyük oranda bazik cüruf uygulaması ile gerçekleştiğinden, refrakter sanayii bazik refrakter üretimine geçmek zorunda kalmıştır. Bazik refrakter sanayiinde kullanışlı hammaddeler, manyezit (MgO), dolomit ($MgO.CaO$), kromit (Cr_2O_3) ve spinel ($MgO.Al_2O_3$)'dir (2). Bu gelişmelere paralel olarak çelik kalitesindeki tanımlamalar radikal değişimlere uğramıştır. "Temiz çelik" kavramı da bu değişimlerden payını almıştır. Çelik temizliğini etkileyen faktörlerin araştırılması, kirliliği arttıran kaynakların azaltılması ve bunun

gerekiyor ise işlem yöntemleri veya konumuzu oluşturan refrakterde olduğu gibi kullanılan malzemenin seçimi yolu ile gerçekleştirilmesi, çelik dünyasının tartıştığı temel konulardan olmuşlardır (3,4).

Sıvı metalin üretimi, işlenmesi ve taşınmasında metalürjik işlem mühendisliği, refrakter malzemelerin kullanımı ile çok yakından ilişkilidir. Refrakterlerin sıvı metal ve cürufa karşı fiziksel ve kimyasal direnci çok önemlidir. Fakat her açıdan mükemmel bir malzeme yoktur. Bu nedenle malzeme seçerken koşullara en uygun, optimum malzemenin seçimi çok önemlidir. Bunu sağlamak için öncelikle refrakterlerin hangi koşullarda nasıl davranış gösterdiğinin bilinmesi gerekir. Geçmiş yıllarda pota ve tandişler, daha çok çelik yapım ünitesinden döküm ünitesine sıvı çelik transfer kabı işlevi görmüş iken, son yıllarda fonksiyonları oldukça değişmiştir. Pota metalürjisinin gelişmesi ile pota ve tandişler artık bir metalürjik reaktör işlevini yüklenmiştir. Bu durum çelik kalitesini belirleme anlamında sekonder metalürji işlemlerini, primer çelik yapım işlemlerinden daha önemli bir hale getirmiştir. Pota ve tandişlerin bu artan önemi refrakterlerin de temiz çelik parametrelerinin elde edilmesine uygun bir şekilde dizaynını gündeme getirmiştir. Pota ve tandiş sadece bir taşıma kabı işlevi gördüğü dönemlerde, refrakterlerden beklenen birinci özellik çeliğin pota ve tandişte kaldığı süre içinde sıcaklığının korunmasıydı. Pota metalürjisi ve sentetik cüruf yapımının yaygınlaşması ile birlikte refrakterlerden, cüruf seviyesinde dozu artmış olan cüruf atağına karşı dayanması ve çelik seviyesinde ise çelik temizliğine katkıda bulunabilmesi istenmektedir. Refrakterler, cüruf atağına, tandiş ve potada görülebilecek aşınmaya karşı dayanım, ömür ve maliyet ilişkisinin ötesine geçmiş ve çelik temizliğine etkileri kapsamında da ele alınmaya başlanmıştır (4).

Yüksek kaliteli çeliklerin üretilmesinde sıvı çelik-refrakter arayüzey etkileşimlerinin anlaşılması çeliğin saflığı ve temizliği açısından her geçen gün daha da önem kazanmaktadır. Sürekli dökümde inklüzyonların sıvı çeliğe geçme aşamalarından biri de tandiş refrakteri-sıvı metal arayüzeyidir. Sıvı(metal)-katı(refrakter) sisteminde sıvının özellikleri, katının özellikleri ve sistemin atmosferi ıslatmayı etkileyen faktörler olarak sıralanabilir. Arayüzeydeki ıslatma açısı refrakterin aşınmasını

etkileyen en önemli parametrelerden birisidir. Sıvının (çeliğin) yüzey gerilimi (γ_{sg}), katının (refrakter malzemenin) yüzey gerilimi (γ_{kg}), ve sıvı-katı arayüzey gerilimi (γ_{ks}) sistemin ıslatma açısını (θ) belirlemektedir. Sıvının katı ile yaptığı açı $\theta < 90^\circ$ ise ıslatma durumu vardır ve bir etkileşim söz konusudur, tersi durumunda $\theta > 90^\circ$ ise sıvının katıyı ıslatmaması durumu vardır ve θ , 90° 'den 180° 'ye yaklaştıkça etkileşim minimum düzeye yaklaşmaktadır.

Sıvının içerisindeki alaşım elemanları ve sıvı metalin sıcaklığı ıslatmayı arttırmakta veya azaltmaktadır (5-8). Islatma özelliklerinin geliştirilmesiyle refrakter ömründe ve sıvı çelik temizliğinde kayda değer ilerlemeler sağlanabilmesine karşın bu konuda yapılmış çalışmalar oldukça sınırlıdır (9-12). Yapılan önemli birkaç çalışma ise patentlidir (9,10). Son yıllarda firmalar kendine has veya dünya standartlarına uygun alaşımda çelik üretirlerken ıslatma özellikleri üzerinde alaşım elemanları ile değişiklik yapmak imkansız hale gelmiştir. Dolayısıyla ilgi, daha çok katının yani refrakter malzeme üzerinde yoğunlaşmaktadır. Bu çalışma; çelik bileşim standartlarını bozmadan refrakter malzeme/sıvı çelik arayüzey incelemesi yaparak Erdemir mevcut durumunun belirlenmesini sağlamak ve mevcut durumundan daha iyi özellik elde etmek için refrakter bileşimini değiştirerek sıvı çeliğin ıslatma kabiliyetini azaltmak ve dolayısıyla daha uzun ömürlü refrakter üretimini ve daha temiz çelik üretimini amaçlamaktadır.

2. SIVI METALLER TARAFINDAN KATILARIN ISLATILABİLİRLİĞİ

2.1. Giriş

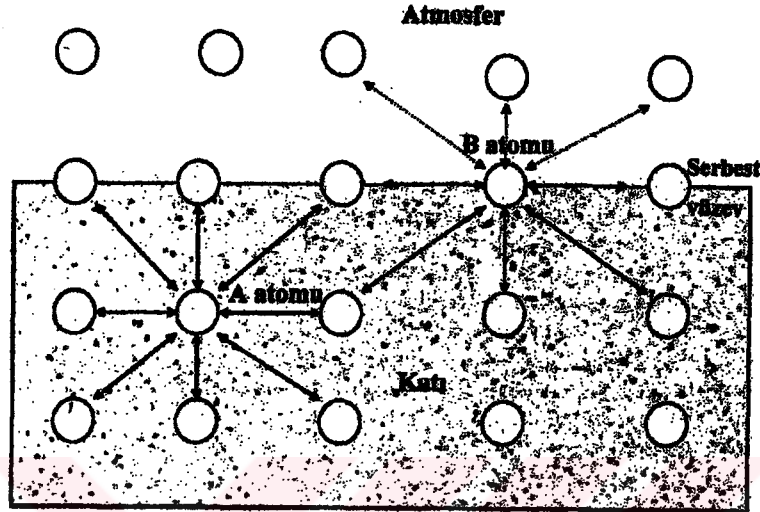
Metalik sıvılar ve katı maddelerin fiziksel kimyası ve fiziği bugünkü modern metalürjide önemli bir yer teşkil etmektedir. Bir metal ergiyiği ile yüksek ergime sıcaklığına sahip olan katı madde veya malzeme yüzeyi arasındaki temas sırasında birçok fiziksel ve kimyasal etkileşimler meydana gelmektedir. Bunlar; eritme, alaşımlama, metal ve alaşımlarının dökümü, metal ergiyiğinden kristallerin çekirdeklenmesi ve büyümesi, kaynak gibi metalurjik işlemler ve sıvı faz sinterlemesini içermektedir (13-18).

Katı madde yüzeylerinin sıvı metaller ile ıslatılabilirlik derecesinin ölçülebilmesi için, malzeme çiftleri arasındaki etkileşim ve adezyon (yapışma) gücünü belirlemek gerekmektedir. Genellikle ıslatma; katı faz içindeki küçük bölgelerin geçiş yerleri ve kanalları (kapiler), çukurlar ve katı fazın düzenli bir şekilde dağıldığı denge yüzeyler arası fazların geliştirilmesiyle karakterize edilmektedir. Böyle sistemlerde süreç ilerlerken meydana gelen ürünün özelliklerine ilave olarak hızı ve yönü; temas adezyon dayanımına, sıvı metaller tarafından katı fazın ıslatılabilirlik derecesine, arayüzeyin özelliklerine ve durumuna bağlıdır (13).

2.2. Yüzey Enerjisi ve Yüzey Gerilimi

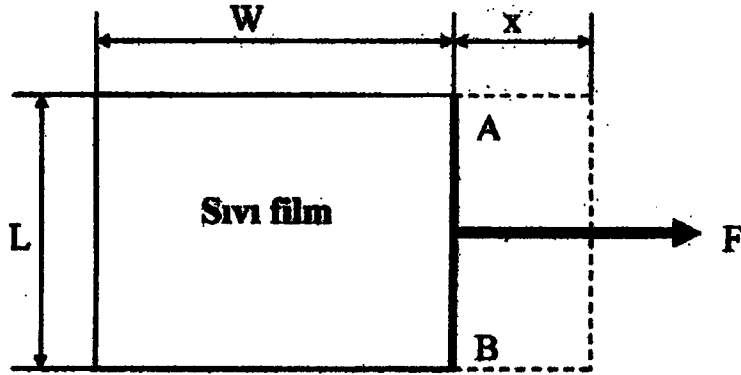
Bir katı veya sıvının yüzey enerjisini tanımlayabilmek için, malzeme yüzeyindeki atomların atmosfer ile etkileşimi göz önünde bulundurulması gerekir. Şekil 2.1'de katı bir malzemenin iç bölgesindeki atomların ve yüzeye yakın olan serbest yüzeyindeki atomların birbirleri ile etkileşimi şematik olarak basitçe gösterilmektedir. Katı içindeki atom (A), komşu atomlarla ilişki halinde olduğundan dengededir. Serbest yüzeyindeki atom (B) ise, eksik komşu atomlarının olmasından dolayı kararsızdır. Serbest yüzeydeki atomun bir bölümü, atmosfer içindeki gaz atomlarıyla temas halindedir. Serbest yüzeydeki atomun (B) potansiyel enerjisi, katı

içerisindeki atomunkine (A) göre daha yüksektir. Serbest yüzeydeki bu enerji, bu katının yüzey enerjisi olarak tanımlanır .



Şekil 2.1. Bir katının yüzey enerjisini tanımlamak için atomlar arasındaki etkileşimi gösteren şematik diyagram (14).

Sıvı haldeki bir damlanın da yüzey enerjisi vardır. Eğer damlanın yüzey enerjisi küçük ise, damla mükemmel küre şeklindedir. Çünkü diğer şekillere göre kürenin yüzey/hacim oranı en küçüktür. Dolayısıyla bir sıvının yüzey enerjisi hacimsel enerjisine göre daha büyüktür. Buharlaşma ve herhangi bir reaksiyon meydana gelmediği kabul edilen bir damlanın katı bir yüzey üzerinde yayıldığı zaman, hacmi sabit kalır. Bu nedenle sadece sıvının yüzey enerjisinde bir değişme söz konusudur (14-18). Yüzey gerilimi ile yüzey enerjisi arasındaki ilişkiyi, belirli şartlar altında tanımlamaya çalışırsak Şekil 2.2’de görüldüğü gibi, L uzunluğunda ve W genişliğinde bir sıvı film düşünelim. Bu sıvı filmi yüzeyi elastik bir zar ile kaplanmış bir pakete benzetebiliriz. Bu sıvının, L uzunluğundaki AB engeline temas ettiği yüzeyinin ortasında dik olarak etki eden bir çekme kuvveti oluşur. Bu kuvvet, sıvı filmin diğer yüzeyine (W) paraleldir ve sıvı filmi (x) mesafesi kadar büyüttür.



Şekil 2.2. Yüzey gerilmesi ile yüzey enerjisi arasındaki ilişkiyi açıklamak için çizilen şematik diyagram (14).

Dolayısıyla sıvı filmin alanında da bir artış olur. Bu artışı, $(x.L)$ olarak ifade edebiliriz. Bu mesafe artışında yapılan işi tanımlayacak olursak, $(F.x)$ sonucunu buluruz. Alan $(x.L)$ içindeki artışa zıt olarak, sabit sıcaklıkta sıvı filmin yaptığı iş, $(2\gamma.x.L)$ olarak tanımlanabilir (γ : sıvının yüzey gerilimi). Buradaki 2 rakamı, sıvının iki adet yüzeyindeki yüzey gerilimini ifade eder. Böylece sabit sıcaklıkta aşağıdaki “Eş. 2.1” yazabilir.

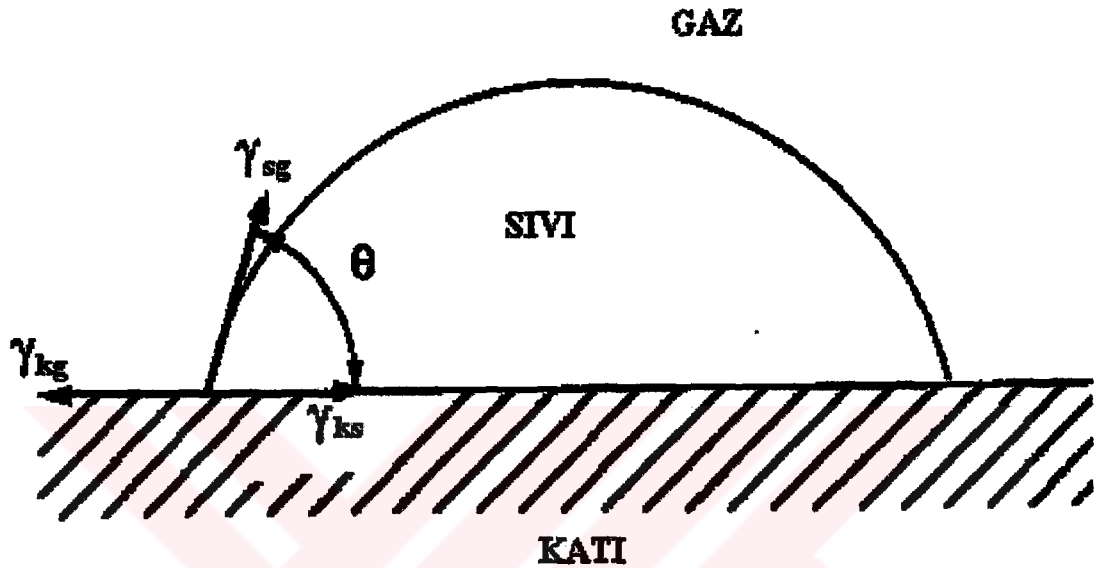
$$F.x = 2\gamma.x.L \quad [2.1]$$

Eşitlik yeniden düzenlendiğinde $F/L = 2\gamma$ veya $F/L = \gamma$ eşitlikleri bulunacaktır. Böylece sabit sıcaklıkta yüzey enerjisinin yüzey gerilimine eşit olduğu görülecektir. Yüzey enerjisinin birimi Jm^{-2} , yüzey geriliminin birimi ise $Nm = \text{Joul}$ 'dür. Bu parametre, sıvı ile atmosfer arasındaki arayüzey özelliğini ifade eder. Sıcaklık ve atmosfer değiştiği zaman, sıvının yüzey gerilimi de değişecektir (14,15).

2.3. Katı-Sıvı Islatması

Islatma gaz basıncıyla sıvının yayılması olayıdır ve ıslatmanın kolaylığı ıslatılabilirlik olarak ifade edilir. Bir sıvı tarafından katının ıslatılabilirliği, sıvının katı üzerine yaptığı ıslatma açısının terimleri içerisinde tanımlanır. Genel olarak ıslatmada, Young-Dupre tarafından önerilen ıslatma açısı (θ) terimi “Eş.2.2”

kullanılmaktadır (19). Bu ıslatma açısı (θ), üç arayüzeyin gerilmelerinin dengesi tarafından belirlenir (Şekil 2.3).

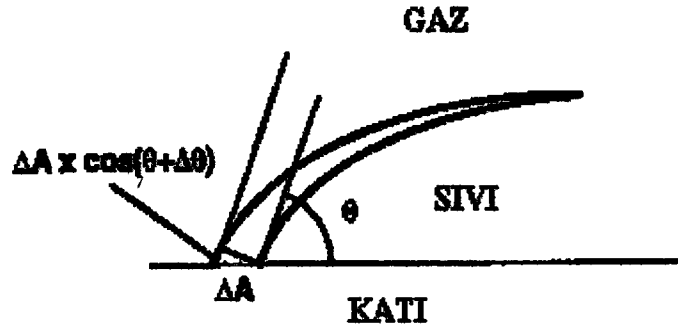


Şekil 2.3. Üç arayüzey gerilimi ve ıslatma açısı arasındaki ilişki (20).

$$\gamma_{kg} - \gamma_{ks} = \gamma_{sg} \cos \theta \quad [2.2]$$

Burada; (γ_{sg}), sıvının (çeliğin) yüzey gerilimi, (γ_{kg}), katının (refrakter malzemenin) yüzey gerilimi (γ_{ks}), sıvı-katı arayüzey gerilimi ve (θ), sistemin ıslatma açısını belirlemektedir (20).

Bununla birlikte ıslatma sadece arayüzey gerilmelerinin dengesi olarak hareket etmez. Aynı zamanda katı yüzeyin ıslatma süresince termodinamik işlemi olarak da davranır (21). Sıvının şekli değiştirildiğinde (son derece küçük değerde), ıslanmış katının alanı A , ΔA kadar artırıldığında ıslatma açısı θ' , $(\theta + \Delta\theta')$ kadar değişir. Bu anda sıvının alanı, Şekil 2.4'de görüldüğü gibi, $\Delta A \times (\theta + \Delta\theta')$ kadar artar.



Şekil 2.4. Sıvının bir miktar yer değiştirmesi ile arayüzey alanındaki değişme (20).

Dolayısıyla; sistemin toplam enerjisindeki değişimi “Eş.2.3” aşağıdaki gibi açıklanabilir (21).

$$\Delta F = \Delta A(\gamma_{ks} - \gamma_{kg}) + \Delta A \gamma_{sg} \times \cos(\theta + \Delta\theta') \quad [2.3]$$

Bir denge şartında ΔF çok küçük bir miktar değişim için (0) sifıra çok yakın olduğundan aşağıdaki “Eş. 2.4” yazılabilir.

$$\Delta A \xrightarrow{\lim} 0 \quad \frac{\Delta F}{\Delta A} = 0 \quad [2.4]$$

“Eş. 2.3 ve 2.4”den “Eş. 2.5” elde edilir.

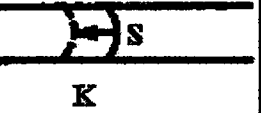
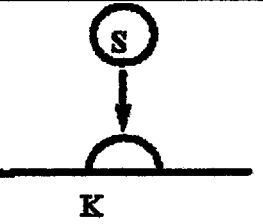
$$\gamma_{kg} - \gamma_{ks} = \gamma_{sg} \cos \theta \quad [2.5]$$

Burada; denge ıslatma açısı $\theta < 90^\circ$ olduğunda (90° ’den 0° ’ye değişimde) ıslatmanın iyileşmesi, denge ıslatma açısı $\theta > 90^\circ$ olduğunda (90° ’den 180° ’ye değişimde) ıslatmanın kötüleşmesi anlamına gelmektedir. Islatma açısına bağlı olarak aşağıdaki gibi üç farklı ıslatma tipi oluşabilir:

- Yayılma ıslatması
- Dalma ıslatması
- Yapışma ıslatması

Islatmanın her bir tipinde birim temas alanını üretmek için gerekli iş (ıslatma işi) önemli parametrelerden biridir. Islatma işi Çizelge 2.1’de görüldüğü gibi ıslatma türüne bağlı olarak değişmektedir.

Çizelge 2.1. Islatma türleri

	Yayılma Islatması	Dalma Islatması	Yapışma Islatması
Şekil			
Arayüzeyde azalma	Katı yüzey (K)	Katı yüzey (K)	Katı yüzey (K) Sıvı yüzey (S)
Arayüzeyde artma	Katı/Sıvı Arayüzey (K/S) Sıvı yüzey (S)	Katı/Sıvı Arayüzey (K/S)	Katı/Sıvı Arayüzey (K/S)
Islatma işi (W)	$W_s = \gamma_{Kc} - \gamma_{Ks} - \gamma_{sc}$ $W_s = \gamma_{sc} (\cos\theta - 1)$	$W_i = \gamma_{Kc} - \gamma_{Ks}$ $W_i = \gamma_{sc} \cos\theta$	$W_A = \gamma_{Kc} + \gamma_{Ks} - \gamma_{sc}$ $W_A = \gamma_{sc} (\cos\theta + 1)$
$W > 0$ Şartı	$\theta = 0^\circ$	$\theta < 90^\circ$	$\theta < 180^\circ$

Denge ıslatma açısı sıfır olduğunda sıvı katı üzerine sonsuz olarak yayılır. Bu durumdaki ıslatma, yayılma ıslatması olarak isimlendirilir. Bu tip ıslatma, katının yüzey alanının azalması ve sıvının yüzey alanının, katı ve sıvı arayüzey alanı kadar artması ile sonuçlanır. Bu yüzden yayılma ıslatması işi, $W_s = \gamma_{Kc} - \gamma_{Ks} - \gamma_{sc}$ olarak açıklanabilir. Bu durumda $\gamma_{Ks} + \gamma_{sc}$ ’nin γ_{Kc} ’den daha küçük olması gerekir. Denge ıslatma açısı 90° ’den küçük olduğunda ıslatma, dalma ıslatması olarak tanımlanmaktadır. Dalma ıslatması sıvının iki katı arasında bulunduğu durumlarda söz konusudur. Denge ıslatma açısı sıvının katı levhalara nüfuziyet derecesine bağlı olarak değişmektedir. Sıvının katı levhalara nüfuziyet derecesine bağlı olarak katı

levhalar sıvı yüzeyi kendilerine doğru çeker. Bu şekilde sıvı iki katı levha arasına nüfuz eder. Bu durumda katı yüzey alanı azalır, katı-sıvı arayüzey alanı artar. Dalma ıslatma işi, $W_i = \gamma_{kg} - \gamma_{ks}$ olarak açıklanır. Bir sıvı bir katıya yapıştığında meydana gelen ıslatmaya yapışma ıslatması denir. Bu durumda katı ve sıvının yüzey alanları azalır, katı-sıvı arayüzey alanı artar. Bundan dolayı yapışma ıslatma işi, $W_a = \gamma_{kg} + \gamma_{ks} - \gamma_{sg}$ olarak ifade edilir. Böylece her bir ıslatma türünün işi, sıvının yüzey gerilmesinin bir fonksiyonu olarak ve ıslatma açısının $\cos$ 'ü olarak ifade edilir "Eş. 2.6-2.8".

$$\text{Yayılma ıslatması işi} \quad W_s = \gamma_{sg} (\cos\theta - 1) \quad [2.6]$$

$$\text{Dalma ıslatması işi} \quad W_i = \gamma_{sg} \cos\theta \quad [2.7]$$

$$\text{Yapışma ıslatması işi} \quad W_a = \gamma_{sg} (\cos\theta + 1) \quad [2.8]$$

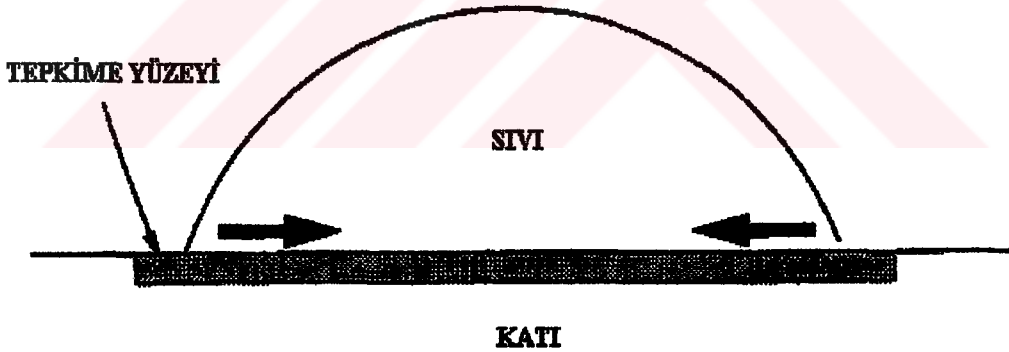
Fiziksel bir bakış açısından ıslatma işi ıslatma açısından daha önemli olmasına rağmen ölçüm kolaylığından dolayı ıslatma açısı (θ), ıslatma ölçümünde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Islatma sonuçlandığında katı-sıvı yüzey gerilimleri ve denge ıslatma açısı (θ) sabitlenir. Dolayısıyla ıslatma işi, ıslatma açısının bir fonksiyonu yani $\cos$ 'ü olarak tahmin edilebilir. Bu, ıslatma açısının, ıslatma ölçümünde kullanılması için daha ileri bir nedendir (20).

2.4. İlerleme ve Gerileme Islatma Açısı

Islatma açısı terimi genellikle dengeli bir ıslatma açısını gösterir. Bununla birlikte arayüzey ilerlerken gözlenen ıslatma açısı ve arayüzey gerilerken gözlenen ıslatma açısı pratikte daima farklıdır. Bu ıslatma açıları, ilerleme ıslatma açısı (θ_a) ve gerileme ıslatma açısı (θ_r) olarak ifade edilir. İki ıslatma açısı arasındaki fark yüzey pürüzlülüğünden kaynaklanmaktadır (19,20). Yüzey çok pürüzlü olduğunda iki ıslatma açısı arasındaki fark büyük olur. Bu durumda denge ıslatma açısı "Eş. 2.9" ile açıklanabilir (20).

$$\cos\theta_e = (\cos\theta_a + \cos\theta_r) / 2 \quad [2.9]$$

Islatma süresince sıvı damla buharlaşırken ıslatma açısı θ_a dan θ_r ye değişir. Özellikle reaktif sistemlerde ıslatma arayüzey reaksiyonlarıyla birleştiğinde gerileme ıslatma açısı bir problemdir. Gerileme ıslatma açısı oluşurken sıvı, denge alanından daha geniş bir alan üzerinde katıyla temasa geçer. Bu durumda Şekil 2.5’de gösterildiği gibi katı temas süresince sıvıyla tepkimeye girer yada sıvı tarafından kirletilerek ıslatma açısındaki azalma daha hızlı olarak gerçekleşir ve böylelikle tepkimeye girmiş malzemenin ıslatma açısı ölçülüyor olabilir (20). Reaktif olmayan sistemler ise, genellikle ıslatmama davranışı göstermekte ve ıslatma açısı üç arayüzeyin dengesine daha bağımlı olmaktadır. Ayrıca bu tür sistemlerde ıslatma açısı çok kısa bir sürede (10^{-1} sn) dengeye gelmekte ve daha yavaş ilerlemektedir. Reaktif olmayan sistemlerde yayılma kinetiğinin çok daha hızlı olabilmesi için yayılmayı kontrol eden çok daha güçlü arayüzey reaksiyonları tarafından desteklenmesi gerekmektedir (13,20).



Şekil 2.5. Bir gerileme ıslatma açısının reaktif bir sistemdeki durumu (20).

2.5. Katının Yüzey Pürüzlülüğünün Islatma Açısına Etkisi

Dengeli bir ıslatma açısı oluşurken katı ve sıvı yüzeyler arasındaki ıslatma açısı (θ) “Eş. 2.10” belirtilmiştir (21).

$$\cos\theta = \frac{\gamma_{kg} - \gamma_{ks}}{\gamma_{sg}} \quad [2.10]$$

“Eş. 2.10”, katı ve gaz arayüzey oluşumunda elde edilen serbest enerjinin sıvı gaz arayüzeyinin oluşumu için gerekli serbest enerjiye oranını veren ıslatma açısının $\cos$ ’ünü göstermektedir. Bir sıvının yüzey alanı onun en önemli karakteristiğidir ve sıvının düzlem geometrik alanıyla belirlenebilir. Fakat bir katı-gaz yüzeyin yüzey alanı, katı yüzey şartlarına daha çok bağlıdır. Bir katı yüzey pürüzlüyse görünen yüzey alanı düz yüzeyin yüzey alanından (r) katı kadar gerçek bir yüzey alanına sahiptir. Katı-gaz arayüzeyin oluşumunda elde edilen serbest enerji $r(\gamma_{kg} - \gamma_{ks})$ olacaktır ve pürüzlü yüzey için ıslatma açısı (θ'), “Eş. 2.11”deki gibi olacaktır (22).

$$\cos\theta' = \frac{r(\gamma_{kg} - \gamma_{ks})}{\gamma_{sg}} \quad [2.11]$$

“Eş. 2.10”, “Eş. 2.11”de yerine konulursa “Eş. 2.12” belirlenir.

$$\cos\theta' = r \cos\theta \quad [2.12]$$

Bu denklem Wenzel eşitliği olarak isimlendirilir ve r değerine Wenzel oranı denir (22). Görünen ıslatma açısı θ' ile, gerçek ıslatma açısı θ birbirine zıttır “Eş. 2.12”. Çünkü pürüzlü bir yüzey yakından incelenmesiyle bir yüzeydeki gerçek ıslatma açısının düz olarak dikkate alındığını açığa çıkaracaktır. Bu denklem ıslatma açısı 90° den küçük olduğunda $\theta' < \theta$ ve pürüzlü yüzeyin ıslatma açısını küçülttüğü anlamına gelir. Diğer bir deyişle, ıslatma açısı $> 90^\circ$ olduğunda $\theta' > \theta$ ve pürüzlü yüzey ıslatma açısını artırır.

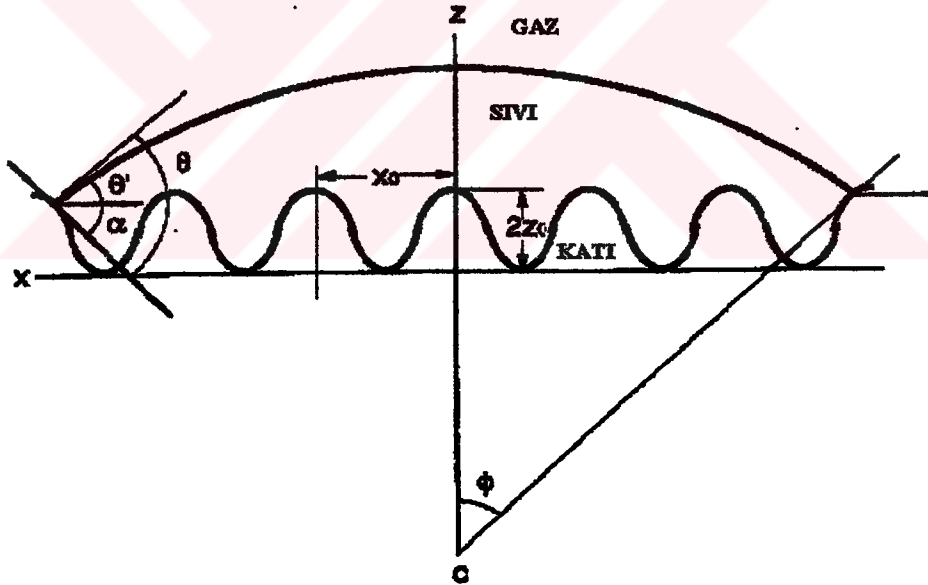
Johnson ve arkadaşları (23) Şekil 2.4. ve “Eş. 2.13, 2.14” de görülen idealize edilmiş bir model kullanarak katı yüzey pürüzlülüğünün etkisini hesaplamışlardır. Onların idealize etmiş olduğu katı yüzey bir damlanın merkezine doğru hareketinin kesitini göstermektedir. Katı yüzey (z) eksenini etrafında dairesel simetriktir. “ y, z, ϕ ”, sistemi tanımlamak için kullanılan silindirik koordinatlardır.

$$z = z_0 \left(1 + \cos \frac{2\pi x}{x_0}\right) \quad [2.13]$$

Damla hacminin dengede olduğu sanılmaktadır, damla devamlı bir dengeyle yüzeyde buluşmaktadır. Burada gerçek açı (θ) denge halindedir ve açının yarıçapı pürüzlü yayılmadakinin çok daha geniştir. Deneysel olarak gözlenmiş olan ıslatma açısı (θ'), temas noktasındaki yüzeyin eğim açısı (α) ve gerçek açı (θ) arasındaki farktır.

$$\theta' = \theta - \alpha \quad [2.14]$$

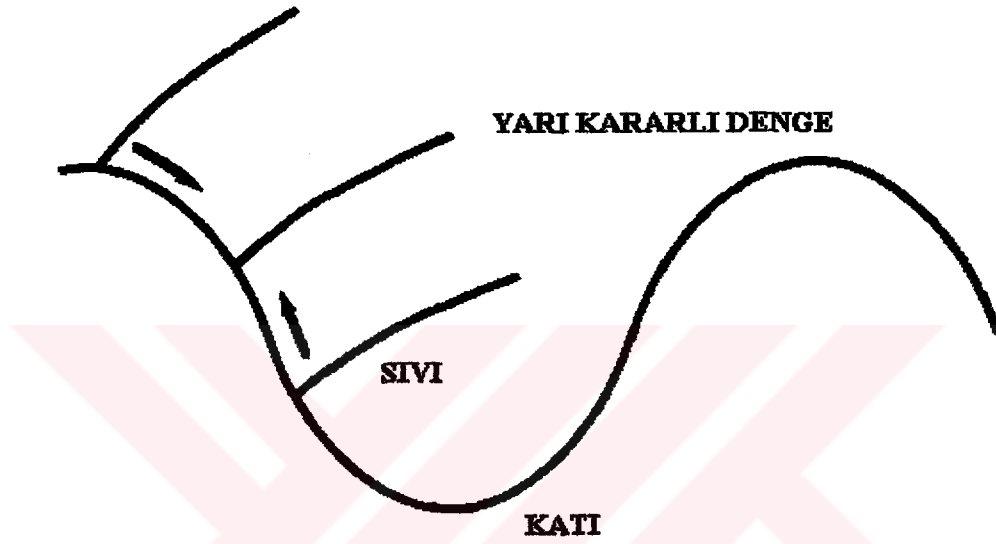
α nın değeri, “Görünür” ıslatma açısı ve “Gerçek” ıslatma açısı arasındaki farkına uyarlanmaktadır. Şekil 2.6’daki ilişkiye göre θ' geometrik bir şekilde ϕ ’e eşittir.



Şekil 2.6. Johnson’un idealize ettiği pürüzlü yüzey (23).

Johnson ve arkadaşları (23) Şekil 2.7’de görüldüğü gibi yüzey üzerinde ilerleyen herhangi bir dairede yarı kararlı bir denge olduğuna işaret etmişlerdir. İfade ettikleri modelde sıvı yeterli mikroskobik titreşim enerjisiyle ilerlerken, sıvı serbest enerjinin daha küçük olduğu enerji bariyerleri boyunca yarı kararlı dengeye taşındığını ifade etmişlerdir. Hesapladıkları ıslatma açısındaki değişiklik eğiliminin deneysel

sonuçlarla yaklaşık olarak benzer olduğunu bildirmişlerdir. Bununla birlikte yüzey pürüzlülüğünü idealize ettikleri için, enerji bariyerlerinin daha geniş ve ilerleme ıslatma açısı ile gerileme ıslatma açısı arasındaki farkın gerçekten daha büyük olduğunu kabul etmişlerdir.



Şekil 2.7. Periyodik yüzeydeki yarı denge durumu (23).

Katı yüzey yeterli şekilde parlatıldığında dengeli ıslatma açısı ile gerileme ıslatma açısı arasındaki fark ve dengeli temas ile gerileme temas arasındaki fark azalır. Bununla birlikte böyle bir yüzeyde dahi katı-sıvı arasında reaksiyon ve sonuçta reaksiyon ürünü oluşabilir. Bu nedenle gerileme ıslatma açısı ıslatma ölçümleri için elverişli değildir.

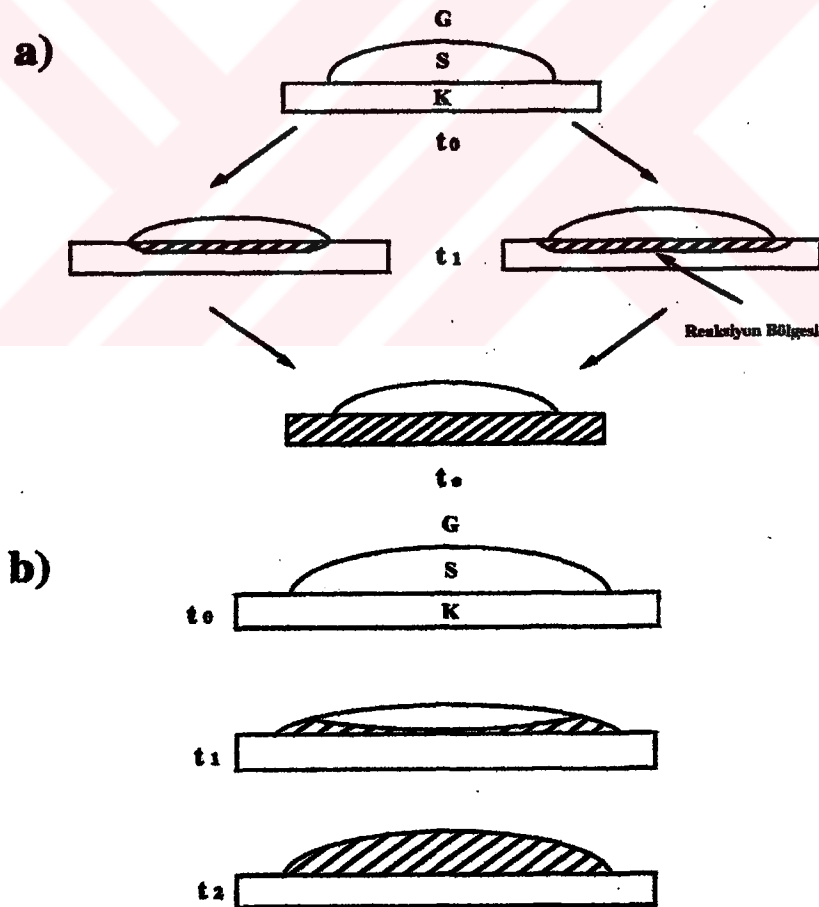
2.6. Islatmanın Kimyasal Reaksiyonlarla İlişkisi

Aksay ve arkadaşları (24) arayüzey-ıslatma ilişkisini teorik olarak değerlendirmiş ve kimyasal reaksiyonlara bağlı olarak aşağıda belirtilen dört tür model tanımlamışlardır.

a) Sadece katı, sıvının tüm bileşenleriyle veya bir kısmı ile ıslanmaktadır.

- b) Sadece sıvı, katının tüm bileşenleriyle veya bir kısmı ile ıslanmaktadır.
- c) Her bir faz bir diğerleriyle uyumlu olarak sarılır
- d) Arayüzeyde bir bileşim şekillenir

Islatma fazlarının oluşumu Şekil 2.8.'de şematik olarak verilmiştir. Burada $t=t_0$ zamanında katı ve sıvı arasındaki hiçbir ara reaksiyon olmaksızın kimyasal bir dengeyi göstermektedir. Reaksiyon, sıvının yüzey serbest enerjisi ve arayüzey serbest enerjisi ile ilerlerken reaksiyonun serbest enerjisinden dolayı $t=t_0$ anında sırasıyla $\Delta\gamma_{ks}$ veya $\Delta\gamma_{sg}$ olarak değişecektir. Bu durumda, sıvıyla ilişkili olarak reaksiyon bölgesi şartları tarafından belirlenmiş olan iki tür ıslatma vardır.



Şekil 2.8. Aksay modeli (24).

- a) ilk katının, sıvının tüm bileşenleriyle veya bir kısmı ile ıslanması
 - b) ilk sıvının, katının tüm bileşenleriyle veya bir kısmı ile sarılması
- (K=Katı S=Sıvı G=Gaz)

2.7. ıslatma Açıısı Üzerine Yerçekiminin Etkisi

ıslatma açıısı, dünya üzerinde ölçüldüğü sürece yerçekiminden etkilendiğı kabul edilmektedir. Bu yüzden yerçekimi etkisinin minimize edilmesine dikkat etmek gerekmektedir. Bu amaçla ıslatma açıısı ölçümleri, genelde küçük damlalar kullanılarak veya serbest düşme gibi sıfır yerçekimi şartları altında yapılmaktadır. Küresel kap modeli kullanılarak yapılan ıslatma açıısı ölçümlerinde, geniş ıslatma açıısı veya damlanın yavaş düşmesi şartlarında yerçekimi etkisi artabilir. Bunun tersi olarak yine geniş damla şartlarında, damla üzerindeki eğim sıfır kabul edildiğinde ıslatma açıısının yerçekiminden etkilenmediğı kabul edilmektedir. Bununla birlikte yer çekiminin ıslatma açıısı üzerindeki etki ve derecesi literatürde tam olarak belirlenememiştir (19,20,24).

2.8. Katı-Sıvı ıslatma Açıısı Ölçüm Metotları

Temas sistemlerinin ana karakteristikleri, katı fazı ıslatan sıvının ıslatma açıısı ve yüzey gerilimidir. Sıvıların yüzey gerilimi ve ıslatma açıısının ölçümünde birbirinden farklı çok sayıda metot bulunmaktadır (13,17,23). Bu metotlardan birkaçı aşağıda verilmektedir.

- Maksimum kabarcık basıncının belirlenmesi
- Kapiler yükselme ve düşme
- Sıvı damla metodu

Bunların içerisinde sıvı damla metodu en yaygın kullanılanıdır.

2.8.1. Kapiler yükselme veya düşme metodu

Birbirine paralel ve dik pozisyonda, aralarında 2r mesafesi kadar bir aralık olan kılcal boru düşünelim (Şekil 2.9). Su gibi ıslatan sıvılar bu kılcal boruda kendiliğinden yükselirken (Şekil 2.9a), cıva gibi ıslatmayan sıvılar kendiliğinden alçalmaktadır (Şekil 2.9b). Sıvıları kılcal içinde yukarıya yada aşağıya doğru çeken kuvvet γ yüzey

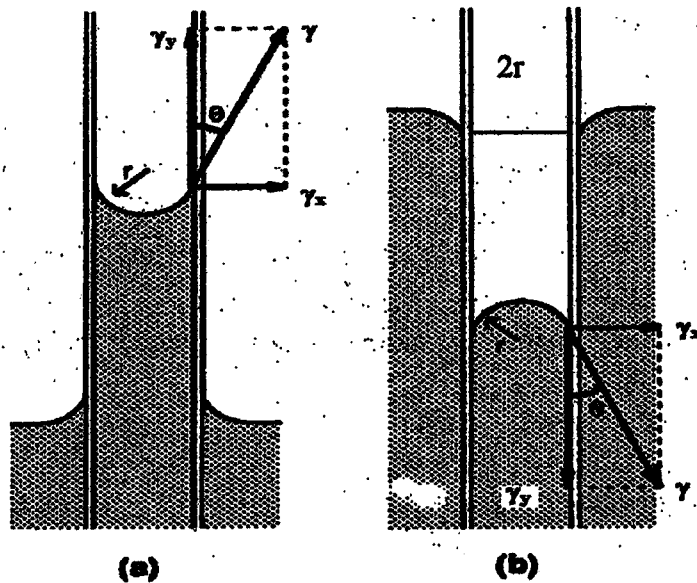
geriliminin γ_y bileşenidir. Yüzey geriliminin γ_x bileşeni kılcal boru duvarı ile etki-tepki sonucu harekete yol açmamaktadır. Islatma açısı (θ) olmak üzere ıslatan sıvıyı yukarıya doğru çeken $\gamma_y = \gamma \cos \theta$ kuvvetlerinin yarıçapı r olan kılcal kesitin tüm çevresi boyunca toplam değeri $2\pi r \gamma \cos \theta$ olur. Yerçekimi ivmesinin (g) olduğu bir yerde yoğunluğu (ρ) olan bir sıvının kılcalda h kadar yükselmesi sonucu oluşan sıvı sütununun $\pi r^2 h \rho g$ ağırlığı toplam yüzey gerilimi kuvvetine eşit olmalıdır. Yazılan kuvvet denkleğinden yüzey gerilimi için “Eş. 2.15” bulunur

$$\gamma = r h \rho g / 2 \cos \theta \quad [2.15]$$

Tam olarak ıslatan sıvılarda ıslatma açısı $\theta = 0$ ve $\cos \theta = 1$ olacağından, $\Delta P = h \rho g$ 'dir ΔP , yükselen sıvının hidrostatik basıncını gösterdiği için son bağıntı “Eş. 2.16” yazılabilir.

$$\Delta P = 2 \gamma / r \quad [2.16]$$

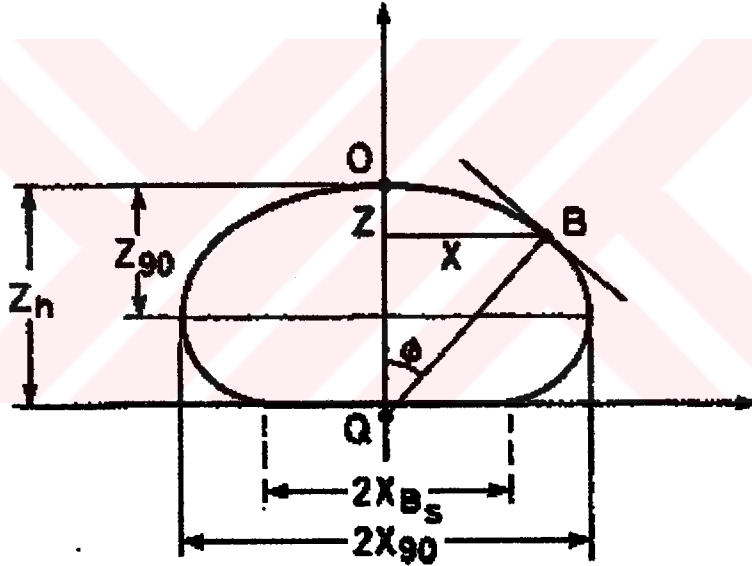
İçbükey sıvıların buhar basıncı Δp kadar düşerken dışbükey sıvıların buhar basıncı Δp kadar yükselmektedir.



Şekil 2.9. Kapiler yükselme veya azalma (17).

$$\frac{1}{\rho/b} + \frac{\sin \phi}{x/b} = 2 + z/b \frac{(D-d)gB^2}{\gamma_{sg}} \quad [2.18]$$

Bu eşitlikte, ρ ; meridyen kısmı düz yüzeyinde eğim yarıçapı, b ise en yüksek seviyede damlanın yüzey eğiminin yarıçapıdır ($R_1 = R_2 = b$). Burada $\frac{(D-d)gB^2}{\gamma_{sg}}$ ifadesi β ile de gösterilebilir. “D-d”; sıvı ve ortamın (sıvı-gaz sistemi) yoğunluk farkı; g ; yerçekimi ivmesi, x ve z ise sıvı yüzeyindeki herhangi bir noktanın koordinatlarıdır. Bu eşitliğin çözümünde noktanın yüzeydeki x , z ve ϕ koordinatları γ_{sg} yüzey gerilmesi, sıvı yoğunluğu ve ivmeyle ilişkilendirilir.



Şekil 2.11. Sıvı damla koordinatları (18).

Sıvı damla yüzeyindeki nokta koordinatlarını ölçerek, sıvının gerilmesi yoğunluğuna göre belirlenebilmektedir. Aynı zamanda eşitlik çözümleri ile katı yüzeyiyle temas noktası dahil herhangi bir noktadaki sıvı yüzeyi eğimi bulunabilir (ıslatma açısı). Böylece sıvı damla metodu, γ_{sg} ve θ değerlerinin hesaplanmasını sağlar. Sıvı yüzeyi şeklini bilerek içindeki hacmi tanımlamak mümkündür. “Eş.2.18”ün çözümü tam olarak belirtilememesine rağmen belirli bir doğruluk derecesiyle yaklaşık olarak integrali alınabilir. Bu eşitliğin en doğru çözümleri için Bashforth ve Adams (25)’in

çıkardığı çizelgeler kullanılmaktadır. Burada γ "Eş. 2.19" ile hesaplanmaktadır.

$$\gamma = \frac{g\rho b^2}{\beta} \quad [2.19]$$

b ve β ; ölçülmüş x_1 , x_2 ve ϕ koordinatları kullanılarak Bashforth ve Adams'ın tablolarından (Ek-2) belirlenmiştir (25). x ve z nin ölçümleri çoğunlukla $\theta = 90^\circ$ de seçilen ϕ değeri ile ortaya çıkar. Böyle ölçümler en doğru olanlardır. Sıvı ile ıslanmanın iyi elde edildiği, $\theta < 90^\circ$ ölçümleri daha az doğrudur. Fakat özel ölçümlerle daha doğru sonuçlar elde edilebilir. Damlacık hattının x , y ve ϕ koordinatlarının değerlerini bulmak için damla görünüşü fotoğraflanır. Baskıya göre maksimum damlacık çapının $(2x)$ $\theta = 90^\circ$ de z 'ye olan mesafesi optik mikroskop ile belirlenir. Fotoğraf üzerinden ıslatma açısını ölçmek için başka metotlar da kullanılmaktadır.

Temas anındaki damla fotoğraflarından Bashforth ve Adams'ın tablolarını kullanarak veya ıslanma düzleminin yanındaki damlacık kenarına bir tanjant çizilerek ıslatma açısı hesaplanabilir "Eş. 2.20". Damla kenarına normal tanjant çizme metodu haricinde küresel kısmın formülü ile de damlacık boyutlarından (damla hacmi yüksekliğinden) ıslatma açısı hesaplanabilir "Eş. 2.21". Burada damla yüzeyinin küresel olduğu kabul edilir.

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{2ha}{a^2 - h^2} \quad [2.20]$$

$$\cos \theta = 1 - \frac{3\pi h^2}{3\theta + \pi h^3} \quad [2.21]$$

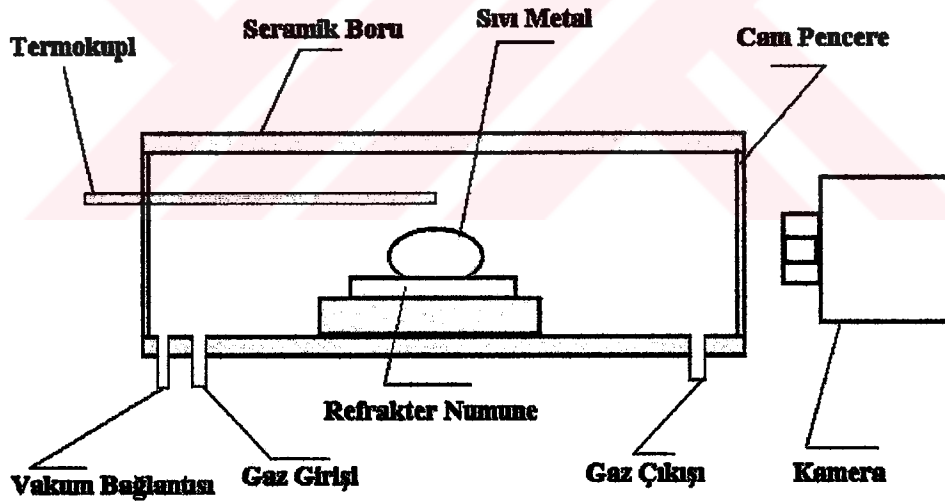
Eğer damlacık çok büyük ise, eğim ihmal edilerek ıslatma açısı "Eş. 2.22"'deki gibi ifade edilebilir.

$$\cos \theta = 1 - \frac{Dgh}{2\gamma_{sg}} \quad [2.22]$$

“Eş. 2.22” sadece çok büyük sıvı damla çapları ($D_d, 10-15 \text{ cm} \leq D_d$) için geçerlidir. Sıvı damla metodu ile ergimiş metal-katı ıslatmasının tespit edilmesi diğer metotlara göre önemli bazı avantajlara sahiptir. Bunlar; prensip olarak metodun basitliği ve katı sıvı fazlar için maddenin sadece küçük bir parçasına ihtiyaç duyulmasıdır. Ayrıca bu metotta sıvı damladan uygun uzaklıktaki ölçümler esnasında kapalı ortam kullanıldığı için damlaya direkt temas edilmemekte ve numunenin tekrar ısıtılması da gerekmemektedir (13).

2.9. ıslatma Açısı Ölçüm Sistemi

Standart ıslatma açısı ölçüm sistemi Şekil 2.12’de görüldüğü gibi vakum sistemi bulunan sıcaklık kontrollü bir fırın ve fotoğraf kaydediciden (fotoğraf makinası, CCD kamera v.b.) oluşmaktadır.



Şekil 2.12. Metalik sıvıların ıslatma açılarını belirlemek için atmosfer kontrollü fırın ve bölümleri

ıslatma açısı ölçümü; katı yüzeyle temas halindeki ergiyik metal damla yüzey gerilmesi ve ıslatma açısının ölçülmesi esasına dayanmaktadır. Ölçüm, kontrollü atmosfer şartlarında yatay durumdaki katı malzeme üzerinde ergitilen metal profilinin fotoğraflanması ve bu fotoğrafların yüzey gerilimi ve ıslatma açısının sağlıklı bir şekilde ölçülebileceği kadar büyütülmesini içermektedir.

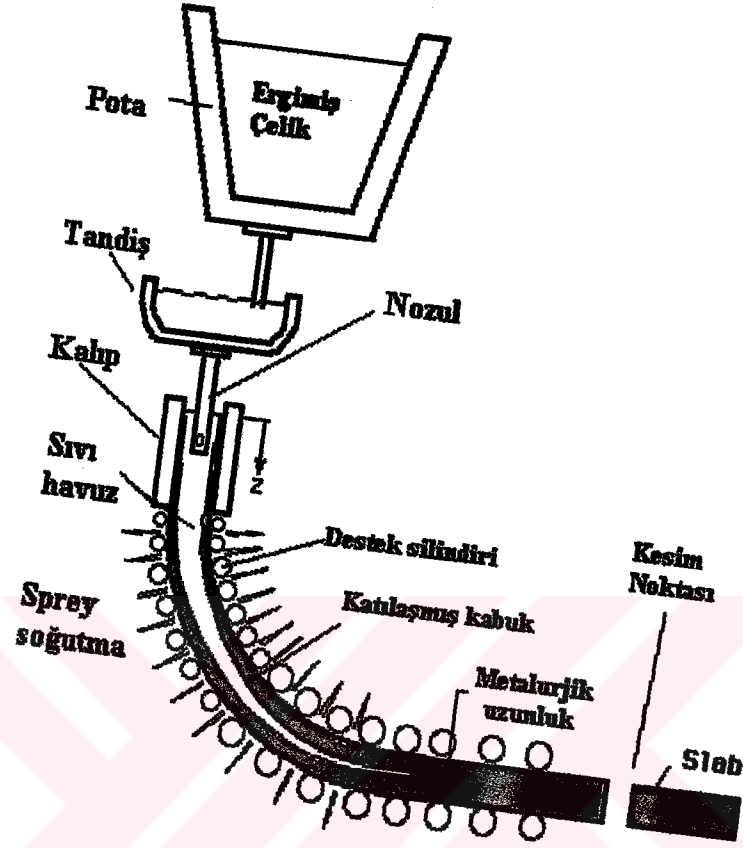
3. SÜREKLİ DÖKÜMDE REFRAKTER-SIVI ÇELİK ARAYÜZEY İLİŞKİSİ

3.1. Çeliğin Sürekli Döküm İşlemi

Sürekli döküm modern bir otomasyon işlemidir. Geleneksel ingot yöntemine göre daha fazla miktarlarda, kaliteli ve ucuz çelik üretimine imkan vermektedir. Bundan dolayı hızla gelişerek, yaygınlaşmaktadır. Sürekli döküm sadece çelik değil fazla miktarda üretimi yapılan diğer bazı demir dışı metallerin (alüminyum vb.) üretiminde de kullanılmaktadır. Son yıllarda dünya çelik üretiminin büyük bir kısmı bu yolla yapılmaktadır. Dünyada her yıl 750 milyon tondan fazla çelik, 20 milyon ton alüminyum ve diğer pek çok alaşım elementlerinin üretimi sürekli döküm yöntemiyle yapılmaktadır (26,27).

Çeliğin döküm yoluyla üretiminde en önemli metotlardan biri olan sürekli döküm (Şekil 3.1); ergimiş metalin, blum ($\approx 200 \times 300$), kütük ($120 \times 120, 140$) veya slab ($\approx 1000 \times 200, 250$) kesitlerinde yarı mamul olarak katılaştırılmasını içeren bir işlemdir (26).

Sürekli döküm işleminde; ergimiş olan metal potadan tandişe dökülmekte, daha sonra kalıbın içerisine doğru bir nozul yardımı ile ilerlemektedir. Yeterli miktarda kabuk oluşumunu sağlamak amacı ile kalıp su ile soğutulmaktadır. Bu işlemin sürekli ve ideal olarak devam etmesi için kabuk bağlayan metalin akışı, uygun döküm hızında kalıbın taban kısmından dışarıya alınmaktadır. Kalıp içerisinde başlayan katılaşma belirli döküm hızında aşağı doğru giderken tamamlanmaktadır. Kalıbın aşağısından daha uzaklarına kadar katılaşan yüzeyine su püskürtülerek gerekli olan metalürjik uzunluk sağlanmaktadır. Son olarak oluşan kısım doğrultularak kesilip depolanmakta veya sıcak haddeleme işlemi uygulanmaktadır (26,27).



Şekil 3.1. Çelik yapımında kullanılan sürekli döküm işlemi (26).

3.2. Pota

Yüksek fırın ürünü olan pik demir, bazik oksijen fırını (BOF) ve elektrik ark fırınlarında (EAF) arıtma işleminden sonra silindirik şekilli döküm potalarına alınmaktadır. Bu potaların kapasitesi yaklaşık olarak 190 ton olup bu da bir konverterin kapasitesine karşılık gelmektedir (27).

Başlangıçta potanın görevi konverterden ergiyik çeliği alıp döküm standına taşımaktır. Böylelikle çelik potadan direkt olarak kalıplara dökülmekteydi. Günümüzde ise sürekli döküm işleminde potanın görevi çok daha fazla işlevselliğe sahip hale gelmiştir. Pota, hala konverterden döküm standına ısının iletimi için bir taşıyıcı görevi yapmaktadır. Bununla birlikte çeliğin kompozisyonunun ayarlanması için ikincil metalürji bu potalarda gerçekleşmektedir (27,28). Sürekli döküm

yönteminin uygulamaya konulmasıyla, çeliğin potaya geliş sıcaklığının artması ve potadaki kalış süresinin uzaması sıvı çelikte refrakter arasındaki reaksiyonu arttırmaktadır. Bazik refrakter kullanımı ile refrakter-sıvı çelik arasındaki reaksiyon azaltılabilmektedir. Bu sebeple sürekli döküm işlemlerinde bazik refrakter kullanımı yaygınlaşmıştır (28).

Pota; asal gazlarla karıştırma imkanı, homojen sıcaklık ve kimyasal bileşimi sağlamaktadır. Ayrıca metalik olmayan kalıntıların yüzdürülmesiyle daha temiz çelik üretilmektedir. Bunun için işlem kontrol şartları, kolaylıkla sağlanabilmektedir. Potalar, elektrik ark fırını (EAF) ve sürekli döküm arasında tampon görevi yaparak, işletme organizasyonunun daha kolay yapılmasını sağlamaktadır (28).

İkincil yada pota metalürjisinin önemi modern yüksek teknolojik çeliklerin gelişmesiyle artmıştır. Alüminyum gibi oksit gidericilerle çeliğin oksit giderme işlemi potada gerçekleşmektedir. Ayrıca küçük oksit partiküllerini ortadan kaldırmak için ergiyik çeliğe argon gazı enjekte edilmekte ve inklüzyonların cürufa yüzdürülerek taşınması sağlanmaktadır. Kükürt giderme işlemi de potada yapılmaktadır. Potada sıvı çeliğin sıcaklığı 1570-1620 °C arasında değişmektedir (27).

En önemli pota metalürjisi işlemi, sıcak metalde kükürt, fosfor, silisyum giderme işlemidir. Bilindiği gibi demir-çelik üretim işlemleri içinde redükleyici ortamda bazik cüruflla en iyi kükürt giderme verimi yüksek fırında sağlanmaktadır. Ancak bu yöntemle çalışmanın refrakter ve kok tüketimi yanında şarjdaki alkalilerin (Na_2O , K_2O) problemlere yol açması nedeniyle, yüksek fırında olabildiğince asidik cüruflla çalışıp kükürdü, yüksek fırın dışında pota metalürjisi yöntemleriyle gidermek daha ekonomik olmaktadır (29).

Refrakter malzemelerin büyük çoğunluğu pota ve tandište kullanılmaktadır. Pota refrakteri iki esas tabakanın kompozitidir. Sabit astar yaklaşık 100-500 mm kalınlığındadır. Bunun üzerine yaklaşık 200 mm nötr dökülebilir veya bazik biriket duvarı örülür. Yüksek alüminalı dökülebilir astar, pota girişi kaplamasında kullanılır.

sahiptir (26). Bunlar;

- Oksit inklüzyonlarının ayrılmasını sağlamak,
- Pota değişimi süresince kalıba sıvı çeliğin sürekli akışını sağlamak
- Kalıpla nozulun üzerindeki metal ağırlığını dengelemek ve üniform şekilde kalıba akışını sağlamaktır.

3.4. Tandişte Kullanılan Refrakterler

Çelik üretim yöntemlerinin çeşitli nedenlerle gelişmesi sonucunda kullanılan potaların ve tandiğin çalışma şartları ve dolayısıyla refrakter çeşitleri de değişmiştir (28). Refrakter malzemeler, pek çok kritere göre sınıflandırılabilir ve pratikte bu sınıflandırmalar az veya çok yaygınlıkta kullanılmaktadır. Burada sınıflandırma için dikkate alınan refrakterliği veren kimyasal karakterlerden asidiklik ve baziklik kriter olarak alınmıştır.

Asit veya bazik deyiimiyle refrakter malzemenin kimyasal olarak asitlik ve baziklik özelliğinden daha çok refrakterin kullanıldığı ortama atıf yapılmaktadır. Örneğin; silika asidik ortamda inertsdir, fakat bazik ortamda reaksiyona girebilir. Bu terimler asidik veya bazik cürufu çelik üretim işleminden kaynaklanmaktadır. Bu nedenle bazik refrakter fevkalade yüksek refrakterlik, sıvı çeliğe ve bazik cürufulara iyi dayanımlarıyla karakterize edilmektedirler. Bunların, sıcak ortamda hurda malzemelerin çarpmasıyla aşınmaya, mekanik zorlamalara ve ergimiş malzemelerin cidara olan etkilerine karşı yeterli dayanıma sahip olmaları gerekir (2).

3.4.1. Bazik refrakterler

Bazik özellik taşıyan ve geniş kullanım alanı olan refrakter malzemeler; Magnezit (MgO), Magnezit-Krom ($MgO.Cr_2O_3$) ve Dolomit ($MgO.CaO$) gibi sıralanabilir.

3.4.1.1. Magnezyum oksit (MgO, Magnezya)

Magnezyum elementine bazik refrakter malzemelerin temel elementi niteliğini kazandıran husus, oksijene olan yüksek ilgisi (2) ve oksijenle oluşturduğu magnezyum oksidin (MgO) 2800 °C gibi yüksek bir ergime sıcaklığına sahip olmasıdır (2,3). MgO, alüminadan daha pahalıdır ve termal genleşmesi çok yüksektir. Oksitleyici atmosferde asidik karaktere sahip olan alüminadan daha yüksek sıcaklıklarda kullanılabilir. Redükleyici atmosferde, yüksek buhar basıncı nedeniyle vakumda, 1600-1700 °C'nin üzerinde kullanılamaz. MgO, çok iyi kalsine edilmediği zaman suda ve mineral asitlerinde çözünür. 1800 °C'ye kadar karbonla teması halinde kararlıdır. Ancak 2000 °C'de karbon ve karbürler ile hızla reaksiyona girebilir (2).

Magnezit refrakterler, modern çelik üretiminin en önemli girdisi olarak tercih edilmektedir. Bunu sağlayan en önemli neden; kalitesindeki gelişmelerdir. Yüksek sıcaklıkta refrakterlik ve cüruf dayanımının iyileştirilmesi için yüksek saflıkta, yüksek yoğunlukta ve tercihen büyük periklas (MgO) kristallerine sahip hammaddenin kullanılmasını gerektirmektedir. Son yıllarda kimyasal açıdan daha saf malzeme kullanım gereksiniminin artması sinter-MgO üretiminde yabancı maddelerin ayırma/ayırıştırma işlemlerinin de önemini arttırmıştır (28).

3.4.1.2 Sinter manyezit

Sinter manyezit, yüksek $MgCO_3$ içeren manyezit cevherinden elde edilir. Manyezit genelde saydam ve yarı saydamdır. Bu cevherin zenginleştirilmesindeki hedef SiO_2 , CaO , Fe_2O_3 gibi emprütelerin giderilmesidir. Bu amaçla cevher zenginleştirme tesislerinde elle yıkama, otomatik optik ayırma, ağır ortam ayırması (yüzdürme) yöntemleri uygulanır (2). Değişen şartlara göre 350-580 °C'de ön kalsinasyon işlemine tabi tutularak magnezya elde edilir. Bu yapıda daima manyezit cevherinden kaynaklanan değişen oranlarda safsızlıklar bulunur.

Magnezyanın hidrasyon eğiliminin engellenerek kararlı hale getirilmesi için 1700 °C'nin üzerinde sinterlenmesi gerekir. Elde edilen ürüne doğal sinter manyezit adı verilir. Sinter manyezit üretiminin esas amacı yabancı oksitleri mümkün olduğunca uzaklaştırarak yüksek refrakterlik özelliklerini kazandırmak ve ayrıca hidrasyonu engellemektir. Sıcaklığın 1700 °C'nin üzerine çıkarılması sonucu sağlam yapılı ve kübik kristalli periklas fazı elde edilmektedir. Sıcaklık ve sıcaklığa maruz kalma süresi ne kadar yüksek olursa periklas fazı o derece büyümekte ve dolayısıyla yoğunluk artmakta, gözeneklilik ise azalmaktadır. Böylece yapı neme ve kimyasal etkilere karşı dirençli hale gelmektedir (2). Sinter manyezitin yapısında daima magnezyanın saflığını bozan SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO gibi oksitler bulunmaktadır. Genellikle kaliteli bir sinter manyezitin kimyasal kompozisyonu aşağıdaki gibi arzu edilmektedir (Çizelge 3.1).

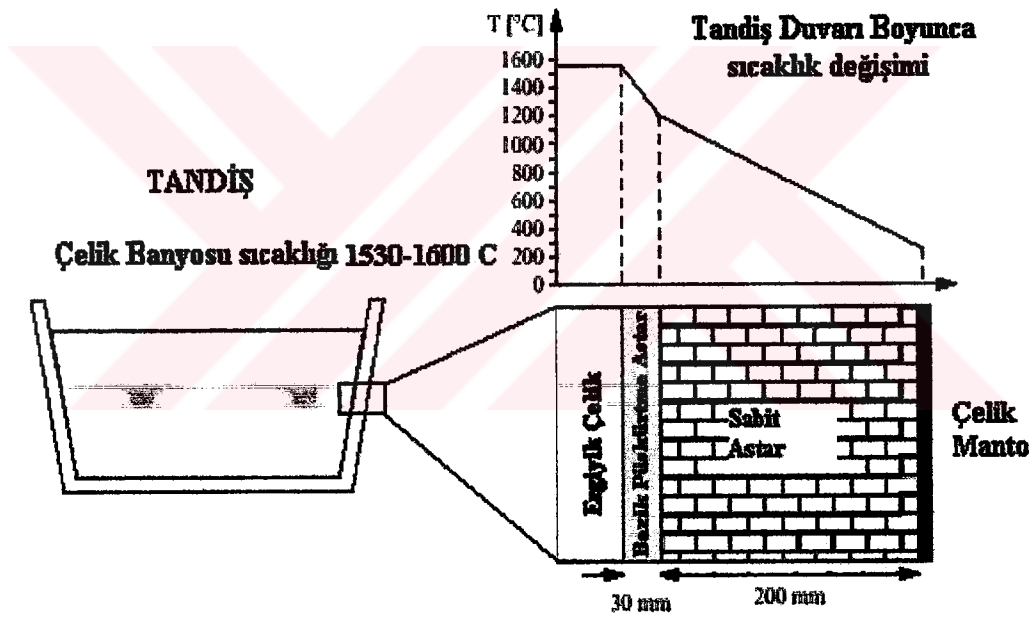
Çizelge 3.1 Kaliteli bir sinter manyezitin kimyasal kompozisyonu

Refrakter	Bileşim(%)
MgO	% 97
SiO_2 ,	0,85 max
Al_2O_3 ,	0,03-0,04
CaO	2 max
Fe_2O_3 ,	0,5 max

Sinter manyezit son işlem olarak 2000 °C üzerinde ısıtılır. Bu şekilde sinter manyezitin tane boyutu artarken MgO haricindeki bileşiklerin arınması sağlanır. Bu ürün diğer manyezit türlerine göre yüksek yoğunluk ve saflığa sahiptir. Dolayısıyla gözeneklilik oldukça düşüktür. Bu özelliklere sahip olması nedeniyle ergimiş çelik gibi sıvılar ve kimyasal etkilere karşı dirençlidir (2,28). Refrakter üretiminde kullanılacak manyezit türünün seçiminde göz önüne alınan diğer bir parametre de manyezitin tane boyutudur. Tane boyutları manyezitin üretim tekniklerine bağlı olup, klasik sinterleme işlemi sonucunda $\approx 60 \mu\text{m}$, ergimiş manyezitte ise tane boyutları $\approx 400 \mu\text{m}$ 'ye kadar olabilmektedir. Tane boyutunun büyümesi yüksek yoğunluğa ilave olarak manyezitin dış etkilere karşı direncini arttırmaktadır (2).

3.5. Bazık Tandış Astarı

Sabit astar yüksek sıcaklık direncine sahip olan dayanıklı refrakter tuğladır (%50-70 Al_2O_3 ve SiO_2). Bu tuğlalar dökülebilen ve yüzlerce kez kullanıma sahip malzemelerdir (10,11). ≈ 200 mm kalınlığındaki sabit tandış refrakterini korozyondan korumak için üzerine yaklaşık 30 mm kalınlığında bazık tandış astarı püskürtülür. Püskürtme tandış astarı genellikle MgO ve az miktarda SiO_2 'den meydana gelmektedir. Şekil 3.3'de tandış astar yapısı ve sıvı çelikle temas halinde meydana gelen ısıl profili görülmektedir. Püskürtülmüş tandış astarın sıcaklığı $\approx 1200-1550$ °C arasında değişmektedir (27).



Şekil 3.3. Tandış duvar boyunca kesit görünüşü (27).

3.6. Püskürtülebilir Bazık Tandış Astar

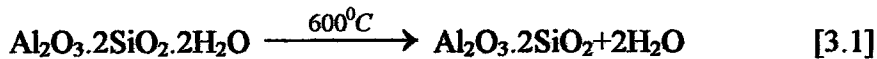
Aşınma astarları pota, tandış ve ergimiş metali taşıyan kanalların sabit refrakter tuğla astarlarını korumak için kullanılmaktadır. Genellikle bu aşınma astarları tabanca ile püskürtülebildiği gibi önceden de kalıplanabilmektedir. Aşınma astarı; sabit astarı koruyan termal ve kimyasal bir bariyer gibi davranarak ergimiş metal ısısını izole

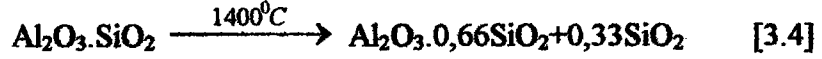
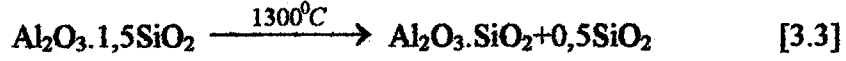
eder (9). Püskürtme astar malzemesinin düşük yoğunluğa sahip olması potaların ve tandışın kolayca astarlanabilmesine izin vermektedir (30,31). Ayrıca refrakter malzemelerin birden bire çökerek veya yıkılarak zarar görebilmesi, son zamanlarda refrakter malzemelerin yüzeyinin tamir edilmesini gerekli kılmıştır. Bu yüzden; püskürtme malzemelerin dökülmeden üniform bir dağılım göstermesi, kolaylıkla sabit astardan sıyrılabilmesi ve yeterli derecede termal yalıtkanlık sağlaması, değiştirilebilir refrakter olarak kullanılan püskürtülebilir refrakter astarını önemli bir yöntem haline getirmiştir (10). Genel olarak bazik tandış astarın birçok farklı şartları sağlaması arzu edilmektedir (27). Bunlar aşağıda verilmiştir.

- Sıvı çeliğe karşı direnç (Yüksek ergime sıcaklığı)
- Tandış cürufuna karşı direnç
- Düşük ısı iletkenliği
- Kararlılık
- Isıl şoka yüksek dayanım
- Isı ve sabit astara karşı kimyasal olarak dengeli olmak
- Püskürtülebilirlik
- Kullanımdan sonra boşaltılabilir olması
- Uygun maliyet

Sabit astar malzemeleri çok yüksek sıcaklık dayanımına sahip olmalarına rağmen ergimiş metal işlemleri süresince çok sayıda ısınma-soğuma döngüsüne sahiptirler ve sıvı metalle doğrudan temas halindedirler. Dolayısıyla aşınma ve beklenen özelliklerini kaybetmemeleri için belli bir kullanımdan sonra değiştirilmektedir. Bu ise oldukça pahalı, zaman alıcı ve zor bir işlemdir. Bu yüzden kolayca değiştirilebilir refrakter astar malzemeleri sabit tuğla astar üzerine püskürtülmek suretiyle kaplanır (10,11). Püskürtme ve sabit astarların termal genleşme katsayıları, püskürtme astarının değiştirilebilmesi ve ömrü açısından önemlidir. Termal genleşme katsayılarındaki fark arttığında püskürtme astarın değiştirilmesi kolaylaşmaktadır. Bununla birlikte kullanım ömrü azalmaktadır. Bu sebeple astarların planlanması ve üretilmesi sırasında optimum değiştirme-kullanım ömrü ilişkisinin sağlanmasına

dikkat edilmesi gerekmektedir (10). Püskürtme astar içerisinde alkali oksit (Na_2O , K_2O) miktarının yüksek olması püskürtme ve sabit tuğla astar arasında alkali oksit miktarını daha da arttıracak şekilde bir reaksiyona sebep olabilmektedir. Alkali oksit miktarı testere dişine benzer dalgalı şekilde arayüzeyden her iki astarın içlerine doğru nüfuz ederek artmaktadır. Bu oluşum iki astar arasında kaynaklanma ve mekanik tutunma sağlayarak ayrılma için gerekli gücü arttırmaktadır. Bu işe püskürtme ve sabit tuğla astarın ömrünü artırmakta fakat eskiyen püskürtme astarın değiştirilmesi gerektiğinde sabit tuğla astarından sıyrılmasını zorlaştırmaktadır. Bu oluşumlar sırasında sabit tuğla-püskürtme astarı ara tabakasının termal genleşme katsayısı da artmaktadır. Bu tabakalar arasındaki genleşme farklılığı sabit astarın pul pul dökülmesiyle sonuçlanabilmekte ve püskürtme astar ile kaynayan sabit astarın parçaları metal ergiyeğin akışı süresince metal içerisine taşınmaktadır. Püskürtme astarının ideal kullanım ömrünün sağlanabilmesi için genellikle püskürtme astarındaki alkali miktarı % 0,10'dan düşük tutulmaktadır (10.11). Püskürtme astar malzemelerden en çok tercih edilenleri magnezya temeline dayalı olanlardır. Magnezya, uzun ve tekrarlanan döküm süresince sıvı çelik ve cürufun korozyif etkilerine karşı diğerlerine göre daha dayanımlıdır (9). Magnezya içeren ana bileşim suyla çözülmeyen kristal boyutlarında seçilmelidir. Püskürtme astarında magnezya miktarının yaklaşık % 50-90 arasında olması kabul edilmekle birlikte tercih edilen miktar en az % 83'dür (9-11). Son zamanlarda bu alandaki teknoloji bir bağlayıcı ile karıştırılıp kalıplamadan püskürtülebilen yalıtkan kompozisyon sağlamaya doğru kaymaktadır. Bağlayıcı ilavesi (% 1-5) refrakter kompozisyonu içerisindeki tozların birbiri ile daha iyi birleşmesini sağlamak için yapılmaktadır. Bağlayıcılar kil, bentonit ve küre kil gibi maddelerdir. Genellikle kil ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) tercih edilmektedir (10). Kullanılan kil yapısındaki safsızlıklara (K_2O , Na_2O , CaO) göre 1200 °C ve üzerindeki sıcaklıklarda sıvı cam faza dönüşebileceğinden kil seçiminde bu safsızlıkların göz önünde bulundurulması gerekmektedir. Ayrıca içerisindeki kimyasal bağlı suyu 600 °C gibi sıcaklıklarda kaybolmaktadır. Kilin ısı karşısındaki davranışı aşağıda "Eş.2.1-2.5"de ifade edilmektedir (32).





Kompozisyonun yoğunluğunu kontrol etmek için yoğunluğu en aza indiren malzemeler yaklaşık % 0,1-6 arasında ilave edilmektedir. Bunlar organik içerikli fiberlerdir. Bu fiberler kağıt (kaba-ince), seramik, cam, veya kaya yünüdür. Tercih edilen kalın kağıt fiberler, ince kağıt fiberler veya cam fiberlerdir. Bu fiberler 0.5-20 mm boyutundadır. Fiberlerin kullanılması ile yoğunluk % 10 dolayında azalmaktadır. Aynı zamanda kompozisyona sertleştirici (hegzametilen tetraamin vb.) malzemelerde ilave edilmektedir (10,11). Ayrıca püskürtme uygulamalarını kolaylaştırmak için kompozisyon içerisine su ilave edilir. Püskürtülebilir refrakter malzemeler yaklaşık olarak % 20-30 su içerirler. Böylelikle püskürtme tabancası içerisine karıştığı zaman püskürtme işlemine imkan vermektedir (10).

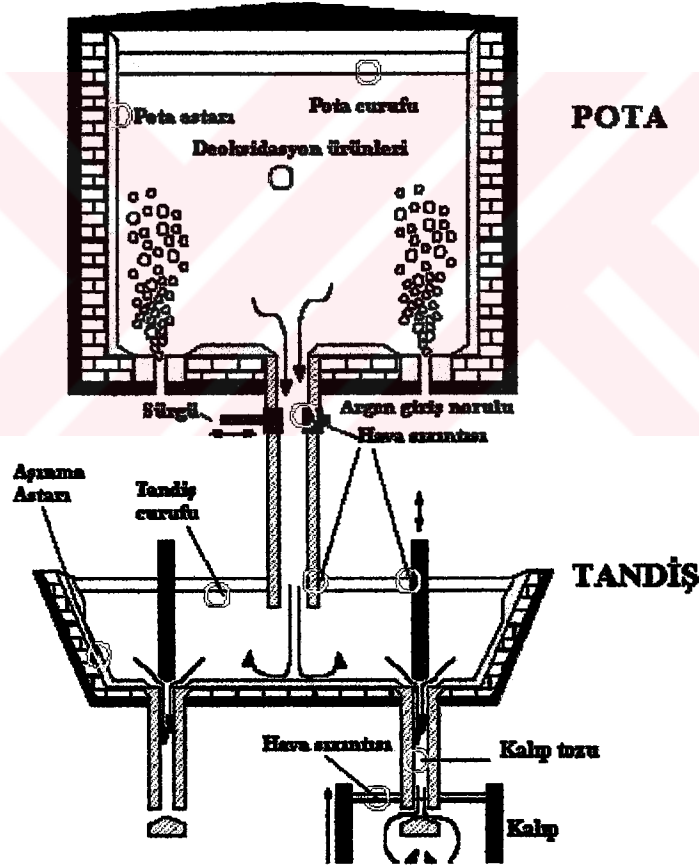
3.7. Sürekli Dökümde Metal Olmayan İnküzyonlar

Metal olmayan inküzyonlar katılaşmanın her safhasında oluşabilir ve ürünün mekanik, işlenebilirlik ve yorulma özelliklerinde güçlü bir etkiye sahiptir. Bu yüzden metal olmayan inküzyonların kontrolü modern çelik üreticilerinin temel problemlerinden bir tanesidir (27). Sürekli döküm ile üretilen çeliklerde görülebilecek metalik olmayan inküzyonlar aşağıda belirtilmiştir.

- Deoksidasyon ürünleri
- Reoksidasyon ürünleri
- Refrakter aşınması
- Cüruf taşınması

Deoksidasyon ürünleri potada çelik söndürülmesi işlemleri esnasında oluşur. Oluşan

oksit partikülleri küçüktür, pota ve tandiş cürufu ile emilmesi gerekir. Reoksidasyon ürünleri ise atmosferik oksijenden, pota ve astar malzemelerinden veya cüruf tarafından ergiyik bileşenlerinden oluşmaktadır (27). Özellikle oksitlenmeye karşı aktif olan alüminyum gibi elementler çabukça atmosferden oksitlenmektedir. Alaşım elementleri tandiş ve pota içerisindeki cürufu ve refrakter astarın bileşimini azalttığı zaman reoksidasyon meydana gelmektedir. Refrakter malzemelerin erozyonu aynı zamanda metalik olmayan inklüzyonların şekillenmesine sebep olmaktadır. Sürekli dökümde sıvı metale, metal olmayan inklüzyonların geçiş bölgeleri Şekil 3.4'de görülmektedir.



Şekil 3.4. Sürekli dökümde sıvı metale inklüzyonların geçiş bölgeleri (27).

Özellikle inklüzyonlar tandiş ve potada döküm sonuna doğru çeliğe geçmektedir. Inklüzyonlar ayrıca çeliğin katılaşması süresince değişik formlarda oluşabilir. Inklüzyonların çeliğe girişini engellemek için birkaç teknik uygulanır. Potadaki

ergiyik; pota cürufundaki oksitlerin absorbsiyonunu güçlendirmek için aktif olmayan argon gazı ile karıştırılır. Bu, ergiyiğin atmosferik oksijenle irtibatını kesen cürufun görevidir ve aşırı ısı kaybını önler. Koruyucu tüp ise potadan tandişe akan çeliği korumak için kullanılır. Koruma tüpü, tıkaç çubuğu ve nozul gibi sürekli döküm işleminin birçok parçası atmosferik oksijenle ergiyiğin temasını pozitif basınç sağlamak suretiyle engellemek için argon gazıyla temizlenmektedir. Bu nedenle oksijen girişi engellenir. İnklüzyonların kompozisyonu ve dağılımının sonuç ürünün kalitesine zararlı olan etkisini minimize etmek için çelik akışı optimize edilir. Ayrıca ergiyik çeliğin atağına karşı direncini artırmak için refrakter malzemelerin optimize edilmesi gerekmektedir (27).

3.8. Sürekli Dökümde Arayüzey İlişkileri

Çeliğin yapımında ve dökümünde arayüzey ilişkilerini anlamak için, sıvı çelik-refrakter astar arasındaki ıslatma açılarını, yüzey gerilimlerini, çeşitli oksit inklüzyonlarını ve bu malzemelerin yüzey özelliklerini tam olarak belirlemek gerekmektedir (33,34). Ayrıca refrakter malzemelerin fırın ortamında gaz, cüruf ve sıvı metalle yaptıkları reaksiyonların iyi anlaşılması bunların olumsuz etkisinin giderilmesine yardımcı olmaktadır.

Bir refrakter malzemenin sıvı metale karşı direnci, gaz ve buhar fazı da dahil olmak üzere, her türlü kimyasal etkileşime karşı mukavemetini belirlemektedir. Bir metal ergiyiği ile yüksek ergime sıcaklığına sahip olan katı madde veya malzeme yüzeyi arasındaki temas sırasında birçok fiziksel ve kimyasal etkileşimler meydana gelmektedir. Refrakter astar ile temas eden aşındırıcı bileşiklerin kimyasal bileşimleri çok farklı olup, buna bağlı olarak korozyon işlemleri de farklılık göstermektedir (35). Katı madde yüzeylerinin sıvı metaller ile ıslatılabilirlik derecesini ölçme, malzeme çiftleri arasındaki etkileşim ve adezyon gücünü belirlemekle mümkün olmaktadır. Genellikle ıslatma; katı faz içindeki küçük bölgelerin geçiş yerleri ve kanalları (kapiler), çukurlar ve katı fazın düzenli bir şekilde dağıldığı denge, yüzeyler arası fazların geliştirilmesiyle karakterize edilmektedir (13).

3.9. Refrakter Astar Korozyonu

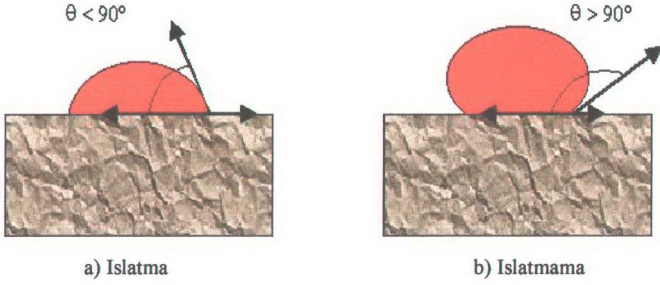
Sıvı çelik/refrakter malzeme etkileşiminde arayüzeyde üç çeşit korozyon gerçekleşmektedir (28). Bunlar;

- Sıvı çelik ile refrakter arasında meydana gelen reaksiyonlar sonucu arayüzeyde ince bir tabaka oluşmaktadır. Oluşan bu tabaka, refrakter astar duvarındaki çözünmeyi daha da hızlandırmaktadır.
- Sıvı çelik-refrakter reaksiyonu sonucu arayüzeyde oluşan yüksek viskoziteye sahip tabaka, çeliğin yayınmasını yavaşlatıcı etkide bulunmaktadır.
- Sıvı çelik-refrakter arasındaki reaksiyon son derece yavaş ilerleyebilmektedir. Sıvı çelik ancak gözeneklerdeki basıncın etkisiyle, refrakter içinde yayınmaktadır. Ancak bu arada çözünen refrakterin, çeliğin viskozitesini düşürmesi ve arayüzey gerilimini yükseltmesiyle yayınma hızlanmaktadır.

Refrakter-sıvı çelik etkileşimi genel olarak refrakter malzemenin ve çeliğin bileşimi, sıvı çeliğin viskozitesi ve ortamın sıcaklığı gibi parametrelere bağlı olarak değişebilmektedir. Ayrıca kimyasal karakter olarak ele alındığında, bazik karakterli refrakterlerin, bazik esaslı cüruflara ve asidik refrakterlerin de asidik esaslı cüruflara daha dirençli oldukları bilinmektedir (28,36).

3.9.1. Islatma

Refrakterlerin çelik ile etkileşiminde ilk aşama, refrakterin çelik tarafından ıslanabilme özelliğidir. Islatma açısının 90° 'den küçük olduğu durumda, çelik refrakter üzerinde yayılma gösterir ve refrakteri ıslatır. Sıvı çelik korozyonunun gerçekleşmesi için önce bu ıslanmanın meydana gelmesi gerekmektedir ki; genelde sıvı-katı sistemlerinde böyle bir durum gözlenmektedir. Eğer ıslatma açısı 90° den büyükse; çelik, refrakter yüzeyi üzerinde damlalar şeklinde kalacak ve ıslanma olayı meydana gelmeyecek yani refrakter korozyonu az oranda gerçekleşecektir (28,36). Farklı temas açılarının şematik gösterimi Şekil 3.5.'de görülmektedir.



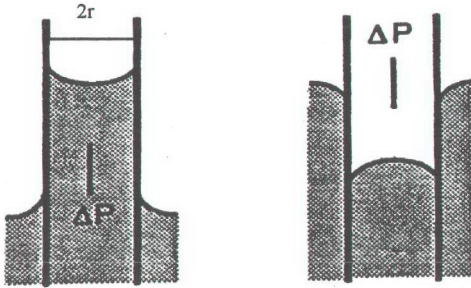
Şekil 3.5. Farklı temas açılarının şematik gösterimi

3.9.2. Sıvı çeliğin gözeneklere dolması

Sıvı-katı ıslatma kabiliyeti ile ilgili bölümde, tek bir yüzey üzerinde yayılan sıvı damlası ile ilgili eşitlikler üzerinde durulmuştur. Fakat refrakter taneleri arasında daima iki yüzey vardır. Eğer sıvı çeliğin ıslatma açısı (θ), 90° 'den küçük olursa, yüzey enerjisi pozitif bir kapiler basınç etkisiyle artacaktır. Birbirine paralel ve dik pozisyonda, aralarında $2r$ mesafesi kadar bir aralık olan kılcal boru düşünelim (Şekil 3.6).

$$\theta < 90 = \Delta P > 0 \text{ (ıslatma)}$$

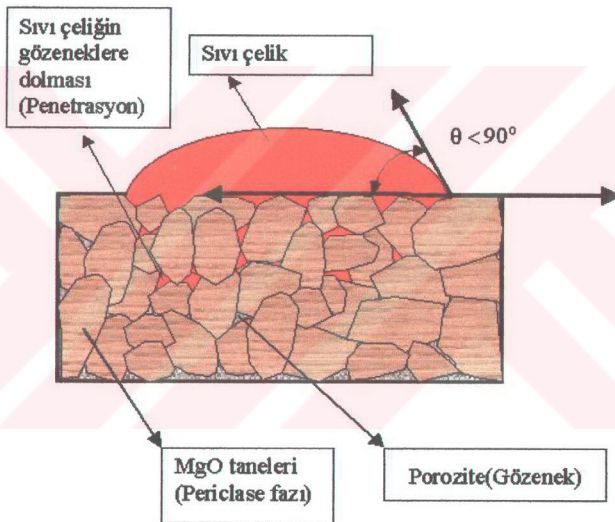
$$\theta > 90 = \Delta P < 0 \text{ (ıslatmama)}$$



$$\Delta P = (2/r)\gamma_{sg} \cos \theta$$

Şekil 3.6. Kapiler etki (17).

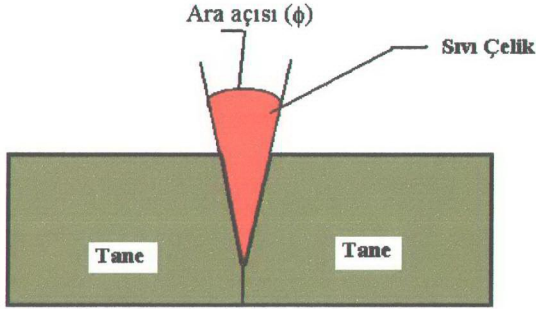
Bu kılcal boru sıvı içerisinde daldırılırsa bir kapiler kuvvet meydana gelir. Bu kapiler kuvvet altında sıvı belirli bir mesafeye kadar yükselecektir. Şekil 3.6'da belirtilen kapiler etki ile çelik-refrakter arayüzeyinde ıslanma gerçekleştikten sonra, sıvı çelik refrakterin yüzeyindeki açık gözeneklerden içeriye sızmaya başlamaktadır. Bu aşamada, refrakterin açık gözenek yüzdesi önemli rol oynar ve açık gözenek miktarı azaldıkça çelik etkileşimine direnç artar (27,36). Şekil 3.7'de refrakter malzemelerde gözeneklere sıvı çeliğin dolması görülmektedir.



Şekil 3.7. Refrakter malzeme gözeneklerine sıvı çelik dolmasının şematik gösterimi

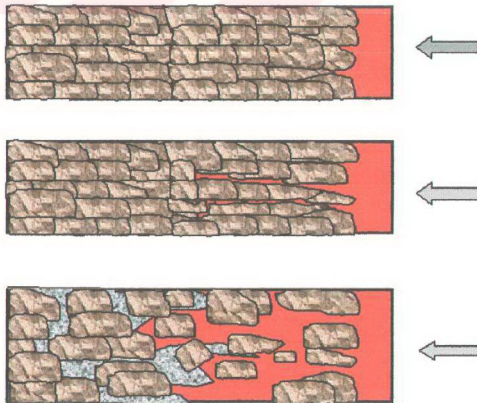
3.9.3. Sıvı çeliğin refrakter taneleri korozyonu

Refrakter korozyonunda, birbirlerine komşu iki refrakter tanesinin arasındaki açı belirleyici olmaktadır (Şekil 3.8). Ara açısı (ϕ) küçüldükçe tanelerin çelik ile teması artacaktır. Ara açısının 0° 'ye yaklaşması durumunda, çelik iki tane arasına ince bir tabaka halinde girmiş olacak (Şekil 3.9) ve taneleri hızla birbirinden ayıracaktır (28,36).



Şekil 3.8. Refrakter taneleri arasındaki açının (ϕ) şematik olarak gösterimi (36)

Refrakterlerin sıvı metal ile korozyonunu etkileyen parametrelerin başında sıcaklık gelmektedir. Sıcaklığın yükselmesi, çeliğin viskozitesini düşürmesinin yanı sıra reaksiyonun hızını artırarak etkileşimin hızlanmasına neden olmaktadır. Sıvı metalin kimyasal bileşiminin refrakter aşınmasında önemli bir yeri vardır. Aynı zamanda refrakterin ergime sıcaklığını, ötektik noktaya doğru düşürecek bileşimler ve bünyede bulunan cüruf fazı etkisi yapan diğer oksitlerin miktarları refrakter aşınmasını olumsuz yönde etkilemektedir(36).



Şekil 3.9. Sıvı çeliğin refrakter taneleri arasına sızması (37)

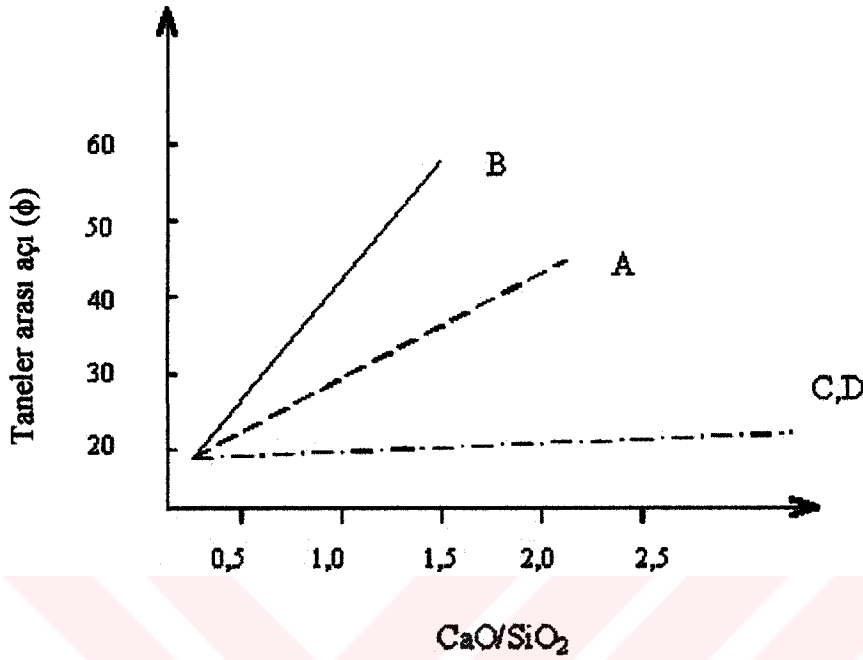
Ayrıca bazik refrakterlerde MgO'in dışında, CaO ve SiO₂'in yapı içindeki miktarı ve dağılımı oluşacak ikinci fazı, dolayısıyla refrakterliği etkilemektedir. Özellikle SiO₂ miktarının artışı ile cam fazın oluşumu kolaylaşmakta ve bu fazın ergime sıcaklığı refrakter içerisindeki safsızlıklara (Na₂O, K₂O) göre 1200 °C'ye kadar düşebilmektedir (2,32). Sinter manyezitte (CaO/SiO₂) oranının 2/1 olması ve serbest CaO'in hidrasyon eğilimi yüksek olduğu için CaO'in serbest halde bulunmaması istenir (2,3). Sinterin refrakterlik özelliği bu safsızlıkların oluşturduğu minerolojik yapıya göre az veya çok düşer. Magnezya haricinde sinterin minerolojik yapısında CaO/SiO₂ oranı etkilidir (Çizelge 3.2).

Çizelge 3.2. CaO / SiO₂ oranına göre oluşan silikat bileşimleri
(C= CaO, M= MgO, S= SiO₂)

CaO/SiO ₂	Minerolojik yapı	Ergime sıcaklığı (°C)
0.94	Forstesit M ₂ S	1890
=0.94	Monticellit CMS	1495
0.94-1.47	Monticellit CMS	1495
	Monticellit CMS	1495
	Mervinit C ₃ MS ₂	1575
=1.47	Mervinit C ₃ MS ₂	1575
1.47-1.87	Mervinit C ₃ MS ₂	1575
	Dikalsiyumsilikat C ₂ S	2130
=1.87	Dikalsiyumsilikat C ₂ S	2130
1.87-3	Dikalsiyumsilikat C ₂ S	2130
	Trikalsiyumsilikat C ₃ S	2140
3	Trikalsiyumsilikat C ₃ S	2140
3	Trikalsiyumsilikat C ₃ S	2140
	Serbest Kireç CaO	2570

Sinter manyezitte magnezyanın (MgO) yanında oluşacak mineralin dikalsiyumsilikat (C₂S) olması tercih edilir. Zira C₂S (2CaO.SiO₂) yüksek sıcaklıklarda sıvı çelik ve cüruf atağına dayanıklı ve 2130 °C'de ergiyen kararlı bir bileşiktir.

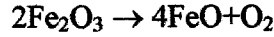
Sinter manyezitin kalitesinin değerlendirilmesinde saflığın yanı sıra fiziksel özellikler de göz önüne alınır. Kaliteli bir sinterin yoğunluğu yüksek, gözenekliliği düşük olmalıdır. Ayrıca tanelerin büyük olması, manyezitin kimyasal kararlılığını artırır. Bazik refrakterlerde CaO/SiO₂ oranının ara açısına etkisi Şekil 3.10'da gösterilmiştir.



Şekil 3.10. Bazik refrakterlerde CaO/SiO₂ mol oranının taneler arası açıya etkisi (36).

Saf magnezit refrakteri gösteren A eğrisine göre CaO/SiO₂ oranı arttıkça, ara açısı (ϕ) yükselmekte, yani malzemenin sıvı metal etkileşimine direnci artmaktadır. % 5 Cr₂O₃ ilavesini gösteren B eğrisinde ise ϕ açısı daha hızlı yükselmektedir. Bir başka ifade ile Cr₂O₃ katkısı korozyon direncini yükseltmektedir. Buna karşılık % 5 Al₂O₃ veya Fe₂O₃ ilavelerinin ϕ açısını düşürücü etkisini gösteren C, D eğrisi ise bünyede bulunacak bu oksitlerin refrakter direncini olumsuz yönde etkilediğini göstermektedir (36,37).

Williams ve arkadaşları (38) refrakter erozyonuna sebep olan demir ve manganez oksitle ilgili yaptıkları çalışmada Fe₂O₃'ün yüksek sıcaklıklarda dengesiz olduğunu belirtmişlerdir. Yapılan araştırmada Fe₂O₃'ün yüksek sıcaklıkta (1450 °C) reaksiyon "Eş. 3.6" ile FeO şekline dönüştüğü ifade edilmiştir. Meydana gelen bu reaksiyonun sıvı çeliğin refrakter korozyonunu kolaylaştırdığı vurgulanmıştır (38).



[3.6]

Refrakter korozyonu ve inklüzyonlarla ilgili olarak Cramb ve Jimbo (33), sürekli dökümde kalıp ve tandiş içerisindeki oluşan çelik-cüruf-refrakter astar arayüzeyindeki aşınma, inklüzyonların taşınması ve inklüzyonların meydana gelip büyümesine yol açan arayüzey faktörleri ve onların döküm kalitesine etkisini araştırmışlardır. Sürekli döküm süresince uzaklaşan inklüzyonun sıvı çelik-refrakter ve sıvı çelik-cüruf arayüzeylerinde meydana geldiğini ifade etmişlerdir

Çelikte oksit giderme kontrolü, çelik içerisindeki inklüzyonların hacmini azaltmakla kalmayıp aynı zamanda arayüzeydeki inklüzyonların ayrılmasına izin verir. Sıvı cüruf inklüzyonları katı inklüzyonlardan daha yavaş bir hızda cüruf-metal arayüzeyine yayılmaktadır. Bu yüzden sıvı cüruf tandiştan kalıp içersine girerse muhtemelen meydana gelen hatalardan kaçınmak güçleşmektedir. Verilmiş olan uygun arayüzey şartlarında, arayüzeyde inklüzyonların kararlı olma eğilimi vardır. Eğer inklüzyon cüruf içerisinde çözünebilirse bu cüruf tabakası çelikten inklüzyonların tamamen ayrılmasını sağlar. Fakat bu durum nozulun tıkanmasına yol açmaktadır. Ancak, nozulun tıkanması seramik bir filtre kullanılarak çeliğin süzülmesi ile önlenabilmektedir (33).

3.10. Çeşitli Refrakter Malzemelerin Demir Esaslı Ergiyiklerle İslanabilirliği Çalışmaları

Literatürde, Cramb ve Jimbo (33), Mukai (39), Nakashimo ve Mori (40) çeşitli refrakter malzemelerin çelik ergiyiklerle ıslanabilirliğinin literatür taramasını yapmışlardır. Literatür taraması sonuçları Çizelge 3.3’de görölmektedir.

Çizelge 3.3. Sıvı çelikle temas halindeki refrakter malzemeler

Refrakter	Sıvı çelik	Sıcaklık °C	Islatma açısı (θ°)
%98 Al ₂ O ₃	%0.4 C	1520	105
Al ₂ O ₃	Saf	1600	144
Al ₂ O ₃	%3.4 C	1600	112
Al ₂ O ₃	Saf	1600	135
SiO ₂	Saf	1600	115
SiO ₂	Saf	1550	110
CaO	Saf	1600	132
CaO	Saf	1550	121
TiO ₂	Saf	1600	84
Cr ₂ O ₃	Saf	1600	88
%89 ZrO ₂	%0.16 C	1520	106
ZrO ₂	Saf	1550	119
ZrO ₂	Saf	1550	122
%95 MgO	%0.16 C	1520	111
MgO	Saf	1600	125
MgO	Saf	1550	128
MnO	Saf	1550	113
%91 SiC	%0.16 C	1500	60
Grafit	%0.16 C	1460	120
TiN	Saf	1550	132
BN	Saf	1550	112
CaS	Saf	1550	87
CaO MgO SiO ₂	Cr-Ni'li çelik	1450	104-120
CaO SiO ₂ Al ₂ O ₃	Cr-Ni'li çelik	1450	96-114

Bu raporlara göre; sıvı çelik ile Zirkonyum oksit (ZrO₂), Magnezyum oksit (MgO), Alüminyum oksit (Al₂O₃), Kalsiyum oksit (CaO) ve Silisyum oksit (SiO₂) temas halindeyken ıslanmamaktadır. Fakat sıvı çelik, Titanyum oksit (TiO₂), Krom oksit (Cr₂O₃), Bor nitrür (BN), Silisyum karbür (SiC) ve Kalsiyum sülfürü (CaS) ıslatmaktadır. Ayrıca yukarıda ifade edilen değişik refrakter sistemleri ile ilişkili olarak son 30 yıldan şimdiye kadar birçok çalışma yapılmıştır.

Pitak ve arkadaşları (41) alümina silikat refrakterlerin % 4,8 C'lu dökme demirle ıslanabilirliğini incelemişlerdir. Çalışmalarda alümina silikat refrakter kompozisyonunun, sıcaklığın ve refrakter gözenekliliğinin değişimine göre ıslatma açıları tespit edilmiştir. Sıvı damla metodu ile belirlenen ıslatma açısı (θ)'ın ölçümünde, vakum sistemi, inert gaz besleyici, güç kaynağı ve damlaların fotoğrafının çekilmesi için gerekli ünitelerin bulunduğu bir yüksek sıcaklık fırını kullanılmış ve deneyler vakum ortamında (10⁻³mm Hg)'de yapılmıştır. Sıcaklığın

1140 °C'den 1500 °C'ye artışı refrakterlerin ergimiş dökme demirle ıslanabilirliğinin artmasına sebep olmuştur. Bu artışın refrakterdeki sıvı fazın kimyasal aktivitesinin artmasıyla oluştuğu belirtilmiştir. Refrakterlerin açık gözenekliliğinin %8'den %16'ya artması ıslatma açısında azalmaya (1350 °C'de $\theta=122^\circ$ 'den $\theta=108^\circ$ 'ye ve 1500 °C'de $\theta=119^\circ$ 'den $\theta=102^\circ$ 'ye) sebep olmuştur. Dökme demirin en büyük ıslatma açısı (θ) yüksek yoğunluklu mullit ve minimum cam fazı içeren refrakterler üzerinde oluşmuştur. Alümina silikat refrakterler üzerinde ergimiş dökme demirin ıslatma açısının büyüklüğünün altlık malzemenin yapısına, faz kompozisyonuna, katı ve ergimiş malzemenin fiziksel ve kimyasal özelliklerine bağlı olduğu belirtilmiştir.

Usatikov ve arkadaşları (42) 10kp ve 00Kh18N10 olarak tanımladıkları sade karbonlu ve Krom-Nikelli iki farklı ergimiş çelik tarafından alümina silikat refrakterlerin ıslatılabilirliğini araştırmışlardır. Çalışmalarda alümina silikat refrakter kompozisyonunun ve sıcaklığın değişimine göre ıslatma açıları (θ) tespit edilmiştir. ıslatma açısı (θ) tespiti, sıvı damla metodu ile belirlenmiş ve deneyler difüzyon tipi vakum pompası ile 10^{-4} mm Hg vakumda yapılmıştır. Deneylerde sade karbonlu çelik ve paslanmaz çeliğin ıslatma açıları 1490-1620 °C sıcaklık aralığında ölçülmüştür. Alümina silikat refrakterlerin Al_2O_3 içeriği %72 – 95 arasında değiştirilmiş ve gözenek miktarı %5'in altında tutulmuştur. 1500 °C'de yapılan deneylerde alümina silikattaki Al_2O_3 artışı, (%72'den %95'e) sade karbonlu çeliğin ıslatma açısında 22° 'lik bir artışa (alümina silikat refrakter için $\theta=126^\circ$, korondum refrakter için $\theta=148^\circ$) sebep olmuştur. Refrakter içerisindeki korondum, mullit ve cam fazının miktarlarının bu açı değişikliklerine sebep olduğu belirtilmiştir. Yüksek sıcaklıklarda ise (1620 °C) bütün numunelerde ıslatma açısı $\theta=113^\circ$ ile $\theta=118^\circ$ arasında olmuştur. Bu düşüşe sebep olarak, sıcaklığın artması ile refrakter taneleri arasındaki bağın zayıflaması ve yapışma işinin (adezyon) artması gösterilmiştir. Ayrıca Krom-Nikelli sıvı çelik, refrakterleri, sade karbonlu çeliklerden daha çok ıslatmıştır. Bu durum, paslanmaz çeliğin içindeki alaşım elementlerinden krom ve nikelin çeliğin kimyasal aktivasyonunu artırması ile açıklanmıştır. Bunun yanı sıra mullit-korondum ve Korondum (Al_2O_3)'a az miktarda ilave edilen MgO , Cr_2O_3 ve

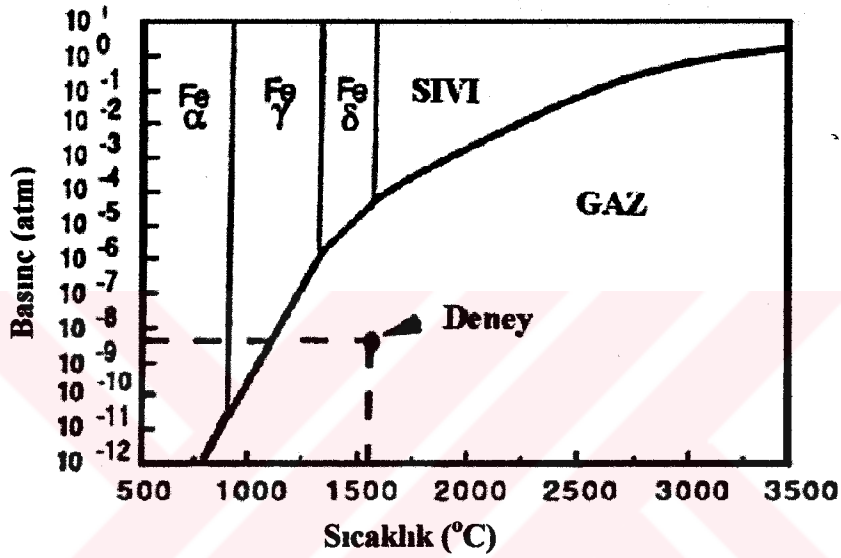
ZrSiO₄'in ıslatma açısının 7° ila 10° artışına sebep olmuştur. Bu ilaveler refrakterin termal şok direncini ve yoğunluğunu artırdığı için korozyon direnci de artmıştır.

Materikin ve arkadaşları (43) kh18N9 ve çelik 20 olarak tanımladıkları sırasıyla %0,011 S - %0,007 P - %0,0046 O ve %0,009 S - %0,012 P - %0,011 O bileşimine sahip iki farklı çelik tarafından farklı kompozisyonlardaki alümina silikat refrakterin ıslatılabilirliğini araştırmışlardır. Islatma açısı (θ), 1450–1550 °C sıcaklık aralığında %99,997 saflıktaki argon gazı ortamında sıvı damla metodu ile tespit edilmiştir. Alümina silikat refrakterlerin kh18N9 ve çelik 20 olmak üzere iki farklı bileşimdeki çeliklerle ıslanabilirliği, 1450–1550 °C aralığında ıslatma açısı %100 Al₂O₃'de $\theta=136^\circ$ iken kompozisyon içerisindeki SiO₂ miktarının artması ile $\theta=92^\circ$ 'ye kadar azaldığını tespit etmişlerdir. Islatma açısındaki bu azalmanın sebebini refrakterin içindeki cam fazı miktarının artması ve kimyasal olarak reaktif olmasına bağlamışlardır.

Prokof'eva ve arkadaşları (44) %0,33 C'li St35 çeliği ile alümina silikat refrakterlerin ıslatılabilirliğini 1550 °C'de argon gazı ortamında sıvı damla metodu ile belirlemişlerdir. Çalışmalarda alümina silikat refrakterlerin kompozisyonundaki değişime göre ıslatma açıları (θ) tespit edilmiştir. Islatma açısı (θ), refrakterin faz kompozisyonuna bağlı olarak değişim göstermiştir. Yapıda %1-7 korondum ve yüksek miktarda mullit fazı içeren refrakterin ıslatma açısı $\theta=115^\circ$ olurken, yapı içerisindeki cam fazın miktarının artması ile ıslatma açısı $\theta=91^\circ$ 'ye kadar düşmüştür. Bu sonuçlara bağlı olarak çelik döküm için mullit refrakterleri kullanmadan önce üretim şartlarının araştırılması gereği vurgulanmıştır.

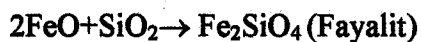
Stefanescu ve arkadaşları (45) farklı tipteki (monolitik kuartz, silika kum, zirkon kum ve kum+bentonit) döküm kumlarını farklı alaşım tiplerine sahip (saf demir, Fe-%3,7 C ötektiği, Fe-%4.02 C-%1.37 Si ötektiği, FeO ve Fe₂SiO₄) demir ve alaşımları tarafından ıslatılabilirliğini araştırmışlardır. Araştırmada ıslatma açısını (θ), sıvı damla metodu ile atmosfer kontrollü bir fırın yardımı ile belirlemişlerdir. Çalışmalar yüksek saflıktaki argon ve vakum ortamında yapılmıştır. Yüksek saflıktaki

(%99,93 Fe) demir, yüksek vakum ortamında 4×10^{-8} atm. basınçta monolitik kuvarsi ıslatmıştır ($\theta=85^\circ$). Ayrıca bu saflıktaki demir 4×10^{-8} atm. basıncında ergime sıcaklığına (1538°C 'de) ulaşıldığında buharlaşmaya başlamıştır ve deney süresince buharlaşma devam etmiştir. Demirin buharlaşması ile ilgili basınç-sıcaklık diyagramı Şekil 3.11'de görülmektedir.



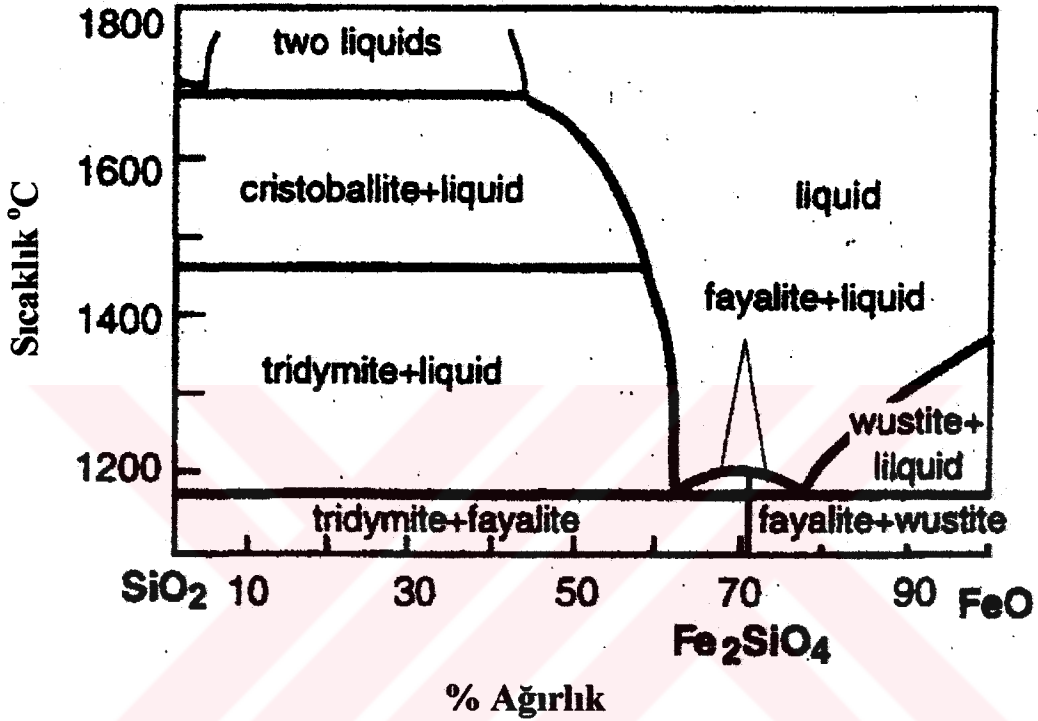
Şekil 3.11. Saf demirin basınç-sıcaklık denge diyagramı (45).

Demir-karbon alaşımları monolitik kuartz, silika kum ve zirkon kumunu ıslatmamıştır. Silika kumlarındaki azalan toz tane boyutu ile demir-karbon alaşımlarının ıslatma açıları ($\theta=120^\circ$ 'den $\theta=140^\circ$ 'ye) artış tespit edilmiştir. Demir-karbon-silisyum alaşımları da demir-karbon alaşımları gibi aynı davranışı göstermiştir. Demir-karbon alaşımlarına ilave edilen silisyum farklı döküm kumları üzerindeki ıslatma açısını etkilememiştir. Ayrıca altlık malzeme olarak silika ve zirkon kumu kullanıldığında FeO güçlü bir ıslatma davranışı göstererek altlık içerisine doğru nüfuz etmiştir. Monolitik cam ve SiO_2 üzerine FeO, hem vakum hem de argon gazı ortamında reaksiyona girerek ıslatma davranışı göstermiştir. Altlık malzemelerle FeO arayüzeyinde ergime başlangıcında "Eş. 3.7"deki reaksiyon gerçekleşerek fayalit oluşmaktadır.



[3.7]

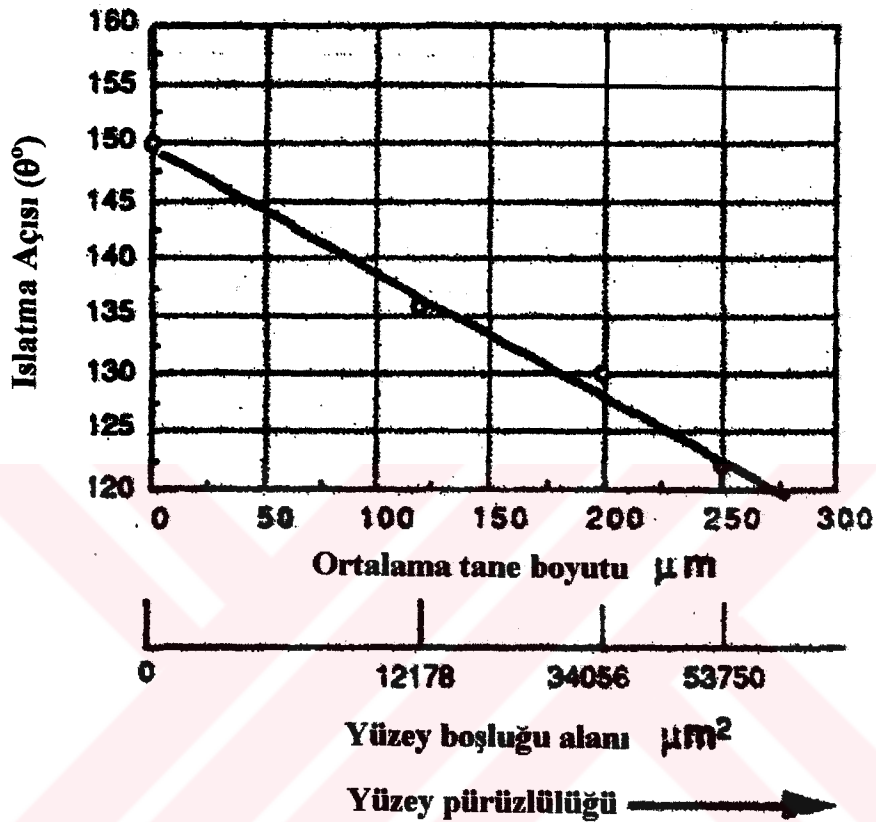
Reaksiyon sonucunda oluşan fayalit düşük sıcaklıkta 1200 C°'de ergimektedir. Fayalit, Şekil 3.12'de SiO₂-FeO denge diyagramından da görüldüğü gibi çeliğin katılaşması sonrasında dahi sıvı haldedir.



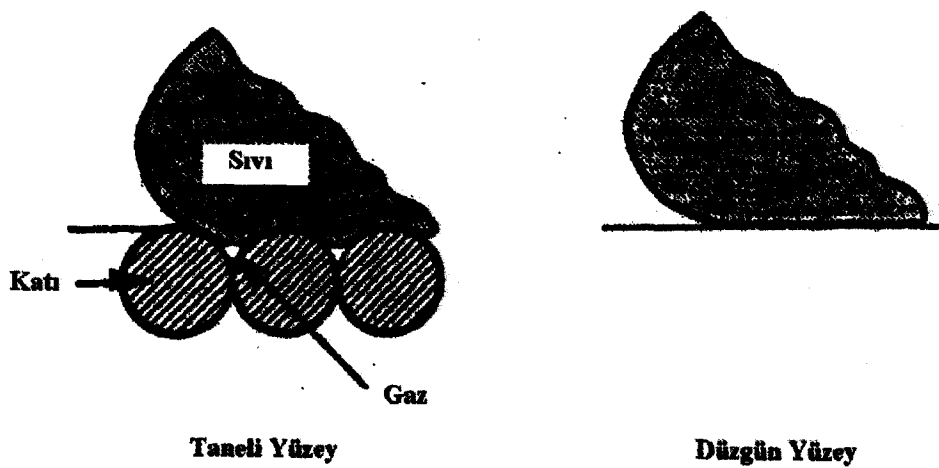
Şekil 3.12. SiO₂-FeO denge diyagramı (45).

Giese ve arkadaşları (46) yukarıda Stefanescu ve arkadaşlarının (45) yaptığı araştırmalara ek olarak sıcaklık değişimini, monolitik kuars toz tane boyutunu ve Fe-C-Si alaşımına ilave edilen Mn, P, S ve Mg elementlerinin ıslatma açılarını etkilerini araştırmışlardır. Fe-C-Si alaşımının silika kumu ile yaptığı ıslatma açısı çalışması sonucunda artan sıcaklıkla birlikte ıslatma açısında düşüş (1200 °C'de $\theta=132^\circ$ ve 1550 °C'de $\theta=122^\circ$) belirlenmiştir. Silika kumun toz tane büyüklüğü arttıkça Fe-C-Si alaşımının ıslatma açısında azalma tespit edilmiştir. 1240 °C'de Fe-C-Si/Silika sisteminde silika kumun toz tane büyüklüğünün ıslatma açısına etkisi Şekil 3.13'de görülmektedir. Islatma açısındaki azalmanın sebebini Şekil 3.14'de görüldüğü gibi düzgün yüzeyden taneli yüzeye geçişte katı-sıvı arayüzey alanının artması ile birlikte yapışma işinin artmasına bağlamışlardır. Ayrıca Fe-C-Si alaşımına ilave edilen Mn,

P, S ve Mg'un ıslatma açılarını düşürdüğü tespit edilmiştir. Islatma açısındaki düşüşte en yüksek etkiyi Mg elementi sağlamıştır.



Şekil 3.13. Silika kumu toz tane büyüklüğünün ıslatma açısına etkisi (46).



Şekil 3.14. İki farklı yüzeye sahip malzemede katı-sıvı arayüzey alanı değişimi (46).

Zhukovskaya ve arkadaşları (47) korondum (Al_2O_3) refrakterlerin ergimiş çelikle (% 0,35 C) ıslatılabilirliğini araştırmışlardır. Islatma açısını (θ), sıvı damla metodu ile 1550 °C sıcaklıkta saf argon gazı ortamında tespit etmişlerdir. Çeliğin yüzey gerilimi Bashforth ve Adams tablolarından hesaplanmıştır. Araştırmada korondum'a MgO , Cr_2O_3 , ZrO_2 ve silika içeren kil ilave edilmiş ve bu ilave maddelerin oranı %1-10 arasında değiştirilmiştir. Oluşturulan refrakterin açık gözeneklilik miktarı %9-12 arasında değişmiştir. Yapılan çalışmada korondum'a MgO ilavesi yeni bir spinel (MgAl_2O_4) faz oluşturarak refrakterin ıslatılabilirliğini artırmış ($\theta=102^\circ$), ZrO_2 ve Cr_2O_3 ilavesi ıslatılabilirliği azaltmıştır (ZrO_2 ilavesi ile $\theta=120^\circ$, Cr_2O_3 ilavesi ile $\theta=145^\circ$). Korondum refrakterine %1-10 arasında silika içeren kil ilavesi ile 40 dakika temas süresinde ıslatma açısının azaldığı görülmüştür. Yapıda %9 cam faz içeren refrakterde ıslatma açısı ($\theta=145^\circ$ 'den $\theta=125^\circ$ 'ye) düşmüştür. Bu düşüşün sebebini cam fazın kimyasal olarak reaktif olmasına bağlamışlardır.

Kashcheev ve arkadaşları (48) Korondum refrakterine ilave edilen $\text{MgO}+\text{MgCr}_2\text{O}_4$ ve Fe_2O_3 ile 0,35 C'lu (35 L) çeliğinin ıslatma özelliklerini araştırmışlardır. Deneyler sıvı damla metodu ile argon atmosferinde 1550-1700 °C aralığında gerçekleştirilmiştir. 1550 °C'de yapılan deneylerde Koronduma ilave edilen $\text{MgO}+\text{MgCr}_2\text{O}_4$ 'un miktarı ile ıslatma açısı, $\theta=130^\circ$ den $\theta=148^\circ$ 'ye artmıştır. Buna sebep olarak artan $\text{MgO}+\text{MgCr}_2\text{O}_4$ 'un miktarının refrakterin sıvı metale karşı kimyasal aktivitesini azaltması ve metalle refrakter arasındaki bağı zayıflatmasını göstermişlerdir. Ayrıca artan sıcaklıkla (1550 °C'den 1700 °C'ye) birlikte ıslatma açısında 10° ile 20° aralığında azalma tespit edilmiştir. Değişen $\text{MgO}+\text{MgCr}_2\text{O}_4$ 'e %20 Fe_2O_3 ilavesi ile ıslatma açısı $\theta=128^\circ$ 'den $\theta=110^\circ$ 'ye düşmüştür. Islatma açısındaki bu azalmanın sebebini, Fe_2O_3 'in refrakter taneler arası bağı zayıflamasına ve açığa çıkan serbest oksijenin kimyasal olarak reaktif olmasına bağlamışlardır.

Kozlova ve Suvarov (49) $\text{MgO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{ZrO}_2$ refrakterlerinin %99.9 saflıktaki ergimiş çelikle ıslanabilirliğini araştırmışlardır. Islatma açısı refrakter yüzeyinde sıvı demirin oluşturduğu (θ) açısı ile ifade edilmiş ve sıvı damla metodu ile 1550 °C'de düşük saflıktaki argon atmosferinde tespit edilmiştir. Yapılan deneylerde 1550

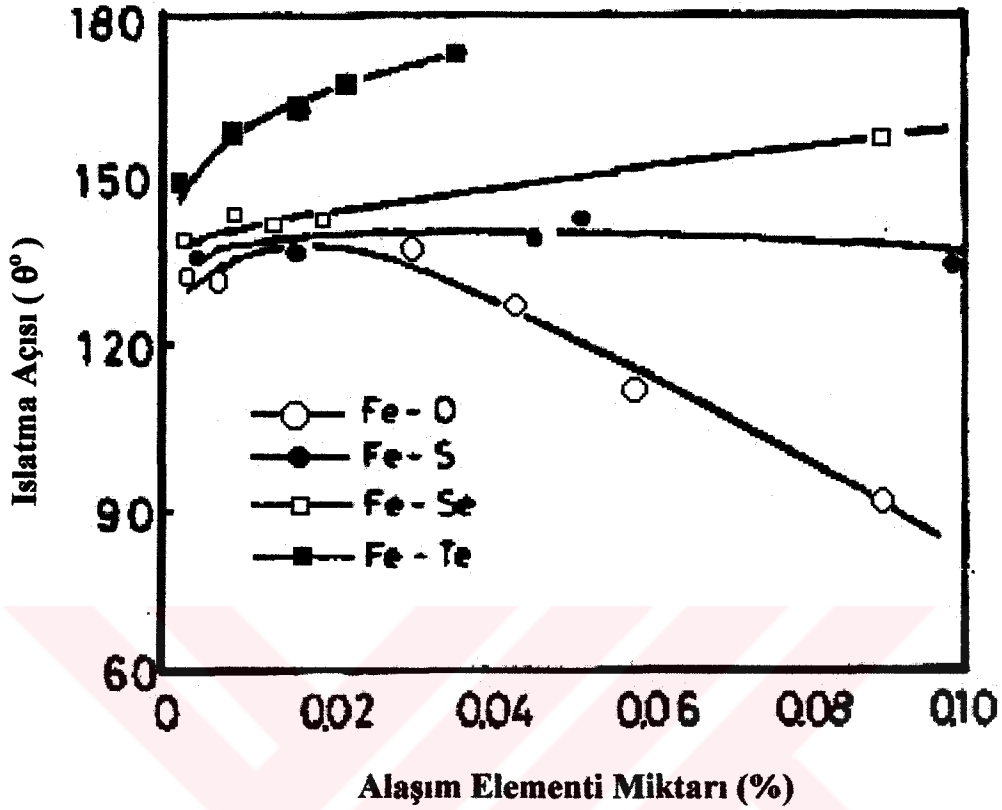
°C'de refrakter malzemeler ergiyik demir tarafından ıslatılmıştır. Korundum (Al_2O_3) refrakterlerdeki ıslatma açısı spinel (MgAl_2O_4) esaslı refrakterlerinin yaklaşık yarısı kadar olmuştur. ıslatma durumu argon atmosferi içerisindeki oksijenin miktarının fazla olmasına dayandırılarak, oksijensiz bir ortamda korundumun çelik tarafından ıslatılamadığını ifade etmişlerdir. Korundum (Al_2O_3) ve spinele (MgAl_2O_4) ilave edilen ZrO_2 , 1550 °C'de demir ergiğiyle ıslanabilirliğinin azaldığı belirtilmiştir. 1550 °C'de ıslanabilirlik %85 MgAl_2O_4 + %15 ZrO_2 kompozisyonu için en düşük değerde (85°) olmuştur. Bunun sebebinin korundum (Al_2O_3) ve spinel (MgAl_2O_4)'e ilave edilen ZrO_2 'nin refrakterin yüzey enerjisini bir miktar düşürmüş olabileceğini bildirmişlerdir.

Staronka ve arkadaşları (50) CaO-MgO-SiO_2 , $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ sistemine sahip refrakterlerin kimyasal kompozisyonu ve toz tane boyutlarında değişiklik yaparak %20 Ni %25 Cr'lu paslanmaz çelik ile ıslatma özellikleri araştırmışlardır. ıslatma açısı (θ), sıvı damla metodu ile 1550 °C sıcaklıkta saf argon gazında tespit edilmiştir. Yapılan araştırmada $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ refrakter sisteminde SiO_2 miktarı %29'u geçerken yapışma işinde artma ve ıslatma açısı (θ)'da azalma görülmüştür. CaO-MgO-SiO_2 sisteminde ise artan CaO miktarında yapışma işinde artma, ıslatma açısı (θ)'da azalma görülmüştür. $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ sisteminde yapılan faz analizlerinde temas bölgelerinde kristobalit, korundum ve mullit fazları tespit edilmiştir.

En yüksek mullit fazı, ıslatma açısı en yüksek olan ($\theta=114^\circ$) %1CaO-%19SiO₂-%80Al₂O₃ yapısında bulunmuştur. Her iki sistem için azalan toz tane boyutu ile ıslatma açısında artma tespit edilmiştir. $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ sisteminde toz tane boyutunun azalması ile ıslatma açıları ($\theta=96^\circ$ 'den $\theta=114^\circ$ 'ye) artmıştır. CaO-MgO-SiO_2 sisteminde ise toz tane boyutunun azalması ile ıslatma açıları ($\theta=104^\circ$ 'den $\theta=120^\circ$ 'ye) artmıştır.

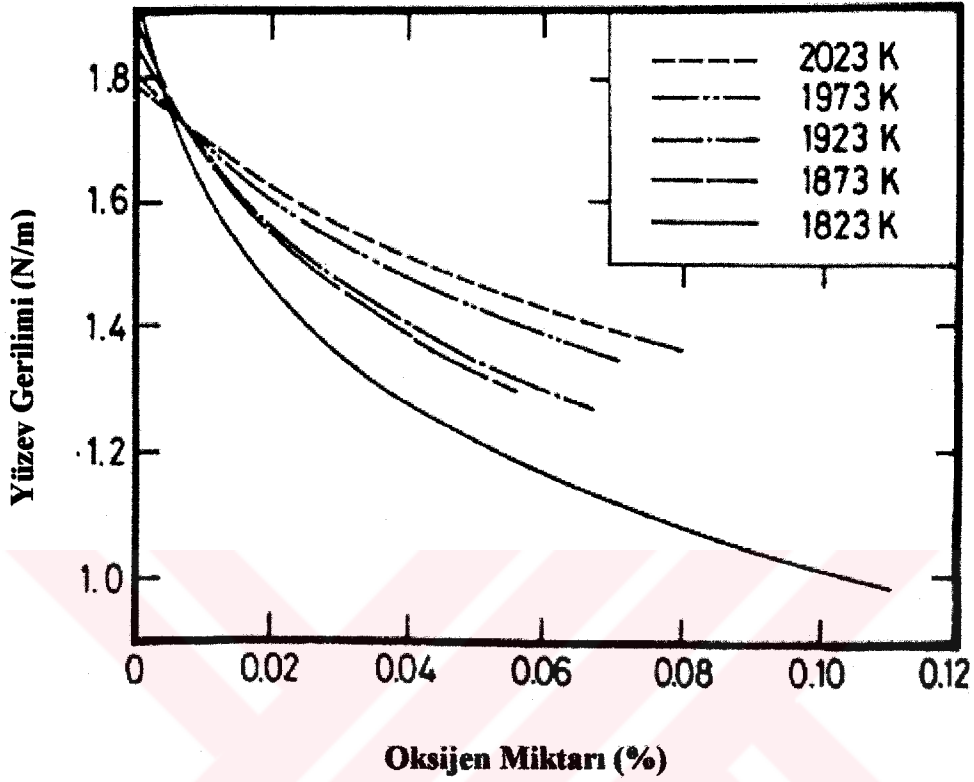
Kalogeropoulou ve arkadaşları (51) %98 saflıktaki SiC'ün farklı bileşimlerdeki (saf Fe, %33.33 Si + %66.66 Fe ve % 66.66 Si + %33.33 Fe) demir alaşımları tarafından ıslatılabilirliğini araştırmışlardır. Islatma açısı (θ), sıvı damla metodu ile yüksek vakumda (10^{-5} Pa) tespit edilmiştir. Deneylerde SiC-Saf Fe sistemi için ıslatma açısı $\theta=85^\circ$, SiC-%33.33 Si+%66.66 Fe ve SiC- %66.66 Si + %33.33Fe sistemi içinse $\theta=35^\circ$ tespit edilmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda demir, SiC'le güçlü bir şekilde reaksiyona girmiş ve belli bir dereceye kadar SiC'ü ıslatmıştır. Ayrıca sıvı Fe-C-Si üçlü faz dengesine göre demir içerisinde artan silisyum miktarı belli bir değeri geçtiğinde ıslatmanın ilerlediği vurgulanmıştır. Bu olayların sebebi, Fe-SiC sistemi arayüzeyine silisyumun absorbe edilmesine bağlanmıştır.

Nogi ve Ogino (52), sıvı demir içerisinde çözülmüş olan oksijen (O), kükürt (S), selenyum (Se), teleryum (Te)'un miktarı ile değişen sıvı demirin yüzey gerilimi ve alümina-sıvı çelik arasındaki ıslatma açısının değişimini araştırmışlardır. Bu elementlerden oksijen (O) ve kükürt (S) miktarının artması ile alümina-sıvı çelik ıslatma açısı (θ) azalmaktadır. Sıvı demirin yüzey gerilimi azaldığı için bu ilavelerin yüzey aktif elementi olduğu varsayılmaktadır. Dolayısıyla çeliğin yüzey gerilimini azalttığı sonucuna varılmıştır. Özellikle sıvıların çözülme veya reaksiyona girme eğilimi olduğunda katıları ıslatılabilirliğinin arttığı sonucuna varmışlardır. Ayrıca demir içerisindeki Se, Te'un artması O ve S'ün tersine ıslatma açısında artışa sebep olmuştur. Bu elementlerin alümina-sıvı çelik ıslatma açısı üzerine etkisi Şekil 3.15'de verilmektedir.



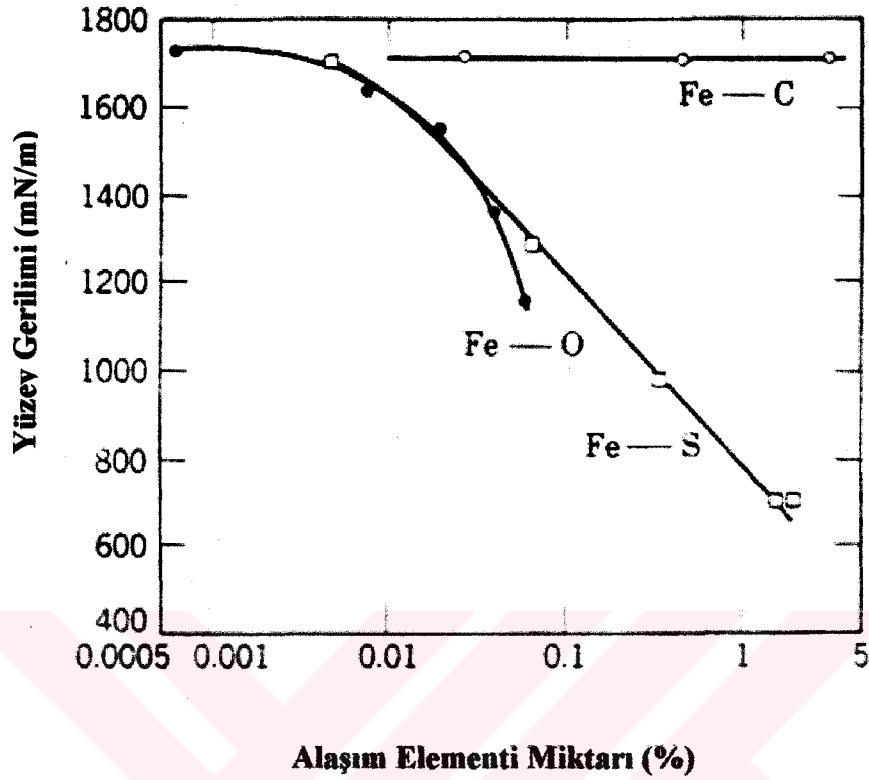
Şekil 3.15. Alümina-sıvı çelik ıslatma açısı üzerine sıvı demir içerisinde çözülmüş olan oksijen, kükürt, selenyum, teleryumun etkisi (52).

Mukai (39), ise çalışmasında sıvı demir içerisinde çözülmüş olan oksijenin farklı sıcaklıklarda yüzey gerilimi üzerine etkisini araştırmıştır. Araştırma sonucunda artan sıcaklık ve oksijen miktarı ile demirin yüzey geriliminin azaldığı tespit edilmiştir. Bu durum Şekil 3.16'da şematik olarak görülmektedir. Burada, oksijenin yüzey aktif elementi olması ve artan sıcaklıkla sıvıların çözülme veya reaksiyona girme eğilimi yüzey gerilimindeki azalmanın sebebi olarak vurgulanmıştır.



Şekil 3.16. Sıvı demir içerisinde çözülmüş olan oksijenin farklı sıcaklıklarda yüzey gerilimi üzerine etkisi (39).

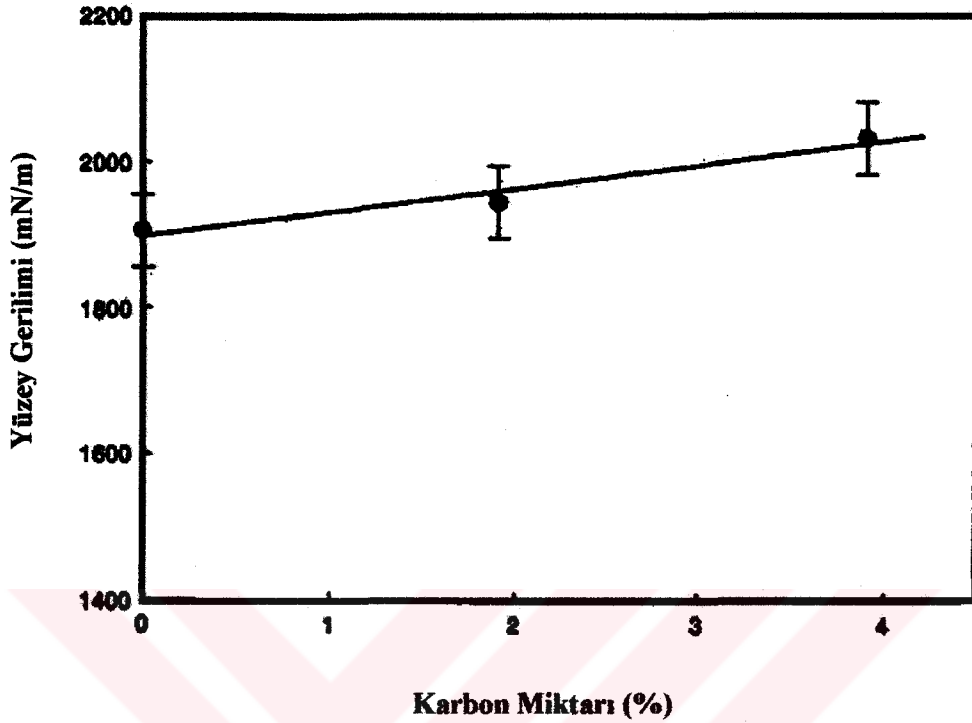
Kingery (53) ise çalışmasında sıvı demirin yüzey gerilimi üzerine oksijen, kükürt ve karbonun etkisini araştırmıştır. İlave edilen bu elementlerden (C) demirin yüzey gerilimini değiştirmezken artan O ve S miktarı ile yüzey geriliminde azalma görülmüştür. Şekil 3.17’de sıvı demirin yüzey gerilimi üzerine O, S ve C’nun etkisi görülmektedir. Sıvı demir bünyesindeki O ve S’ün yüzey aktif elementi olduğu için reaksiyona girdiği, damla yüzeyine ince bir tabaka halinde absorbe olarak yüzey gerilimini düşürdüğü tespiti yapılmıştır. C’nin ise yüzey gerilimine bir etkisi olmadığı belirtilmiştir.



Şekil 3.17. Sıvı demirin yüzey gerilimi üzerine oksijen, kükürt ve karbon miktarının etkisi (53).

Jimbo ve Cramb (34) X-ray ışınları ile damlanın dış hatlarından yararlanarak geliştirdikleri metotla sıvı demirin yüzey gerilimi hesaplamışlardır. Araştırmada %99,99 saflıkta sıvı demir ve %99,98 saflıktaki alümina altlık kullanılarak, 1550 °C'de 1 atmosfer CO basıncı altında sıvı demirin içerisindeki C miktarının yüzey gerilimine etkisi belirlenmiştir.

Şekil 3.18'de demir içerisindeki karbon miktarının yüzey gerilimine etkisi görülmektedir. Sonuçlar, sıvı demir içerisindeki artan karbon miktarı ile sıvı demir yüzey geriliminin ortalama 30 mN/m kadar arttığını göstermiştir. Yazarlar araştırmada elde edilen bu sonuçların diğer yapılan çalışmalarla tam olarak uygunluk göstermediğini ve karbonun yüzey gerilimini ya değiştirmeyeceği ya da azda olsa düşüreceğini vurgulamışlardır.



Şekil 3.18. Sıvı demirin yüzey gerilimi üzerine karbon miktarının etkisi (34).

Wu ve Sahajvalla (54) tarafından yapılan diğer bir araştırmada da sıvı çelik-kalıp kaplama malzemesi grafit arayüzey ıslatma özellikleri araştırılmıştır. Araştırmada altlık olarak yüksek saflıkta karbon elektrot malzemesi ve sıvı damla için % 0,13-2,24 arasında değişen karbon miktarına sahip demir kullanılmıştır. Islatma açısı(θ) sıvı damla metodu ile 1600 °C'de Ar gazı atmosferinde belirlenmiştir. Araştırmada, sıvı demirin ergimesi ile birlikte ilk 100 sn. temas süresince ıslatılabilirlikte artma , 100 sn. temas süresi sonrasında ıslatılabilirlikte düşme tespit edilmiştir. Buna sebep olarak, grafitten sıvı demire geçen karbon miktarı ile, sıvı demirin karbonca doyduğu ve iki arayüzey arasındaki kimyasal potansiyel farklılığı azaldığı için ıslatılabilirliği düşürdüğü belirtilmiştir. Ayrıca sıvı demirin grafiti ıslatması, dengeli olmayan bir doğaya sahip olduğu ve ıslatılabilirliği iki temas yüzeyi arasındaki kimyasal potansiyel farklılığı ve arayüzey gerilimi etkilediği vurgulanmıştır. Sonuç olarak, C'un sıvı demirin yüzey gerilimini artırdığı, S'in ise C'un tersine yüzey gerilimini düşürdüğü rapor edilmiştir.

4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu çalışmada; MgO tandiş püskürtme astar malzemesinin servis süresince dayanımını etkileyen ve sürekli dökümde inklüzyonların sıvı çeliğe geçme aşamalarından biri olan tandiş refrakteri-sıvı çelik arayüzey ıslatma özellikleri sıvı damla (sessile drop) metodu kullanılarak araştırıldı. Öncelikle Erdemir T.A.Ş. tarafından halen kullanılmakta olan iki farklı kimyasal kompozisyonuna sahip tandiş püskürtme astar malzemesinin ıslatma açısı (θ) tespiti için çalışmalar yapıldı. Daha sonra MgO astar tozuna ilave edilen cam fiber, Fe_2O_3 ve kil gibi katkı maddelerinin yanı sıra alternatif katkı maddelerinin (karbon fiber, kestamit fiber, kaya yünü, alümina fiber, kağıt fiber) θ 'ya etkisi araştırıldı. Ayrıca, MgO toz tane boyutunun, temas süresinin, sıcaklığın ve çelik bileşiminin θ 'ya etkisi belirlendi.

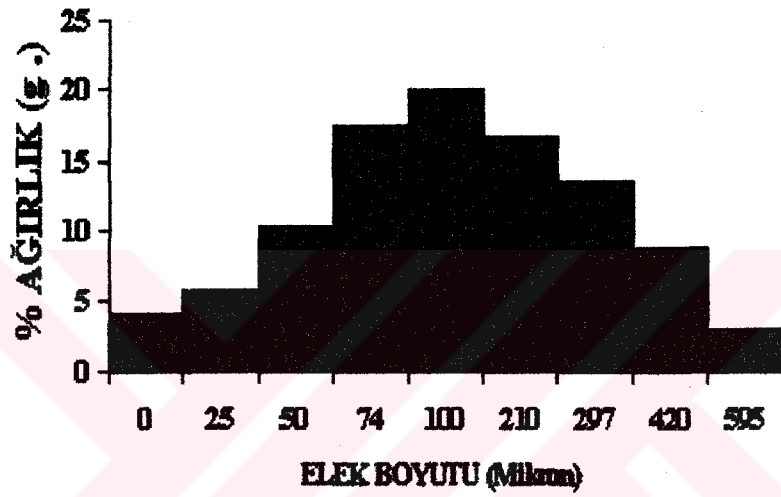
4.1. Malzeme

4.1.1. Tandiş astar (MgO) malzemesi

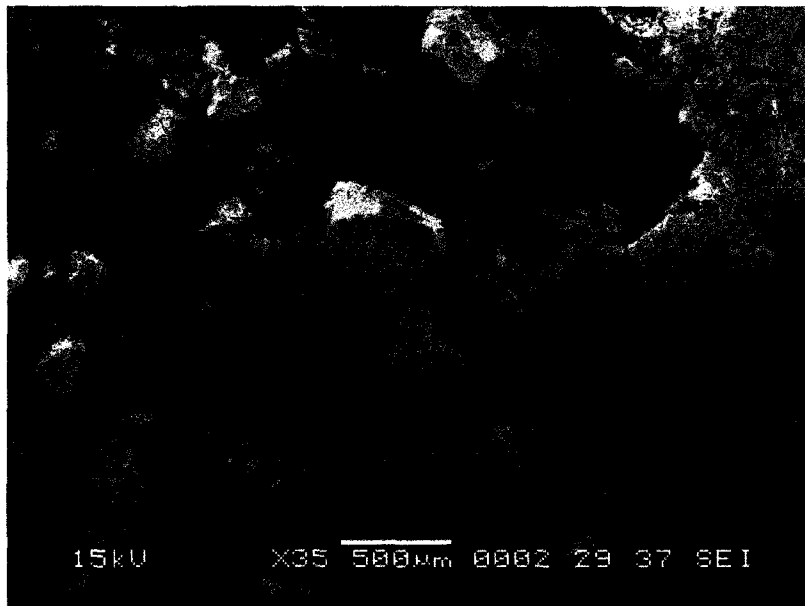
Altlık malzeme olarak Konya Krom Magnezit Tuğla San. A.Ş.'den sağlanan tandiş püskürtme astarı tozu (MgO) seçildi. Püskürtme astarının kimyasal kompozisyonu Konya Krom Magnezit laboratuvarında belirlendi. MgO tane dağılımını belirlemek için A.F.S. elek analizi ve lazer partikül ölçme yöntemi uygulandı. G.Ü. Teknik Eğitim Fakültesi Döküm Eğitimi Anabilim Dalı laboratuvarında A.F.S. elek analizi ve Yapı Bölümü Zemin Mekaniği Laboratuvarında lazer partikül ölçme testi yapıldı. Ayrıca arayüzey incelemeleri ve toz tane şeklini belirlemek için Erdemir T.A.Ş. laboratuvarında SEM incelemesi yapıldı. MgO tandiş astar tozu kimyasal kompozisyonu Çizelge 4.1'de, tane dağılımı Şekil 4.1 ve tane şekli Resim 4.1'de sırasıyla verilmektedir.

Çizelge 4.1. Tandış astar (MgO) tozu kimyasal kompozisyonu

Refrakter	% Ağırlık (g.)
MgO	95.08
Al ₂ O ₃	0.16
SiO ₂	2.49
CaO	1.73
Fe ₂ O ₃	0.54



Şekil 4.1. Tandış astar (MgO) tozu tane dağılımı



Resim 4.1. Tandış astar (MgO) tozu SEM görüntüsü

4.1.2. Katkı maddeleri

4.1.2.1 Cam (SiO_2) fiber

SiO_2 fiber, Konya Krom Magnezit Tuğla San. A.Ş.'den sağlandı. Fiber uzunluğu 15 mm ve çapı yaklaşık 10 μm olarak belirlendi (Resim 4.2).



Resim 4.2. SiO_2 fiber SEM görüntüsü

4.1.2.2. Hematit (Fe_2O_3)

Fe_2O_3 tozu, Kardemir A.Ş.den sağlandı. Fe_2O_3 tozunun tane boyutu lazer partikül ölçme tekniği kullanılarak ortalama 30 μm olduğu belirlendi.

4.1.2.3. Kil ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)

Kil, Kardemir A.Ş.den sağlandı. Kilin tane boyutu lazer partikül ölçme tekniği kullanılarak ortalama 30 μm olduğu gözlemlendi.

4.1.2.4. Kaya yünü

Kaya yünü, Konya Krom Magnezit Tuğla San. A.Ş.'den sağlandı. Fiber uzunluğu 10 mm ve çapı yaklaşık 10 μm olduğu ilgili firma tarafınca verildi.

4.1.2.5. Alümina fiber

Alümina fiber, Zircar firmasından (A.B.D.) sağlandı. Alümina fiberin uzunluğu 5 mm ve çapı yaklaşık 5 μm olduğu ilgili firma tarafınca verildi.

4.1.2.6. Karbon fiber

Karbon fiber, Zoltek firmasından (A.B.D.) sağlandı. Karbon fiberin uzunluğu 250 mm ve çapı 50 μm olarak ilgili firma tarafından verildi. Deney öncesi 250 mm uzunluğundaki fiber 10 mm uzunlukta olacak şekilde kesilerek hazırlandı.

4.1.2.7. Kestamit fiber

Kestamit fiber, sanayide kestamit işletmecilerinden sağlandı. Kestamit fiber çapının birbirine eşit olması için A.F.S. elek analizi yapıldı. Eleme işlemi sonucu iki elek arasında kalan (50-100 μm arası) fiberler kullanıldı.

4.1.2.8. Kağıt fiber

Kağıt fiber, A4 kağıdından yaklaşık 10 mm uzunluğunda 0,1 mm genişliğinde kesilerek fiber elde edildi. Kağıt fiber çapının birbirine eşit olması için A.F.S. elek analizi yapıldı. Eleme işlemi sonucu iki elek arasında kalan (50-100 μm arası) fiberler kullanıldı.

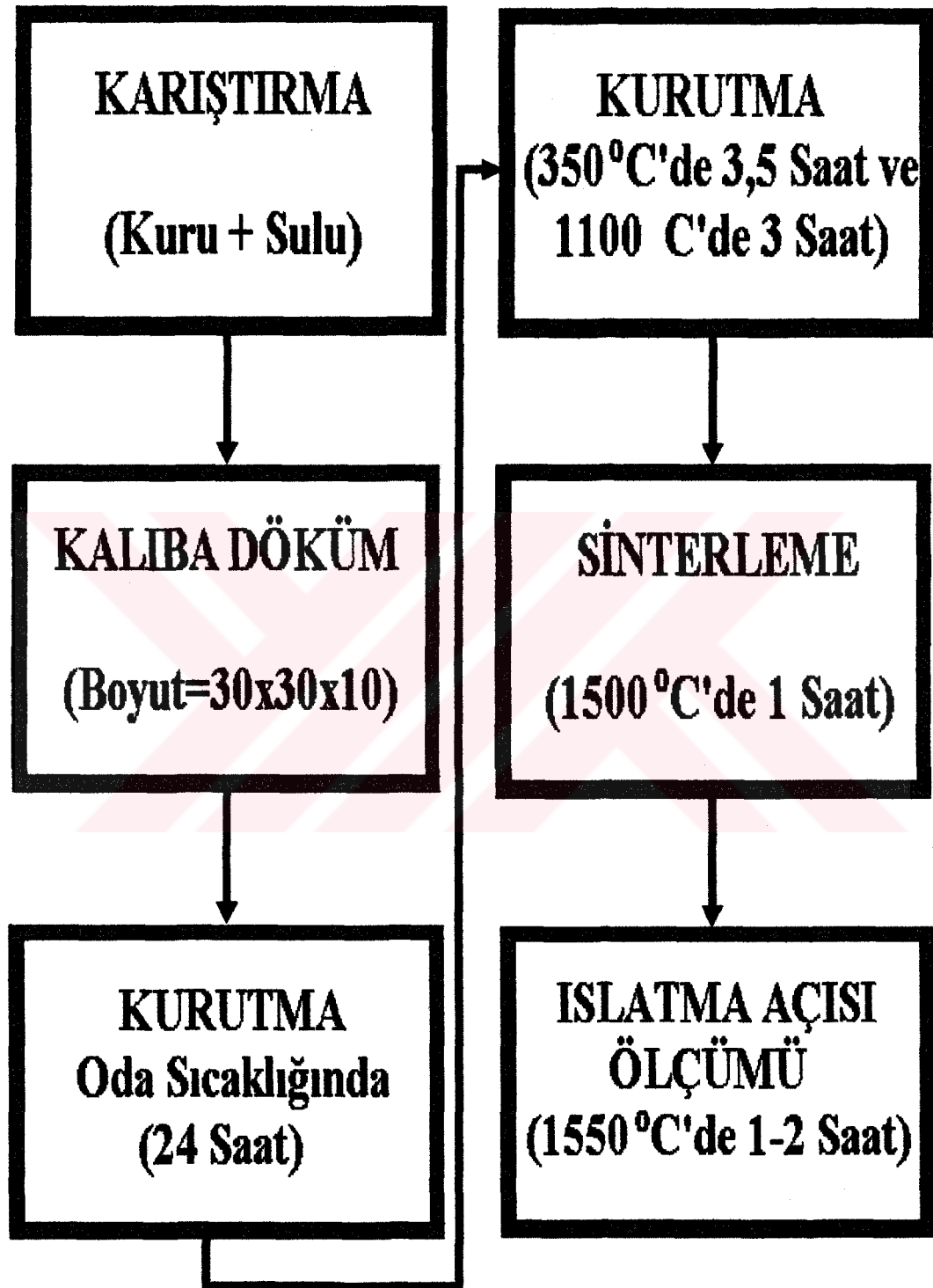
4.1.2.9. Fenol reçine (Novalak)

Fenol formaldehit bazlı toz reçine (Novalak), Çukurova Kimya Endüstri. A.Ş.'den sağlandı. Reçinenin sertleştirilmesi için katalizör olarak hegzametilen tetramin kullanıldı.

4.1.3. Tandış astar numunelerinin hazırlanması

Bileşimi ve tane dağılımı tespit edilen astar malzemelerinin hazırlık işlemleri, Erdemir T.A.Ş.'nin uygulama şartları (Şekil 4.2) dikkate alınarak yapıldı. Astar malzemelerin hazırlanmasında karıştırıcı (mikser) kullanıldı. Mikser içerisine MgO tandış astarı tozu ve değişik oranlarda katkı maddeleri ilave edildi. Değişken parametreler temas süresi, fiber, toz katkı elemanları, toz tane boyutu, çelik türü, ve sıcaklık olmak üzere 6 ana gruba ayrıldı. Kullanılan katkı maddeleri, oranları ve deneylerde uygulanan parametreler sırasıyla Çizelge 4.2-4.7'de verilmiştir. Katkı maddelerinin ilave edildiği kuru karışım 15 dakika mikser ile karıştırıldıktan sonra ağırlığının % 25-30 oranında su ilave edilerek 60 dakika süre ile karıştırma sonucu sulu karışım hazırlandı. Sulu karışım, önceden hazırlanmış 30x30x10 mm boyutlarında kalıplara (Şekil 4.3) döküldü.

Kalıp içerisindeki numuneler oda sıcaklığında 24 saat bekletilerek bünyesinde bulunan fazla suyun atılması sağlandı. Kalıptan çıkarılan numuneler fırın atmosferinde kurutmaya alındı. Kurutma işlemi, atmosfere açık olan fırında 350 °C'de 3,5 saat, 1100 °C'de 3 saat bekletilerek yapıldı. Bu sıcaklıklar Erdemir tandış kurutma işlemi göz önüne alınarak seçildi. Kurutma işlemi tamamlanan numuneler atmosfer kontrollü fırında argon ortamında 1550 °C'de 1 saat sinterlendi. Sinterlenen numuneler 10x10x10 boyutlarında elmas disk ile kesildi ve yüzeyleri sırası ile 180, 320, 600 ve 800 meshlik SiC ile zımparalanarak yüzey pürüzlülüğünün minimuma indirilmesi sağlandı. Aynı şartlar her bir parametre için tekrarlandı.



Şekil 4.2. Tandiş astar malzemesi hazırlık işlemleri

Çizelge 4.2. Temas süresine göre deney parametresi
(Çelik türü: 7114K, Sıcaklık: 1550 °C, Atmosfer: Argon)

Değişken parametre	θ ölçüm süreleri (dk.)	Astar malzeme
Süre (120 dk.)	1, 5, 15, 30, 60, 120	MgO + %1 SiO ₂ fiber

Çizelge 4.3. Fiber katkı elemanları ve oranlarına göre deney parametreleri
(Çelik türü: 7114K, Sıcaklık: 1550 °C, Atmosfer: Argon)

Değişken parametre	Astar malzeme	Katkı malzemesi (% ağırlık)
SiO ₂ fiber	MgO	% 0 SiO ₂ fiber
		% 1 SiO ₂ fiber
		% 2 SiO ₂ fiber
		% 4 SiO ₂ fiber
		% 8 SiO ₂ fiber
Alternatif fiber	MgO + %1 SiO ₂ fiber	% 0,5 Karbon fiber
		% 1 Kaya yünü
		% 1 Alümina fiber
		% 1 Kestamit fiber
		% 1 Kağıt fiber

Çizelge 4.4. Toz katkı elemanları ve oranlarına göre deney parametreleri
(Çelik türü: 7114K, Sıcaklık: 1550 °C, Atmosfer: Argon)

Değişken parametre	Astar malzeme	Katkı malzemesi (% ağırlık)
Fe ₂ O ₃	MgO + %2 SiO ₂ fiber	% 1 Fe ₂ O ₃
		% 2 Fe ₂ O ₃
		% 4 Fe ₂ O ₃
		% 8 Fe ₂ O ₃
Kil	MgO + %1 SiO ₂ fiber	% 0.5 Kil
		% 1 Kil
		% 2 Kil
		% 4 Kil

Çizelge 4.5. Toz tane boyutu değişimine göre deney parametreleri
(Çelik türü: 7114K, Sıcaklık: 1550 °C, Atmosfer: Argon)

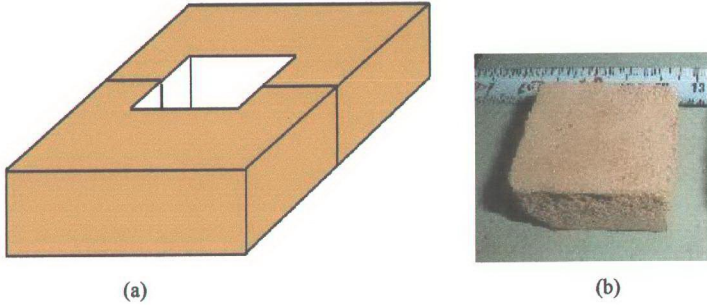
Değişken parametre	Astar malzeme	Toz tane boyutu (µm)
Toz tane boyutu	MgO (fibersiz)	25
	MgO + %2 SiO ₂ fiber	25
		75
		150
		300

Çizelge 4.6. Çelik türü değişimine göre deney parametreleri
(Sıcaklık: 1550 °C, Atmosfer: Argon)

Değişken parametre	Astar malzeme	Erdemir çelik türü
Çelik türü	MgO + %1 SiO ₂ fiber	7114 K
		6112 K
		6113 K
		9065 K
		3950 K

Çizelge 4.7. Sıcaklık değişimine göre deney parametreleri
(Çelik türü: 7114K, Atmosfer: Argon)

Değişken parametre	Astar malzeme	θ ölçüm sıcaklığı (°C)
Sıcaklık	MgO + %1 SiO ₂ fiber	1550
		1575
		1600



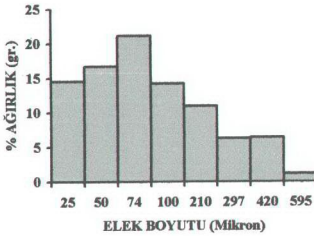
Şekil 4.3. Tandiş astar kalıbı (a) ve kalıptan çıkmış numune (b)

4.1.4. Erdemir tandiş astar (MgO) malzemesi ve hazırlanması

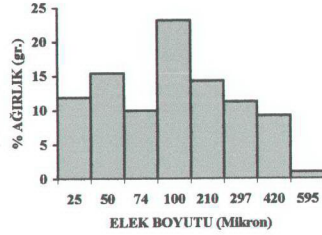
Erdemir A.Ş.'nin kullanmış olduğu iki farklı tandiş püskürtme astarının kimyasal kompozisyonu, toz tane dağılımları ve deneylerde uygulanan parametreler sırasıyla Çizelge 4.8, Şekil 4.4 ve Çizelge 4.9'de verilmektedir. Elek analizi sonucu astar malzemeler içerisinde bulunan fiber miktarı (g.) A bileşiminde ağırlıkça % 2,43, B bileşiminde % 2,77 olduğu tespit edildi. Erdemir astar malzemesinin hazırlık işlemleri yukarıda (Bölüm 4.1.3) belirtilen şartlar dikkate alınarak hazırlandı

Çizelge 4.8. Erdemir T.A.Ş.'nin kullandığı tandiş astar malzemelerinin kimyasal kompozisyonları

Refrakter	A Bileşimi	B Bileşimi
	% Ağırlık (g.)	% Ağırlık (g.)
MgO	% 89,46	% 80,90
SiO ₂	% 3,41	% 9,49
Fe ₂ O ₃	% 1,23	% 3,50
Al ₂ O ₃	% 0,23	% 0,71
CaO	% 2,76	% 2,01
Na ₂ O+K ₂ O	% 0,52	% 0,479



(Erdemir A)



(Erdemir B)

Şekil 4.4. İki farklı Erdemir tandış astar tozu tane dağılımı

Çizelge 4.9. Erdemir tandış astar uygulamalarına göre deney parametresi
(Çelik türü: 7114K, Sıcaklık: 1550 °C)

Astar malzeme	SiO ₂ fiber (% ağırlık)	θ ölçüm atmosferi
Erdemir A	% 2.43	Argon
Erdemir A	% 2.43	Vakum (10 ⁻⁵ mbar)
Erdemir B	% 2,77	Argon
Erdemir B	% 2,77	Vakum (10 ⁻⁵ mbar)

4.1.5. Çelik malzeme ve hazırlanması

İslatma açısı ölçümlerinde Erdemir T.A.Ş.'den temin edilen düşük karbonlu çelik malzemeler kullanıldı. Bu malzemelerin kimyasal kompozisyonları Çizelge 4.10'da görülmektedir.

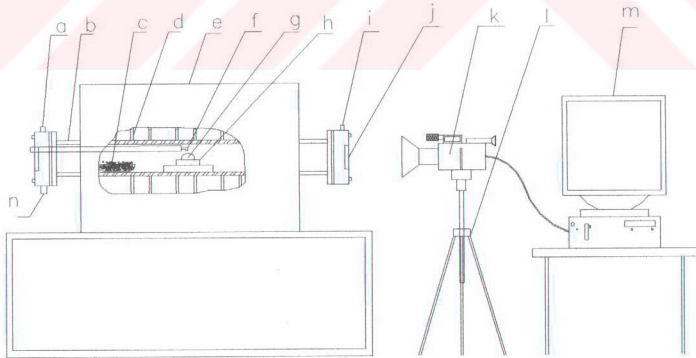
Çizelge 4.10. Deneylerde kullanılan düşük karbonlu çelik malzemelerin kimyasal kompozisyonları (% ağırlık)

Erdemir malzeme kodu	Alaşım elementleri				
	% C	% Mn	% Si	% P	% S
7114K	0.003	0.131	0.009	0.007	0.006
6113K	0.022	0.156	0.026	0.011	0.008
6112K	0.042	0.254	0.009	0.006	0.008
3937K	0.072	0.354	0.012	0.010	0.011
9065K	0.089	1.599	0.233	0.018	0.006

Sıvı damla oluşturmak için düşük karbonlu çelik malzemeler yaklaşık 0,3 gram olarak ($\approx 3 \times 3 \times 3$ mm boyutlarında) küp şeklinde kesilerek yüzeyde oluşabilecek oksit tabakası sırası ile 180, 320 ve 600 meshlik SiC su zımparaları yardımı ile alındı. Zımparalanmış olan numuneler metanol içerisinde 10 dakika süre ile ultrasonik olarak temizlendi.

4.1.6. Atmosfer kontrollü fırın

Islatma açısı ölçümü için, 1750°C sıcaklığa çıkabilen, vakum kontrollü tüp fırın kullanıldı. Islatma açısı ölçümleri % 99,997 saflıkta alümina boru içerisinde yapıldı. Gözetleme kısmı, alümina borunun her iki tarafında “O” ring’li flanşlarla kapatılmış cam olan bir sistemden oluşmaktadır. Aynı zamanda alümina boru turbo moleküler vakum pompa ve gaz sağlayıcı bağlantısına sahiptir. Ergitme esnasında oluşan sıvı çeliğin refrakter astar ile yapmış olduğu temas açısı kayıtlarını alabilen CCD kamera (Sony Camcorder Vx2000 marka) mevcuttur. Sıvı damla metodunun uygulandığı atmosfer kontrollü fırın ve bölümleri Şekil 4.5’de görülmektedir.



Şekil 4.5. Deney çalışmalarında kullanılan sıvı damla metodunun uygulandığı

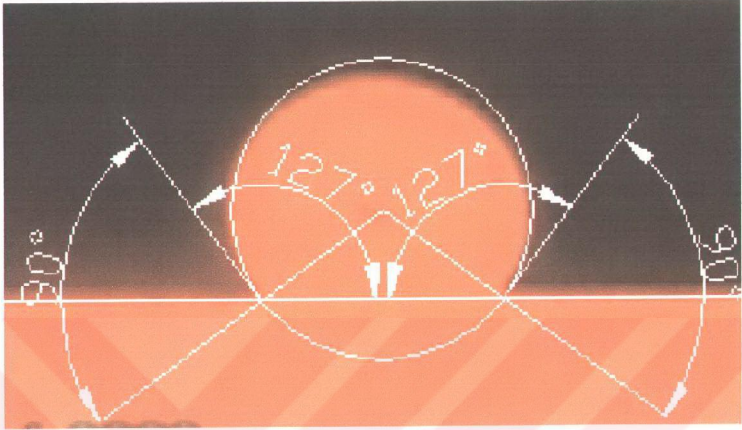
atmosfer kontrollü yüksek sıcaklık fırını ve bölümleri

- a. Gaz girişi b. Alümina boru c. Oksit giderici d. Isıtma elementi e. Fırın gövdesi
- f. Termokupl g. Sıvı damla h. Seramik altlık i. Gaz çıkışı j. Gözetleme penceresi
- k. CCD Kamera l. Tripot m. Bilgisayar n. Vakum

4.1.7. Islatma açısı ölçümü

Islatma açısı tespiti vakum altında (10^{-5} mbar) veya atmosfer basıncında % 99,999 saflıkta argon gazı kullanılarak yapıldı. Deney öncesinde yüzeyleri temizlenmiş olan astar numuneler ve üzerine yerleştirilen çelik parçalarla birlikte alümina tüp merkezine yerleştirilerek su terazisi yardımı ile optimum yatay duruma getirildi. Sistem 2 saat 10^{-5} mbar vakumda tutularak ortamdaki oksijenin en aza indirilmesi sağlandı. 2 saat vakumda tutulan sisteme tekrar argon girişi sağlanarak bu işlem iki kez tekrar edildi. Deney süresince sürekli olarak sistemden argon geçişi sağlanan fırın, deneylerin yapılacağı sıcaklığa kadar $5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{dak.}$ ile çıkılarak ıslatma açısının ölçüm sıcaklığı $\pm 7\text{ }^{\circ}\text{C}$ hassasiyette ABB commander marka sıcaklık ölçüm cihazı ile belirlendi.

Çelik damlanın fotoğraflarını alabilmek için CCD kamera alümina tüpün gözetleme penceresi önüne yerleştirildi. Ergimiş çelik damla tarafından MgO tandış astarın ıslatma açısı (θ), CCD kameranın VCR bağlantısı ile bilgisayar ekranına görüntüsünün yansıtılması ile değerlendirildi. CCD kamera ile çekimi yapılan filmler, fotoğraf şeklinde bilgisayar dosyasına kaydedildi. X12 kez büyütülen kaydedilmiş resimlerden ıslatma açısı (θ)'nın ölçümü AutoCAD 2000 programında hesaplandı. Hesaplamalar, yatay katı yüzeyde duran ve değişim yüzeyi olan sıvı damla fotoğraflarından (Resim 4.3) ıslanma düzleminin yanındaki damlacık kenarına bir tanjant çizgisi çizilerek (damla yüzeyinin küresel olduğu kabul edilerek) refrakter-sıvı çelik ıslatma açısı tespit edildi.

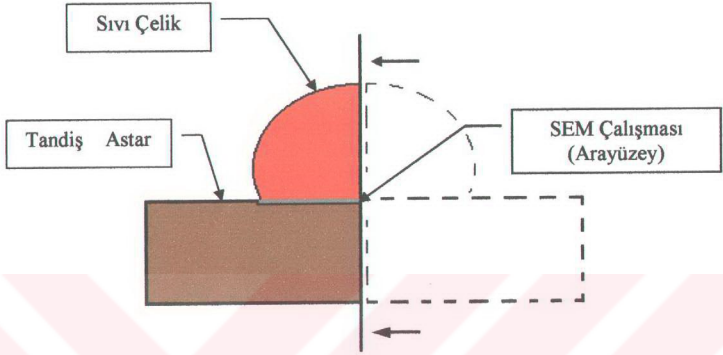


Resim 4.3. Refrakter astar-sıvı çelik arayüzey fotoğraflarından ıslanma düzleminin yanındaki damlacık kenarına tanjant çizilmesi ve ıslatma açısı hesaplanması

Ayrıca bu metodun kalibrasyonu ve güvenilirliği için literatürde (8,41,42,47) θ 'nın tespitinde sıvı damla şekli ve koordinatlarının kullanıldığı Bashforth ve Adams'ın (25) tablolarından yararlanılarak θ ölçümü için hesaplamalar tekrar yapıldı. Yapılan her bir ölçümdeki hassasiyetin $\pm 2^\circ$ olduğu tespit edildi. Ek-1'de ıslatma açısı hesaplaması ile ilgili bir örnek verilmektedir.

4.1.8. SEM çalışması

10x10x10 mm boyutlarındaki ıslatma açısı ölçülmüş numunelerden damla yaradan kesilerek arayüzey çıkartıldı (Şekil 4.6). İncelenecek numunelerin arayüzeyleri sırası ile 150, 320, 500, 600, 800, 1000 meshlik SiC zımparalarında sulu ortamda zımparalandı ve 6, 3, 1 μm elmas pasta ile parlatıldı. İncelemelerde JEOL 6400 tipi SEM kullanıldı.



Şekil 4.6. SEM çalışmasının yapıldığı sıvı çelik-tandış astar arayüzeyinin şematik gösteriliş

5. DENEYSEL SONUÇLAR

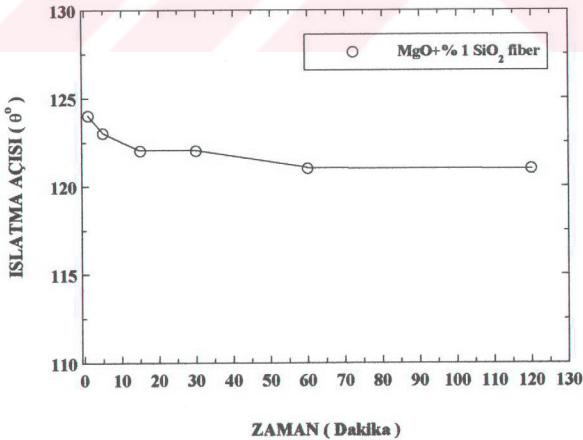
5.1. Islatma Açısı (θ°)

5.1.1. MgO+SiO₂ fiber /sıvı çelik ıslatma açısının temas süresine bağlı değişimi

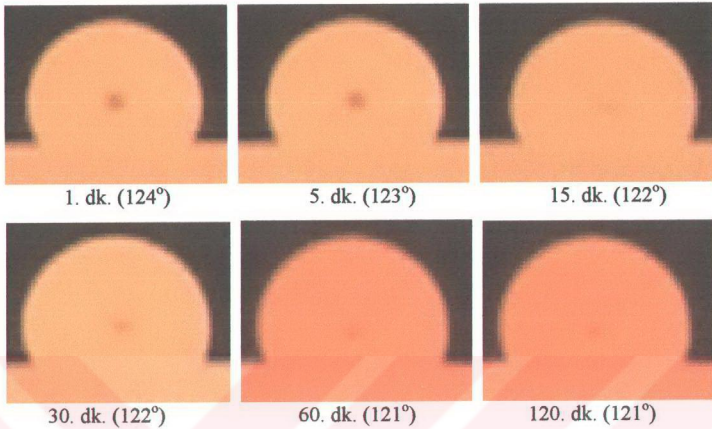
MgO+% 1 SiO₂ fiber kompozisyonundaki tandiş astarın 7114K çelik malzeme tarafından ıslatılabilirliği üzerine temas süresinin etkisi 1550 °C'de argon gazı ortamında yapıldı. Deneylerde tespit edilen zamana bağlı θ değişimleri Çizelge 5.1 ve Şekil 5.1'de, 120 dakika temas süresince θ 'nın değişim görüntüleri Resim 5.1'de verilmiştir.

Çizelge 5.1. Islatma açısının temas süresine bağlı değişim değerleri

ASTAR MALZEME	ISLATMA AÇISI (θ°)					
	1. dk.	5. dk.	15. dk.	30. dk.	60. dk.	120. dk.
MgO+ % 1 SiO ₂ fiber	124	123	122	122	121	121



Şekil 5.1. Islatma açısının temas süresine bağlı değişimi



Resim 5.1. Islatma açısının temas süresine bağlı değişim görüntüleri
(MgO+%1 SiO₂ fiber)

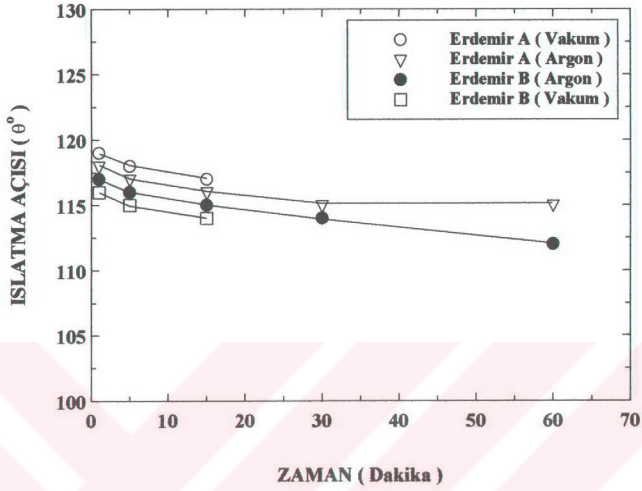
Deneylerde, MgO'e % 1 SiO₂ fiber ilavesi ile 120 dakika temas süresi sonunda $\theta=121^\circ$ olduğu gözlemlendi. Islatma açısı ölçümünün yapıldığı ilk 15 dakikada θ 'da 2° azalma görülürken, artan temas süresi ile θ 'da daha fazla bir değişiklik gözlemlenmedi.

5.1.2. Erdemir tandış astarları (Erdemir A, B) / sıvı çelik ıslatma açısı

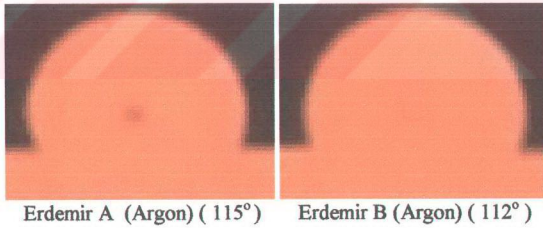
İki farklı bileşimdeki Erdemir tandış astarın 7114K çelik ile ıslatılabilirliği 1550 °C'de argon gazı ve vakum ortamında yapıldı. Deneylerde tespit edilen zamana bağlı θ değişimleri Çizelge 5.2 ve Şekil 5.2'de, 60 dakika temas süresi sonunda belirlenen θ görüntüleri Resim 5.2'de verilmiştir.

Çizelge 5.2. Erdemir tandış astarları / 7114K sıvı çelik θ değerleri

ASTAR MALZEME	ISLATMA AÇISI (θ°)				
	1. dk.	5. dk.	15. dk.	30. dk.	60. dk.
Erdemir A (Argon)	118	117	116	115	115
Erdemir B (Argon)	117	116	115	114	112
Erdemir A (Vakum)	119	118	117	-	-
Erdemir B (Vakum)	116	115	114	-	-



Şekil 5.2. Erdemir MgO tandış astarları-7114K sıvı çelik θ° 'nin zamana bağlı değişimi



Resim 5.2. Erdemir MgO tandış astarları-7114K sıvı çelik θ görüntüleri
(Temas süresi: 60 dakika)

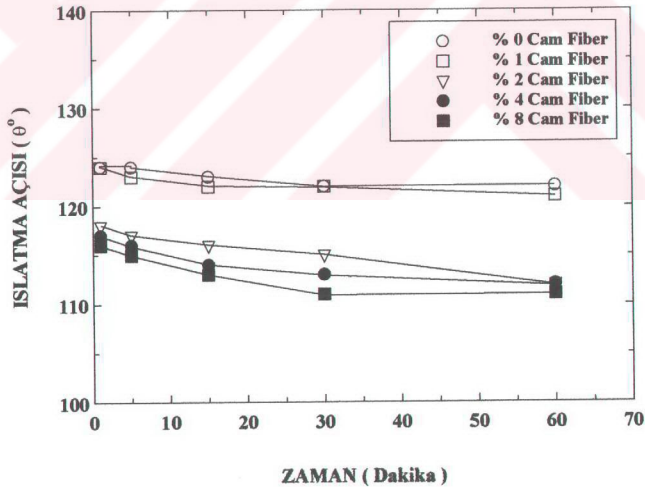
Deneylerde vakum kullanılması sonucunda sıvı çelik damlası hacminde temas süresi boyunca belirgin azalma tespit edildi. Dolayısıyla ilk 15 dakika sonrasında veri alınmadı.

5.1.3. MgO+SiO₂ fiber / sıvı çelik ısıtma açısı

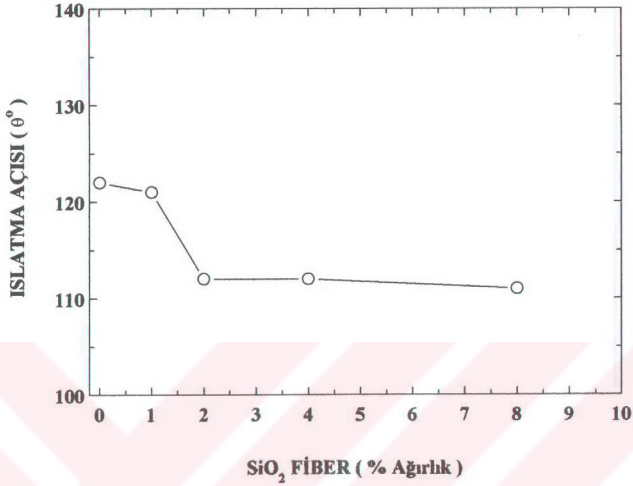
MgO'e SiO₂ fiber ilaveleri ile hazırlanan tandır astarın 7114K çelik ile ısıtılabilirliği 1550 °C'de argon gazı ortamında yapıldı. Deneylerde tespit edilen zamana bağlı θ değişimleri Çizelge 5.3 ve Şekil 5.3'de, 60 dakika temas süresi sonunda belirlenen θ ve görüntüleri Şekil 5.4 ve Resim 5.3'te gösterilmektedir.

Çizelge 5.3. MgO'e SiO₂ fiber ilaveleri ile θ 'nın zamana bağlı değişim değerleri

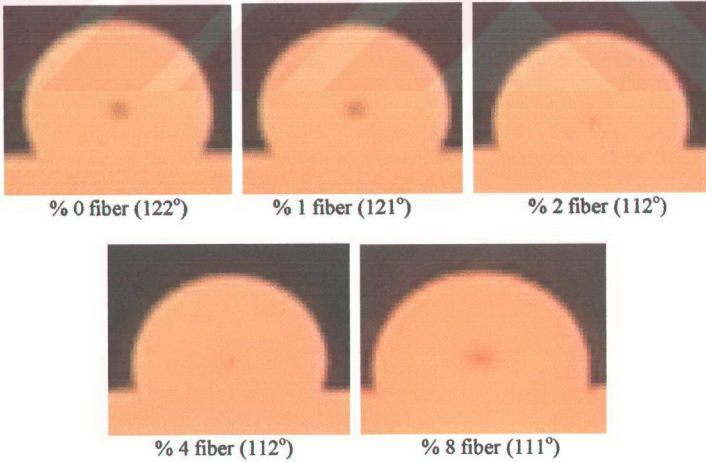
ASTAR MALZEME	KATKI MALZEMESİ	ISLATMA AÇISI (θ°)				
		1. dk.	5. dk.	15. dk.	30. dk.	60. dk.
MgO	% 0 SiO ₂ fiber	124	124	123	122	122
	% 1 SiO ₂ fiber	124	123	122	122	121
	% 2 SiO ₂ fiber	118	117	116	115	112
	% 4 SiO ₂ fiber	117	116	114	113	112
	% 8 SiO ₂ fiber	116	115	113	111	111



Şekil 5.3. MgO'e SiO₂ fiber ilaveleri ile θ 'nın zamana bağlı değişimi



Şekil 5.4. MgO içerisindeki SiO₂ fiber miktarına bağlı θ değişimi
(Temas süresi: 60 dakika)



Resim 5.3. MgO içerisindeki SiO₂ fiber miktarına bağlı θ görüntüleri
(Temas süresi: 60 dakika)

Deneysel sonuçlar; MgO astar malzemesine SiO₂ fiber ilaveleri ile 60 dakika temas süresi sonucunda θ 'da dikkate değer azalmalar olduğunu gösterdi. Fiber içermeyen numunelerde 60 dakika temas süresi sonunda $\theta=122^\circ$, % 1 SiO₂ fiber ilavesinde $\theta=121^\circ$ olurken, SiO₂ fiber oranı % 2, 4 ve 8'e çıkartıldığında yaklaşık $\theta\approx 111^\circ$ olduğu gözlemlendi.

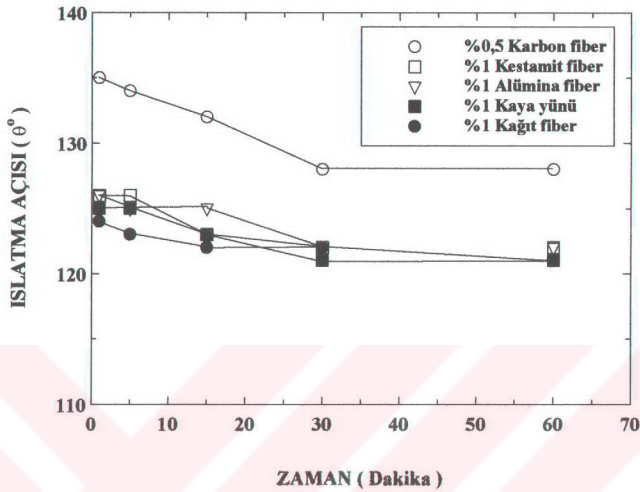
5.1.4. MgO+SiO₂ fiber+alternatif fiber /sıvı çelik ısıtma açısı

MgO+% 1 SiO₂ fiber'e alternatif fiber ilaveleri ile hazırlanan MgO tandış astarın 7114K çelik ile ısıtılabilirliği 1550 °C'de argon gazı ortamında yapıldı. Deneylerde tespit edilen zamana bağlı θ değişimleri Çizelge 5.4 ve Şekil 5.5'de, 60 dakika temas süresi sonunda belirlenen θ ve görüntüleri Şekil 5.6 ve Resim 5.4'de verilmiştir.

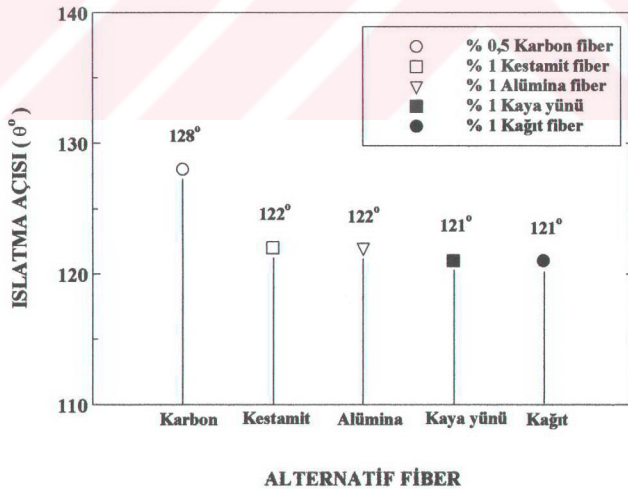
Çizelge 5.4. Alternatif fiber türü ile θ 'nın zamana bağlı değişim değerleri

ASTAR MALZEME	KATKI MALZEMESİ	ISLATMA AÇISI (θ°)				
		1. dk.	5. dk.	15. dk.	30. dk.	60. dk.
MgO + % 1 SiO ₂ fiber	% 0.5 Karbon fiber	135	134	132	128	128
	% 1 Kestamit fiber	126	126	123	122	122
	%1 Alümina fiber	126	125	125	122	122
	% 1 Kaya yünü	125	125	123	121	121
	%1 Kağıt fiber	124	123	122	122	121

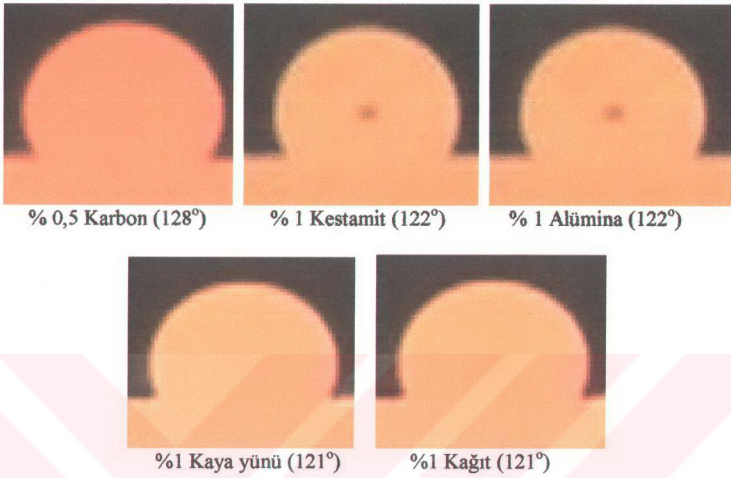
Deneylerde, alternatif fiber olarak C'un kullanımı ile θ 'nın arttığı gözlemlendi. Kestamit fiber, kaya yünü, alümina fiber ve kağıt fiber kullanımı θ 'da kayda değer bir etki göstermedi. 60 dakika temas süresi sonunda % 0,5 karbon fiber içeren numunelerde $\theta=128^\circ$ olurken, alümina fiber, kağıt fiber, kaya yünü ve kestamit fiber ilavelerinde $\theta\approx 122^\circ$ olduğu belirlendi.



Şekil 5.5. Alternatif fiber türü ve zamana bağlı θ değişimi



Şekil 5.6. Alternatif fiber türüne bağlı θ değişimi (Temas süresi: 60 dakika)



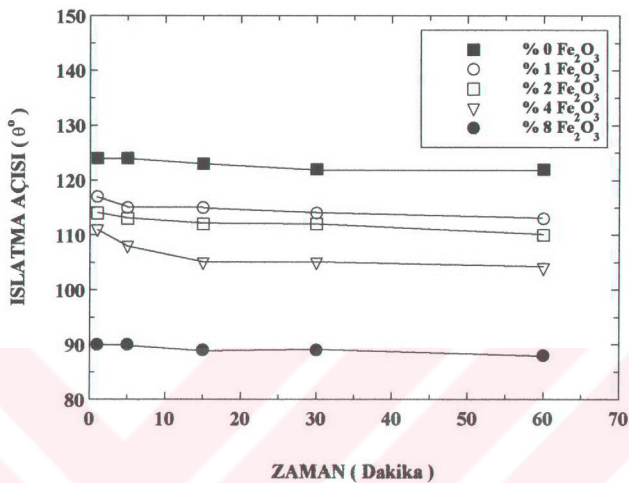
Resim 5.4. Alternatif fiber türüne bağlı θ görüntüleri (Temas süresi: 60 dakika)

5.1.5. MgO+SiO₂ fiber+Fe₂O₃ /sıvı çelik ısılatma açısı

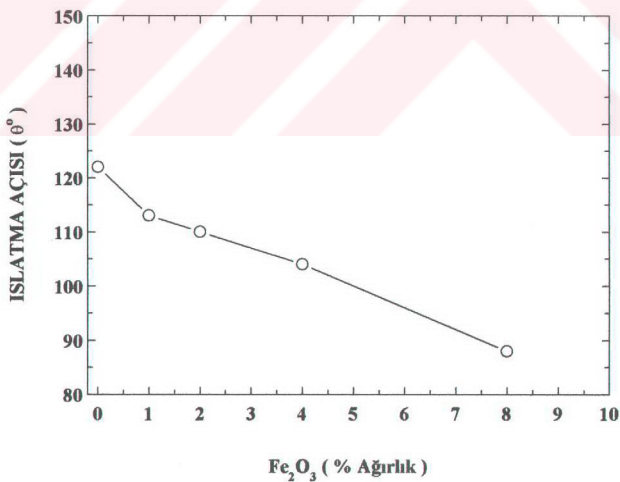
MgO+% 2 SiO₂'e Fe₂O₃ ilaveleri ile hazırlanan tandış astarın 7114K çelik ile ısılatılabilirliği 1550 °C'de argon gazı ortamında yapıldı. Deneylerde tespit edilen zamana bağlı θ değişimleri Çizelge 5.5 ve Şekil 5.7'de, 60 dakika temas süresi sonunda belirlenen θ ve görüntüleri Şekil 5.8 ve Resim 5.5'de gösterilmektedir.

Çizelge 5.5. MgO'e Fe₂O₃ ilaveleri ile θ 'nın zamana bağlı değişim değerleri

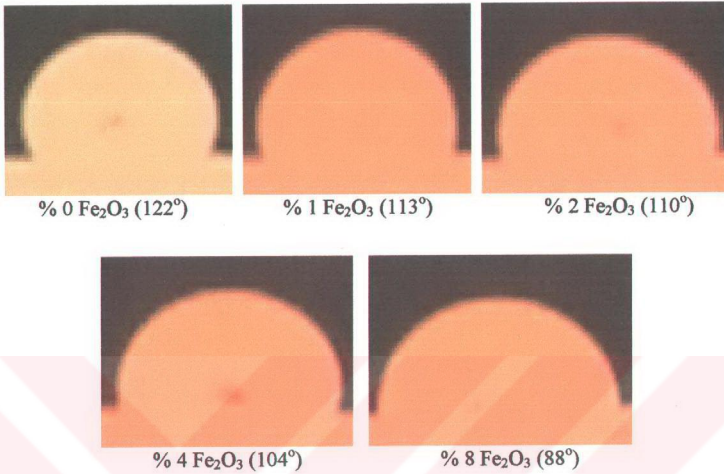
ASTAR MALZEME	KATKI MALZEMESİ	ISLATMA AÇISI (°)				
		1. dk.	5. dk.	15. dk.	30. dk.	60. dk.
MgO + % 2 SiO ₂ fiber	% 0 Fe ₂ O ₃ (fibersiz)	124	124	123	122	122
	% 1 Fe ₂ O ₃	117	115	115	114	113
	% 2 Fe ₂ O ₃	114	113	112	112	110
	% 4 Fe ₂ O ₃	111	108	105	105	104
	% 8 Fe ₂ O ₃	90	90	89	89	88



Şekil 5.7. MgO'e Fe₂O₃ ilaveleri ile θ 'nın zamana bağlı değişimi



Şekil 5.8. MgO'e ilave edilen Fe₂O₃ miktarına bağlı θ değişimi
(Temas süresi: 60 dakika)



Resim 5.5. MgO'e ilave edilen Fe_2O_3 miktarına bağlı θ görüntüleri
(Temas süresi: 60 dakika)

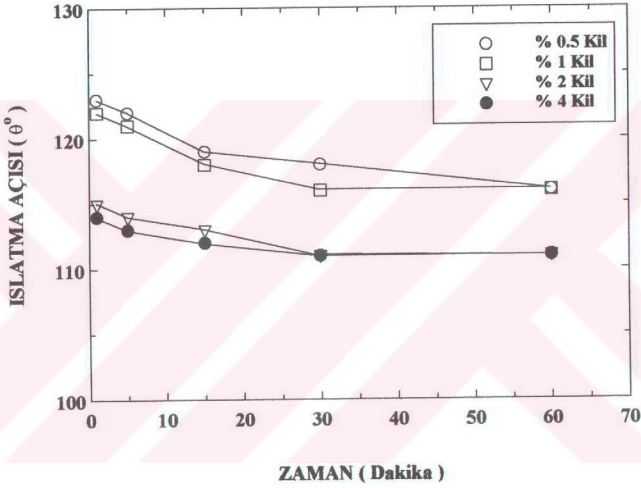
Deneyler, Fe_2O_3 ilavesi ile θ 'da büyük oranlarda düşüş olduğunu gösterdi. Fe_2O_3 içermeyen numunelerde 60 dakika temas süresi sonunda $\theta=122^\circ$ olurken % 1, 2, 4 ve 8 Fe_2O_3 ilaveleri ile sırasıyla θ ; 113° , 110° , 104° , 88° olduğu belirlendi. Özellikle % 8 Fe_2O_3 ilavesi ile ısıtma şartları ($\theta < 90^\circ$)'nın oluştuğu gözlemlendi.

5.1.6. MgO+SiO₂ fiber+kil /sıvı çelik ısıtma açısı

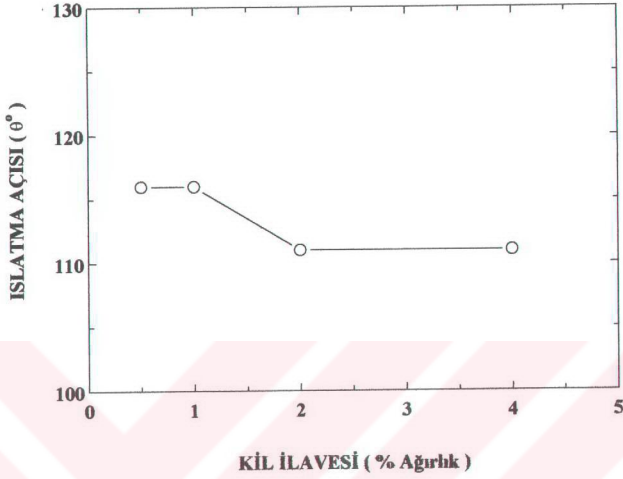
MgO+% 1 SiO₂ fiber'e kil ilaveleri ile hazırlanan tandış astarın 7114K çelik ile ısıtılabilirliği 1550°C 'de argon gazı ortamında yapıldı. Deneylerde tespit edilen zamana bağlı θ değişimleri Çizelge 5.6 ve Şekil 5.9'da, 60 dakika temas süresi sonunda belirlenen θ ve görüntüleri Şekil 5.10 ve Resim 5.6'da verilmiştir.

Çizelge 5.6 MgO'e kil ilaveleri ile θ 'nın zamana bağlı değişim değerleri

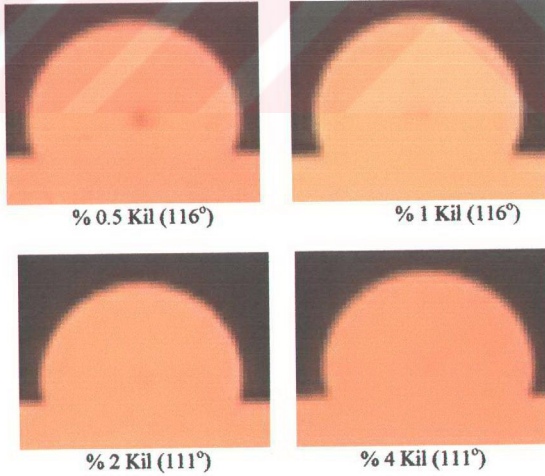
ASTAR MALZEME	KATKI MALZEMESİ	ISLATMA AÇISI (θ°)				
		1. dk.	5. dk.	15. dk.	30. dk.	60. dk.
MgO + % 1 SiO ₂ fiber	% 0,5 Kil	123	122	119	118	116
	% 1 Kil	122	121	118	116	116
	% 2 Kil	115	114	113	111	111
	% 4 Kil	114	113	112	111	111

Şekil 5.9. MgO'e kil ilaveleri ile θ 'nın zamana bağlı değişimi

Deneylerde, MgO+% 1 SiO₂ fiber'e % 2 kil ilavesine kadar θ 'da azalma gözlemlenmedi. % 2 üzerindeki kil ilavelerinde kayda değer azalmalar gözlemlendi. 60 dakika temas süresi sonucunda % 0,5 ve 1 kil ilaveleri ile $\theta=116^\circ$ olurken, % 2 ve 4 kil ilavelerinde $\theta=111^\circ$ olduğu belirlendi.



Şekil 5.10. MgO'e ilave edilen kil miktarına bağlı θ değişimi
(Temas süresi: 60 dakika)



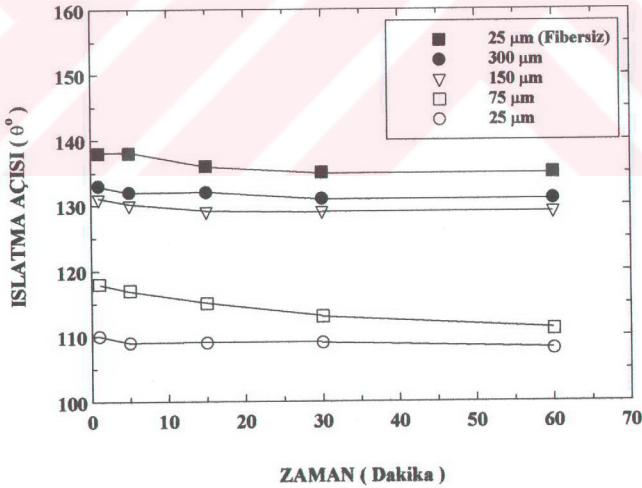
Resim 5.6. MgO'e ilave edilen kil miktarına bağlı θ görüntüleri
(Temas süresi: 60 dakika)

5.1.7. Farklı toz tane boyutundaki MgO+SiO₂ fiber /sıvı çelik ıslatma açısı

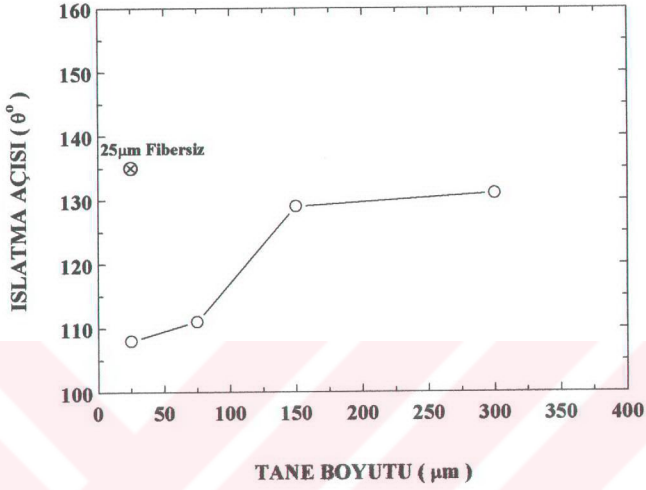
% 2 SiO₂ fiber+farklı toz tane boyutlarına sahip MgO tandış astarın 7114K çelik ile ıslatılabilirliği 1550 °C'de argon gazı ortamında yapıldı. Deneylerde tespit edilen zamana bağlı θ değişimleri Çizelge 5.7 ve Şekil 5.11'de, 60 dakika temas süresi sonunda belirlenen θ ve görüntüleri Şekil 5.12 ve Resim 5.7'de verilmiştir.

Çizelge 5.7. MgO toz tane boyutu ile θ 'nın zamana bağlı değişim değerleri

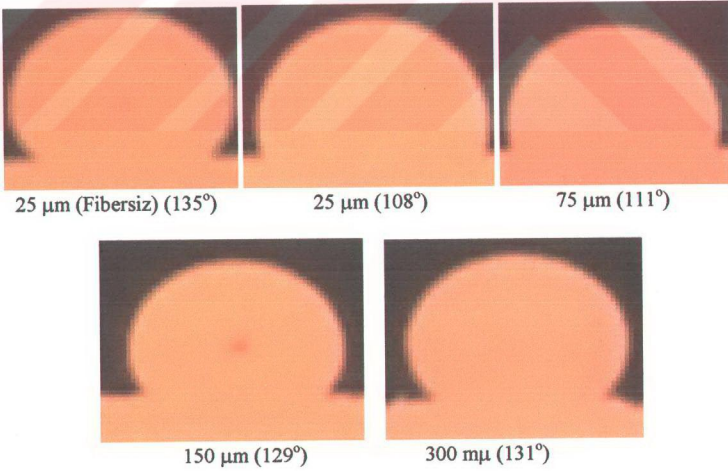
ASTAR MALZEME	MgO TOZ TANE BOYUTU (μm)	ISLATMA AÇISI (θ°)				
		1. dk.	5. dk.	15. dk.	30. dk.	60. dk.
MgO + % 2 SiO ₂ fiber	25 (fibersiz)	138	138	136	135	135
	300	133	132	132	131	131
	150	131	130	129	129	129
	75	118	117	115	113	111
	25	110	109	109	109	108



Şekil 5.11. MgO toz tane boyutu ile θ 'nın zamana bağlı değişimi



Şekil 5.12. MgO toz tane boyutuna bağlı θ değişimi (Temas süresi: 60 dakika)



Resim 5.7. MgO toz tane boyutuna bağlı θ görüntüleri (Temas süresi: 60 dakika)

Farklı toz tane boyutuna sahip $\text{MgO}+\% 2$ cam fiber içeren astar malzemelerde 60 dakika temas süresi sonunda artan toz tane boyutu ile θ 'da kayda değer artışlar gözlemlendi. $25\mu\text{m}$, $75\mu\text{m}$, $150\mu\text{m}$ ve $300\mu\text{m}$ farklı toz tane boyutuna sahip MgO 'e $\% 2$ cam fiber ilavesinde sırasıyla θ ; 108° , 111° , 129° , 131° olurken, fiber içermeyen $25\mu\text{m}$ toz tane boyutundaki MgO 'in $\theta=135^\circ$ olduğu belirlendi.

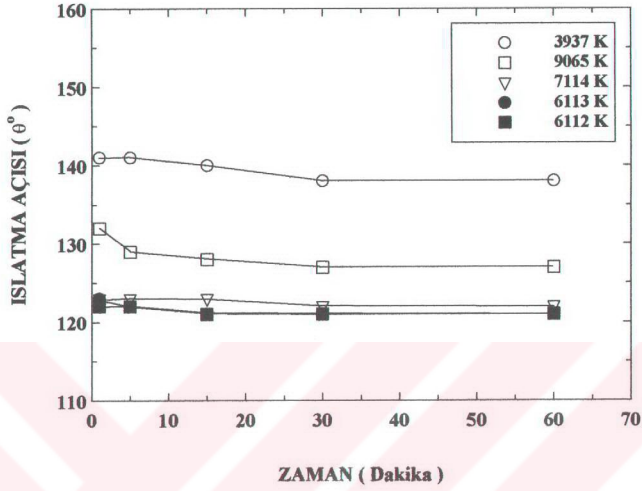
5.1.8. $\text{MgO}+\text{SiO}_2$ fiber /farklı sıvı çelik türü ıslatma açısı

$\text{MgO}+\% 1 \text{ SiO}_2$ fiber kompozisyonundaki tandış astarın farklı karbon içeriğindeki çelik malzeme türleri tarafından ıslatılabilirliği 1550°C 'de argon gazı ortamında yapıldı. Deneylerde tespit edilen zamana bağlı θ değişimleri Çizelge 5.8 ve Şekil 5.13'de, 60 dakika temas süresi sonunda θ ve görüntüleri Şekil 5.14 ve Resim 5.8'de verilmiştir.

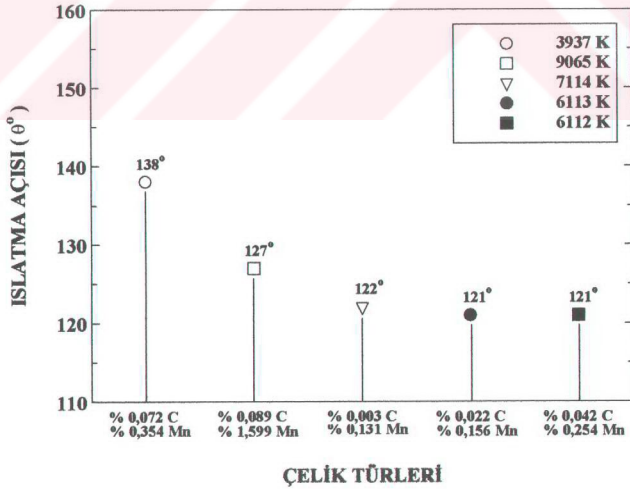
Çizelge 5.8. Farklı çelik türü ile θ 'nın zamana bağlı değişim değerleri

ASTAR MALZEME	ÇELİK TÜRÜ	ISLATMA AÇISI (θ°)				
		1. dk.	5. dk.	15. dk.	30. dk.	60. dk.
MgO + $\%1 \text{ SiO}_2$ fiber	3937 K	141	141	140	138	138
	9065 K	132	129	128	127	127
	7114 K	123	123	123	122	122
	6113 K	123	122	121	121	121
	6112 K	122	122	121	121	121

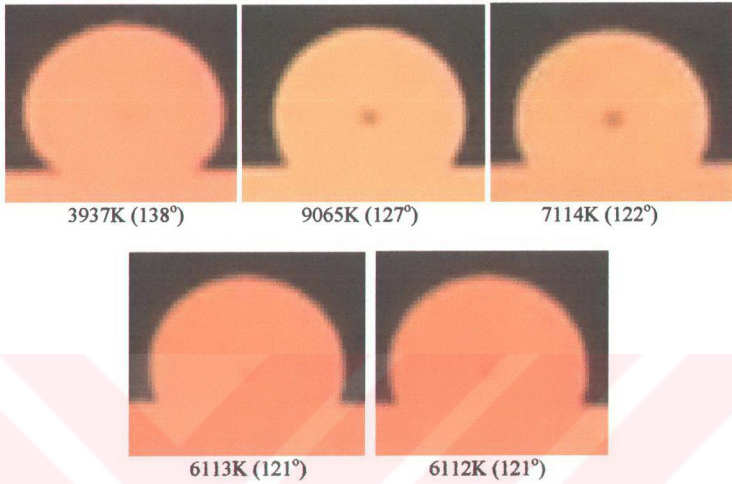
Deneylerde $\% 0,003-0,042 \text{ C}$ 'lu çeliklerin θ 'da değişiklik olmazken C içeriği $\% 0,042$ üzerindeki çeliklerde θ 'da belirgin bir artma gözlemlendi. 60 dakika temas süresi sonunda $\text{MgO}+\% 1 \text{ SiO}_2$ fiber astar malzeme ile 6112K, 6113K, 7114K çelik malzeme arasındaki $\theta=122^\circ$ olurken 9065K için $\theta=127^\circ$ ve 3937K için $\theta=138^\circ$ olduğu gözlemlendi.



Şekil 5.13. Çelik türü ve zamana bağlı θ 'nın değişimi



Şekil 5.14. Çelik türüne bağlı θ değişimi (Temas süresi: 60 dakika)



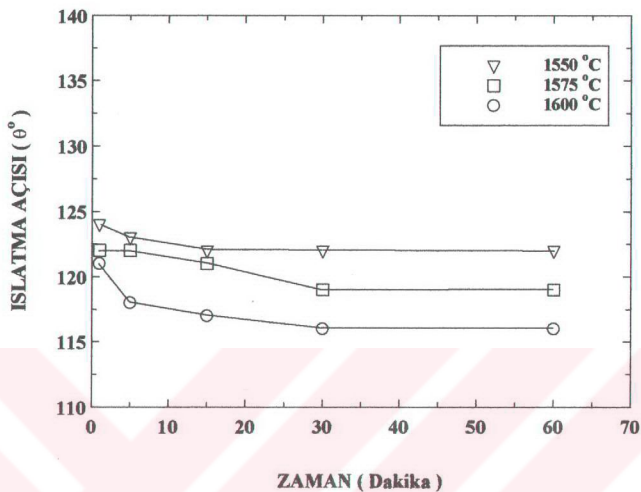
Resim 5.8. Çelik türüne bağlı θ görüntüleri (Temas süresi: 60 dakika)

5.1.9. MgO+SiO₂ fiber /sıvı çelik ıslatma açısının sıcaklığa bağlı değişimi

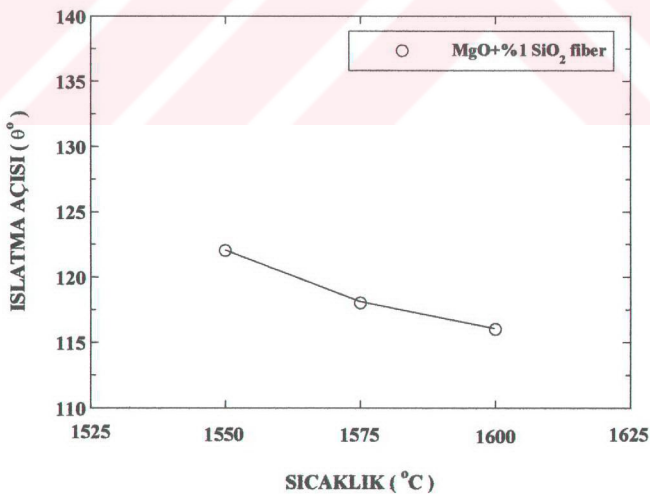
MgO+% 1 SiO₂ fiber kompozisyonundaki tandış astarın 7114K çelik malzeme tarafından ıslatılabilirliği argon gazı ortamında üç farklı sıcaklıkta yapıldı. Deneylerde tespit edilen zamana bağlı θ değişimleri Çizelge 5.9 ve Şekil 5.15'de, 60 dakika temas süresi sonunda θ ve görüntüleri Şekil 5.16 ve Resim 5.9'da verilmiştir.

Çizelge 5.9. Farklı sıcaklıklarda θ 'nın zamana bağlı değişim değerleri

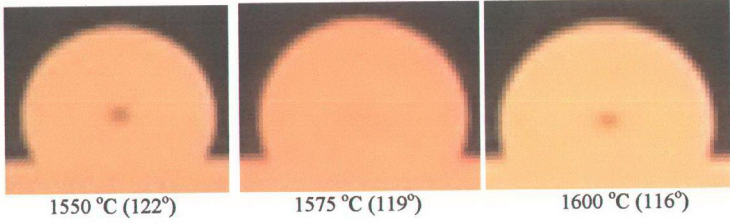
ASTAR MALZEME	SICAKLIK (°C)	ISLATMA AÇISI (°)				
		1. dk.	5. dk.	15. dk.	30. dk.	60. dk.
MgO+ %1 SiO ₂ fiber	1550	124	123	122	122	122
	1575	122	122	121	119	119
	1600	121	118	117	116	116



Şekil 5.15. Farklı sıcaklıklarda θ 'nın zamana bağlı değişimi



Şekil 5.16. Sıcaklığa bağlı θ değişimi (Temas süresi: 60 dakika)



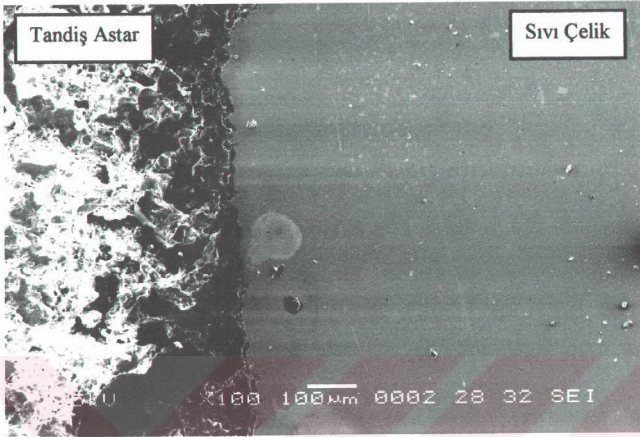
Resim 5.9. Sıcaklığa bağlı θ görüntüleri (Temas süresi: 60 dakika)

Deneylerde artan sıcaklıkla birlikte θ 'da belirgin bir azalma gözlemlendi. 60 dakika temas süresi sonunda 1550 °C'de $\theta=122^\circ$, 1575 °C'de, $\theta=119^\circ$ ve 1600 °C'de $\theta=116^\circ$ olduğu belirlendi.

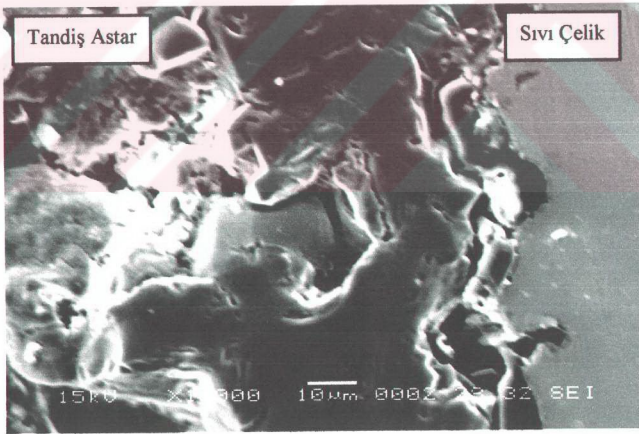
5.2. MgO Tandış Astar /Sıvı Çelik Arayüzey SEM İncelemeleri

5.2.1. Erdemir tandış astarı /sıvı çelik arayüzey SEM incelemesi

Erdemir (A) tandış püskürtme astarı/sıvı çelik arayüzeyinden çekilen SEM görüntüleri Resim 5.10 ve Resim 5.11'de görülmektedir.



Resim 5.10. Erdemir(A) tandış astarı/sıvı çelik arayüzey SEM görüntüsü (x100)

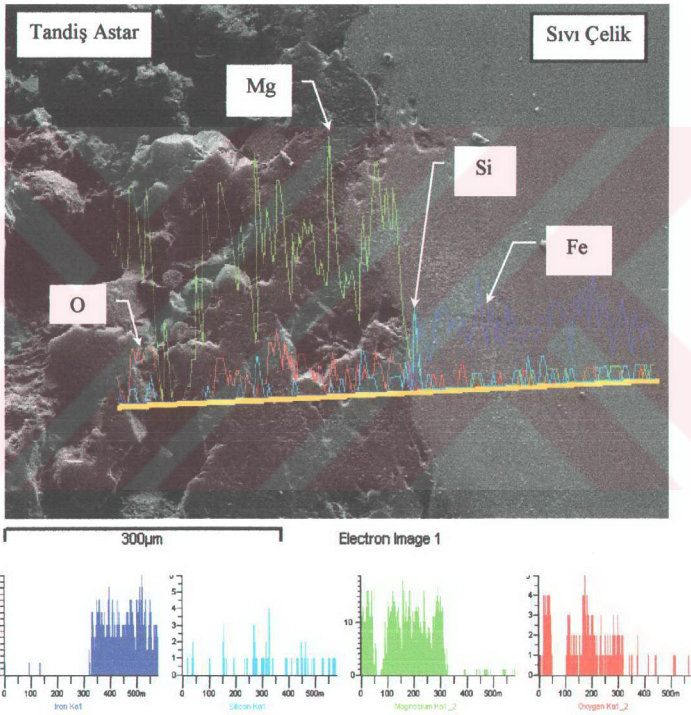


Resim 5.11. Erdemir(A) tandış astarı/sıvı çelik arayüzey SEM görüntüsü (x1000)

Resim 5.11'deki yüksek boyuttaki SEM görüntüsünde arayüzeyin düzgün olmadığı diğer bir deyişle tandış astar/sıvı çelik arayüzeyinde etkileşimin olduğu gözlemlenmiştir.

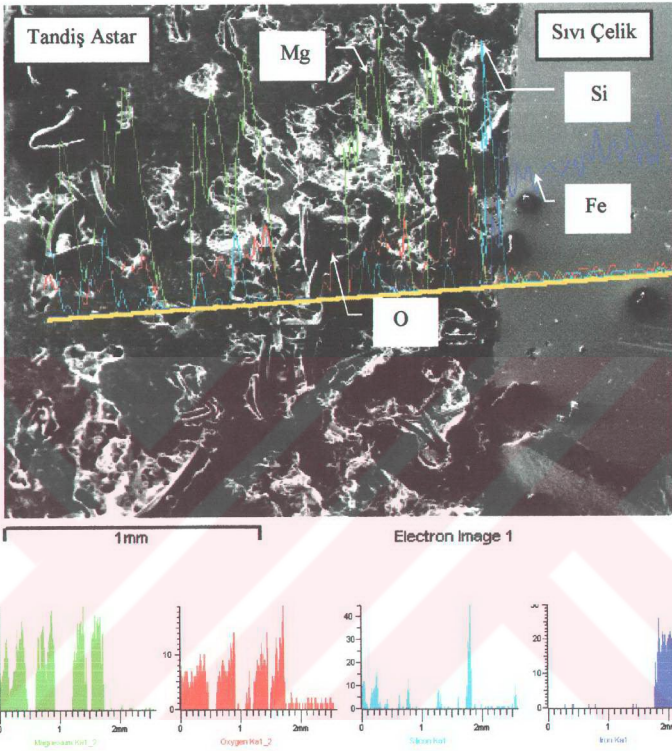
5.2.2. MgO+SiO₂ fiber /sıvı çelik arayüzey SEM incelemesi

MgO'e SiO₂ fiber ilaveleri ile hazırlanan tandış püskürtme astarı/sıvı çelik arayüzeyinden çekilen SEM ve EDS görüntüleri Resim 5.12 ve Resim 5.13'de görülmektedir.



Resim 5.12. MgO+ % 1 SiO₂ fiber/sıvı çelik arayüzey SEM ve EDS görüntüsü

Resim 5.12'deki SEM ve EDS analizine göre astar malzemeye % 1 SiO₂ fiber ilavesi ile sıvı çelik/tandış astar arayüzeyinde belirli bir miktar Si pikinin var olduğu gözlemlenmiştir.

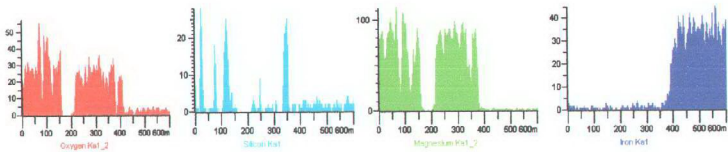
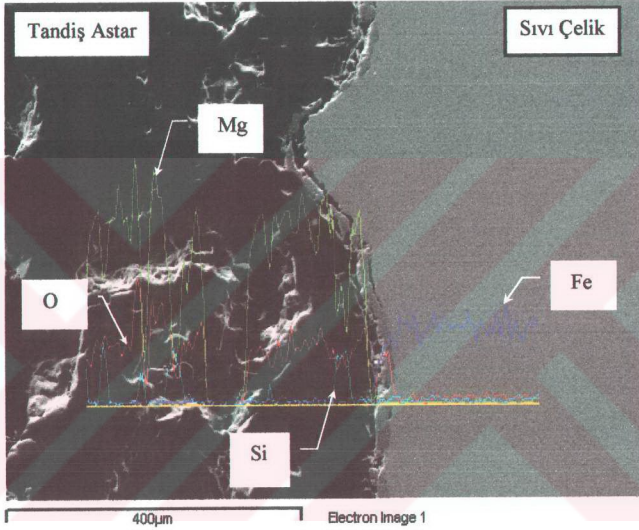


Resim 5.13. MgO+ % 8 SiO₂ fiber/sıvı çelik arayüzey SEM ve EDS görüntüsü

Resim 5.13’de, MgO+% 8 SiO₂ fiber katkıli tandış astar/sıvı çelik arayüzey SEM incelemeleri görülmektedir. Resim 5.13 ile Resim 5.12 karşılaştırıldığında arayüzeyde Si pikinde kayda değer bir artma meydana gelmiştir.

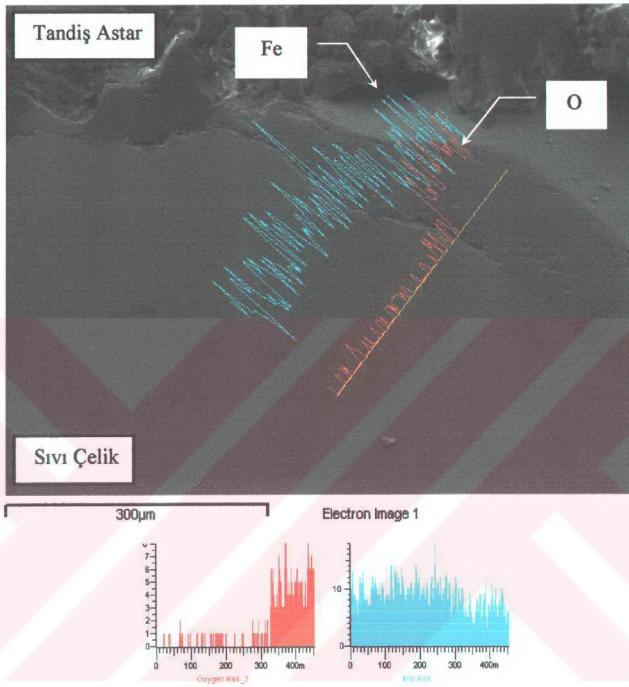
5.2.3. MgO+SiO₂ fiber+Fe₂O₃ /sıvı çelik arayüzey SEM incelemesi

MgO+ % 2 SiO₂ fiber+ % 8 Fe₂O₃ kompozisyonundaki tandış püskürtme astarı/sıvı çelik arayüzey SEM ve EDS görüntüleri Resim 5.14-5.16'da görülmektedir.



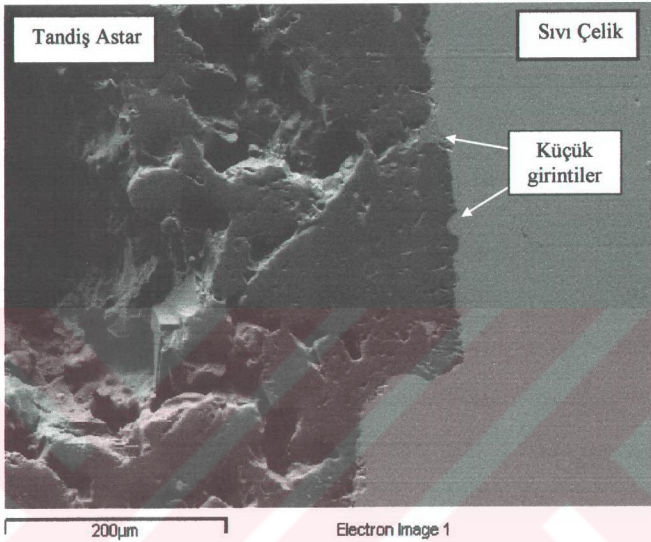
Resim 5.14. MgO+ % 2 SiO₂ fiber +% 8 Fe₂O₃/sıvı çelik arayüzey SEM ve EDS görüntüsü

Astar malzemeye Fe₂O₃ ilavesi yapıldığında arayüzeyde bir film tabakasının meydana geldiği gözlemlenmiştir (Resim 5.14). EDS analizlerinde arayüzeyde Fe pikinin yanı sıra O pikinde de artma gözlemlenmiştir.



Resim 5.15. $\text{MgO} + \% 2 \text{SiO}_2$ fiber $+ \% 8 \text{Fe}_2\text{O}_3$ /sıvı çelik arayüzey SEM ve EDS görüntüsü

Resim 5.14’de gözlemlenen arayüzeydeki tabakanın çelik damlası yüzeyinde de oluştuğu görülmektedir (Resim 5.15). Bu tabakanın O ve Fe elementlerinden oluştuğu EDS ile tespit edilmiştir.

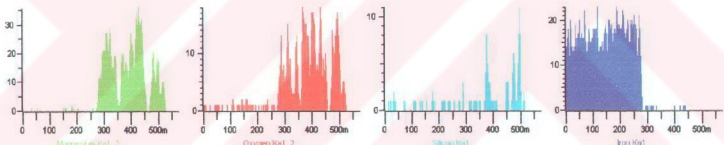
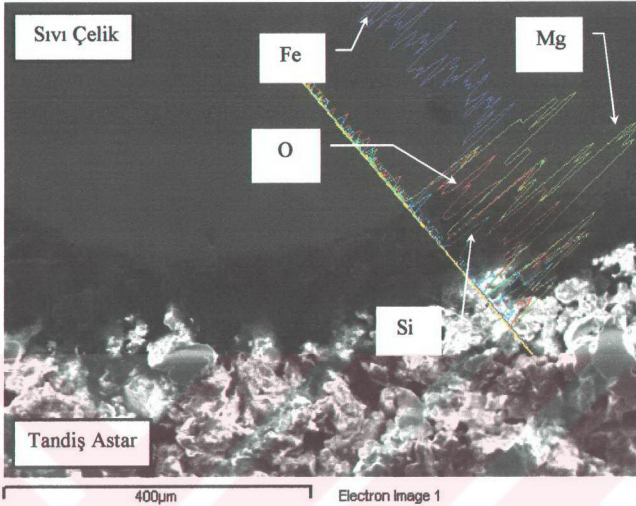


Resim 5.16. $\text{MgO} + \% 2 \text{SiO}_2$ fiber $+ \% 8 \text{Fe}_2\text{O}_3$ / sıvı çelik arayüzey SEM görüntüsü

Resim 5.16'daki SEM görüntüsünde astar malzemeye Fe_2O_3 ilavesi ile tandış astar yüzeyindeki çok küçük pürüzlülüklere sıvı çeliğin girdiği gözlemlenmiştir.

5.2.4. $\text{MgO} + \text{SiO}_2$ fiber+kil / sıvı çelik arayüzey SEM incelemesi

$\text{MgO} + \% 1 \text{SiO}_2$ fiber $+ \% 4$ kil kompozisyonundaki tandış püskürtme astarı/sıvı çelik arayüzey SEM ve EDS görüntüsü Resim 5.17'de verilmiştir.

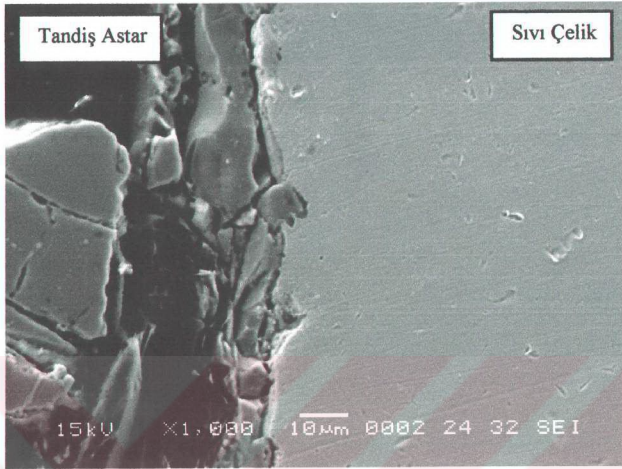


Resim 5.17. $\text{MgO} + \% 1 \text{ SiO}_2$ fiber + $\% 4$ kil / sıvı çelik arayüzey SEM ve EDS görüntüsü

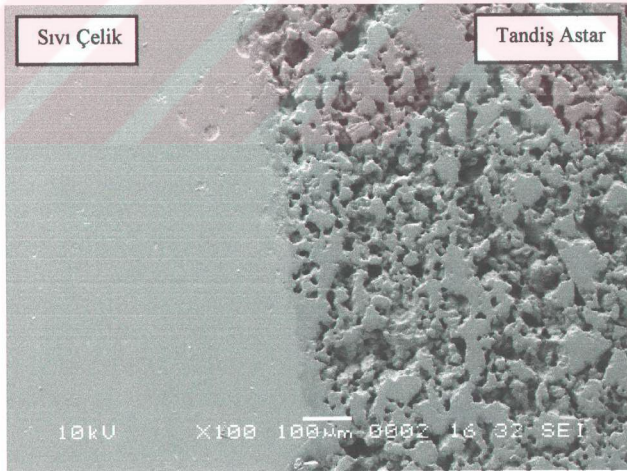
Tandiş astar malzemesine kil ilavesi ile çelik damlanın, astar malzemesi içerisine bir oyuntu halinde ilerlediği SEM incelemesi ile gözlemlenmiştir (Resim 5.17). Ayrıca $\text{MgO} + \text{SiO}_2$ astar malzemesine oranla yapının daha fazla gözenekli olduğu görülmüştür.

5.2.5. Farklı toz tane boyutundaki $\text{MgO} + \text{SiO}_2$ fiber / sıvı çelik arayüzey SEM incelemesi

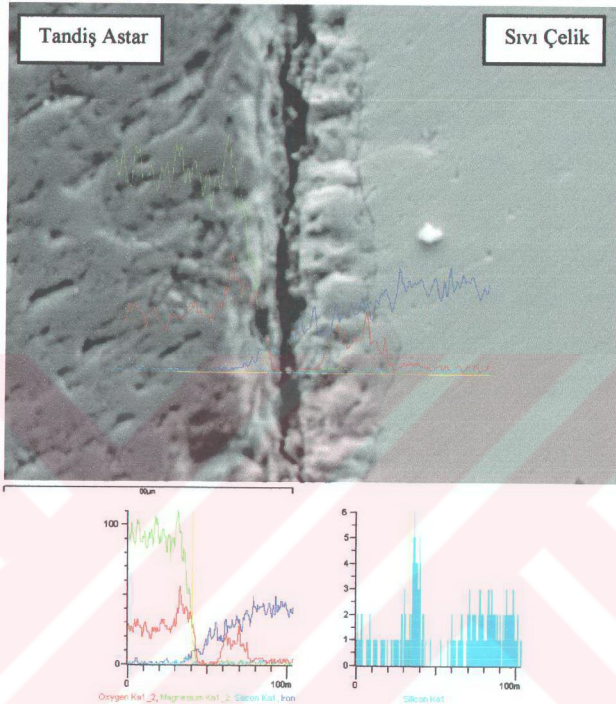
Farklı toz tane boyutundaki $\text{MgO} + \text{SiO}_2$ fiber / sıvı çelik arayüzey SEM görüntüleri Resim 5.18 - 5.20'de görülmektedir.



Resim 5.18. MgO (150 μm) + % 2 SiO₂ fiber /sıvı çelik arayüzey SEM görüntüsü



Resim 5.19. MgO (25 μm) + % 0 SiO₂ fiber /sıvı çelik arayüzey SEM görüntüsü



Resim 5.20. MgO (25 μm)+ % 2 SiO₂ fiber /sıvı çelik arayüzey SEM görüntüsü

Resim 5.19'da fiber içermeyen, Resim 5.20'de % 2 SiO₂ fiber içeren ortalama toz tane boyutu (25 μm) aynı olan tandış astar/sıvı çelik arayüzey SEM ve EDS incelemeleri görülmektedir. Her iki resim karşılaştırıldığında Resim 5.20'de arayüzeyde Si elementinin olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca Resim 5.18'de MgO (150μm) tandış astar/sıvı çelik arayüzeyinde pürüzlenmenin arttığı görülmüştür.

6. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

6.1. Temas Süresi / Islatma Açısı Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Çizelge 5.1 ve Şekil 5.1'de ıslatma aşısının temas süresine bağlı değişiminde görüldüğü üzere, ilk 15 dakika temas süresinde θ 'da zamana bağlı azalma olurken, temas süresi 15 dakikadan fazla olduğunda θ 'da zamanla fazla bir değişiklik gözlenmemiştir. Islatma açısının ilk birkaç dakika düşüp daha sonra düşüşün azalmasının sebebi ise, MgO gibi sıvı çeliğe karşı reaktif olmayan bir sistemin θ , reaktif sistemlere göre çok daha kısa zaman içerisinde dengeye gelmesi ve daha yavaş ilerlemesi ile açıklanabilir. Bir çok araştırmacı (13,20) reaktif olmayan sistemlerde θ 'nın ilk birkaç dakika içinde dengeye geldiği rapor edilmektedir ki bu çalışma ile uyumluluk göstermektedir.

6.2. Erdemir Astarı / Sıvı Çelik Islatma Açısı Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Erdemirce halen uygulamalarda kullanılmakta olan tandiş astarı/sıvı çelik ıslatma açıları A bileşimi için $\theta=115^\circ$, B bileşimi için $\theta=112^\circ$ olduğu tespit edilmiştir. Vakum kullanılarak yapılan deneyler sonucunda sıvı çelik damlada temas süresi boyunca yüksek vakumdan (10^{-5} mbar) dolayı damla hacminde belirgin azalma tespit edilmiştir. Dolayısıyla Şekil 5.2'de görüldüğü üzere ilk 15 dakika temas süresi sonunda veri alınamamıştır. Damla hacmindeki bu azalmanın sebebi, sıvı çeliğin yüksek sıcaklıklarda buharlaşma basıncından meydana gelmesine dayandırılmıştır. Şekil 3.11 çeliğin farklı sıcaklıklardaki buharlaşma basınçlarını göstermektedir. Şekle göre kullanılan 10^{-5} mbar'lık vakum, 1550°C 'de çeliğin buharlaşma basıncına tekabül etmektedir.

Benzer sonuçlar, Stefanescu ve arkadaşları (45) tarafından da rapor edilmiştir. Yüksek saflıktaki (%99,93 Fe) demir ile kuvars'ın ıslatılabilirliğini çalışan Stefanescu ve arkadaşları (45), 4×10^{-8} atm. vakumda çelik damlasının hacminde belirgin azalma olduğunu belirlemişler ve bunun sebebini çeliğin vakumdan dolayı

buharlaşmasına dayandırmışlardır. Resim 5.10 ve 5.11’de Erdemir A astarı/sıvı çelik arayüzeyi görülmektedir. Arayüzeyde bir miktar etkileşim görülmüştür. Arayüzey pürüzlenmesi olarak görülen bu etkileşimin arayüzeyde cam fazın birikmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Bu kısım ile ilgili olarak değerlendirme bundan sonraki bölümde detaylı olarak açıklanacaktır.

6.3. MgO+SiO₂ Fiber / Sıvı Çelik Islatma Açısı Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Deneylerde fiber ilavesi olmayan MgO astar malzemesi üzerine düşük karbonlu çeliğin θ ’nın 122° olduğu tespit edilmiştir. Fakat literatürde (33) yoğun MgO üzerine ergimiş çeliğin θ ’nın 128° olduğu rapor edilmiştir. Sonuçlar literatürdeki değerlerden biraz sapmaktadır. θ ’daki bu farklılığın sebebi, altlık numunesinin kimyasal bileşiminin ve kullanılan çelik bileşiminin farklılığından kaynaklandığına inanılmaktadır. Literatürde (33) ifade edilen MgO, saf’a yakın bileşimdedir. Ayrıca yüzey pürüzlülüğü de θ ’yı azaltmaktadır. Bu çalışmada kullanılan MgO toz boyutu 0-600 μm olduğundan yüzey pürüzlülüğü kaçınılmaz olmuştur. Dolayısıyla düz yüzeyden pürüzlü yüzeye geçişte damla ile altlık arasındaki temas alanının artmasıyla θ ’nın düştüğü düşünülmektedir.

MgO astar malzemesine SiO₂ fiber ilaveleri ile 60 dakikalık temas süresinde zamana bağlı olarak θ ’da azalma görülmüştür. Fiber içermeyen ve %1 SiO₂ fiber içeren numunelerde θ , 60 dakika temas süresi sonunda yaklaşık 122° olurken, % 2, 4 ve 8 SiO₂ fiber ilavelerinde ani bir düşüşle yaklaşık $\theta=111^\circ$ olmuştur. Bu düşüşün, SiO₂’in ergimesiyle arayüzeyde birikmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. SEM ve EDS analizlerinde de (Resim 5.12, 5.13) MgO içerisindeki SiO₂ fiber miktarı artarken astar malzeme/sıvı çelik arayüzeyinde cam fazın miktarının da arttığı belirlenmiştir. Bu durum şöyle açıklanabilir; SEM görüntülerinden de görüldüğü gibi deney sıcaklığında cam faz sıvı halde bulunmaktadır (2,32). Muhtemelen sıvı cam faz kapiler etkiden dolayı (Eş. 2.16) katı sıvı arayüzeyine yükselmekte ve arayüzeyde silika miktarı zenginleşmektedir. MgO’e %1 SiO₂ fiber ilavesi ile θ ’nın çok az miktarda azalması, oluşan sıvı cam fazın miktarının yüzeye çıkacak kadar fazla

oranda olmadığından kaynaklandığı sanılmaktadır. Resim 5.12 ve 5.13'de sırasıyla % 1 ve 8 SiO₂ fiber içeren MgO-sıvı çelik arayüzey EDS analizleri yukarıdaki savı desteklemektedir. Zira % 1 SiO₂ fiber içeren arayüzeyde çok az Si piki bulunurken % 8 SiO₂ içeren arayüzeyde Si piki oldukça yükselmiştir. Literatürde (46) SiO₂ üzerine çeliğin θ 'nın 112° olduğu rapor edilmiştir. Bu çalışmada MgO'e % 2, 4 ve 8 SiO₂ fiber ilavesi ile çeliğin θ 'nın sırası ile 112°, 112° ve 111° olduğu tespit edilmiştir. Diğer bir literatür çalışmasında (44,48) ise korondum malzemeye ilave edilen silikanın θ 'yı azalttığı rapor edilmiş fakat araştırmada arayüzey incelenmediğinden cam fazın varlığı belirtilmemiştir. Bu çalışmada ise MgO içerisinde SiO₂ fiber miktarı artarken astar malzeme/sıvı çelik arayüzeyinde cam fazın miktarının da arttığı belirlenmiştir. Dolayısıyla ölçülen θ , gerçekte SiO₂/sıvı çelik θ olarak kendini göstermektedir. Literatürdeki (44,48) korondum/sıvı çelik θ ile bu çalışmada MgO'e % 2, 4, 8 SiO₂ fiber ilavesi oluşan θ 'nın aynı düşme eğilimini vermesi bu ilişkiyi daha da güçlendirmektedir.

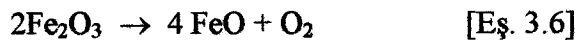
6.4. MgO+Alternatif Fiber/Sıvı Çelik Islatma Açısı Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Alternatif fiber olarak kullanılan karbon fiber, kestamit fiber, kaya yünü, alümina fiber ve kağıt fiberler arasındaki θ 'nın yükselmesi C fiber ile gerçekleşmiştir. C fiber ile θ 'daki bariz yükselme (128°), C difüzyonu ile çeliğin C oranının bir miktar artması ve çeliğin yüzey geriliminin artmasından kaynaklandığı sanılmaktadır. Ayrıca C fiberin MgO astarı yüzeyinde bir miktar alan kapladığı ve dolayısıyla sıvı damla ile temas ettiği aşıkardır. Literatürde (54) sıvı çelik/grafit arayüzeyinde temas süresi arttıkça θ 'da yükselme gözlenmiştir. Bu durum C'un sıvı çeliğe difüzyonu ve çeliğin yüzey enerjisinin artması olarak yorumlanmıştır. Jimbo ve Cramb (34) yaptıkları çalışmada artan C miktarı ile sıvı çeliğin yüzey geriliminin ortalama 30 mN/m kadar arttığını rapor etmişlerdir. Ancak, refrakter malzemedeki C fiberin difüzyonunun ne kadar gerçekleştiği ve bunun yüzey enerjisine ne kadar etki yaptığı literatürde bulunmamaktadır ve detaylı ayrı bir çalışmayı gerektirmektedir.

Bilindiği üzere kestamit (C-H-O-N) bağ yapısına sahiptir ve yaklaşık 240 °C’de ergiyip 450 °C’de yanmaktadır. Bu çalışmada kestamit, refrakterin yaş dayanımını sağlamak amacıyla kullanılmıştır.. Yaş dayanımını sağlamanın yanı sıra % 2 SiO₂ fiber ilavesinde gözlenen θ ’daki düşme önlenmiştir. Diğer bir deyişle MgO’in yüzey enerjisinde bir değişiklik yapmamakla birlikte negatif bir etki de göstermemiştir. Kaya yünü (Al₂O₃+SiO₂) fiber kullanımı da θ ’da kayda değer bir değişiklik göstermemiştir. Ancak % 2 SiO₂’de görülen düşüşün gözlenmemesi yaş dayanımı sağlaması açısından avantaj olarak yorumlanabilir. Kağıt fiber kullanımı da C fiber hariç yukarıdaki kestamit, alümina ve kaya yününden elde edilen değerleri (121°) vermiştir.

6.5. MgO+Fe₂O₃ / Sıvı Çelik Islatma Açısı Sonuçlarının Değerlendirilmesi

MgO+% 2 SiO₂’e % 0-8 oranlarında Fe₂O₃ ilave edildi. Diğer karışımlarda SiO₂ miktarı % 1 iken burada SiO₂’nin % 2 olmasının sebebi Erdemir çalışma şartlarından kaynaklanmaktadır. Zira Erdemir tandiş astarında yaklaşık % 2 SiO₂ fiber kullanılmaktadır. Deneysel sonuçlar, MgO’e Fe₂O₃ ilavesi ile θ ’da oransal düşme olduğu gözlemlendi. Fe₂O₃ içermeyen numunelerde θ , 60 dakika temas süresi sonunda 122° olurken %1, 2, 4 ve 8 Fe₂O₃ ilaveleri ile θ , 60 dakika sonunda doğrusal bir düşüşle sırası ile 113°, 110°, 104°, 88° olmuştur. Bu sonuçlar neticesinde % 8 Fe₂O₃ ilavesi ile ıslatma şartları ($\theta < 90^\circ$) oluşmuştur. MgO astar malzemesine ilave edilen Fe₂O₃ miktarı ile θ ’nın azalması, deney sıcaklığında Fe₂O₃’ün ayrıştığını ve bununla θ ’yı düşürdüğü düşünülmektedir. Literatürde (37) ifade edilen Gibbs serbest enerji değişimine göre, Fe₂O₃ yüksek sıcaklıklarda dengesizdir ve aşağıda verilen “Eş. 3.6”ya göre FeO’e dönüşmektedir.

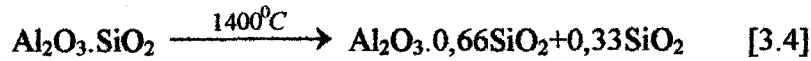
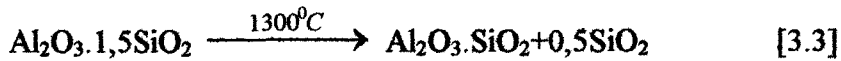
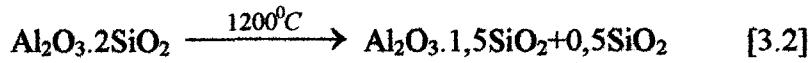
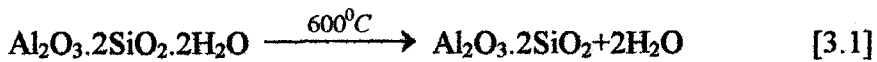


Gerçekte de, SEM ve EDS analizlerinden (Resim 5.14, 5.15) belirlendiği gibi MgO tandiş astar-sıvı çelik arayüzeyinde demir (Fe) ve oksijen (O) elementlerini içeren ince bir tabaka meydana geldiği gözlenmiştir. Oluşan bu tabakanın FeO olduğu

düşünülmektedir. Burada en önemli olan nokta reaksiyonla belli bir değerde O_2 açığa çıkmakta ve yüzey aktif elementi olan O_2 (52,53,55) sıvı çeliğin yüzey gerilimini düşürerek θ 'nın azalmasına yol açmaktadır. Literatürde de (39,52,53) O_2 'nin sıvı çeliğin θ 'sını şiddetle düşürdüğü ittifakla rapor edilmektedir. Çeliğin yüzey enerjisinin düştüğü veya diğer bir deyişle yapıya O_2 aldığıının belirgin diğer bir göstergesi arayüzeyde çok küçük girintilere bile sıvı çeliğin işlemesidir (Resim 5.16). Fe_2O_3 ilavesi olmayan damlaların deney sonrası yüzeyi gri renkli iken, Fe_2O_3 katkılı damla yüzeylerinde kahverengi tabaka oluşması Resim 5.15'deki SEM görüntüsü ile beraber EDS analizleri ile bu tabakanın Fe ve O'dan meydana gelmesi, ortamda bir O_2 kaynağının ifadesidir ki bu da yukarıdaki savı desteklemektedir.

6.6. MgO+Kil / Sıvı Çelik Islatma Açısı Sonuçlarının Değerlendirilmesi

MgO'e kil ilavesi, MgO ve MgO+%1 SiO_2 kompozisyonuna göre θ 'da yaklaşık 10° lik bir azalma ile $\theta=111^\circ$ olarak gerçekleşmiştir. Bu azalmanın sebebi kilin $1400^\circ C$ üzerindeki sıcaklıklarda mullite dönüşmesi ve aşağıdaki "Eş.3.1-3.5"'de ifade edilen reaksiyon ile açığa çıkan SiO_2 'in cam fazın oluşumuna yol açtığı şeklinde yorumlanmıştır (32).



Ayrıca "Eş.3.1"'e göre kilin yapısındaki su $600^\circ C$ 'de uzaklaşmaktadır (2,32). Kil ilavesi ile çelik damlalarının bir oyuntu şeklinde astar malzemesi içerisine doğru ilerlemesi, kilin yapısındaki suyun $600^\circ C$ 'den sonra kaybolması ile astar malzeme tozlarının etrafındaki kilde meydana gelen hacimsel azalma sonucu olarak

açıklanabilir. SEM ve EDS (Resim 5.17) analizlerinde arayüzeyde Si elementinin arttığı gözlenmiştir. Dolayısıyla arayüzeyde açığa SiO_2 miktarı ile oluşan cam faz θ 'daki azalmaya sebep olduğu düşünülmektedir.

6.7. MgO Toz Tane Boyutu/Sıvı Çelik Islatma Açısı Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Sıvı çelik/MgO arasındaki θ toz tane boyutunun artmasıyla artış göstermektedir (Şekil 5.12). Bu artış 150 μm toz tane boyutundan sonra neredeyse sabitleşmektedir. 150 μm tane boyutundan daha düşük tane boyutunda θ 'nın düşük çıkması MgO içerisindeki SiO_2 'nin kapiler etki "Eş.2.16" ile yüzeye çıkması olarak yorumlanmıştır. Zira 25 μm fiberli numune ile 25 μm fibersiz numunenin θ 'ları karşılaştırıldığında fiberli numunede $\theta=108^\circ$ iken fibersiz numunede $\theta=135^\circ$ 'dir. Aradaki tek fark SiO_2 miktarıdır (Şekil 5.12). Burada 25 μm fibersiz ile 300 μm tane boyutlu fiberli numuneler arasındaki θ farkı çok azdır. Bu fark aynı zamanda iki sonucu desteklemektedir. Şöyle ki; büyük tane boyutunda taneler arası boşlukların büyük olması ile kapiler etkinin "Eş.2.16"'ya göre az olması beklenir. Buda yüzeye SiO_2 'nin çıkmasının zor olması demektir. Diğer sonuç ise; 25 μm fibersiz ile 300 μm tane boyutlu fiberli numuneler arasındaki θ 'ların birbirine çok yakın olması ölçümlerin doğruluğunun ifadesidir. Aradaki küçük fark yüzey pürüzlülüğünden kaynaklanmaktadır. Giese ve arkadaşları (46) kuvars (SiO_2)/ Fe-C-Si sisteminde kuvars toz tane boyutunun ıslatma açısına etkisini araştırmışlar ve toz tane boyutu arttıkça θ 'da azalma olduğunu rapor etmişlerdir. θ 'daki azalmanın sebebini düzgün yüzeyden pürüzlü yüzeye geçişte (Şekil 3.13) katı-sıvı arayüzey alanının artması ile birlikte yapışma işinin artmasına bağlamışlardır. Dolayısıyla bu çalışmada literatürle paralellik göstermekte ve desteklenmektedir.

6.8. Çelik Türü /Islatma açısı Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Deneylerde % 0,003-0,042 C'lu çeliklerin θ 'da değişiklik olmazken C içeriği % 0,042 üzerindeki çeliklerde θ 'da belirgin bir artma gözlemlendi (Şekil 5.15). Şekil

5.15'de göze çarpan 3937K çelik malzeme ile 9065K malzeme arasındaki farktır. C miktarı birbirine çok yakın olmasına rağmen θ 'da dikkate değer bir azalma söz konusudur. İki çelik arasındaki fark ise Mn miktarıdır. 3937K çelik malzeme % 0,354 Mn ihtiva ederken 9065K çelik malzeme yaklaşık % 1,6 Mn içermektedir. Bu sonuç Giese ve arkadaşlarının (46) sonuçlarıyla uyumludur. Giese ve arkadaşları (46) SiO_2 /Fe-C-Si sisteminde, Fe-C-Si alaşımına ilave edilen Mn'ın sıvı metalin yüzey enerjisini azalttığını ve θ 'da azalmaya sebep olduğunu rapor etmişlerdir.

Şekil 5.15'de dikkate değer ikinci nokta ise C'nun θ 'ya etkisidir. 3937K malzeme ile 6112K malzeme karşılaştırıldığında Mn miktarı arasındaki fark çok az iken C miktarı arasındaki fark yaklaşık 1,7 kattır. Bu sonuç çeliğin MgO ile yaptığı θ 'yı artırdığını göstermektedir ki buda çeliğin yüzey enerjisinin arttığına dayandırılmıştır. Jimbo ve Cramb (34) yaptıkları çalışmada C'un çeliğin yüzey enerjisini artırdığını rapor etmişlerdir ki bu çalışmayla paralellik göstermektedir.

6.9. Sıcaklık Değişimi /Islatma açısı Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Sonuçlar, sıcaklığın artması ile θ 'da düşme olduğunu göstermektedir (Şekil 5.15). θ 'daki azalmanın sebebi artan sıcaklıkla çeliğin yüzey enerjisindeki azalması olarak yorumlanmıştır. Birçok Literatürde (39,41-43,46,48) metallerin sıcaklığı arttıkça yüzey enerjilerinin de azalma meydana geldiği ifade edilmiştir. Dolayısıyla sıcaklık arttıkça θ 'nın azalması literatürle de desteklenmektedir.

7. SONUÇ ve ÖNERİLER

Tandiş astar/sıvı çelik ıslatma özelliklerinin araştırılmasında aşağıdaki sonuçlar gözlenmiştir.

1. MgO'e SiO₂ fiber ilavesi %1'e kadar θ 'yı etkilememekle beraber %1'in üstündeki ilaveler θ 'yı düşürmüştür. θ 'daki azalmanın sebebi, sıvı cam fazın tandiş astar/sıvı çelik arayüzeyinde kapiler etkiden dolayı birikmesinden olduğuna yorumlanmıştır.
2. MgO'e Fe₂O₃ ilavesiyle θ 'da oransal düşüşler gözlenmiştir. θ 'daki düşüşün nedeni Fe₂O₃'ün deney sıcaklığında FeO'ya dönüşmesi ve açığa çıkan O₂'nin çeliğin yüzey enerjisini düşürerek θ 'yı azalttığına dayandırılmıştır.
3. MgO tane boyutu arttıkça θ 'da dikkate değer artışlar görülmüştür. θ 'daki artışın sebebi, artan toz tane boyutunun kapiler etkiyi azaltarak arayüzeyde cam fazın oluşumunu engellediğine dayandırılmıştır.
4. MgO'e ilave edilen kil miktarı arttıkça θ düşmüştür. θ 'daki düşüşün nedeni reaksiyon ile açığa çıkan SiO₂'in tandiş astar/sıvı çelik arayüzeyinde cam fazın oluşumuna yol açtığı ve deney sıcaklığında kilin kimyasal bağlı suyu kaybetmesine bağlanmıştır.
5. MgO+SiO₂ fiber malzemeye, alternatif olarak ilave edilen C fiber haricinde diğer fiber türlerinde θ 'da belirli bir etkiye sahip olmamıştır. C fiber θ 'nın yükselmesini sağlamıştır. θ 'nın yükselmesinin sebebi C'un sıvı çeliğin yüzey enerjisini artırdığına yorumlanmıştır.
6. Bütün θ ölçümlerinde ilk 15 dakika temas süresi aralığında θ zamana göre belirgin miktarda düşerken, artan temas sürelerinde θ 'da düşme gözlenmemiştir. θ 'daki bu değişimin sebebi, reaktif olmayan sistemlerdeki

θ 'nın reaktif sistemlere göre çok daha kısa zaman içinde dengeye gelmesine yorumlanmıştır.

7. Çelik bünyesindeki karbon miktarı artarken θ 'nın arttığı gözlenmiştir. θ 'daki bu artışın sebebi, C'un sıvı çeliğin yüzey enerjisini artırdığına dayandırılmıştır.
8. Çelik bünyesindeki Mn miktarı artarken θ 'nın düştüğü gözlemlenmiştir. θ 'daki düşüşün sebebi Mn'in sıvı çeliğin yüzey enerjisindeki düşüşe yol açtığına yorumlanmıştır.

İlerideki çalışmalar için öneriler aşağıda sunulmuştur;

1. MgO astar malzemesi uygulamalarında SiO_2 fibere alternatif olarak farklı fiberler araştırılabilir.
2. MgO toz tane boyutu-gözenek ilişkisi ile SiO_2 'nin yüzeye kapiler etki ile çıkma parametreleri incelenebilir.
3. SiO_2 fiberlerin yüzey kaplaması yapılarak kaplama içerisindeki sıvı fazın yüzeye çıkmasını engelleyecek tedbirler çalışılabilir.

KAYNAKLAR

1. İzmirlioğlu, A., "Refrakter", *D.P.T. Taş ve toprağa dayalı ürünler sanayii özel ihtisas komisyonu raporu*, Ankara, 1-50, (2001).
2. Topaç, C., "Magnezya-karbon refrakterlerde oksitlenme ve cüruf korozyonu", Yüksek lisans tezi, *İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 1-40, (1994).
3. Geçkinli, E., "Oksit seramikler", İleri teknoloji malzemeleri, *İstanbul Teknik Üniversitesi matbaası*, İstanbul, 92-120, (1992).
4. Bilgiç, M., "Temiz çelik üretiminde bazik refrakter kullanımı", *Metalurji*, 23(119): 6-14, (1999).
5. Candan, E., Atkinson, H. V. and Jones, H., "Role of surface tension in relation to contact angle in determining threshold pressure for melt infiltration of ceramic powder compacts" *Scripta Materialia*, 38(6): 999-1002, (1998).
6. Asthana, R. and Rohatgi, P. K., "Solidification synthesis of pressure-infiltrated Al alloy 2014-SiC platelet composites", *Materials Science & Engineering A*, 144, 169-178, (1991).
7. Suzuki T, Umehara H, and Hayashi R, "Vapor phase synthesis of Ti aluminides and the interfacial bonding effect on the mechanical property of micro-composites reinforced by pyrolyzed SiC fibers", *J. Mater. Res*, 8, 2492-2498, (1993).
8. Han, D. S., Jones, H., and Atkinson, H. V., "Wettability of silicon carbide by liquid aluminium: the effect of free silicon in the carbide and of magnesium, silicon and copper alloy additions to the aluminium", *J. Mater. Sci.*, 28, 2654-2658, (1993).
9. Johnson, H. B., "Sprayable insulating liner compositions for metal vessels", *U.S. Patent*, No: 5.036.029., (1991).
10. Rumpeltin, C. R. and Dody, J. A., "Sprayable refractory composition", *U.S. Patent*, No: 5.302.563., (1994).
11. Shimada, N., Miyamoto, A., Kobayashi, M., Kuribayashi, A., Toyoda, T., Kimura, M., Kyoden, H., Hoshino, T. and Watanabe, J., "Casting vessel having basic lining", *U.S. Patent*, No: 4.216.944., (1980).
12. Karl, B., Hans, G. F., Friedrich, H., Mantey, K. and Paul, G., "Method for pouring steel during continuous casting", *U.S. Patent*, No: 400423., (1973).

13. Naidich, Y. J., "The wettability of solids by liquid metals", *Progress in Surface and Membrane Science*, 14, 353-485, (1981).
14. Uzun, H., "Sert lehimleme parametreleri", Sert Lehimleme Prensipleri, *Değişim Yayınları*, İstanbul, 2, 21-60, (2002).
15. Onaran, K., Altıntaş, S., "İç yapıların termodinamiği", Malzemelerin Yapı ve Özellikleri, *İ.T.Ü. Matbaası*, İstanbul, 2, 45-60, (1986).
16. Moore, J. J., "Liquid metal solutions", Chemical Metallurgy, *Butterworth-Heinemann*, Cornwall, 4, 127-151, (1990).
17. Sarıkaya, Y., "Yüzey kimyası ve kolloitler", Fizikokimya, *Gazi Büro Kitabevi*, Ankara, 3, 172-182, (1997)
18. Keene, B. J., "Surface tension of pure metals", *International Materials Reviews*, 38(4): 157-192, (1993)
19. Sobczak, N., and Asthana, R., "The influence of metallic coatings on the structure, wetting, and mechanical strength of ceramic/metal interfaces", *2001 TMS Annual meeting*, New Orleans, 52, 1-5, (2001).
20. Fujii, H., "Wetting of ceramics by molten aluminium", Doktora Tezi, *Department of Materials Science and Engineering, Waseda University*, Waseda, 1-42, (1993).
21. Adamson, A. W., "The solid-liquid interface-contact angle", Physical chemistry of surface, *A Willey-Interscience publications*, California, 379-420. (1990).
22. Wenzel, R.N., "Resistance of solid surfaces to wetting by water", *Industrial and engineering chemistry*, 28(8): 988-994, (1936).
23. Johnson, R.E. and Dettre, R.H., "Contact angle, wettability and adhesion", *American Ceramic Society*, 112-136, (1964).
24. Aksay, İ. A., Hoge, C. E. and Pask, J. A., "Wetting under equilibrium and nonequilibrium conditions", *The Journal of Physical Chemistry*, 78(12): 1178-1183 (1974).
25. Bashforth, F. and Adams, J.C., "An attempt to test the theories of capilarity" *Cambridge University Press*, Cambridge, (1883).
26. Kiflie, B. and Alemu, D., "Thermal analysis of continuous casting process", *ESME 5th Annual Conference On Manufacturing and Processing Industry*, (2000).

27. Pack, A., "Tracing the origin of oxide inclusions in continuously casted steel using stable oxygen isotopes—An interdisciplinary approach", Doktora Tezi, *Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät, Friedrich-Wilhelms-University Bonn*, 2-118, (2000).
28. Yılmaz, S., "Sonlu elemanlar yöntemi ile çelik potası refrakter astarının incelenmesi ve geliştirilmesi", Doktora tezi, *İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, (1998).
29. Dikeç, F., "Demir çelik endüstrisinde pota metalurjisinin yeri, önemi ve gelişimi", *TMMOB Dergisi*, 58, 9-14, (1988).
30. Powdrell, A. W., "Advantages of sprayed ladle and tundish sprayed refractory lining", *A.F.S. Transactions*, 207-211, (1990).
31. Nonaka, S. and Nakamura, R., "Robotic gunning system for coating a tundish", *Iron and steel Engineer*, 19-23, (1987).
32. Doğan, Ş., "Seramik hammaddeler", Seramik Teknolojisi, *Birsan Yayınevi*, İstanbul, 24-50, (1990).
33. Cramb, A. W. and Jimbo, I., "Interfacial considerations in continuous casting", *Iron and steelmaker*, 16(6):43-55, (1989).
34. Jimbo, I. and Cramb, A. W., "Computer aided interfacial measurements", *ISIJ International*, 32(1): 26-35, (1992).
35. Chesters, J. H., "Refractories, production and properties", *Iron and steel Institute*, London, (1973).
36. Özgen, Ö. S., "Metalurji fırınlarında refrakter korozyonu", *Metal Dünyası*, 35, 41-43, (1996).
37. Gürmen, S., "Bakır rafinasyon fırınlarında cüruf bileşiminin refrakter korozyonuna etkisi", Yüksek Lisans Tezi, *İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, (1992).
38. Williams, D.C., Ko, Y.H. and Green, T.M., "Iron and manganese oxides: culprits of refractory erosion", *Modern Casting*, 22-25, (1996).
39. Mukai, K., "Wetting and marangoni effect in iron and steelmaking processes" *ISIJ International*, 32(1): 19-25, (1992).
40. Nakashima, K. and Mori, K., "Interfacial properties of liquid iron alloys and liquid slags relating to iron and steelmaking processes" *ISIJ International*, 32(1): 11-18, (1992).

41. Pitak, N.V., Fedoruk, R.M., Shulyak, R.S. and Khemelonko, T.P., "Wetting of aluminosilicate refractories with cast iron" *Refractories*, 19(5-6): 301-304, (1978).
42. Usatkov, I.F., Kalita, G.E. and Galchenko, T.G., "Wettability of aluminosilicate refractories with molten steel", *Refractories*, 19(3-4): 254-257, (1978).
43. Materikin, Yu.V., Sveshkov Yu.V. and Kalmykov, V.A., "Chemical and phase composition of aluminosilicate refractories as a factor in their wettability with steel", *Refractories*, 16(9-10): 592-594, (1975).
44. Prokofeva, E.A. and Ioff, N.U., "Chemical composition and porosity of refractories as factors in their wettability with carbon steel", *Refractories*, 16(3-4): 174-177, (1975).
45. Stefanescu, D.M., Delennay, P., Piwonka, T.S. and Kacar, S., "An investigation on the role of sand-metal contact angle in the formation of casting penetration defects", *AFS Transactions*, 761-779, (1991).
46. S. Giese, D.M., Stefanescu, T.S., Piwonka, S. Sen and B.K. Dhindaw, "An investigation on the role of sand-metal contact angle in the formation of casting penetration defects: phase II", *AFS Transactions*, 785-792, (1992)
47. Zhukovskaya, A.E., Kortel, A.E., Sherman, E.A., Prokofeva, E.A. and Korableva, T.P., "How corundum refractories are wetted by molten steel", *Refractories*, 23(9-10): 504-507, (1982).
48. Kashcheev, I. D., Novozhilov, N. Yu., Mezentsева, N.E., Tsarevskii, B.V., Seliverstov, N. F. Ryabin, V. A. and Kalitina, L. N., "Masses in the $MgO-Al_2O_3-Cr_2O_3$ system," *Refractories*, 21(9-10): 550-554, (1980).
49. Kozlova O.B. and Suvorov, S.A., "The wetting of refractories of the $MgO-Al_2O_3-ZrO_2$ system with metal melts", *Refractories*, 16(12):763-767, (1976).
50. Staronka A. and Krakau, W.G., "Wettability of solid $CaO-MgO-SiO_2$ and $Al_2O_3-SiO_2$. CaO oxides by liquid steel", *Arch. Eisenhüttenwes*, 51, 403-406, (1980).
51. Kalogeropoulou, S., Baud L. and Eustathopoulos N., "Relationship between wettability and reactivity in Fe/SiC system", *Acta Metallurgica et Materialia*, 43(3): 907-912. (1995).
52. Nogi, K. and Ogino, K., "Role of interfacial phenomena in deoxidation process of molten iron", *Canadian Metallurgical Quarterly*, 22(1): 19-28, (1983).
53. Kingery, W.D., "Surface, interfaces, and grain boundaries" Introduction to Ceramics, *A Willey-Interscience publications*, Canada, 177-207, (1975).

54. Wu, C and Sahajwalla, V., " Wettability of graphite mold coatings by iron and steel: Mold-metal interfacial phenomena", *AFS Transactions*, 739-744, (1997).
55. Kalkanlı, A., Grant, D., Wood, J. and Selçuk, E., "The effect of surface active elements on the liquid vapour surface tension of liquid 304 stainless steel", *High Temperatures-High Pressures*, 25, 435-442, (1993).





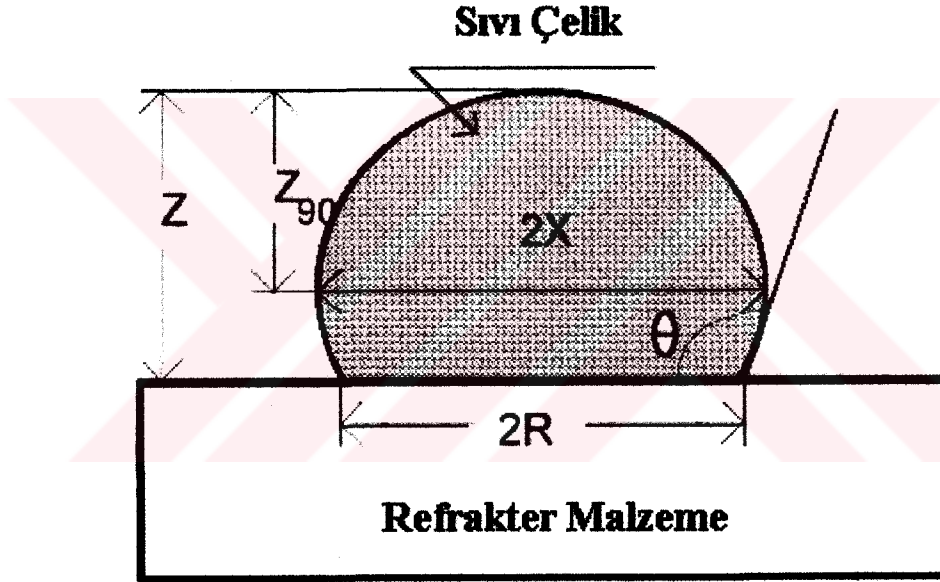
EKLER

EKLER

EK-1 ıslatma Açıı Hesaplaması

Örnek

Bu örnekte MgO'e %1 SiO₂ fiber ilavesi ile hazırlanan tandış astarının 9065 K çelik için 60 dakika temas süresi sonucunda ıslatma açısı tespiti yapıldı. ıslatma açısı (θ)'nın hesaplanması için gerekli olan damla profili ve koordinatlar ve aşağıda Şekil 1'de gösterilmiştir.



Şekil 1. ıslatma açısı ölçümü için sıvı damla şekli ve koordinatları
(Astar malzeme: MgO+%1 SiO₂ fiber, Çelik malzeme: 9065K)

Bu şekle göre damla üzerindeki koordinatlar belirlenmiş Bashforth ve Adams (25) tablolarından (Ek-2) yararlanılarak ıslatma açısı (θ) aşağıdaki hesaplamalarla bulunmuştur.

$$2X = 46,3 \text{ mm}$$

$$2R = 41,0 \text{ mm}$$

$$Z = 25,6 \text{ mm}$$

$$Z_{90} = 18,7 \text{ mm}$$

$$X / Z_{90} = 23,15 / 18,7 = 1,2353$$

Adams and Basford Tablo I'den $\beta \cong 1,9$ bulunmuştur.

Tablo 5'de $\beta \cong 1,9$ için;

$$(X / b)_{90} = 0,82383 \Rightarrow 23,15 / 0,82383 \Rightarrow b = 28,10$$

$$(Z_{90} / b) = 0,66576 \Rightarrow 18,7 / 0,66576 \Rightarrow b = 28,09$$

$b_{\text{ortalama}} = 28,095$ hesaplanmıştır.

Tablo II kullanılarak aşağıdaki değerler hesaplanmıştır.

$$R/b = 20,5/28,05 = 0,72954$$

$$Z/b = 25,6/28,05 = 0,91103$$

Bulduğumuz $\beta \cong 1,9$ için Tablo II'de $\beta = 1,5 - 2,0$ aralığına bakıldı. Buradan R/b ve Z/b değerleri arasındaki en kapalı bölge tespit edildi. Bu alan $\beta = 2,0$ oldu. Buradan;

$$\theta_1 = 128^\circ$$

$$\theta_2 = 126^\circ$$

$\theta_{\text{Ortalama}} = 127^\circ$ olarak tespit edilmiştir.

Bashforth ve Adams tablolarından yararlanılarak hesaplanan ıslatma açısı (θ), Resim 4.1'de AutoCAD 2002 programı ile aynı şartlarda bulunan ıslatma açısı (θ) ile benzerlik göstermiştir.

Ek-2. Bashforth ve Adams Tabloları

Tables from Bashforth and Adams [1883]

2X = maximum diameter

2R = base diameter

Z = maximum height

 θ = contact angle
 $\beta = \rho g b^2 / \gamma_{lv}$ b = radius of curvature at the origin of coordinate system
 μ = angle made by the normal to the surface with Z

I

$\left(\frac{x}{z}\right) \phi = 90^\circ$										
β	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	1.00000	.02180	.04149	.05942	.07589	.09115	.10542	.11880	.13140	.14333
1	.15466	.16546	.17576	.18562	.19508	.20418	.21294	.22138	.22953	.23742
2	.24507	.25248	.25967	.26666	.27345	.28006	.28650	.29278	.29890	.30488
3	.31072	.31643	.32201	.32748	.33283	.33807	.34320	.34824	.35318	.35803
4	.36278	.36745	.37204	.37656	.38100	.38535	.38963	.39386	.39802	.40211
5	.40615	.41012	.41403	.41789	.42169	.42544	.42914	.43278	.43638	.43993
6	.44344	.44690	.45032	.45369	.45702	.46032	.46358	.46679	.46996	.47310
7	.47621	.47928	.48232	.48533	.48830	.49124	.49415	.49703	.49988	.50270
8	.50550	.50827	.51101	.51372	.51640	.51906	.52169	.52430	.52689	.52946
9	.53200	.53452	.53702	.53949	.54194	.54437	.54678	.54917	.55154	.55389
10	.55621	.55851	.56080	.56307	.56533	.56758	.56981	.57202	.57421	.57638
11	.57852	.58065	.58277	.58488	.58698	.58906	.59112	.59317	.59520	.59722
12	.59923	.60122	.60320	.60517	.60712	.60906	.61099	.61290	.61480	.61669
13	.61856	.62042	.62227	.62411	.62594	.62776	.62957	.63136	.63314	.63491
14	.63667	.63842	.64016	.64189	.64361	.64532	.64702	.64871	.65039	.65206
15	.65372	.65537	.65701	.65864	.66027	.66189	.66350	.66510	.66669	.66827
16	.66984	.67140	.67296	.67451	.67605	.67758	.67910	.68062	.68213	.68363
17	.68512	.68661	.68809	.68956	.69102	.69248	.69393	.69537	.69681	.69824
18	.69966	.70108	.70249	.70389	.70528	.70667	.70805	.70943	.71080	.71217
19	.71353	.71488	.71623	.71757	.71890	.72023	.72155	.72287	.72418	.72548
20	.72678	.72807	.72936	.73064	.73192	.73319	.73446	.73572	.73698	.73823
21	.73947	.74072	.74194	.74317	.74440	.74562	.74684	.74805	.74926	.75046
22	.75165	.75284	.75403	.75521	.75639	.75756	.75873	.75989	.76105	.76221
23	.76336	.76451	.76565	.76679	.76792	.76905	.77017	.77129	.77241	.77352
24	.77463	.77574	.77684	.77794	.77903	.78011	.78119	.78227	.78335	.78443
25	.78550	.78657	.78764	.78870	.78975	.79081	.79185	.79289	.79393	.79497
26	.79600	.79703	.79806	.79908	.80010	.80112	.80213	.80314	.80415	.80515
27	.80615	.80715	.80814	.80913	.81012	.81110	.81208	.81306	.81404	.81501
28	.81598	.81695	.81791	.81887	.81983	.82078	.82173	.82268	.82362	.82456
29	.82550	.82643	.82736	.82829	.82922	.83015	.83107	.83199	.83291	.83383
30	.83474	.83565	.83656	.83746	.83836	.83926	.84015	.84104	.84193	.84282
31	.84371	.84459	.84547	.84635	.84722	.84809	.84896	.84983	.85070	.85156
32	.85242	.85328	.85414	.85499	.85584	.85669	.85754	.85838	.85922	.86006
33	.86090	.86173	.86256	.86339	.86422	.86505	.86587	.86669	.86751	.86833
34	.86915	.86996	.87077	.87158	.87239	.87320	.87400	.87480	.87560	.87640
35	.87719	.87798	.87877	.87956	.88035	.88113	.88191	.88269	.88347	.88425

II

$\beta = 0^{\circ}125$			$0^{\circ}25$		$0^{\circ}50$		$0^{\circ}75$		$1^{\circ}0$	
θ	R $\frac{1}{\lambda}$	$\frac{z}{\lambda}$	R $\frac{1}{\lambda}$	$\frac{z}{\lambda}$	R $\frac{1}{\lambda}$	$\frac{z}{\lambda}$	R $\frac{1}{\lambda}$	$\frac{z}{\lambda}$	R $\frac{1}{\lambda}$	$\frac{z}{\lambda}$
5	08715	00380	08714	00380	08711	00380	08709	00380	08707	00380
10	17357	01518	17348	01517	17333	01515	17316	01513	17300	01511
15	25855	03402	25827	03397	25774	03386	25720	03375	25668	03365
20	34139	06014	34076	05997	33952	05964	33830	05932	33711	05900
25	42141	09328	42022	09288	41790	09210	41564	09134	41344	09060
30	49793	13314	49600	13232	49217	13075	48849	12925	48495	12781
35	57049	17933	56749	17786	56173	17506	55628	17242	55109	16993
40	63838	23142	63413	22899	62608	22441	61854	22017	61146	21623
45	70115	28893	69545	28517	68478	27819	67493	27183	66579	26599
50	75834	35133	75104	34582	73752	33573	72522	32669	71394	31851
55	80955	41807	80055	41033	78407	39637	76928	38408	75587	37312
60	85445	48855	84371	47807	82427	45946	80706	44335	79161	42919
65	89278	56216	88233	54840	85507	52436	83857	50389	82127	48613
70	92430	63826	91027	62067	88545	59042	86396	56511	84502	54322
75	94839	71621	93343	69425	90647	65707	88332	62646	86305	60056
80	96644	79537	94995	76850	92126	72372	89685	68744	87559	65708
85	97694	87508	95974	84251	92908	78984	90478	74756	88291	71259
90	98042	95471	96297	91656	93233	85491	90736	80641	88529	76671
95	97698	103363	95981	98910	93007	91845	90438	86358	88302	81909
100	96677	111121	95047	106215	92197	90202	89763	84370	87640	80944
105	95001	118636	93524	112389	90886	883920	88595	87145	86576	81747
110	92695	126000	91443	119492	89109	869562	87018	85151	85144	80293
115	89793	133003	88841	125777	86902	84892	85067	83663	83377	790561
120	86333	139656	85759	131699	84306	819830	82732	81255	81312	764531
125	82360	145895	82243	137220	81566	794498	80201	785309	78983	768189
130	77923	151678	78345	142321	78127	772722	77365	759026	76428	745520
135	73082	156962	74122	146912	74637	732531	74318	722333	73686	714514
140	67922	161710	69635	151026	70949	695912	71103	692380	70794	681765
145	62460	165883	64953	154620	67117	658555	67765	667843	67793	6519469
150	56842	169469	60151	157681	63197	611354	64350	630022	64720	6121428
155	51150	172434	55310	160203	59246	574312	60904	591815	61615	5823045
160	45497	174778	50514	162192	55311	545039	57472	553238	58516	543330
165	40013	176511	45852	163665	51483	5146252	54096	5134304	55458	5125096
170	34830	177663	41402	164453	47773	474076	50813	495051	51476	475958
175	30080	178208	37245	165203	44247	447542	47672	463448	49599	463338
180	25864	178487	33439	165372	40941	417688	44690	435579	46853	436459

11

$\beta = 15$			20		25		30		35	
θ	R	$\frac{1}{R}$	R	$\frac{1}{R}$	R	$\frac{1}{R}$	R	$\frac{1}{R}$	R	$\frac{1}{R}$
5°	08703	00380	08699	00379	08695	00379	08691	00379	08687	00379
10	17368	001507	17366	001507	17364	001498	17363	001494	17361	001493
15	25564	003344	25562	003324	25563	003305	25565	003286	25570	003268
20	33479	005838	33255	005779	33039	005723	32830	005668	32628	005615
25	40923	008920	40523	008787	40143	008662	39780	008543	39434	008430
30	47826	012511	47203	012262	46619	012030	46071	011814	45553	011613
35	54144	016533	53260	016117	52446	015739	51691	015391	50988	015071
40	59848	020908	58681	020774	57621	020407	56651	020194	55756	019876
45	64928	025560	63469	024658	62161	023863	60978	023155	59898	022517
50	69385	030420	67636	029203	66089	028146	64703	027216	63448	026387
55	73229	035427	71206	033851	69435	032503	67862	031330	66448	030294
60	76478	040522	74203	038552	72231	036888	70492	035454	68939	034199
65	79152	045655	76656	043261	74510	041262	72629	039556	70956	038273
70	81277	050783	78596	047939	76305	045592	74308	043604	72539	041886
75	82879	055857	80052	052552	77649	049847	75561	047573	73718	045622
80	83987	060850	81055	057070	78572	054004	76420	051442	74523	049255
85	84632	065724	81635	061466	79104	058238	76915	055191	74989	052771
90	84838	070453	81822	065717	79275	061931	77074	058303	75137	056154
95	84640	075009	81645	069822	79113	065665	76924	062262	74998	059391
100	84067	079371	81133	073702	78646	069224	76491	065556	74593	062472
105	83150	083516	80314	077401	77899	072596	75821	068674	73948	065386
110	81917	087427	79216	080886	76900	075768	74873	071605	73086	068122
115	80402	091089	77868	084143	75674	078730	73745	074340	72027	070674
120	78634	094487	76297	087162	74246	081474	72428	076873	70799	073039
125	76644	097612	74531	089935	72642	083994	70948	079198	69417	075209
130	74465	0100453	72598	092456	70886	086283	69328	081310	67926	077182
135	72128	0103006	70525	094720	69004	088339	67592	083207	66234	078949
140	69663	0105264	68339	096723	67018	090159	65758	084887	64574	080519
145	67105	0107229	66068	098467	64954	091744	63851	086350	62792	081884
150	64482	0108901	63738	099952	62834	093095	61893	087599	60963	083050
155	61826	0110284	61375	0101183	60681	094217	59921	088636	59101	084020
160	59167	0111387	59003	0102166	58518	095113	57898	089467	57223	084798
165	56532	0112228	56647	0102970	56364	095793	55901	090097	55353	084200
170	53949	0112792	54329	0103425	54240	096265	53927	090535	53500	085802
175	51439	0113123	52026	0103723	52164	096538	51994	090790	51684	086041
180	49026	0113229	49885	0103819	50151	096630	50116	090872	50914	086117

V

β	15°		30°		45°		60°		90°	
	$\frac{\pi}{\delta}$	$\frac{\pi}{\delta}$	$\frac{\pi}{\delta}$	$\frac{\pi}{\delta}$	$\frac{\pi}{\delta}$	$\frac{\pi}{\delta}$	$\frac{\pi}{\delta}$	$\frac{\pi}{\delta}$	$\frac{\pi}{\delta}$	$\frac{\pi}{\delta}$
+										
0°	25582	03407	50000	13397	70711	29289	86653	50000	100000	100000
0°1	25586	03403	49838	13330	70232	28972	85673	49278	98421	96321
0°2	25588	03399	49679	13264	69770	28666	84794	48217	96976	93113
0°3	255816	03395	49522	13200	69324	28372	83962	47412	95648	90185
0°4	25795	03392	49368	13137	68894	28090	83174	46657	94422	87764
0°5	25774	03386	49217	13075	68478	27819	82427	45946	93283	85491
0°6	25752	03381	49068	13015	68075	27553	81715	45275	92217	83423
0°7	25730	03377	48922	12955	67684	27306	81035	44640	91215	81529
0°8	25710	03373	48777	12896	67305	27062	80384	44038	90271	79786
0°9	25689	03369	48635	12838	66937	26827	79760	43465	89377	78173
1°0	25668	03365	48495	12781	66579	26599	79161	42919	88529	76671
1°1	25647	03360	48357	12725	66231	26378	78585	42397	87722	75268
1°2	25626	03356	48221	12670	65892	26164	78031	41898	86953	73954
1°3	25606	03352	48087	12616	65562	25957	77496	41420	86218	72719
1°4	25585	03348	47955	12563	65241	25756	76979	40962	85513	71554
1°5	25564	03344	47826	12511	64928	25560	76478	40522	84838	70453
1°6	25543	03340	47698	12460	64622	25370	75994	40098	84189	69410
1°7	25523	03336	47571	12409	64323	25185	75526	39690	83564	68418
1°8	25503	03332	47447	12360	64032	25004	75072	39297	82963	67475
1°9	25482	03328	47324	12311	63747	24829	74631	38918	82383	66576
2°0	25462	03324	47203	12262	63469	24658	74203	38552	81822	65717
2°1	25442	03321	47084	12214	63196	24491	73787	38193	81280	64895
2°2	25422	03317	46965	12167	62929	24328	73382	37855	80755	64109
2°3	25402	03313	46848	12121	62668	24169	72988	37522	80247	63353
2°4	25383	03309	46733	12075	62412	24014	72605	37200	79754	62628
2°5	25363	03305	46619	12030	62161	23863	72231	36888	79275	61931
2°6	25343	03302	46507	11986	61915	23715	71866	36585	78810	61260
2°7	25324	03298	46396	11942	61674	23570	71510	36290	78358	60613
2°8	25304	03294	46286	11899	61437	23429	71162	36004	77919	60089
2°9	25285	03290	46178	11856	61205	23290	70823	35726	77491	59586
3°0	25265	03286	46071	11814	60978	23155	70492	35454	77074	59093
3°1	25246	03282	45966	11773	60754	23022	70168	35189	76667	58620
3°2	25227	03279	45861	11732	60534	22892	69851	34932	76270	58169
3°3	25208	03275	45757	11691	60318	22765	69540	34681	75883	57735
3°4	25189	03271	45655	11652	60106	22640	69236	34437	75506	57312
3°5	25170	03268	45553	11613	59898	22517	68939	34199	75137	56904
3°6	25150	03264	45453	11573	59693	22397	68647	33966	74776	56512
3°7	25132	03260	45355	11535	59491	22279	68361	33739	74423	56130
3°8	25113	03256	45257	11497	59292	22163	68080	33517	74078	55745

ÖZGEÇMİŞ

1969 yılında Konya’da doğdu. İlkokul, Ortaokul ve Endüstri Meslek Lisesi öğrenimini Konya’da tamamladı. İ.T.Ü Sakarya Meslek Yüksek Okulu Döküm Eğitimi Bölümünü 1989 yılında bitirdi. G. Ü. Teknik Eğitim Fakültesi Metalurji Eğitimi Döküm Anabilim Dalından 1993 yılında mezun oldu. 1994 yılında Z. K. Ü. Karabük Teknik Eğitim Fakültesi Metal Eğitimi Bölümü Döküm Anabilim Dalında araştırma görevliliğine başladı. 1998 yılında G.Ü. Fen bilimleri Enstitüsü Metal Eğitimi yüksek lisans programından mezun oldu. 1998 yılında aynı kurumda doktora eğitimine başladı. 1999 yılında G.Ü. Fen bilimleri Enstitüsüne 35. madde gereğince araştırma görevlisi olarak görevlendirildi. Halen aynı kurumda Araştırma Görevliliği ve doktora eğitimini devam ettirmektedir. Evli ve iki çocuk babasıdır.