

2023



TÜBİTAK

YEŞİL BÜYÜME TEKNOLOJİ YOL HARİTASI DEMİR-ÇELİK SEKTÖRÜ

Versiyon: 12.05.2023

Görüşlerinizi ve sorularınızı politikalar@tubitak.gov.tr adresine e –postayla iletebilirsiniz.

- 1.1. Kok fırınlarında iyileştirilmiş ve alternatif kömür hammaddelerin kullanılması
- 1.2. Sinter ve Pelet tesislerinde enerji ve hammadde girdilerinin ve verimliliğin iyileştirilmesi
- 1.3. Yüksek fırınların ve bazik oksijen fırınlarının alternatif hammadde kaynaklarının kullanmasına ve enerji verimliliğinin artırılmasına yönelik teknolojiler
- 1.4. Yüksek fırınlarda ve bazik oksijen fırınlarında dögüsel ve geri kazanım/kullanıma yönelik atık yönetimi proseslerinin tasarlanması, uygulanması

1. Entegre Demir-Çelik Üretimi



- 2.1. Sürekli döküm, haddeleme, ısı işlem ve yüzey işlem proseslerinin iyileştirilmesine ve verimliliğini artırmaya yönelik alternatif ve yenilikçi proseslerin ve yöntemlerin geliştirilmesi

2. Sürekli Döküm ve Yarı Mamul İşlenmesi (Haddeleme, Isıl ve Yüzey İşlem)

- 4.1. DRI ve diğer alternatif Demir-Çelik üretim yöntemleri geliştirilmesi, pilot gösterimleri ve ölçek büyütme çalışmaları

4. DR (Doğrudan indirgeme) ve Diğer Alternatif Demir-Çelik Üretim Yöntemleri



- 5.1. Parça dökümde enerji verimliliğini artırmaya yönelik alternatif proseslerin ve yöntemlerin geliştirilmesi
- 5.2. Parça dökümde proses çıktılarının (döküm kumları, cürufklar, filtre tozları vb.) değerlendirilmesine yönelik yöntemlerin geliştirilmesi

5. Parça Döküm



- 3.1. Hurda ayıklama ve hazırlama proseslerinin iyileştirilmesine yönelik yöntemlerin ve uygulamaların geliştirilmesi
- 3.2. Hurdadan çelik üretiminde alternatif hammaddelerin kullanmasına yönelik yöntemlerin geliştirilmesi
- 3.3. Elektrikli ark ve pota ocaklarından çıkan katı atıkların dögüsel ekonomi süreçleriyle geri dönüşümüne yönelik yenilikçi proseslerin ve uygulamaların geliştirilmesi

3. Hurdadan Çelik Üretimi – Elektrikli Ark Ocağı, İndüksiyon Ocağı ve Pota Ocağı Fırınları

- 6.1. Demir-çelik ve parça döküm sektörlerinde optimizasyon, enerji girdisi, verimlilik ve atık yönetimine yönelik uygulamaların geliştirilmesi ve yaygınlaştırılması
- 6.2. Karbon yakalama, kullanımı ve depolama (CCUS) teknolojilerinin prosese entegrasyonuna yönelik çalışmalar gerçekleştirilmesi

6. Demir-Çelik ve Parça Döküm Sektöründe Optimizasyon, Enerji Girdisi, Verimlilik ve Atık Yönetimi



Şekil 1. Demir-Çelik Sektörünün Yeşil Dönüşümü için Teknolojik İhtiyaçlar ve Çözümler

TÜBİTAK Yeşil Büyüme Teknoloji Yol Haritası – Demir-Çelik Sektörü, 2023

Hedef	Kritik Ürün/Teknoloji	Araştırma, Teknoloji Geliştirme ve Yenilik Konusu	Dünyadaki Teknolojik Hazırlık Seviyesi	Türkiye'deki Teknolojik Hazırlık Seviyesi	Zaman Tahminleri Kısa Vade: 2026'a kadar Orta Vade: 2030'a kadar Uzun Vade: 2035'e kadar
1. Entegre Demir-Çelik Üretimi	1.1. Kok fırınlarında iyileştirilmiş ve alternatif kömür hammaddelerin kullanılması	a. Biyokömür (Isı Verilerek Torrefaksiyon ile Kurutulmuş, Peletlenmiş Biyokütle) üretimi ve kullanımı	9	3-4	2026
		b. Düşük emisyon üretecek verimli kömür harman modellerinin geliştirilmesi	9	7	2026
	1.2. Sinter ve Pelet tesislerinde enerji ve hammadde girdilerinin ve verimliliğin iyileştirilmesi	a. Ateşleme fırının verimliliğinin artırılmasına yönelik " Çok Yarıkli Brülörlerin " ve " Perde Alev Ateşleme Sistemlerinin " geliştirilmesi, pilot gösterimlerinin yapılması	8	3-4	2026
		b. Sinterleme prosesinde Hidrojen zengin Kok gazı veya doğrudan hidrojen kullanılması nın araştırılması	3	1	2026
		c. Pelet tesislerinde enerji ve hammadde girdilerinin ve verimliliğinin iyileştirilmesine yönelik çalışmaların gerçekleştirilmesi	8	-	2026
	1.3. Yüksek fırınların ve bazik oksijen fırınlarının alternatif hammadde kaynaklarının kullanmasına ve enerji verimliliğinin artırılmasına yönelik teknolojiler	a. Yüksek fırında kok kullanım oranının azaltılması veya kok kömürüne alternatif hammaddelerin kullanımı, atık plastiklerin enjeksiyonu, toz haline getirilmiş kömür enjeksiyonu (PCI), doğal gaz enjeksiyonu, karbon kompozit aglomeratların şarjı gibi yöntemlerle verimliliğinin artırılması	Atık Plastik 9; Biyokömür 6; HBI 8-9; Ferrokok 7-8	Atık Plastik 3-4; Biyokömür 3-4; HBI 7-8; Ferrokok 3-4	2026

TÜBİTAK Yeşil Büyüme Teknoloji Yol Haritası – Demir-Çelik Sektörü, 2023

Hedef	Kritik Ürün/Teknoloji	Araştırma, Teknoloji Geliştirme ve Yenilik Konusu	Dünyadaki Teknolojik Hazırlık Seviyesi	Türkiye'deki Teknolojik Hazırlık Seviyesi	Zaman Tahminleri Kısa Vade: 2026'a kadar Orta Vade: 2030'a kadar Uzun Vade: 2035'e kadar
		ve karbon ayak izinin azaltılmasına yönelik çalışmaların gerçekleştirilmesi			
		b. Bazık oksijen fırınında CO2 emisyonlarının azaltılmasına (CO gazının zenginleştirilmesi gibi) yönelik çalışmalar (proses tasarımları, geliştirmeler, vb.) gerçekleştirilmesi	7-8	2-3	2026
	1.4. Yüksek fırınlarda ve bazık oksijen fırınlarında döngüsel ve geri kazanım/kullanıma yönelik atık yönetimi proseslerinin tasarlanması, uygulanması	a. Karbondioksitin kuru reforming ile sisteme indirgeyici gaz (CO) veya hidrojen kullanarak sentez gazı olarak geri kazanımı	6	2-3	2026
		b. Yüksek fırın ve çelik üretim proseslerinden çıkan bacı tozları ve filtre tozlarının döngüsel ve geri kazanım/kullanıma yönelik çalışmaların gerçekleştirilmesi	8	8	2026
2. Sürekli Döküm ve Yarı Mamul İşlenmesi (Haddeme , Isıl ve	2.1. Sürekli döküm, haddeme, ısıl işlem ve yüzey işlem proseslerinin iyileştirilmesine ve verimliliğini artırmaya yönelik alternatif ve	a. Reküperatör veya Rejeneratif brülörlerin geliştirilmesi	Hidrojen Brülör 9; Reküperatör ve Rejeneratif Brülör 9	Hidrojen Brülör 7; Reküperatör ve Rejeneratif Brülör 6-8	2026

TÜBİTAK Yeşil Büyüme Teknoloji Yol Haritası – Demir-Çelik Sektörü, 2023

Hedef	Kritik Ürün/Teknoloji	Araştırma, Teknoloji Geliştirme ve Yenilik Konusu	Dünyadaki Teknolojik Hazırlık Seviyesi	Türkiye'deki Teknolojik Hazırlık Seviyesi	Zaman Tahminleri Kısa Vade: 2026'a kadar Orta Vade: 2030'a kadar Uzun Vade: 2035'e kadar
Yüzey İşlem)	yenilikçi proseslerin ve yöntemlerin geliştirilmesi	b. Kesintisiz şerit üretimi çalışmalarının geliştirilmesi	9	3-4	2035
		c. Haddelenecek konvansiyonel üretim teknikleri yerine yenilikçi üretim tekniklerinin (Direkt Haddelene, Termomekanik Haddelene, Normalizeli Haddelene, Ferritik Haddelene, Direkt Su Verme Temperleme) geliştirilmesi, uygulanması ve yaygınlaştırılması	Direk Haddelene 9 ; Termomekanik Haddelene 9 ; Normalizeli 9 ; Ferritik Haddelene 8 ; Direk Su Verme ve Temperleme 9	Direk Haddelene 8 ; Termomekanik Haddelene 9 ; Normalizeli 9 ; Ferritik Haddelene 3-4 ; Direk Su Verme ve Temperleme 8	2030
		d. Sıcak haddelenecek yarı mamullerin yüzey işlemleri için alternatif yenilikçi ve çevreci teknolojilerin geliştirilmesi, kullanılması ve yaygınlaştırılması	9	7-9	2026

TÜBİTAK Yeşil Büyüme Teknoloji Yol Haritası – Demir-Çelik Sektörü, 2023

Hedef	Kritik Ürün/Teknoloji	Araştırma, Teknoloji Geliştirme ve Yenilik Konusu	Dünyadaki Teknolojik Hazırlık Seviyesi	Türkiye'deki Teknolojik Hazırlık Seviyesi	Zaman Tahminleri Kısa Vade: 2026'a kadar Orta Vade: 2030'a kadar Uzun Vade: 2035'e kadar
		e. Ürünün oksidasyon ve korozyon direncinin artırılmasına yönelik yenilikçi ve çevreci metalik ve organik/inorganik kimyasal kaplama proseslerinin geliştirilmesi	9	7-9	2026
		f. Direkt şarj, sıcak şarj gibi tekniklerin geliştirilmesi ve yaygınlaştırılması	Sıcak Şarj 9; Direkt Şarj 9	Sıcak Şarj 8; Direkt Şarj 3-4	2030
		g. Direkt şerit döküm teknolojilerinin geliştirilmesi	9	3-4	2035
3. Hurdadan Çelik Üretimi – Elektrikli Ark Ocağı, İndüksiyon Ocağı ve Pota Ocağı Fırınları	3.1. Hurdadan ayıklama ve hazırlama proseslerinin iyileştirilmesine yönelik yöntemlerin ve uygulamaların geliştirilmesi	a. Hurda temizleme ve ayıklama proseslerinin ve uygulamalarının geliştirilmesi ve çelik hurdadan, bakır, kalay ve diğer problemlili elementlerin giderilmesine yönelik çalışmaların gerçekleştirilmesi	7-8	2-3	2026 proseslerin geliştirilmesi 2030 proseslerin pilot denemeleri 2035 proseslerin endüstriyel olarak uygulanması
	3.2. Hurdadan çelik üretiminde alternatif hammaddelerin kullanılmasına yönelik yöntemlerin geliştirilmesi	a. EAF ve İkincil metalurji uygulamalarında kok tozuna alternatif olabilecek hammaddelerin kullanılmasına	5-6	3-4	2035

TÜBİTAK Yeşil Büyüme Teknoloji Yol Haritası – Demir-Çelik Sektörü, 2023

Hedef	Kritik Ürün/Teknoloji	Araştırma, Teknoloji Geliştirme ve Yenilik Konusu	Dünyadaki Teknolojik Hazırlık Seviyesi	Türkiye'deki Teknolojik Hazırlık Seviyesi	Zaman Tahminleri Kısa Vade: 2026'a kadar Orta Vade: 2030'a kadar Uzun Vade: 2035'e kadar
		yönelik çalışmaların gerçekleştirilmesi			
		b. Dolomit ve kireçtaşı yerine daha az CO2 salınımı olan alternatif curuf yapıcıların geliştirilmesine yönelik çalışmaların gerçekleştirilmesi	8-9	6-7	2026
	3.3. Elektrikli ark ve pota ocaklarından çıkan katı atıkların dögüsel ekonomi süreçleriyle geri dönüşümüne yönelik yenilikçi proseslerin ve uygulamaların geliştirilmesi	a. Elektrik ark fırın tozlarından (EAFD) pirometalürji, hidrometalürji veya kimyasal ayırma yöntemleriyle Zn/ZnO ve pik Fe kazanımıyla ilgili çalışmaların gerçekleştirilmesi	8-9	5-6	2026 Ar-Ge, 2030 pilot tesis ve 2035 endüstriyellesmesi gerçekleşebilir.
4. DR (Doğrudan indirgeme) ve Diğer Alternatif Demir-Çelik Üretim Yöntemleri	4.1. DRI ve diğer alternatif Demir-Çelik üretim yöntemleri geliştirilmesi, pilot gösterimleri ve ölçek büyütme çalışmaları	a. Demir içerikli atıkların en etkin şekilde değerlendirilmesini sağlayacak doğrudan indirgeme (DR) proseslerinin ve tesislerin tasarımı	9	3-4	2026 tasarım, 2030 pilot tesis ve 2035 ticari uygulamaya geçilebilir.
		b. İndirgeyici Ergitme (SR) proseslerinin geliştirilmesi ve tesislerinin tasarımı	9	3-4	2026 tasarım, 2030 pilot tesis ve 2035 ticari uygulamaya geçilebilir.
		c. Yakıt olarak hidrojen veya doğal gaz kullanılabilen proseslerin geliştirilmesi ve pilot tesis çalışmalarının yapılması	8	3-4	2026 tasarım, 2030 pilot tesis ve 2035 ticari uygulamaya geçilebilir.

TÜBİTAK Yeşil Büyüme Teknoloji Yol Haritası – Demir-Çelik Sektörü, 2023

Hedef	Kritik Ürün/Teknoloji	Araştırma, Teknoloji Geliştirme ve Yenilik Konusu	Dünyadaki Teknolojik Hazırlık Seviyesi	Türkiye'deki Teknolojik Hazırlık Seviyesi	Zaman Tahminleri Kısa Vade: 2026'a kadar Orta Vade: 2030'a kadar Uzun Vade: 2035'e kadar
		d. Ülkemizde bulunan düşük tenörlü demir cevherlerinin kullanımına özel proseslerin tasarlanması	6-7	2-3	2026 tasarım, 2030 pilot tesis ve 2035 ticari uygulamaya geçilebilir.
		e. Plazma teknolojisi kullanılarak cevherden doğrudan çelik üretimi	4	1	2026 tasarım, 2030 pilot tesis ve 2035 ticari uygulamaya geçilebilir.
5. Parça Döküm	5.1. Parça dökümde enerji verimliliğini artırmaya yönelik alternatif proseslerin ve yöntemlerin geliştirilmesi	a. Döküm proseslerinde ısı, enerji ve sarf maddelerini minimize edilmesine yönelik çalışmaların gerçekleştirilmesi	Ergitme Sistemleri: 6-8 ; Maça Üretiminde Yeni Nesil Reçine ve Katkı: 6-8	Ergitme Sistemleri: 4-5 ; Maça Üretiminde Yeni Nesil Reçine ve Katkı: 4-5	2026 laboratuvar ölçeği; 2030 endüstriyel ölçeğe yakın pilot tesis
		b. Eklemeli imalat tekniklerinin (3D üretim gibi) döküm proseslerinde kullanımının araştırılmasına yönelik çalışmaların gerçekleştirilmesi (Kalıp, maça vb. üretiminde) ve uygulamalarının yaygınlaştırılması	8-9	4-8	2030
	5.2. Parça dökümde proses çıktılarının (döküm kumları, cüruf, filtre tozları vb.)	a. Döküm kumlarının, cüruf, filtre tozlarının vb. çıktılarının rejenerasyon sistemlerinin geliştirilmesi ve yaygınlaştırılması	Kum: 7-8 Cüruf: 3-4 Filtre Tozları: 2-3	Kum: 4-5 Cüruf: 2-3 Filtre Tozları: 2-3	2026

TÜBİTAK Yeşil Büyüme Teknoloji Yol Haritası – Demir-Çelik Sektörü, 2023

Hedef	Kritik Ürün/Teknoloji	Araştırma, Teknoloji Geliştirme ve Yenilik Konusu	Dünyadaki Teknolojik Hazırlık Seviyesi	Türkiye'deki Teknolojik Hazırlık Seviyesi	Zaman Tahminleri Kısa Vade: 2026'a kadar Orta Vade: 2030'a kadar Uzun Vade: 2035'e kadar
	değerlendirilmesine yönelik yöntemlerin geliştirilmesi	b. Kullanılmış döküm kumunun parça döküm dışındaki diğer sektörlerde değerlendirilmesine yönelik sistemlerin geliştirilmesi ve yaygınlaştırılması	Kum: 7-8 Cüraf: 3-4 Filtre Tozları: 2-3	Kum: 4-5 Cüraf: 2-3 Filtre Tozları: 2-3	2026
		c. Döküm cürafları ve filtre tozlarının döküm dışındaki diğer sektörlerde değerlendirilmesine yönelik sistemlerin geliştirilmesi ve yaygınlaştırılması	Kum: 7-8 Cüraf: 3-4 Filtre Tozları: 2-3	Kum: 4-5 Cüraf: 2-3 Filtre Tozları: 2-3	2026
6. Demir-Çelik ve Parça Döküm Sektöründe Optimizasyon, Enerji Girdisi, Verimlilik ve Atık Yönetimi	6.1. Demir-çelik ve parça döküm sektörlerinde optimizasyon, enerji girdisi, verimlilik ve atık yönetimine yönelik uygulamaların geliştirilmesi ve yaygınlaştırılması	a. Demir-Çelik ve Parça Döküm sektöründe üretim proseslerinin dijital ve elektronik teknolojilerle optimizasyonuna yönelik uygulamaların geliştirilmesi ve yaygınlaştırılması	4-6	2-4	2030
		b. Demir-Çelik tesislerinin enerji girdisinin ekonomik döngüsellğe uygun ve yenilenebilir kaynaklardan olmasına yönelik çalışmaların gerçekleştirilmesi	9	9	Yenilenebilir enerji: 2026 Hidrojen: 2030-2035
		c. Tüm proseslerde enerji, su ve malzeme verimliliğinin arttırılmasına yönelik en iyileme çalışmalarının gerçekleştirilmesi	9	8-9	2026

TÜBİTAK Yeşil Büyüme Teknoloji Yol Haritası – Demir-Çelik Sektörü, 2023

Hedef	Kritik Ürün/Teknoloji	Araştırma, Teknoloji Geliştirme ve Yenilik Konusu	Dünyadaki Teknolojik Hazırlık Seviyesi	Türkiye'deki Teknolojik Hazırlık Seviyesi	Zaman Tahminleri Kısa Vade: 2026'a kadar Orta Vade: 2030'a kadar Uzun Vade: 2035'e kadar
		d. Demir-çelik tesislerinde yan ürün ve atık yönetimine ilişkin yöntemlerin ve uygulamaların geliştirilmesi	Cüruf+karbon yakalama+ısı geri kazanımı: 5	Cüruf+karbon yakalama+ısı geri kazanımı: 1-2	2026
		e. Atık gazların ve ısının geri kazanımına yönelik teknolojilerin ve uygulamaların geliştirilmesi ve yaygınlaştırılması	9	8-9	2026
	6.2. Karbon yakalama, kullanımı ve depolama (CCUS) teknolojilerinin prosese entegrasyonuna yönelik çalışmalar gerçekleştirilmesi	a. Karbon yakalama, kullanımı ve depolama (CCUS) teknolojilerinin prosese entegrasyonuna yönelik çalışmalar gerçekleştirilmesi	7-9	3-4	2030-2035

İçindekiler

Teknolojik Hedef 1:	13
ENTEGRE DEMİR-ÇELİK ÜRETİMİ	13
1.1. Kok fırınlarında iyileştirilmiş ve alternatif kömür hammaddelerin kullanılması	14
1.2. Sinter ve Pelet tesislerinde enerji ve hammadde girdilerinin ve verimliliğin iyileştirilmesi	25
1.3. Yüksek fırınların ve bazik oksijen fırınlarının alternatif hammadde kaynaklarının kullanılmasına ve enerji verimliliğinin artırılmasına yönelik teknolojiler	33
1.4. Yüksek fırınlarda ve bazik oksijen fırınlarında döngüsel ve geri kazanım/kullanıma yönelik atık yönetimi proseslerinin tasarlanması, uygulanması	49
Teknolojik Hedef 2:	57
SÜREKLİ DÖKÜM VE YARI MAMÜL İŞLENMESİ (HADDELEME, ISIL VE YÜZEY İŞLEM)	57
2.1. Sürekli döküm, haddeleme, ısıl işlem ve yüzey işlem proseslerinin iyileştirilmesine ve verimliliğini artırmaya yönelik alternatif ve yenilikçi proseslerin ve yöntemlerin geliştirilmesi	58
Teknolojik Hedef 3:	81
HURDADAN ÇELİK ÜRETİMİ – ELEKTRİKLİ ARK OCAĞI, İNDÜKSİYON OCAĞI VE POTA OCAĞI FIRINLARI	81
3.1. Hurda ayıklama ve hazırlama proseslerinin iyileştirilmesine yönelik yöntemlerin ve uygulamaların geliştirilmesi	82
3.2. Hurdadan çelik üretiminde alternatif hammaddelerin kullanılmasına yönelik yöntemlerin geliştirilmesi	95
3.3. Elektrikli ark ve pota ocaklarından çıkan katı atıkların döngüsel ekonomi süreçleriyle geri dönüşümüne yönelik yenilikçi proseslerin ve uygulamaların geliştirilmesi	106
Teknolojik Hedef 4:	119
DR (DOĞRUDAN İNDİRGEME) VE DİĞER ALTERNATİF DEMİR-ÇELİK ÜRETİM YÖNTEMLERİ	119
4.1. DRI ve diğer alternatif Demir-Çelik üretim yöntemleri geliştirilmesi, pilot gösterimleri ve ölçek büyütme çalışmaları	120
Teknolojik Hedef 5:	154
PARÇA DÖKÜM	154
5.1. Parça dökümde proses ve enerji verimliliğini artırmaya yönelik alternatif proseslerin ve yöntemlerin geliştirilmesi	155
5.2. Parça dökümde proses çıktılarının (döküm kuşları, cürufur, filtre tozları vb.) değerlendirilmesine yönelik yöntemlerin geliştirilmesi	175
Teknolojik Hedef 6:	187
DEMİR-ÇELİK VE PARÇA DÖKÜM SEKTÖRLERİNDE OPTİMİZASYON, ENERJİ GİRDİSİ, VERİMLİLİK VE ATIK YÖNETİMİ	187
6.1. Demir-çelik ve parça döküm sektörlerinde optimizasyon, enerji girdisi, verimlilik ve atık yönetimine yönelik uygulamaların geliştirilmesi ve yaygınlaştırılması	188
6.2. Karbon yakalama, kullanımı ve depolama (CCUS) teknolojilerinin prosese entegrasyonuna yönelik çalışmalar gerçekleştirilmesi	206

EK 1. Yeşil Büyüme Teknoloji Yol Haritası Demir-Çelik Sektörü Danışma Grubu Üyeleri	215
EK 2. Yeşil Büyüme Teknoloji Yol Haritası Demir-Çelik Sektörel Odak Grubu Üyeleri	216
EK 3: Çalışmanın Yürütülmesinde Görevli TÜBİTAK Yetkilileri	217

Teknolojik Hedef 1:

ENTEGRE DEMİR-ÇELİK ÜRETİMİ

Demir-Çelik sektöründeki entegre tesislerde **kok, sinterleme, peletleme, yüksek fırın ve bazik oksijen fırın tesislerinde karbon ayak izinin ve iklim etkilerinin en aza indirilmesine** yönelik teknolojilerin geliştirilmesi, pilot gösterimlerin gerçekleştirilmesi

Kritik Ürün/Teknoloji

1.1. Kok fırınlarında iyileştirilmiş ve alternatif kömür hammaddelerin kullanılması

Öncelikli Ar-Ge ve Yenilik Konuları

1.1.a. Biyokömür (Isı Verilerek Torrefaksiyon ile Kurutulmuş, Peletlenmiş Biyokütle) üretimi ve kullanımı

1.1.b. Düşük emisyon üretecek verimli kömür harman modellerinin geliştirilmesi

Kritik Ürün/Teknoloji 1.1.

1.1 Kok fırınlarında iyileştirilmiş ve alternatif kömür hammaddelerin kullanılması

A. Teknik Açıklamalar, Yenilikçi Özellikler, Hedeflenen Performans ve Metrikler

Metalürjik kok, taşkömürlerinin havasız ortamda tüm uçucu bileşenleri uzaklaştırılana kadar ısıtılmasından sonra kalan katı maddedir.

Metalürjik kok, koklaşabilir kömürlerden üretimi sürecinde ve de indirgenme/yakıt girdisi amaçlı yüksek fırınlarda kullanımı sırasında yapısında bulunan yüksek oranda karbondan dolayı CO₂ emisyonları açığa çıkmasına sebep olmaktadır.

Metalürjik kok başta karbon olmak üzere az miktarda hidrojen, azot, kükürt ve oksijenden oluşmaktadır. Boyutları 40–100 mm arasında değişen metalürjik kokun büyük bölümü yüksek fırınlarda demir üretiminde kullanılmaktadır.

Fosil kömür ve Metalürjik kok, demir-çelik sanayisinde, örneğin yüksek fırınlarda kullanım için uyarlanmış, iklim açısından nötr, ön işleme tabi tutulmuş biyokütle ürünleri ile kısmen ikame etmek, karbon emisyonlarını belirli bir ölçüde azaltmak için fırsat olabilir.

Geleneksel demir ve çeliğin üretimi, büyük miktarda karbon tüketir. Özellikle demir üretim süreci, enerji ve kaynak olarak tüketimin en yoğun olduğu üretim sürecidir. Bu durum çevresel kaygıları beraberinde getirir. Ayrıca, yüksek fırının vazgeçilmez hammaddelerinden biri olan metalürjik kok, üretiminde kullanılan koklaşabilir kömür kaynakları giderek azalmakta olan bir hammaddedir ve koklaştırma prosesi ciddi kirliliğe neden olmaktadır. Bu nedenle, düşük karbonlu, enerji tasarruflu, emisyon azaltıcı ve düşük maliyetli bir demir üretim süreci gerçekleştirmek, demir-çelik işletmelerinin ve toplumun çıkarları için büyük önem taşımaktadır.

ÖNCELİKLİ AR-GE VE YENİLİK KONULARI

1.1.a. Biyokömür (Isı Verilerek Torrefaksiyon ile Kurutulmuş, Peletlenmiş Biyokütle) üretimi ve kullanımı

Metalürjik proseslerde kullanım için en uygun biyokütle ahşap bazlıdır; bununla birlikte, ham odunsu biyokütlenin kullanılması uygun değildir. Biyokütlenin, kok kömürü veya enjeksiyon kömürlerine kıyasla karbon içeriği ve ısıtma değeri düşüktür ve oksijen, uçucu madde (VM) ve

nem içerikleri yüksek olduğundan kullanım öncesinde ham biyokütlenin geliştirilmesi gerekmektedir. Odunsu biyokütle, torrefaksiyon veya piroliz süreçlerinde olduğu gibi, oksijenin yokluğunda termokimyasal yavaş piroliz yolu ile biyokömüre yükseltilebilir.

Biyokömür, Metalürjik kok üretimi için kömür harmanlarına eklenebilir. Odun kömürü, genel kimyası açısından düşük uçucu kömür veya kok kömürüne benzer, ancak çok düşük kül seviyelerine sahiptir (örneğin %0,5-%2,0) ve geleneksel yakıtların/indirgeyicilerin değiştirilmesinde genellikle ek kimyasal riskler taşımaz. Bununla birlikte, bazı durumlarda, kömürün fiziksel özellikleri sınırlayıcı olabilir ve daha düşük kütle yoğunluğu ve mukavemeti ve/veya nemi emme kabiliyeti ile başa çıkmak için uyum gerekli olabilir.

Biyokütle yenilenebilir ve karbon nötr bir malzemedir. Biyokütle, yeryüzündeki tüm canlıları ifade eden, otlar, mahsuller, ağaçlar vb. gibi bitkilerden elde edilen organik maddeler için genel bir terimdir. Genel olarak, tüm hidrokarbonlar, esas olarak karbon, hidrojen, oksijen, nitrojen vb. biyokütle kaynakları çok bol ve çeşitlidir. Biyokütlenin karbonizasyonundan elde edilen biyokömür, mükemmel özelliklere sahip bir tür katı yakıttır. Biyokütlenin demir üretim sürecinde ısıtma ve indirgeme amaçlı olarak kullanılması, enerji tasarrufuna ve emisyon azaltımına katkıda bulunur ve kısmen kömür ve kok kömürünün yerini alabilir. Biyokütlenin demir üretim sürecinde kullanımının araştırma durumu farklı akademisyenler tarafından araştırılmıştır. Biyokütle enerjisinin demir üretim sürecindeki uygulama beklentileri analiz edilmiş ve biyokütlenin etkin kullanımı ve metalürjik kömür ve kok gibi fosil yakıtların tüketiminin azaltılması için anlamlı olan yeni bir biyoenerji yardımcı demir üretim sistemi önerilmiştir.

İstatistiklere göre, küresel biyokütle kaynaklarının yıllık üretimi, kuru ağırlıkla yaklaşık 146 milyar tondur. Yeşil bitkilerin fotosentezinden kaynaklanan biyoenerji, biyokütlerde kimyasal enerji olarak depolanır. Bu nedenle, özünde bir güneş enerjisi şeklidir. Biyoenerji, küresel enerji arzının yaklaşık %10-14'ünü oluşturan, her zaman insan kullanımı için birincil enerji formlarından biridir. Tüm bitki biyokütlesinin enerji yoğunluğu, kuru kül içermeyen bazda 17 MJ/kg ile 21 MJ/kg arasında değişen, nispeten karardır. Dünyanın yıllık enerji talebi yaklaşık 400EJ iken, ormanlardan ve tarımsal kalıntılardan yılda yaklaşık 30EJ potansiyel biyoenerji elde edilebileceği tahmin edilmektedir.

Biyoenerji, yenilenebilir karbonun tek kaynağıdır. Fosil enerji ile karşılaştırıldığında, biyokütle enerjisi çevre koruma, kaynakların korunması ve sürdürülebilir kalkınmada büyük bir avantaja sahiptir. Dünyanın her yerindeki araştırmacılar tarafından biyokütle enerjisinin dönüştürülmesi ve kullanılması üzerine çok fazla çalışma yapılırken, biyoenerjinin demir yapım sürecinde uygulanması konusunda daha az çalışma yapılmıştır.

Biyokütle kaynakları genellikle düşük kütle yoğunluğuna ve düşük öğütülebilirliğe sahiptir, bu da depolama ve nakliye için yüksek bir maliyet getirme eğilimindedir. Ayrıca biyokütle,

genellikle düşük enerji yoğunluğuna ve yüksek neme sahiptir, bu da kararsız yanmaya ve dalgalı yanma hızına yol açar. Tüm bu faktörler, biyokütle kaynaklarının doğrudan endüstriyel uygulamasını sınırlar. Yukarıdaki sorunların üstesinden gelmek için ön arıtma veya dönüştürme gereklidir. Biyokütle için yakıtların ve kimyasalların elde edilebildiği biyokimyasal dönüşüm ve termokimyasal dönüşüm olmak üzere başlıca iki kimyasal dönüşüm yaklaşımı vardır.

Ham biyokütlenin pirolizinden elde edilen katı bir yakıt olan biyokömür, muhtemelen demir üretiminde geniş uygulama olanaklarına sahip olacaktır. Biyokömür, kömür veya kok gibi, biyokömür de sabit karbon, uçucu, kül vb. özellikleri olan belirli sıcaklıklarda biyokütlenin oksijensiz karbonizasyonu ile üretilen katı artıklar olarak tanımlanabilir. Biyokömürün verim oranı, bileşimi ve özellikleri piroliz koşullarından (karbonizasyon sıcaklığı, ısıtma hızı, bekletme süresi vb.) doğrudan etkilenir.

Genel olarak, karbonizasyon sıcaklığının artması ve bekletme süresinin uzaması ile biyokömürün verim oranı ve uçucu maddesi azalmaktadır. Ham biyokütle, karbonizasyon işleminden sonra biyokömüre dönüşür ve ardından öğütülebilirliği ve enerji yoğunluğu artırılır. Biyokömürün hazırlanması ve özellikleri, dünya çapındaki araştırmacılar tarafından kapsamlı bir şekilde araştırılmaktadır. Biyokömürün yüksek karbonlu, yüksek kalorifik değere ve düşük kirliliğe sahip yüksek kaliteli bir yakıt olduğu ve kısmen fosil yakıtların yerini alabileceği yaygın olarak kabul edilmiştir. Genel olarak, fosil yakıtlarla karşılaştırıldığında biyokömürün aşağıdaki üç avantajı vardır:

- 1) Çevre dostu: Biyokömür, yenilenebilirlik, karbon nötrlüğü, düşük kükürt içeriği ve düşük nitrojen içeriği gibi ham biyokütle ile benzer özelliklere sahiptir ve bunlar fosil enerji krizinin hafifletilmesine ve CO₂, SO₂ ve NO_x emisyonlarının azaltılmasına katkıda bulunur.
- 2) Saf bileşim: Biyokömürün karbon içeriği yüksektir ve kül, nitrojen, kükürt, kalsiyum, natrium vb. içerikleri düşüktür.
- 3) Mükemmel özellikler: Biyokömür genellikle gözeneklidir ve yüksek gözenekliliğe, yüksek gözenek hacmine ve yüksek spesifik yüzey alanına sahiptir. Ayrıca biyokömürün yanıcılığı ve reaktivitesi kömürden daha iyidir.

Demir üretimi söz konusu olduğunda, biyokömür proste uygun şekilde kullanılabilirse enerji tasarrufu, emisyon azaltımı, maliyet düşürme ve benzeri hedeflere ulaşılabilir. Ayrıca, biyokömürün saflığı nedeniyle, daha sonraki çelik üretim süreci için daha az safsızlık ile yüksek kaliteli sıcak metal üretilebilir ve sağlanabilir.

Isı ve indirgeyici madde temini için geleneksel demir üretim sürecinde çok miktarda kömür ve kok tüketilir. Önceki araştırmalar çoğunlukla kömür ve kok kömürünün etkin kullanımına veya verimli kullanımına odaklanırken, kömür ve kok kömürünün temel olarak biyokütle kaynaklarıyla değiştirilmesiyle ilgili çok az şey var.

Biyoenjerji, yüksek karbon içeriğine sahip karbon nötr bir enerjidir ve şu anda doğrudan yakma veya birlikte ateşleme yoluyla ısı ve güç üretmek için kullanılmaktadır. Her iki yöntem de ekstra oksijen kaynağı gerektiren ve düşük enerji verimliliğine sahip oksidasyon süreçleridir. Ancak, demir yapımına biyoenjerji uygulanırsa işler farklı olacaktır. Biyokütle karbonu, demir cevheri indirgeme sürecinde çok önemli bir rol oynayacak ve biyoenjerjinin tam olarak kullanılabilmesi için yüksek oksijen atomlarını yakalayabilecektir. Çevre kirliliği ve enerji kısıtları nedeniyle, biyoenjerjinin demir üretim sürecinde kullanılmasının fizibilitesi dünya çapında araştırmacıların dikkatini çekmiştir. Biyokütlenin demir üretiminde kullanılması konusu birçok ülkenin (Japonya, Çin, Brezilya, Avustralya, Almanya, Finlandiya vb.) gündeminde olmaya devam etmektedir.

Biyokütle kaynakları, yenilenebilir ve temiz bir enerji türü olarak endüstriyel uygulamalarda büyük gelişme potansiyeline sahiptir. Biyokömür kullanılarak şu sonuçların elde edilebileceği beklenmektedir.

(1) Biyokütle, büyük bir rezerv ve geniş bir dağılıma sahip tek yenilenebilir karbon kaynağıdır. Biyokütlenin piroliz ürünü olan biyokütle kömürü veya biyokömür, yüksek reaktivite ve saflığa sahip, düşük kükürt ve kül içeriğine sahip mükemmel bir katı yakıttır. Biyokütle, demir üretim sürecinde kısmen kömür ve kok kömürünün yerini almak için ısıtma ve indirgeme amaçlı olarak kullanılabilen uygun metalürjik özelliklere sahiptir.

(2) Biyoenjerji, modern demir üretim sürecinde büyük uygulama potansiyeline sahiptir. Kok üretimi, demir cevheri aglomerasyonu, yüksek fırın demir üretimi, yüksek fırın dışı demir üretimi vb. için kullanılabilir. Teorik olarak tüm kömür ve kok kömürü ve diğer fosil yakıtlar biyoenjerji ile değiştirilebilir.

(3) Yeni biyokütle yardımcı demir üretim süreci, yeraltı karbon kaynaklarının ve fosil yakıtların tüketimini önemli ölçüde azaltacak ve böylece CO₂, SO₂ ve NO_x gibi emisyonlar da azaltılacaktır.

1.1.b. Düşük emisyon üretecek verimli kömür harman modellerinin geliştirilmesi

Metalürjik kok, değişik özelliklere sahip genellikle koklaşabilir (bitümlü) kömürlerin karışımından üretilmektedir. Genellikle kömürler temel olarak düşük, orta ve yüksek uçucusuna sahip kömürler olarak sınıflandırılır. Kömürler doğadan çıktığı haliyle kırma, eleme,

lavvarlanma gibi fiziksel işlemlerden geçirildikten sonra tek başına istenilen özelliklerde olabileceği gibi, birkaç kömürün birbiriyle karıştırılması yöntemiyle de istenilen özelliklere getirilebilir. Kokun fiziksel ve kimyasal özelliği, koklaştırma koşullarının yanı sıra, karışımda kullanılan kömürlerin kendi özelliklerine ve bunların birbirlerini karşılıklı etkilemelerine (özellikle, koklaşma ve büzülme özelliğinde) bağlıdır. Günümüz yüksek fırınlarının istediği boyut ve sağlamlıkta kok üretebilmek için, uygun koklaştırılacak kömür karışımının çok iyi ayarlanması gerekmektedir. Genel olarak, kömür karışımları önce laboratuvar koklaştırma fırınlarında koklaştırılarak, optimal karışım oranları belirlenmekte ve bunu pilot çapta deneyler izlemektedir. Metalürjik kokların kullanıldığı Yüksek Fırınların çapı, üretim miktarı, kullandığı ilave yakıtlar (PCI, doğalgaz vs.) belirlenen Metalürjik kok özellikleri üzerine etki etmektedir.

Farklı üretim tesislerinin belirlediği farklı uçucu miktar aralığı bulunmaktadır. Bu karara etki eden konular;

1. Kok Fabrikalarının üretime alacağı stok sahalarındaki mevcut kömürler,
2. İstenilen Metalürjik kok kalitesine ulaşmak için kömürlerin birbiri ile uyumu,
3. Fabrikaların Kok Gazı ihtiyacı,
4. Maliyet ve Termin programları.

İşletme birimleri bu bileşenleri kullanarak bir optimizasyon yapmak durumunda kalmaktadır.

Yukarıdaki sayılan konular ışığında Yüksek Fırınların talep ettiği optimum kok kalitesini sağlayacak ve minimum emisyon sağlayacak kömür harman uçucu miktarına karar vermek gerekmektedir.

Mevcut şartlarda da kömür karışım karar süreci yukarıda da açıklandığı şekilde yapılmaktadır. Ancak emisyon azaltımı ve bunun sağlayacağı avantajlar mali olarak net olarak tanımlanırsa firmalar bu avantajlardan yararlanacak şekilde optimum kömür harmanlarına müdahale edebilecek ve karışımın ortalama uçucu oranını azaltabilecektir. Burada unutulmaması gereken konu; bu yapılan değişiklik, kok kalitesi üzerinde negatif bir etki oluşturursa, yüksek fırınların yakıt oranlarındaki artışla oluşacak ilave karbon ayak izinin kok üretim süreci ve sıcak maden üretim süreci olarak birbirleriyle mukayese edilerek optimize edilmesidir.

B. Dünyada ve Türkiye’de Teknolojik Hazırlık Seviyeleri

1.1.a. Biyokömür (Isı Verilerek Torrefaksiyon ile Kurutulmuş, Peletlenmiş Biyokütle) üretimi ve kullanımı

Dünyada THS 9, Türkiye’de THS 3-4

1.1.b. Düşük emisyon üretecek verimli kömür harman modellerinin geliştirilmesi

Dünyada THS 9, Türkiye’de THS 7

C. Dünyada ve Türkiye’deki Mevcut Duruma İlişkin Başarılı Örnekler

1.1.a. Biyokömür (Isı Verilerek Torrefaksiyon ile Kurutulmuş, Peletlenmiş Biyokütle) üretimi ve kullanımı

Biyokütlenin demir-çelik üretiminde kullanılması konusunda teknoloji olarak herhangi bir sorun yoktur. Mevcutta teknolojiler olmakla birlikte farklı teknolojiler de geliştirilebilir.

- Dünyadaki başarılı girişimler ve örnekler

John G. Mathieson ve arkadaşlarının (Potential For The Use of Biomass in The Iron And Steel Industry, 2011) çalışmasında Avustralya’da BlueScope Steel, OneSteel ve CSIRO firmaları sera gazı emisyonlarında düşüş sağlayabilecek teknolojilerin geliştirilmesi için ortak yürütülen Ar-Ge programında tipik bir entegre çelik üretimi operasyonunda biyokütle türevli girdiler için uygulama önerilerine yer verilmiştir. [1]

Biyokütleden türetilen malzemelerin “yenilenebilir” olarak üretildiği varsayılan tabloda teorik olarak, koklaşabilir taş kömürü karışımına %5’lik oranda eklenebilen ve yüksek sıcaklıkta torrefelenmiş beyaz peletler veya kalıntı briketlere %10 oranında eklenebilen biyokömür, CO₂ emisyonlarını yaklaşık %4 oranında azaltabilmektedir.

Tablo: Tipik Bir Entegre Çelik Üretimi Operasyonunda Biyokütle Türevli Girdiler İçin Önerilen Uygulamalar

Varsayım: Sonuçlar yalnızca doğrudan malzeme ikamesine dayalıdır

Uygulama	Enjeksiyon Oranı	Emisyon Azalımı	
		t-CO ₂ /t-ham çelik	% CO ₂ Emisyonu
Sinterleme	%50 – %100 İğne kok değişimi 45 – 60 kg-kok/antrasit/t-sinter'de antrasit (ve 1,7 t-sinter/t-HM)	0.12 – 0.32	5 – 15
Koklaşma Karışım Bileşeni	% 2 – 10 kok kömürü karışımı, kullanılan kok ile 300 – 350 kg-kok / t-HM	0.02 – 0.11	1 – 5
YF Tüyer Enjeksiyonu	150 – 200 kg-kömür / t-HM'de enjekte edilen kömürün (PCI) %100 değiştirilmesi	0.41 – 0.55	19 – 25
YF Ceviz Kok Değişimi	45 kg somun / t-HM için %50 – %100 değiştirme	0.08 – 0.16	3 – 7
YF Karbon/Cevher Kompozitleri veya BOF Önceden Azaltılmış Besleme	Kömür/cevher peletlerindeki demirin %5 – 10'u YF'ye veya kömür bazlı önceden indirgenmiş girdiden YF veya BOF'a	0.08 – 0.15	4 – 7
Çelik Üretimi Yeniden Karbonlaştırıcı	0,25 kg-odun kömürü / t-ham çeliğin %100 değiştirilmesi	0.001	0.04
Toplam		0.70 – 1.26	32 - 58

Not:

PCI =Pülverize kömür enjeksiyonu

PCI kömürünün %75 karbon olduğu varsayılır

Kok, kok tozu, antrasit ve yeniden karbonlaştırıcının %85 karbon olduğu varsayılır.

Tesisin sıcak metal ve ham çelik üretiminin eşit olduğu varsayıldı.

Zhengwen Hu ve arkadaşlarının yapmış olduğu yayında biyokütle demir üretiminde kullanılması konusunun birçok ülkenin (Japonya, Çin, Brezilya, Avustralya, Almanya, Finlandiya vb.) gündeminde olmaya devam ettiği belirtilmektedir.[2]

1.1.b. Düşük emisyon üretecek verimli kömür harman modellerinin geliştirilmesi

Kömür karışımları hazırlanırken optimum kömür karışımına karar vermek üzere bilgisayar programları kullanılmaktadır. Dünyada kullanıldığı gibi Türkiye'de de benzer programları kullanan Demir-Çelik tesisleri vardır. Kullanılan programların başarısı konusunda tereddütler vardır. Konuyla ilgili yapılan OPEX projeleri de mevcuttur.

- Dünyadaki başarılı girişimler ve örnekler

Thermo Scientific COBOSTM Coal Blending Optimization System, N-Side SCOOP (Her iki firmanın programının başarısı konusunda net bir şey söylemek mümkün değildir.)

- Türkiye'de (varsa) başarılı örnek ve girişimler

Entegre Demir-Çelik üreten firmalarda optimizasyon programlarının ve OPEX çalışmalarının bulunduğu bilinmektedir.

D. Ar-Ge ve Yenilik Sürecinde Biraraya Gelmesi Gereken Disiplinler ve Sektörler

Metalürjik Kok Üretiminde kullanılan kömür harmanlarının optimizasyonu konusunda Üniversite ve Demir-Çelik İşletmeleri arasında bir işbirliği yapılabilir. Kok kalitesinde iyileşme sağlanması durumunda Yüksek Fırınlarda kullandığı kok ve yakıt oranları düşürülerek emisyonlarda azalma meydana gelir.

1.1.a. Biyokömür (Isı Verilerek Torrefaksiyon ile Kurutulmuş, Peletlenmiş Biyokütle) üretimi ve kullanımı

Üniversitelerin Maden, Malzeme ve Metalurji Mühendisliği, Makine Mühendisliği ve Kimya Mühendisliği bölümlerinden özellikle Heterojen Yanma konusunda deneyimli Akademisyenler ile birlikte Demir-Çelik İşletmelerinin ilgili alandaki personelleri biraraya gelebilir.

Üniversite, Tarım ve Orman Bakanlığı, Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı ve Demir-Çelik Şirketlerinin bir arada çalışması gerekir.

1.1.b. Düşük emisyon üretecek verimli kömür harman modellerinin geliştirilmesi

Üniversitelerin Maden, Kimya, Malzeme ve Metalurji Bölümlerinden Akademisyenler ile Demir-Çelik İşletmelerinin ilgili alandaki personelleri biraraya gelebilir. Ayrıca Bilgisayar programlarının yazılması için grupların içinde Programcıların olması gerekmektedir.

E. Ar-Ge, Yenilik, Demonstrasyon İşbirliği Modeli ve Destek Mekanizması

1.1.a. Biyokömür (Isı Verilerek Torrefaksiyon ile Kurutulmuş, Peletlenmiş Biyokütle) üretimi ve kullanımı

Üniversitelerin Maden, Malzeme ve Metalurji Mühendisliği, Makine Mühendisliği ve Kimya Mühendisliği bölümlerinden özellikle Heterojen Yanma konusunda deneyimli Akademisyenler üniversitelerde teknoloji geliştirme amaçlı bilimsel çalışmalar yapabilir, yüksek lisans ve doktora tezi konuları olarak çalıştırılabilir.

Yapılacak çalışmaların ilk hedefi THS 6 düzeyine ulaşılmasıdır. Çalışmalar THS 6 düzeyinde başarıyla prototip geliştirildikten sonra Demir-Çelik Ar-Ge ve/veya İşletmeleri arasında bir işbirliği yapılarak THS 9 seviyesine getirilmesine ve yaygınlaştırılmasına yönelik çalışmalar yapılabilir. Orta/büyük ölçekli Ar-Ge ve Yenilik Projeleri ile gerçekleştirilebilir.

1.1.b. Düşük emisyon üretecek verimli kömür harman modellerinin geliştirilmesi

Üniversitelerin Maden, Kimya, Malzeme ve Metalurji Bölümlerinden Akademisyenler ile Demir-Çelik İşletmelerinin ilgili alandaki personelleri biraraya gelebilir. Ayrıca Bilgisayar programlarının yazılması için grupların içinde Programcıların olması gerekmektedir.

Akademisyenler üniversitelerde teknoloji geliştirme amaçlı bilimsel çalışmalar yapabilir, yüksek lisans ve doktora tezi konuları olarak çalıştırılabilir. Çalışmalar belirli bir düzeye getirildikten sonra Demir-Çelik Ar-Ge ve/veya İşletmeleri arasında bir işbirliği yapılabilir ve saha denemeleri gerçekleştirilebilir. Küçük/Orta ölçekli Ar-Ge ve Yenilik Projeleri ile gerçekleştirilebilir

F. Zaman Boyutu

(Kısa Vade: 1-3 yıl, Orta Vade: 3-5 yıl, Uzun Vade: 5 yıldan fazla)

1.1.a. Biyokömür (Isı Verilerek Torrefaksiyon ile Kurutulmuş, Peletlenmiş Biyokütle) üretimi ve kullanımı

Kısa vade

1.1.b. Düşük emisyon üretecek verimli kömür harman modellerinin geliştirilmesi

Kısa vade

G. Teknolojik İlerlemenin Sağlanmasında Kritik Hususlar

Üniversite ve Sanayi arasında koordinasyon ve mali destekler gereklidir.

Mevzuat ve Yasal Düzenlemeler

Biyokütle malzemelerin kok bataryalarında kok üretiminde kullanılması için mevzuat incelenmeli ve eksiklik varsa mevzuata dahil edilmelidir.

Teknik Altyapılar

Biyokütlenin kok üretiminde kullanımı için ön işlemlerden geçirilme süreçleri ve kok bataryasına beslenmesi konusunda gerekli çalışmaların yapılması gerekir. Biyokütlelerin özelliklerinin tespiti ve belirli bir sertifikasyon ihtiyacı olacak mı bunun üzerinde çalışılması gerekmektedir. Proses üzerine etkisi konusunda çıkan metalürjik kokların kalite özelliklerinin tespiti için gerekli alt yapı, entegre üretim fabrikalarında mevcuttur.

Destek ve Teşvikler

Ar-Ge ve Teknoloji projelerinde kullanılacak ekipman, malzeme ve işgücünün mali olarak desteklenmesi sağlanmalıdır.

Kritik Ürün/Teknoloji 1.2.

1.2. Sinter ve Pelet tesislerinde enerji ve hammadde girdilerinin ve verimliliğin iyileştirilmesi

Öncelikli Ar-Ge ve Yenilik Konuları

1.2.a. Ateşleme fırınının verimliliğinin artırılmasına yönelik "Çok Yarıklı Brülörlerin" ve "Perde Alev Ateşleme Sistemlerinin" geliştirilmesi, pilot gösterimlerinin yapılması

1.2.b. Sinterleme prosesinde Hidrojence zengin Kok gazı veya doğrudan hidrojen kullanılmasının araştırılması

1.2.c. Pelet tesislerinde enerji ve hammadde girdilerinin ve verimliliğin iyileştirilmesine yönelik çalışmaların gerçekleştirilmesi

Kritik Ürün/Teknoloji 1.2.

1.2. Sinter ve Pelet tesislerinde enerji ve hammadde girdilerinin ve verimliliğin iyileştirilmesi

A. Teknik Açıklamalar, Yenilikçi Özellikler, Hedeflenen Performans ve Metrikler

Sinter ve Pelet üretimi sırasında mevcut şartlarda kok yakıt olarak tozu, antrasit, kok gazı, doğal gaz vb. fosil yakıtlar kullanılmaktadır. Bu yakıtların tüketiminde sağlanacak her türlü azalma bu proseslerden ortaya çıkan emisyonların azalmasına hizmet edecektir. Ayrıca malzeme verimleri de aynı bağlamda değerlendirilmektedir.

Fosil yakıtlara dayalı prosesler olması nedeniyle güncel proste yapılacak en uygun iyileştirme enerji tasarrufu ve malzeme verimlerinin artırılmasıdır.

Mevcut proseslerde mevcut en iyi teknolojik uygulamalar açısından yakıt tüketimini azaltma ve malzeme verimliliğini artırma potansiyeli olan fırsatlar bulunmaktadır.

ÖNCELİKLİ AR-GE VE YENİLİK KONULARI

1.2.a. Ateşleme fırının verimliliğinin artırılmasına yönelik “Çok Yarıklı Brülörlerin” ve “Perde Alev Ateşleme Sistemlerinin” geliştirilmesi, pilot gösterimlerinin yapılması

Yanma verimi yakıt tüketimleri ve maliyetleri açısından çok önemli bir konudur. Sanayide kullanılan çok farklı brülör sistemleri ve uygulamaları bulunmaktadır. “Çok Yarıklı Brülörler” ve “Perde Alev Ateşleme Sistemleri” de bu sistemlerden iki tanesidir.

Sinter ve pelet fabrikalarında üretimde kurulu yanma sistemlerinin ve malzeme verimlerinin detaylı incelenmesi ve mevcut en iyi teknolojik uygulamalar açısından değerlendirilme gerekmektedir.

Yanma ve malzeme verimlerinin artırılmasına yönelik olarak “Çok Yarıklı Brülörler” ve “Perde Alev Ateşleme Sistemleri” kullanılarak yanma veriminin artırılması hedeflenmektedir.

1.2.b. Sinterleme prosesinde Hidrojence zengin Kok gazı veya doğrudan hidrojen kullanılmasının araştırılması veya olmaması durumunda doğal gaz kullanımının yaygınlaştırılması

Sinter prosesi yüksek fırınlara direk olarak şarj edilemeyecek boyuttaki toz cevherlerin, harmanlanıp kok tozu, kireçtaşı, sinter tozu ve diğer katkı malzemeleri ile belirli oranlarda karıştırılarak ergime sıcaklığı altında yüzey ergitme işlemine tâbi tutularak birleştirilmesi sonucu yüksek fırınlara şarj edilebilecek boyuta getirilmesi sürecidir.

Proseste yüzey ergitme işlemini sağlamak için kok tozu/antrasit, cevher içerisindeki silisi nötralle etmek için ise kireç taşı kullanılmaktadır.

Sinter prosesinde kok gazı ve doğalgaz yakıt olarak kullanılabilir. Hidrojen oranı iyileştirilen kok gazı veya doğrudan hidrojenin yakıt olarak kullanılması durumunda mevcut sistemde yapılması gereken iyileştirmeler ve uyarlanabilirliği gerçekleştirilecek çalışmaların çıktılarına göre değerlendirilebilir.

Sinterleme prosesinde mevcutta kok gazı kullanılmaktadır. Kok gazı ile hidrojen gazının zenginleştirildiği bir gazın kullanılması veya doğrudan yakma gazı olarak hidrojen gazının kullanılması hedeflenmektedir

Sinterleme prosesinde mevcut durumda kok fabrikalarında koklaşma prosesi sırasında üretilen ve daha sonrasında yan ürün tesislerinde işleminden geçirilen kok gazı kullanılmaktadır. Kok gazı içinde ihtiva ettiği karbon içerikleri nedeniyle emisyon neden olan bir gazdır. Gerek hidrojen ile zenginleştirme yapılarak konsantrasyonu azaltılarak emisyon oluşturma potansiyeli azaltılması sağlanacak ya da doğrudan hidrojen kullanılarak emisyon ortadan kaldırılacaktır.

Hidrojen üretim ve kullanılması sağlanacaktır. Mevcut durumda sinterde hidrojenin yakıt olarak kullanımı bulunmamaktadır.

1.2.c. Pelet tesislerinde enerji ve hammadde girdilerinin ve verimliliğin iyileştirilmesine yönelik çalışmaların gerçekleştirilmesi

Pelet Tesislerinde kullanılan enerji ve hammadde girdileri incelenmeli ve dünyadaki iyi örneklerle karşılaştırılarak iyileştirme önerileri oluşturulmalıdır. Pelet fabrikalarında kullanılan enerji ve hammaddelerin verimli olarak kullanılıp kullanılmadığı belirlenmelidir. Enerji ve hammadde verimliliğinin artırılmasına yönelik mevcut en iyi fabrikalarla benchmarking yapılarak uygulamalar gözden geçirilmeli ve tespit edilen iyileştirme başlıkları üzerinde çalışma başlatılmalıdır.

B. Dünyada ve Türkiye’de Teknolojik Hazırlık Seviyeleri

1.2.a. Ateşleme fırınının verimliliğinin artırılmasına yönelik *Çok Yarıklı Brülörlerin” ve “Perde Alev Ateşleme Sistemlerinin” geliştirilmesi, pilot gösterimlerinin yapılması

Dünyada THS 8; Türkiye’de THS 3-4

1.2.b. Sinterleme prosesinde Hidrojence zengin Kok gazı veya doğrudan hidrojen kullanılmasının araştırılması

Hidrojen oranı iyileştirilmiş kok gazı/doğrudan hidrojen kullanımı Dünyada THS 3, Türkiye’de THS 1

1.2.c. Pelet tesislerinde enerji ve hammadde girdilerinin ve verimliliğinin iyileştirilmesine yönelik çalışmaların gerçekleştirilmesi

Dünyada THS 8, Türkiye’de THS belirlenmeli.

C. Dünyada ve Türkiye’deki Mevcut Duruma İlişkin Başarılı Örnekler

1.2.a. Ateşleme fırınının verimliliğinin artırılmasına yönelik *Çok Yarıklı Brülörlerin” ve “Perde Alev Ateşleme Sistemlerinin” geliştirilmesi, pilot gösterimlerinin yapılması

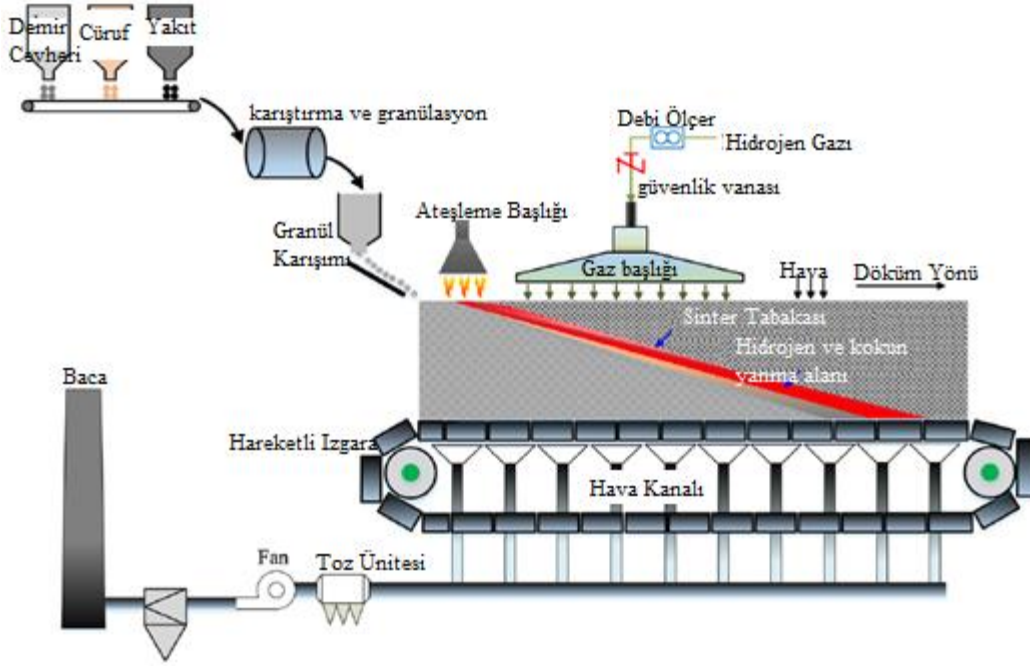
Japonya ve Çin’de bu teknoloji bulunmaktadır.

- Dünyadaki başarılı girişimler ve örnekler

Japonya’da Sumitomo Metal Industries, Ltd. tarafından kullanılmaktadır. Diğer ülkelerde Çin’de vb. kullanılmaktadır.[3]

1.2.b. Sinterleme prosesinde Hidrojence zengin Kok gazı veya doğrudan hidrojen kullanılmasının araştırılması

Hidrojen oranı iyileştirilmiş kok gazı/doğrudan hidrojen kullanımı ile ilgili literatür araştırması sırasında sinter harmanının tutuşturulması sonrasında hidrojence zengin gazın uygulandığı Zhiyun Ji ve arkadaşlarının çalışması incelenmiştir.[4] .



D. Ar-Ge ve Yenilik Sürecinde Biraraya Gelmesi Gereken Disiplinler ve Sektörler

1.2.a. Ateşleme fırının verimliliğinin artırılmasına yönelik *Çok Yarıklı Brülörlerin” ve “Perde Alev Ateşleme Sistemlerinin” geliştirilmesi, pilot gösterimlerinin yapılması

Akademisyen (Yanma Konusunda Uzmanlar), Demir ve Çelik Fabrikaları Ar-Ge ve İşletme Birimleri, Üniversite, araştırma kurumları ve yanma prosesinde uzman bulunduran brülör firmaları birarada çalışmalıdır.

1.2.b. Sinterleme prosesinde Hidrojence zengin Kok gazı veya doğrudan hidrojen kullanılmasının araştırılması

Akademisyen (Yanma Konusunda Uzmanlar), Demir ve Çelik Fabrikaları Ar-Ge ve İşletme Birimleri, Hidrojen Çalışması yapan brülör sistemleri konusunda uzman Özel Şirketler, Üniversite ve araştırma kurumları birarada çalışmalıdırlar.

1.2.c. Pelet tesislerinde enerji ve hammadde girdilerinin ve verimliliğinin iyileştirilmesine yönelik çalışmaların gerçekleştirilmesi

Akademisyen (Maden Mühendisliği, Kimya Mühendisliği ve Malzeme ve Metalurji Mühendisliği), Pelet Tesisi Ar-Ge ve İşletme Birimleri, Üniversite, araştırma kurumları, Madencilik Firmaları ve Dünyada bu konuda yetkin firmalar birarada çalışmalıdırlar.

E. Ar-Ge, Yenilik, Demonstrasyon İşbirliği Modeli ve Destek Mekanizması

1.2.a. Ateşleme fırınının verimliliğinin artırılmasına yönelik *Çok Yarıklı Brülörlerin” ve “Perde Alev Ateşleme Sistemlerinin” geliştirilmesi, pilot gösterimlerinin yapılması

Akademisyen (Yanma Konusunda Uzmanlar), Demir ve Çelik Fabrikaları Ar-Ge ve İşletme Birimleri, Brülör ve Yanma konusunda Çalışma yapan Özel Şirketler biraraya gelerek çalışabilirler. Küçük ölçekli Ar-Ge ve Yenilik desteği ile dünyada örneği olan projelerin geliştirilmesi ve adaptasyonu gerçekleştirilebilir. Pilot Tesis kurulum desteği ve Tesis Kurulumları konusunda yatırım desteği gerekmektedir.

Bu proje ile hidrojen yakıtlı projeler birlikte ele alınabilir.

1.2.b. Sinterleme prosesinde Hidrojence zengin Kok gazı veya doğrudan hidrojen kullanılmasının araştırılması

Öncelikle hidrojen üretimi (Hidrojence zengin Kok gazı veya doğrudan hidrojen) konusunda çalışma başlatılması gerekmektedir. Bu konuda çalışacak akademisyen ve Ar-Ge birimlerinin koordinasyonunda sahada Demir ve Çelik Fabrikaları Ar-Ge ve İşletme Birimleri ile birlikte hidrojen çalışması yapan brülör sistemleri konusunda uzman Özel Şirketler ile birlikte saha uygulamaları planlanmalıdır. Orta Boyutlu Ar-Ge ve Yenilik Desteği yeterli olabilir. Pilot Tesis kurulum desteği ve Tesis Kurulumları konusunda yatırım desteği gerekmektedir.

“Çok Yarıklı Brülörlerin” ve “Perde Alev Ateşleme Sistemlerinin” geliştirilmesi projesi ile birlikte ele alınmalıdır.

1.2.c. Pelet tesislerinde enerji ve hammadde girdilerinin ve verimliliğin iyileştirilmesine yönelik çalışmaların gerçekleştirilmesi

Öncelikle Akademisyen (Maden Mühendisliği ve Malzeme ve Metalurji Mühendisliği), Pelet Tesisi Ar-Ge ve İşletme Birimlerinin katılımıyla saha çalışması yapılmalı, MET dökümanlarına göre fiili uygulamalar gözden geçirilmeli ve iyileştirme alanları belirlenmelidir. Belirlenen iyileştirme konuları için çalışma ve yatırım başlatılmalıdır.

Saha çalışması yapılmadan ve iyileştirmeye açık alanlar belirlenmeden karar verilmesi mümkün değildir. İyileştirmeye açık alanlar belirlendikten sonra Ar-Ge ve yatırım teşvikleri sağlanmalıdır.

F. Zaman Boyutu

(Kısa Vade: 1-3 yıl, Orta Vade: 3-5 yıl, Uzun Vade: 5 yıldan fazla)

1.2.a. Ateşleme fırınının verimliliğinin artırılmasına yönelik *Çok Yarıklı Brülörlerin” ve “Perde Alev Ateşleme Sistemlerinin” geliştirilmesi, pilot gösterimlerinin yapılması

Kısa Vade

1.2.b. Sinterleme prosesinde Hidrojence zengin Kok gazı veya doğrudan hidrojen kullanılmasının araştırılması

Orta Vade

1.2.c. Pelet tesislerinde enerji ve hammadde girdilerinin ve verimliliğin iyileştirilmesine yönelik çalışmaların gerçekleştirilmesi

Kısa Vade

G. Teknolojik İlerlemenin Sağlanmasında Kritik Hususlar

Teşvik Mekanizmaları konusunda güncel şartlara göre mevzuat hazırlanarak yayınlanması gerekmektedir.

Mevzuat ve Yasal Düzenlemeler

Mevzuat açısından sanayide hidrojenin kullanımı konusunda değişiklik ihtiyacı olabilir. Bu konunun irdelenmesi ve ihtiyaca göre mevzuatta değişiklik yapılması gerekir.

Teknik Altyapılar

Hidrojenin üretimi, iletimi, dağıtımı ve kullanımı konusunda test ve sertifikasyon altyapılarının geliştirilmesi gerekmektedir. Bu altyapının hazırlanması ve yeterli insan gücünün test ve uygulamalar konusunda eğitilmesi gerekmektedir.

İnsan Kaynakları

Hidrojenin üretimi, iletimi, dağıtımı ve kullanımı konusunda test ve sertifikasyonların yapılması gibi konularda alt yapı yeterli değildir. Bu başlık altında değerlendirilen konular için herhangi bir problem yaşanacağı düşünülmemektedir.

Destek ve Teşvikler

Ar-Ge ve Yatırım Teşviklerine ihtiyaç vardır.

Kritik Ürün/Teknoloji 1.3.

1.3. Yüksek fırınların ve bazik oksijen fırınlarının alternatif hammadde kaynaklarının kullanılmasına ve enerji verimliliğinin artırılmasına yönelik teknolojiler

Öncelikli Ar-Ge ve Yenilik Konuları

1.3.a. Yüksek fırında kok kullanım oranının azaltılması veya kok kömürüne alternatif hammaddelerin kullanımı, atık plastiklerin enjeksiyonu, toz haline getirilmiş kömür enjeksiyonu (PCI), doğal gaz enjeksiyonu, karbon kompozit aglomeratların şarjı gibi yöntemlerle verimliliğin artırılması ve karbon ayak izinin azaltılmasına yönelik çalışmaların gerçekleştirilmesi

1.3.b. Bazik oksijen fırınında CO₂ emisyonlarının azaltılmasına (CO gazının zenginleştirilmesi gibi) yönelik çalışmalar (proses tasarımları, geliştirmeler, vb.) gerçekleştirilmesi

Kritik Ürün/Teknoloji 1.3.

1.3. Yüksek fırınların ve bazik oksijen fırınlarının alternatif hammadde kaynaklarının kullanılmasına ve enerji verimliliğinin arttırılmasına yönelik teknolojiler

A. Teknik Açıklamalar, Yenilikçi Özellikler, Hedeflenen Performans ve Metrikler

Konvansiyonel yüksek fırınların (Metalürjik kok, parça cevher, sinter, pelet, kireçtaşı, pulverize kömür, doğalgaz vb.) ve bazik oksijen fırınlarının (kireç, kok tozu vb.) kullandığı hammaddeler bulunmaktadır. Gelişen şartlara göre karbonsuzlaştırma çalışmalarına destek olacak şekilde yeni alternatif hammaddeler kullanılabilir.

Yüksek Fırınlarda ve bazik oksijen fırınlarında kullanılan hammaddeler kullanım miktarlarına da bağlı olarak CO₂ emisyonuna neden olmaktadır.

ÖNCELİKLİ AR-GE VE YENİLİK KONULARI

1.3.a. Yüksek fırında kok kullanım oranının azaltılması veya kok kömürüne alternatif hammaddelerin kullanımı, atık plastiklerin enjeksiyonu, toz haline getirilmiş kömür enjeksiyonu (PCI), doğal gaz enjeksiyonu, karbon kompozit aglomeratların şarjı gibi yöntemlerle verimliliğin artırılması ve karbon ayak izinin azaltılmasına yönelik çalışmaların gerçekleştirilmesi

Yüksek fırınlarda, demir cevheri ve kok yüksek fırına üstten bir sıra dahilinde yüklenmektedir. Sıcak hava ise fırının alt kısmındaki tüyerlerden üflenerek koktan CO üretilmektedir. Bu reaksiyonun ısı ve oluşan CO demir cevherini redüklemek ve ergitmek için kullanılır. Böylece üretilen sıvı ham demir ve cüruf belli aralıklarla fırının en alt kısmındaki hazne bölümünden alınır.

Sıvı ham demir üretimi esnasında demir oksitleri redüklemek için kokun yanı sıra yardımcı hammadde olarak pülverize kömür (PCI), katran ve karbon türevleri kullanılarak hammadde maliyetlerini azaltmaktadır.

Yüksek fırında demir oksitleri redükleme sırasında kullanılan kokun tüketiminin ve CO₂ emisyonlarının azaltılması yenilikçi yöntemler ile araştırılmalıdır.

Atık Plastik

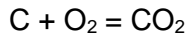
Piyasadan toplanan ve ön işlemlerden geçirilen atık plastikler, tüyerler vasıtası ile fırına enjekte edilerek yüksek fırında kok ve karbon türevleri yerine redükleyici eleman olarak kullanılması, hem atık plastik miktarını azaltarak çevreye katkı sağlamakta, verimliliği arttırmak, hem de yüksek fırında kok tüketimini ve CO₂ emisyonlarını düşürmektedir.

Plastikleri yüksek fırın redükleyici elemanına dönüştürmek için kullanılan teçhizatlar; Sert, iri plastikler (örneğin pet şişeler) birinci ve ikinci kademe kırıcıdan geçirilerek istenen boyuta indirilir ve doğrudan fırına enjekte edilir. Borulardaki tıkanmaları önlemek için ince, hafif film şeklindeki plastikler kıyılır, ergitilir ve fırına enjeksiyona uygun boyutta pelet haline getirilir.

Yüksek fırında kullanılacak plastik peletler gözenekli, düzensiz şekilli, 6-8mm (max. 10mm) boyuta sahip malzemelerdir. Az bir maliyetle üretilebilirler. Peletler belli bir kaliteye sahiptirler ve geri dönüşüm tesisi içinde kolayca taşınabilirler.

Plastikler, karbon ve hidrojenden yapılmışlardır. Kok yerine redükleyici eleman olarak fırına verilen plastik, redükleyici gazlar (CO+H₂) üretecek şekilde parçalanır ve bunlar fırın içinde yukarı doğru yükselerek demir cevheriyle reaksiyona girerler. Redüksiyon reaksiyonlarını takiben gazlar (yaklaşık 800 kcal/Nm³) geri kazanım amacıyla çelik fabrikası içinde ısıtma fırınları ve güç üreteçlerinde gaz yakıt olarak yeniden kullanılırlar.

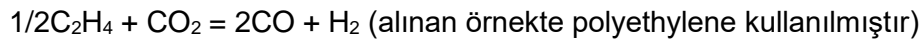
Atık plastikler tüyerler vasıtasıyla fırına enjekte edilirler. Sıcak hava fırının alt kısmındaki tüyerlerden yüksek hızda üflenerek koku akışkanlaştırır ve “hava oluğu/cebi” (raceway) denilen bir boşluk oluşturur. Tüyerler vasıtasıyla enjekte edilen plastik parçacıkları hava oluğu içindeki dönüş esnasında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



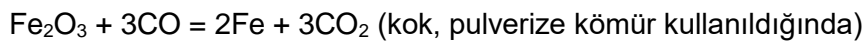
Oluğun son kademesine gelinceye kadar bütün oksijen tükeneceği için kokla CO₂’in reaksiyonu sonucu CO üretilir.

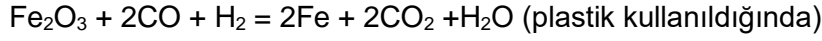


Kok yerine plastik kullanıldığında, plastik CO ve H₂’e parçalanır.



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





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

Biyokömür Enjeksiyonu

Biyokömür, enjeksiyon yoluyla, karbon kompozit aglomeralarda (CCA) bir ek bileşen olarak eklenebilir. Brezilya'da küçük boyutlu yüksek fırınlarda üstten şarj metodu ve kömür enjeksiyonu uygulanmıştır. Ancak orta ila büyük boyutlu yüksek fırınlar için bu tip uygulamalarda odun kömürünün düşük mukavemeti nedeni ile geçirgenlik ve toz oluşumu üzerinde olumsuz bir etkiye sahip parçalanma meydana gelebilir.

Odun kömürü enjeksiyonu, Monlevaro'daki Arcelor Mittal firmasının yüksek fırınlarda yaklaşık 3.000 ton sıcak metal (tHM)/gün üretim hızıyla gerçekleştirilmiştir. Odun kömürü ve enjeksiyon kömürü, Hardgrove öğütülebilirlik indeksindeki (HGI) önemli farklılık nedeniyle ayrı tesislerde işlem görecük öğütölür. Tesis ekipmanı ve prosesinin değışkenliği CO₂ emisyonlarını etkileme eğilimindedir. Gösterilen tasarruf yüzdesi, entegre tesisler için 2,2 t-CO₂/t-ham çeliğe dayanmaktadır.

Tablo: Tipik Bir Entegre Çelik Üretimi Operasyonunda Biyokütle Türevli Girdiler için Önerilen Uygulamalar

Varsayım: Sonuçlar yalnızca doğrudan malzeme ikamesine dayalıdır

Uygulama	Enjeksiyon Oranı	Emisyon Azalımı	
		t-CO ₂ /t-ham çelik	% CO ₂ Emisyonu
Sinterleme	%50 – %100 İğne kok değışimi 45 – 60 kg-kok/antrasit/t-sinter'de antrasit (ve 1,7 t-sinter/t-HM)	0.12 – 0.32	5 – 15
Koklaşma Karışım Bileşeni	% 2 – 10 kok kömürü karışımı, kullanılan kok ile 300 – 350 kg-kok / t-HM	0.02 – 0.11	1 – 5
YF Tüyer Enjeksiyonu	150 – 200 kg-kömür / t-HM'de enjekte edilen kömürün (PCI) %100 değıştirilmesi	0.41 – 0.55	19 – 25
YF Ceviz Kok Değişimi	45 kg somun / t-HM için %50 – %100 değıştirme	0.08 – 0.16	3 – 7
YF Karbon/Cevher Kompozitleri veya BOF Önceden Azaltılmış Besleme	Kömür/cevher peletlerindeki demirin %5 – 10'u YF'ye veya kömür bazlı önceden indirgenmiş girdiden YF veya BOF'a	0.08 – 0.15	4 – 7

TÜBİTAK Yeşil Büyüme Teknoloji Yol Haritası – Demir-Çelik Sektörü, 2023

Çelik Üretimi Yeniden Karbonlaştırıcı	0,25 kg-odun kömürü / t-ham çeliğin %100 değiştirilmesi	0.001	0.04
Toplam		0.70 – 1.26	32 - 58

Not:

PCI =Pülverize kömür enjeksiyonu

PCI kömürünün %75 karbon olduğu varsayılır

Kok, kok tozu, antrasit ve yeniden karbonlaştırıcının %85 karbon olduğu varsayılır.

Tesisin sıcak metal ve ham çelik üretiminin eşit olduğu varsayıldı.

HBI

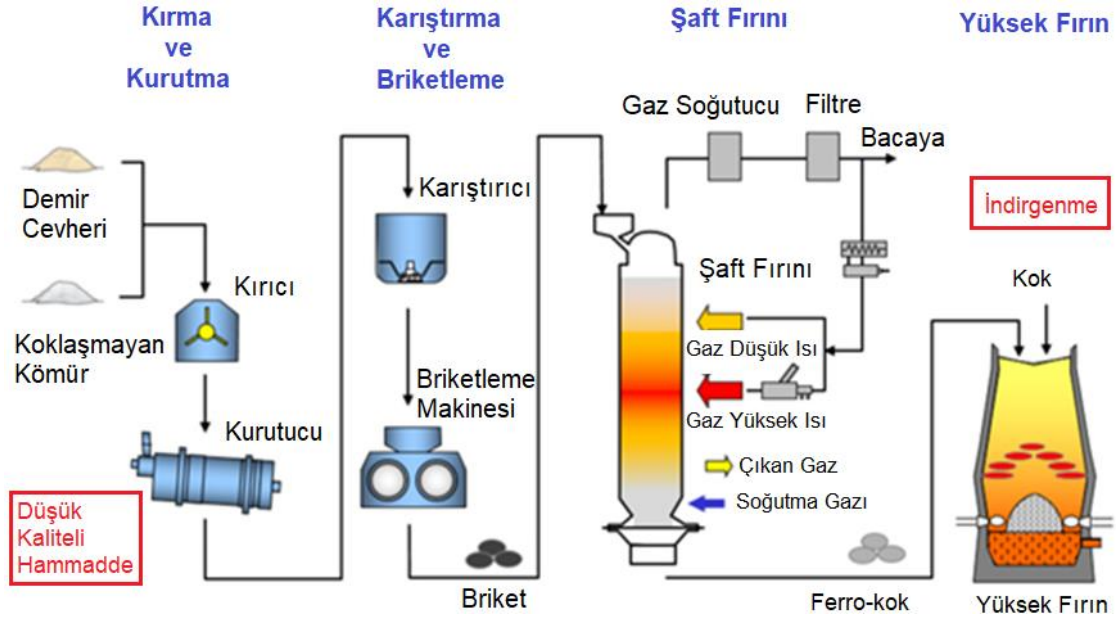
Toz, pelet ya da parça halindeki demir cevherlerinin gaz veya katı redükleyici kullanılarak Doğrudan İndirgenme Prosesi (DR – Direct Reduction) ile ergime sıcaklığının altında (950 – 1100°C) redüklenmesi sonucunda doğrudan indirgenmiş demir (DRI - Direct Reduced Iron - Sünger Demir) üretilmektedir.

HBI (sıcak briketlenmiş demir) pelet ve parça sünger demirin, yüksek basınç altında, 650°C den yüksek sıcaklıklarda sıkıştırılması ile elde edilmektedir. HBI ürünü, yüksek yoğunluğu ve şekli sayesinde üstün taşıma, nakliye, depolama ve erime özelliklerine sahiptir.

Yüksek fırınlara sıcak briketlenmiş demir (HBI) gibi önceden indirgenmiş malzemelerin şarj edilmesi, metalürjik kok ve PCI kömürü tüketimini azaltırken fırın verimliliğini artırmaktadır. Yüksek Fırınlardaki karbon kaynakları girdilerinin azalması, yüksek fırın sürecindeki CO₂ emisyonlarının da azalmasını sağlamaktadır.

Ferrokok

Ferro-kok, yüksek fırınlarda demir cevherinin indirgenme reaksiyonunu iyileştirerek CO₂ emisyonlarının önemli ölçüde azalmasını sağlayan yenilikçi bir malzeme olarak tanımlanmaktadır.



Düşük tenörlü demir cevheri ve koklaşmayan kömürlerin de kullanılabildiği teknolojide hammaddeler kırma, karıştırma, briketleme ve ısıtma işlemlerine tabi tutulmaktadır.

İndirgeyici olarak ton sıvı ham demir üretimi için 100 kg ferro-kok kullanılarak ferro-kok karbonizasyon sıcaklığının indirgeyici oranlarına etkilerinin karşılaştırıldığı senaryolarda ferro-kok karbonizasyon sıcaklığının 800°C ila 900°C aralığı için ton sıvı ham demir üretiminde indirgeyici madde oranı 30 kg veya daha fazla azalmıştır.

Ferro-kok Kullanılarak İndirgeyici Oranlarının Azaltılması							
		Baz	Senaryo 1	Senaryo 2	Senaryo 3	Senaryo 4	Senaryo 5
Ferrokok Karbonizasyon Sıcaklığı	°C	X	750	800	850	900	950
Ferro Kok ile Demirin İndirgenme Oranı	%	X	20	45	69	84	87
Kullanılan Ferro Kok Miktarı	kg/t	0	100	100	100	100	100
Hazneli Kok Fırın Oranı	kg/t	352	262	250	244	251	257
Pülverize Kömür Oranı	kg/t	130	130	130	130	130	130
İndirgeyici Ajan Oranı	kg/t	482	463	450	444	451	457

Yüksek Fırınlarda sıcak ham demir üretiminde ana olarak metalürjik kok kullanılmaktadır. Demir üretim sürecinde karbon ayak izi oluşturma bakımından en yüksek etkiye sahip aşamalardan birisi kok üretim sürecidir. Bu nedenle kok tüketimini azaltacak her aksiyon CO₂ emisyonlara fayda sağlayacaktır. Kok tüketimini azaltmak için demir cevheri indirgenme prosesinde pulverize edilmiş kömür (PCI), plastik enjeksiyonu, doğal gaz enjeksiyonu, biyokömür enjeksiyonu ve karbon kompozit aglomeratların şarjı gibi alternatiflerin araştırılması ve uygulamanın yaygınlaştırılması gerekmektedir.

Türkiye’de kurulu entegre tesislerde bulunan yüksek fırınlarda PCI enjeksiyonu yaygın olarak kullanılmakta, doğalgaz ise acil durumlarda kullanılmaktadır. Ülkemizde doğalgazın üretiminin sınırlı olması nedeniyle maliyet olarak doğalgaz kullanılması avantajlı görülmemektedir. Maliyet açısından avantajlı duruma gelmesi kaydıyla kullanım miktarının artırılmasında herhangi bir engel bulunmamaktadır. Plastik enjeksiyonu, biyokömür enjeksiyonu ve karbon kompozit aglomeratların şarjı gibi konularda ise herhangi bir uygulama bulunmamaktadır.

Yüksek Fırınlarda sıcak ham demir üretiminde ana olarak Metalürjik kok kullanılmaktadır. Demir üretim sürecinde karbon ayak izi oluşturma bakımından en yüksek etkiye sahip aşama kok üretim sürecidir. Bu nedenle kok tüketimini azaltacak her aksiyon CO₂ emisyonlara fayda sağlayacaktır.

Özellikle plastik enjeksiyonu, biyokömür enjeksiyonu ve karbon kompozit aglomeratların şarjı gibi konularda çalışma yapılması ve bu maddelerin yüksek fırınlarda kullanımına başlanması ve kullanım miktarının artırılması için Ar-Ge ve saha çalışmalarının yapılması gerekmektedir. Yüksek Fırınlarda fırın özelliklerine bağlı olarak PCI ve doğalgaz kullanımını içinde belirli sınırlar bulunmaktadır. Bu sınırların yükseltilmesi için de Ar-Ge ve saha çalışmaları yapılabilir.

1.3.b. Bazik oksijen fırınında CO₂ emisyonlarının azaltılmasına (CO gazının zenginleştirilmesi gibi) yönelik çalışmalar (proses tasarımları, geliştirmeler, vb.) gerçekleştirilmesi

Yüksek fırında üretilen sıcak ham demirde karbon içeriği yaklaşık % 4-4,5 civarındadır. Çelikte ise bu değer çeliğin cinsine göre değişiklik göstermekle birlikte % 1 altına indirilmektedir. Konvertere şarj edilen çelik ve hurda içine üflenen oksijen karbonun yanmasına neden olmakta bu ise CO ve CO₂ emisyonu oluşturmaktadır. Genelde konverter emisyonların toplanması için gaz holderlar bulunmaktadır. Üfleme başlangıcından bir müddet sonra CO oranı yükseldiğinde bacadan çıkan gazlar gaz holdera yönlendirilmekte ve burada depolanan gaz ileri hatlarda yakıt olarak kullanılmaktadır.

Konverterde çelik üretim süreci sürecinde üfleminin başında ve sonunda yüksek oksijen ve düşük CO oranı nedeniyle gaz tutulmakta çıkan gaz doğrudan atmosfere salınmaktadır. Atmosfere salınan gaz miktarını azaltacak şekilde proseste modifikasyon yapılırsa atmosfere salınan gaz miktarı azaltılabilir.

Üfleme başı ve üfleme sonunda oluşan gazın CO miktarını artıracak bir çözümün oluşturulması, gaz analizlerinin hassasiyetinin artırılması ile atmosfere salınan gaz miktarı azaltılması, çıkış gazlarında CO miktarının atırılması, CO₂/CO ayırma teknikleri (kriyojenik distilasyon, membran ayırma tekniği vb.) çalışmaları hedeflenmektedir.

B. Dünyada ve Türkiye’de Teknolojik Hazırlık Seviyeleri

1.3.a. Yüksek fırında kok kullanım oranının azaltılması veya kok kömürüne alternatif hammaddelerin kullanımı, atık plastiklerin enjeksiyonu, toz haline getirilmiş kömür enjeksiyonu (PCI), doğal gaz enjeksiyonu, karbon kompozit aglomeratların şarjı gibi yöntemlerle verimliliğin artırılması ve karbon ayak izinin azaltılmasına yönelik çalışmaların gerçekleştirilmesi

Atık Plastik

Atık plastikler kırılarak ya da peletlenerek gerekli boyuta ve şekle getirildikten sonra kok ve pulverize kömür yerine kullanılabilir. Boyutlandırma ve şekillendirme işlemlerinden sonra özel enjeksiyon ekipmanları kullanılarak sıcak hava ile tüyerlerden yüksek fırına verilirler.

Dünyada THS 9 aşamasında birçok tesis bulunmaktadır. Dünyada birçok demir çelik fabrikasında atık plastik kullanımı mevcuttur. Ancak şuan için Türkiye’de atık plastik kullanımı mevcut değildir. Türkiye’de, atık plastikleri kullanılması için öncelikle; atık plastik temizleme ve öğütme tesisleri kurulduktan sonra yüksek fırınlara enjeksiyon işlemi gerçekleştirilebilir. Türkiye’de THS 3-4’tür.

Biyokömür Enjeksiyonu

Biyokömür kullanımı uygulaması için Dünyada THS 6, Türkiye’de THS 3-4’tür.

HBI

HBI kullanımı uygulaması için Dünyada THS 8-9, Türkiye’de THS 7-8’dir.

Ferrokok

Ferrokok kullanımı uygulaması için Dünyada THS 7-8, Türkiye’de THS 3-4’tür.

1.3.b. Bazik oksijen fırınında CO₂ emisyonlarının azaltılmasına (CO gazının zenginleştirilmesi gibi) yönelik çalışmalar (proses tasarımları, geliştirmeler, vb.) gerçekleştirilmesi

Dünyada THS 7-8, Türkiye’de THS 2-3’tür.

C. Dünyada ve Türkiye'deki Mevcut Duruma İlişkin Başarılı Örnekler

1.3.a. Yüksek fırında kok kullanım oranının azaltılması veya kok kömürüne alternatif hammaddelerin kullanımı, atık plastiklerin enjeksiyonu, toz haline getirilmiş kömür enjeksiyonu (PCI), doğal gaz enjeksiyonu, karbon kompozit aglomeratların şarjı gibi yöntemlerle verimliliğin artırılması ve karbon ayak izinin azaltılmasına yönelik çalışmaların gerçekleştirilmesi

Atık Plastik

Atık plastiklerin miktarlarının azaltılması ve daha verimli bir geri dönüşümün sağlanması için Japonya ve Almanya'da atık plastiklerin yüksek fırına enjeksiyonu sistemi geliştirilmiştir.

Japonya'da NKK firması 1996'da, Almanya'da ise Stahlwerke Bremen 1995'te ticari olarak yüksek fırında atık plastik kullanım sistemini faaliyete geçirmişlerdir. Yine Almanya'da Krupp Hoesch firması deneme çalışmalarını bitirmiş ve kullanıma başlamıştır.

NKK'da 1 no.lu yüksek fırında yılda 600.000 ton atık plastik değerlendirilmektedir. Firma bu miktarı 1 milyon tona çıkarmayı planlamaktadır. Stahlwerke Bremen'de kullanılan atık plastik miktarı yılda 70.000 ton, Krupp'ta ise 90.000 tondur. Her iki işletmede bu miktarları artırma çalışmaları yapmaktadırlar.

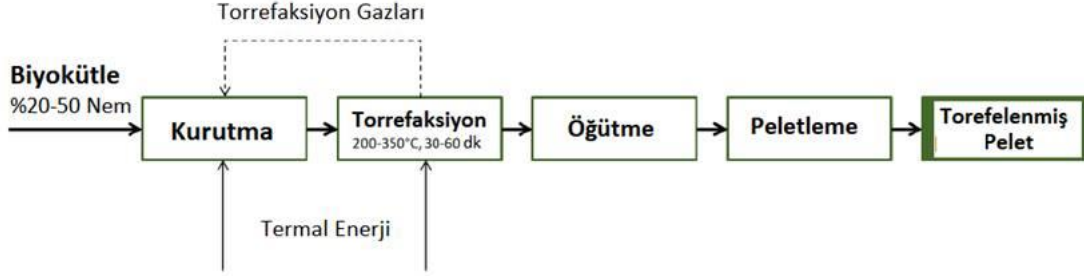
Biyokömür Enjeksiyonu

Belçika'da Gent'de bulunan ArcelorMittal firması, 2021'de Torero adlı projesi ile yüksek fırınlara biyokütlenin enjekte edildiği büyük ölçekli demo tesisinin kurulumu ile ilgili çalışmalara başlamıştır.

Torero projesinde biyokütle atıkları torefaksiyon yöntemi ile kurutulup daha sonra biyokömüre dönüştürülmekte ve sonrasında da Gent'te bulunan yüksek fırınlara enjekte edilmesi planlanmaktadır. Biyokömürün elde edilmesi torefaksiyon tesisinin kurulmasını gerektirmektedir.

Torero süreci aşağıdaki adımları izlemektedir:

1. Odun atıklarının, (torefaksiyon) yakma yoluyla biyokömüre dönüştürülmesi.
2. Daha sonra biyokömürün, yüksek fırınlar için pulverize kömür yerine ikame edilmesi.



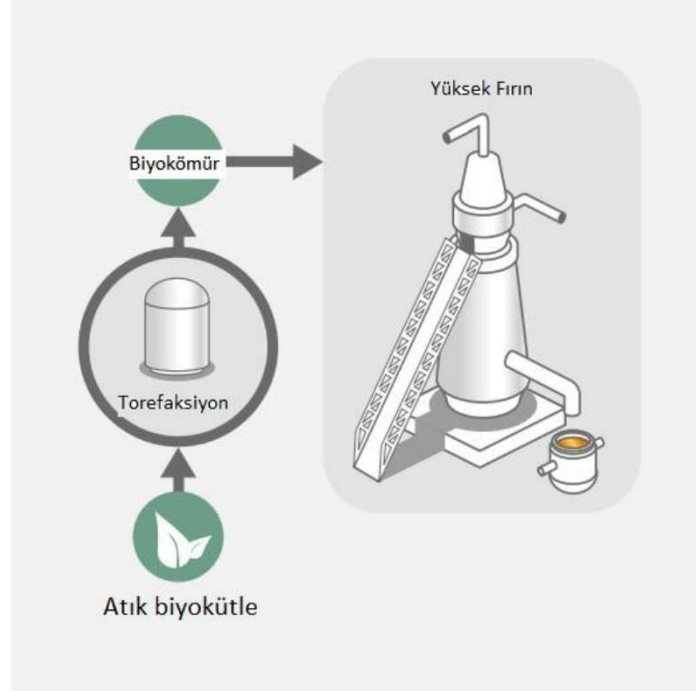
Şekil: Torrefaksiyon süreci gösterimi

Torrefaksiyon termokimyasal bir işlemdir. Enerji yoğunluğu ve karbon içeriği yükselmiş katı bir malzeme üretilir. TorrCoal teknolojisi C-Vertr, besleme stoğunun 270°C ile 350°C (hafif piroliz) arasındaki sıcaklıklara ısıtıldığı torrefaksiyon için döner bir tambur kullanır.

İlk adımda, yaklaşık %20 ila %50 neme sahip biyokütle kurutulur. Verimliliği artırmak için, kavurma işleminden çıkan gazları kullanmak mümkündür. Ardından, biyokütle torrefelenir, yani atmosfer basıncı altında, oksijensiz ortamda, 30 ila 60 dakika boyunca 200 ila 350°C arasında ısıtılır. Yüksek sıcaklık koşulları, biyokütle bileşenlerinin ayrışmasına yol açar. Düşük enerjili bileşenler gaz fazına aktarılır. Önce su dışarı atılır, ardından hemiselüloz ve kısmen de lignin ayrışır. Kısmen ayrılmış (torrefiye edilmiş) biyokütle öğütülür ve ardından peletlenir.

Torrefaksiyon ve peletleme adımlarını değiştirmek de mümkündür. Bu durumda, hazır peletler daha sonra fırınlanır. Tüm üretim prosesi tek başına kurulabileceği gibi, aynı zamanda örneğin büyük bir enerji santrali kazanı, bir kereste fabrikası veya bir biyo-yağ üretimi (piroliz) tesislerine entegre olarak da kurulabilir.

Torrefaksiyon işlemi sırasında 270°C'den 350°C'ye kadar hafif koşullarda piroliz işlemi gerçekleştirilmiş olunur. Bu işlemde, orman bakım odunu, yıkım odunları, SRF (Katı geri kazanılan yakıt) vb. biyolojik atıklardan biyo-karbon üretme prosesleri kullanılır. İçeriğindeki düşük karbon yüzdesinden dolayı fosil kömür ile değiştirildiğinde karbon emisyonu avantajı sağlayabilir.



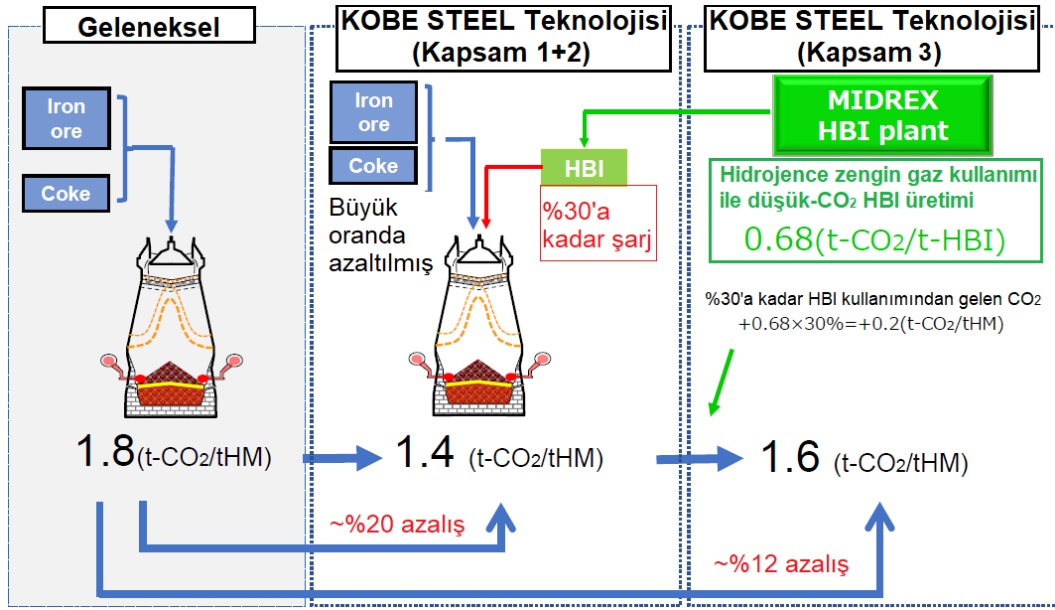
Şekil: ArcelorMittal Gent Fabrikası Biyokütle Enjeksiyonu Şematiği

HBI

Midrex 2022 3. Çeyrek raporunda Voestalpine Linz'de Ocak 2017 – Ocak 2018 yılları arasında günlük ortalama 2500-2700 tshd kapasiteli 5 ve 6 No.lu Yüksek Fırınlarda gerçekleştirilen HBI kullanımının yakıt kullanımı, işletme, üretim, sıvı ham demir kalitesine etkilerinin incelendiği çalışmada yüksek fırınlara 100 kg HBI/tshd şarj edildiğinde aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır:

- Redükleyicilerde 21,9 – 27,5 kg/tshd, yakıt (kok) oranında ise 10,9 – 18,1 kg/tshd azalma,
 - Sabit oksijen seviyelerinde üretimde % 7,3 - 10,1'e kadar artış,
 - HBI önceden indirgenmiş bir malzeme olduğundan ve yüksek fırına daha az oksit yüklendiğinden gaz kullanımında yaklaşık % 0,4 - 1,1 oranında düşme,
 - Tepe gazının kalorifik değerinde daha yüksek CO ve H₂ içeriği nedeniyle 12,3 - 23,5 Wh/Nm³ artış,
 - HBI kullanımı ile üretilen sıvı ham demir içeriğinde daha düşük kükürt miktarına ulaşılmıştır.
- [6]

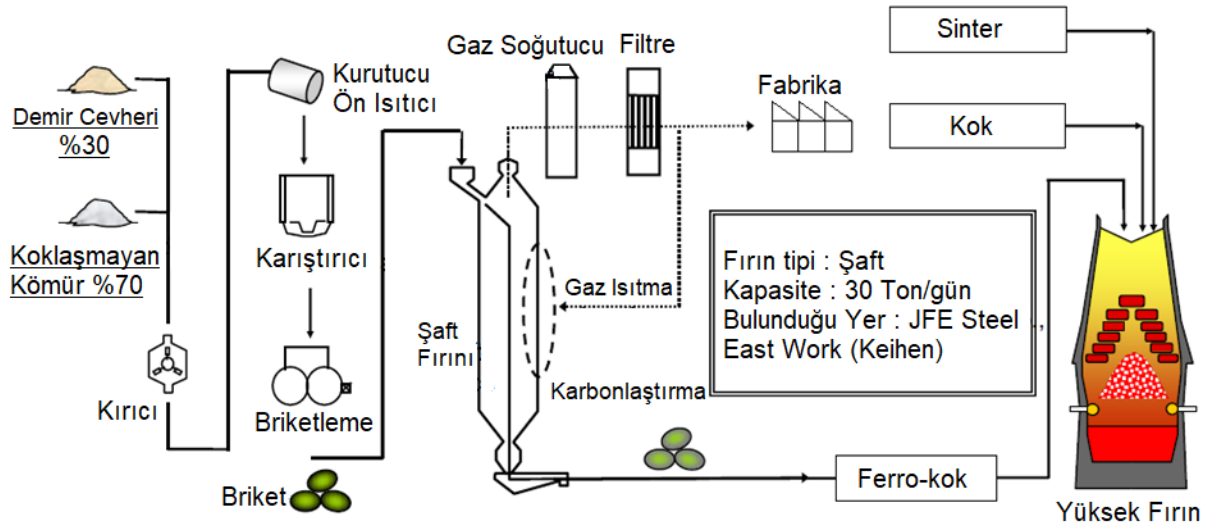
Şubat 2021 tarihli "KOBELCO Group's CO₂ Reduction Solution for Blast Furnace Ironmaking" sunumunda, Ekim 2020'de KOBELCO Kakogawa Fabrikası'ndaki 3 No'lu Yüksek Fırında (4844m³) gerçekleştirilen çalışmada;



- Midrex prosesinde üretilen büyük miktardaki HBI (briktlenmiş formda doğrudan indirgenmiş demir) şarj edilerek redükleyici olarak kullanılan kok ve PCI gibi karbon yakıtlarının miktarında önemli bir düşüş sağlanarak yüksek fırınlarda CO₂ emisyonu azaltılmıştır.
- 305 kg/tHM HBI şarjı ile RAR (Reducing Agent Rate) için 518 kg/tshd'den 415 kg/tshd'e sabit bir düşüş elde edilerek CO₂ emisyonlarında yaklaşık olarak %20 oranında azalma sağlanmıştır
- Kok oranı mevcut teknolojiye kıyasla 2,5 kat azalmıştır.[6]

Ferrokok

JFE Steel'de (Keihin) 30 Ton/gün kapasiteli pilot tesiste gerçekleştirilen uzun süreli üretim testleri ve 2013 yılında JFE Steel'in (Chiba) 6 No'lu Yüksek Fırınına beş gün süresince toplam 2100 ton ferro-kokun şarj edildiği uygulama sürecinde indirgeyici madde ve kok oranlarını düşürdüğü doğrulanmıştır.



JFE Steel, Kobe Steel, Nippon Steel, Tohoku Üniversitesi ve Kyushu Üniversitesi ortaklaşa NEDO'nun (Yeni Enerji ve Endüstriyel Teknoloji Geliştirme Organizasyonu) "Çevresel Uyumlu Proses Teknolojisi Geliştirme (Ferro-Kok Teknolojisinin Geliştirilmesi)" projesini başlatmıştır. Haziran 2017'de başlayan ve 6 yılda tamamlanması öngörülen proje kapsamında ticari işletme için öngörülen 1.500 ton/gün üretim kapasitesinin beşte biri ölçeğindeki yarı endüstriyel tesis JFE Steel Fukuyama tesislerinde kurulmaktadır.

Ferro-kok ile ilgili çalışmalar "The Project Guideline of Low-carbon Metallurgy Innovation Fund of China Baowu 2021" listesinde "Baowu Group"un da planları arasında yer almaktadır. [7]

Dünyada 235 kg/SHD oranlarına kadar ulaşmış PCI oranları bulunmaktadır. Türkiye'de bu maksimum 160 kg/SHD oranına ulaşmıştır. Doğalgaz ise özellikle ABD gibi doğalgaz kaynakları olan ülkelerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Plastik enjeksiyonu, biyokömür enjeksiyonu ve karbon kompozit aglomeratların şarjı konularında dünyada farklı çalışmalar olmakla birlikte başarılı olarak kullanıldığına dair çok fazla veri bulunmamaktadır. Bu konulardaki çalışmalar halen Ar-Ge aşamasındadır. Türkiye de ise bu konularda çalışma yapıldığına dair bilgiye rastlanmamıştır.

Dünyada 235 kg/SHD oranlarına kadar ulaşmış PCI oranları bulunmaktadır. Türkiye'de bu değer daha düşüktür. Doğalgaz ise özellikle ABD gibi doğalgaz kaynakları olan ülkelerde yaygın olarak kullanılmaktadır.

Yüksek Fırınlara plastik enjeksiyonu konusunda dünya çapında farklı denemeler olmakla birlikte yüksek fırınlarda plastiğin yaygın kullanıldığı bir proses bulunmamaktadır.

Minoru ASANUMA ve arkadaşlarının çalışmalarında Japonya'da 1996'da ticari olarak yüksek fırında atık plastik kullanım sisteminin faaliyete alındığı belirtilmektedir. [8]

D Bhagyaraj ve arkadaşlarının, JSW Hindistan'da plastik atıkların yüksek fırınlara enjeksiyonu ile ilgili çalışması bulunmaktadır.[9]

Yüksek Fırınlara biyokömür enjeksiyonu konusunda Mousa, E ve arkadaşları (çalışmaları dünyada farklı araştırmaların yapılmakta olduğunu göstermektedir. Ancak yaygın olarak bir tesiste kullanıldığına dair bir bilgi bulunmamaktadır. [10]

Karbon kompozit aglomeratların yüksek fırınlara kok yerine şarjı konusunda birkaç çalışma örneği vardır. Ancak yüksek fırınlarda deneme ve yaygın olarak bir tesiste kullanıldığına dair bir bilgi bulunmamaktadır.

Türkiye'de PCI yaygın olarak ve doğal gaz enjeksiyonu ise acil şartlarda olmak üzere kullanılmaktadır. Plastik enjeksiyonu konusunda herhangi bir girişim bulunmamaktadır.

D. Ar-Ge ve Yenilik Sürecinde Biraraya Gelmesi Gereken Disiplinler ve Sektörler

1.3.a. Yüksek fırında kok kullanım oranının azaltılması veya kok kömürüne alternatif hammaddelerin kullanımı, atık plastiklerin enjeksiyonu, toz haline getirilmiş kömür enjeksiyonu (PCI), doğal gaz enjeksiyonu, karbon kompozit aglomeratların şarjı gibi yöntemlerle verimliliğin artırılması ve karbon ayak izinin azaltılmasına yönelik çalışmaların gerçekleştirilmesi

Üniversitelerin Malzeme ve Metalurji Mühendisliği, Makine Mühendisliği ve Kimya Mühendisliği bölümlerinden özellikle Heterojen Yanma konusunda deneyimli Akademisyenler ile birlikte Demir-Çelik İşletmelerinin ilgili alandaki personelleri biraraya gelebilir.

1.3.b. Bazik oksijen fırınında CO₂ emisyonlarının azaltılmasına (CO gazının zenginleştirilmesi gibi) yönelik çalışmalar (proses tasarımları, geliştirmeler, vb.) gerçekleştirilmesi

Entegre Demir Çelik İşletmesi ve Ar-Ge Birimleri, Üniversite Akademisyenleri (Malzeme ve Metalürji Mühendisliği), Araştırma Kurumları ve Özel Teknoloji firmaları birarada çalışmalıdırlar.

E. Ar-Ge, Yenilik, Demonstrasyon İşbirliği Modeli ve Destek Mekanizması

1.3.a. Yüksek fırında kok kullanım oranının azaltılması veya kok kömürüne alternatif hammaddelerin kullanımı, atık plastiklerin enjeksiyonu, toz haline getirilmiş kömür enjeksiyonu (PCI), doğal gaz enjeksiyonu, karbon kompozit aglomeratların şarjı gibi yöntemlerle verimliliğin artırılması ve karbon ayak izinin azaltılmasına yönelik çalışmaların gerçekleştirilmesi

İlgili disiplinler bir araya gelerek öncelikle hangi malzemeler konusunda çalışma yapılması gerektiğine özellikle plastik konusunda hangi türlerin bu amaçla kullanılacağına belirlenmesine ve sonrasında Ar-Ge ve teknoloji geliştirme çalışmalarının başlatılması gerekmektedir.

Orta ölçekli Ar-Ge ve Yenilik Projesi yeterli görülmektedir. Ar-Ge, Pilot tesis, teknoloji geliştirme ve uygulama teşvikleri gerekmektedir.

1.3.b. Bazik oksijen fırınında CO₂ emisyonlarının azaltılmasına (CO gazının zenginleştirilmesi gibi) yönelik çalışmalar (proses tasarımları, geliştirmeler, vb.) gerçekleştirilmesi

İlgili disiplinler bir araya gelerek öncelikle hangi konular üzerinde çalışma yapılması gerektiğine karar vermeli sonrasında Ar-Ge ve teknoloji geliştirme çalışmaları başlatılmalıdır.

Orta ölçekli Ar-Ge ve Yenilik Projesi yeterli görülmektedir. Ar-Ge, Pilot tesis, teknoloji geliştirme ve uygulama teşvikleri gerekmektedir.

F. Zaman Boyutu

(Kısa Vade: 1-3 yıl, Orta Vade: 3-5 yıl, Uzun Vade: 5 yıldan fazla)

1.3.a. Yüksek fırında kok kullanım oranının azaltılması veya kok kömürüne alternatif hammaddelerin kullanımı, atık plastiklerin enjeksiyonu, toz haline getirilmiş kömür enjeksiyonu (PCI), doğal gaz enjeksiyonu, karbon kompozit aglomeratların şarjı gibi yöntemlerle verimliliğin artırılması ve karbon ayak izinin azaltılmasına yönelik çalışmaların gerçekleştirilmesi

Kısa Vade

1.3.b. Bazık oksijen fırınında CO₂ emisyonlarının azaltılmasına (CO gazının zenginleştirilmesi gibi) yönelik çalışmalar (proses tasarımları, geliştirmeler, vb.) gerçekleştirilmesi

Kısa Vade

Kritik Ürün/Teknoloji 1.4.

1.4. Yüksek fırınlarda ve bazik oksijen fırınlarında döngüsel ve geri kazanım/kullanıma yönelik atık yönetimi proseslerinin tasarlanması, uygulanması

Öncelikli Ar-Ge ve Yenilik Konuları

1.4.a. Karbondioksitin kuru reforming ile sisteme indirgeyici gaz (CO) veya hidrojen kullanarak sentez gazı olarak geri kazanımı

1.4.b. Yüksek fırın ve çelik üretim proseslerinden çıkan baca tozları ve filtre tozlarının döngüsel ve geri kazanım/kullanıma yönelik çalışmaların gerçekleştirilmesi

Kritik Ürün/Teknoloji 1.4.

1.4. Yüksek fırınlarda ve bazik oksijen fırınlarında döngüsel ve geri kazanım/kullanıma yönelik atık yönetimi proseslerinin tasarlanması, uygulanması

A. Teknik Açıklamalar, Yenilikçi Özellikler, Hedeflenen Performans ve Metrikler

Yüksek fırınlar ve bazik oksijen fırınlarında üretim prosesi sırasında atık olarak gazlar, muhtelif özellikte cüruf ve tozlar (baca atık gazı tozları, filtre tozları vb.) üremektedir. Bu üreyen atık malzemelerin döngüsel ve geri kazanım/kullanıma yönelik atık yönetimi proseslerinin tasarlanması, uygulanması çevre boyutu ve yeşil dönüşüm açısından çok önemlidir. Kontrolsüz bir şekilde gazların atmosfere salınması, cüruf ve tozların atık sahalarına depolanması kısa, orta ve uzun vadede problem oluşturan unsurlardır.

Prosesler sırasında üreyen gazlar, muhtelif özellikte cüruflar ve tozlar (baca atık gazı tozları, filtre tozları vs.) doğru şekilde işlemde geçirilerek ekonomiye kazandırılmazsa ciddi çevre ve sosyal sorun kaynağı olacaktır.

Yüksek fırınlarda sıcak maden üretimi ve bazik oksijen fırınlarında çelik üretim prosesi sırasında meydana gelen reaksiyonlar sonucunda üreyen muhtelif gazlar, cüruflar ve tozların bir kısmı değerlendirilmekte ancak önemli bir kısmı da değerlendirilmeden atmosfere ya da doğadaki atık sahalarına atılmaktadır. Uzun vade de bu işlemin sürdürülmesi mümkün olmadığından bu atıkların tümünün döngüsel ve geri kazanım/kullanımına yönelik proseslerin geliştirilmesine ve mevcut bazı proseslerde de verimin artırılmasına ihtiyaç duyulmaktadır.

ÖNCELİKLİ AR-GE VE YENİLİK KONULARI

1.4.a. Karbondioksitin kuru reforming ile sisteme indirgeyici gaz (CO) veya hidrojen kullanarak sentez gazı olarak geri kazanımı

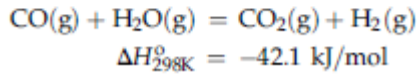
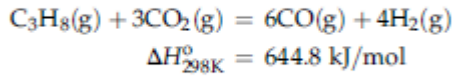
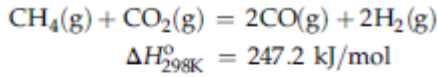
Karbondioksit dönüşümü (kuru reforming), karbondioksitin metan gibi hidrokarbonlarla reaksiyonundan sentez gazı (hidrojen ve karbon monoksit karışımları) üretme yöntemidir. Proses çevresel açıdan faydalı olmasına rağmen, özellikle çok yüksek sıcaklıkların kullanılması ile katalizörün deaktivasyonu ile ilgili birçok zorluktan dolayı endüstriyel düzeyde uygulanmamıştır.

Metandan sentez gazı üretimi, kısmi oksidasyon reformasyonundan ototermal reformasyon sistemlerine ve buhar reformasyonundan kuru reform proseslerine kadar farklı yaklaşımlar kullanılarak yapılabilir. Her durumda proses, kullanılan oksitleyici tipine bağlı olarak değişen bir oranda hidrojen üretirken metanı karbon monoksit oksitleyecek bir oksitleyici ajan kullanır.

Hidrojenin gelecekte çevre dostu temiz yakıt ve enerji taşıyıcılarının ana kaynağı olacağı tahmin edilmektedir. Daha düşük sera gazı emisyonu ile yakıt hücrelerinde verimli bir şekilde elektriğe dönüştürülebilir.

Yakıt pili teknolojisindeki hızlı ilerleme ve talep nedeniyle hidrojen üretebilen yeni yöntemlerin geliştirilmesi hızla artmıştır. Şimdiye kadar buharla hidrokarbon reformasyonu, özellikle CH₄'ün buharla reformasyonu, genellikle hidrojen üretiminin en büyük ve en ekonomik yoludur.

1993'ten beri, aşağıdaki reaksiyonlarla gösterilen metan ve propanın kuru (CO₂) reformasyonu ve ardından su-gaz değişim reaksiyonu yoluyla hem hidrokarbonlardan hem de CO₂ kullanılarak hidrojen üretimi, sera gazlarının azaltım hedefi için çok dikkat çekmiştir.



Yüksek fırınlarda sıcak maden üretimi ve bazik oksijen fırınlarında çelik üretim prosesi sırasında meydana gelen reaksiyonlar sonucunda üreyen muhtelif gazlar büyük oranda CO₂ gazı içermektedir. Bu gazların kuru reforming ile sisteme indirgeyici gaz (CO) veya hidrojen kullanarak sentez gazı olarak geri kazanımı CO₂ gazı salınımlarını önemli ölçüde azaltacaktır.

1.4.b. Yüksek fırın ve çelik üretim proseslerinden çıkan baca tozları ve filtre tozlarının döngüsel ve geri kazanım/kullanıma yönelik çalışmaların gerçekleştirilmesi

Yüksek Fırın ve çelik üretim prosesleri sırasında baca tozları ve filtre tozları üretilmektedir. Yüksek fırına tüyerlerden üflenen sıcak hava Metalürjik kok ve/veya PCI kömürü ile reaksiyona girmekte gaza dönüşmektedir. Dönüşen gaz reaksiyonlara girmekte ve saniyeler içinde yüksek fırını yüksek basınç ve hız ile terk etmektedir. Yüksek Fırın gazı aynı zamanda içinde önemli miktarda toz taşımaktadır. Tozların ileri gaz hatlarına taşınmasını önlemek için öncelikle gaz tutucuda mekanik olarak tozu ayrılmakta daha sonra yıkayıcı sistemlerinde veya kuru filtreli sistemlerde gaz temizliği yapılmaktadır. Ayrılan tozlar içinde yüksek miktarda karbon ve demir

olduğu gibi yüksek miktarda alkali (K_2O , Na_2O) ve çinko (Zn) gibi empürite elementler içermektedir. Gaz tutucuda tutulan tozlar “baca tozu”, kuru filtrelerde tutulan tozlar “filtre tozu” ve gaz yıkacılar da tutulan malzemelerde “yıkayıcı çamuru” olarak ayrıştırılmaktadır ve her bir malzemenin farklı özellikleri nedeniyle ayrı değerlendirilmesi gerekmektedir.

Çelik üretim prosesi sırasında konverterde oksijen üfleme sırasında oluşan gazların içinde tozlar ve ikincil metalurji aşamasında pota fırınlarında işlem yapılırken oluşan gazlar ise filtre edilerek geri kazanılmaktadır.

Yüksek Fırın ve çelik üretim prosesleri sırasında üreyen baca tozları ve filtre tozlarının büyük bir bölümünün mevcut şartlarda kullanımı olmadığından atık sahalarına gönderilmek zorunda kalmaktadır.

Üretim prosesleri sonucu çıkan tüm toz ve çamurlar için yenilikçi proseslerin devreye alınması ve içinde değerlendirilebilir malzemelerin olduğu bu atıkların tekrar ekonomiye kazandırılması sağlanmalıdır.

B. Dünyada ve Türkiye’de Teknolojik Hazırlık Seviyeleri

1.4.a. Karbondioksitin kuru reforming ile sisteme indirgeyici gaz (CO) veya hidrojen kullanarak sentez gazı olarak geri kazanımı

Dünyada THS 6, Türkiye’de THS 2-3

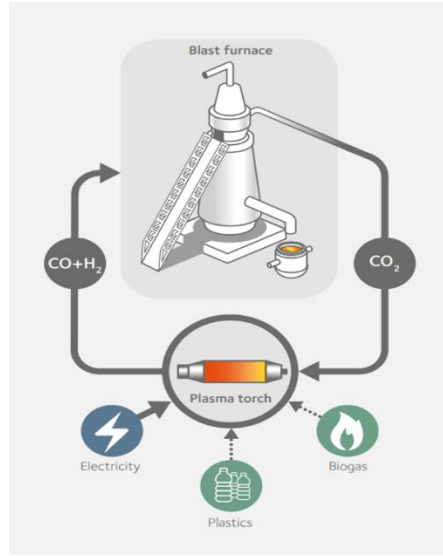
1.4.b. Yüksek fırın ve çelik üretim proseslerinden çıkan baca tozları ve filtre tozlarının dögüsel ve geri kazanım/kullanıma yönelik çalışmaların gerçekleştirilmesi

Dünyada THS 8, Türkiye’de THS 8

C. Dünyada ve Türkiye’deki Mevcut Duruma İlişkin Başarılı Örnekler

1.4.a. Karbondioksitin kuru reforming ile sisteme indirgeyici gaz (CO) veya hidrojen kullanarak sentez gazı olarak geri kazanımı

Arcelor-Mittal firmasının entegre üretim yapan bir diğer tesisi içerisinde; karbon yakalama projesi olan IGAR adlı projesinde, Yüksek Fırın gazındaki CO_2 yakalanıp, bir sentez gazına dönüştürülmekte, bu sentez gazı CO ve H_2 ’den oluşmakta ve yakalanan CO_2 gazı bu syngas’ı üretmek için çok yüksek sıcaklıkta plazma torç ünitesinden geçirilmektedir. Plazma torç sistemi ısıtma işlemi için elektrik, doğal gaz, biyogaz ya da atık plastikler kullanabilmektedir.



CO₂'nin Plazma Torçundan Isıtılarak Geçirilip CO+H₂ Sentez Gazı Oluşturduğu Mekanizma

1.4.b. Yüksek fırın ve çelik üretim proseslerinden çıkan baca tozları ve filtre tozlarının dögüsel ve geri kazanım/kullanıma yönelik çalışmaların gerçekleştirilmesi

Çinko içeren atık tozlardaki geri çinkonun geri kazanımı için hem Türkiye' de hem de Dünyada farklı prosesler vardır. Ayrıca baca tozu ve filtre tozlarının değerlendirildiği (FINMET Prosesi, SL/RN Prosesi, FASTMET Prosesi, ITmk3 Proses, Hlsmelt procesi, Circored procesi vb.) çok değişik proseslerde mevcuttur.

Özellikle Uzakdoğu ülkelerinde olmak üzere dünyanın farklı coğrafyalarında FINMET Prosesi, SL/RN Prosesi, FASTMET Prosesi, ITmk3 Proses, Hlsmelt procesi, Circored procesi vb. uygulamaları faaliyet göstermektedir.

Türkiye' de çinko içeren atık tozlardan geri kazanım yapan en bilindik olarak MARZINC olmak üzere 7 adet farklı fabrika bulunduğu bilinmektedir.

D. Ar-Ge ve Yenilik Sürecinde Biraraya Gelmesi Gereken Disiplinler ve Sektörler

1.4.a. Karbondioksitin kuru reforming ile sisteme indirgeyici gaz (CO) veya hidrojen kullanarak sentez gazı olarak geri kazanımı

Üniversitelerin Malzeme ve Metalurji Mühendisliği, Makine Mühendisliği ve Kimya Mühendisliği bölümlerinden özellikle Heterojen Yanma konusunda deneyimli Akademisyenler ile birlikte Demir-Çelik İşletmelerinin ilgili alandaki personelleri biraraya gelebilir.

1.4.b. Yüksek fırın ve çelik üretim proseslerinden çıkan baca tozları ve filtre tozlarının döngüsel ve geri kazanım/kullanıma yönelik çalışmaların gerçekleştirilmesi

Üniversitelerin Malzeme ve Metalurji Bölümlerinden ve Çevre Mühendisliği Bölümlerinden Akademisyenler, Entegre Demir-Çelik Fabrikalarının Ar-Ge ve İşletme birimleri birlikte çalışmalıdır. Üniversite, Araştırma Kurumları ve Entegre Demir-Çelik Fabrikaları biraraya gelebilir.

E. Ar-Ge, Yenilik, Demonstrasyon İşbirliği Modeli ve Destek Mekanizması

1.4.a. Karbondioksitin kuru reforming ile sisteme indirgeyici gaz (CO) veya hidrojen kullanarak sentez gazı olarak geri kazanımı

Öncelikle üniversitelerde dünyadaki mevcut uygulamalarında incelenmesiyle Ar-Ge ve proje geliştirme çalışmaları başlatılmalı projeler belirli bir olgunluğa eriştikten sonra Entegre Demir-Çelik Fabrikalarının Ar-Ge ve İşletme birimleri ile birlikte sahada uygulama çalışmaları yapılmalıdır.

Üniversitelere Ar-Ge ve Proje Desteği ve Proje uygulama aşamasında Devlet Teşvikleri verilmelidir.

1.4.b. Yüksek fırın ve çelik üretim proseslerinden çıkan baca tozları ve filtre tozlarının döngüsel ve geri kazanım/kullanıma yönelik çalışmaların gerçekleştirilmesi

Öncelikle üniversitelerde dünyadaki mevcut uygulamalarında incelenmesiyle Ar-Ge ve proje geliştirme çalışmaları başlatılmalı projeler belirli bir olgunluğa eriştikten sonra Entegre Demir-Çelik Fabrikalarının Ar-Ge ve İşletme birimleri ile birlikte sahada uygulama çalışmaları yapılmalıdır.

Üniversitelere Ar-Ge ve Proje Desteği ve Proje uygulama aşamasında Devlet Teşvikleri verilmelidir.

F. Zaman Boyutu

(Kısa Vade: 1-3 yıl, Orta Vade: 3-5 yıl, Uzun Vade: 5 yıldan fazla)

1.4.a. Karbondioksitin kuru reforming ile sisteme indirgeyici gaz (CO) veya hidrojen kullanarak sentez gazı olarak geri kazanımı

Kısa Vade

1.4.b. Yüksek fırın ve çelik üretim proseslerinden çıkan baca tozları ve filtre tozlarının döngüsel ve geri kazanım/kullanıma yönelik çalışmaların gerçekleştirilmesi

Kısa Vade

G. Teknolojik İlerlemenin Sağlanmasında Kritik Hususlar

Farklı disiplinlerin bir arada çalışması için gerekli altyapı oluşturulmalı ve gerekli her türlü destek sağlanmalıdır.

Mevzuat ve Yasal Düzenlemeler

Mevzuat incelenmeli ve uygulamanın önünde engel olabilecek konularla ilgili gerekli yönetmelikler düzeltilmeli ya da yeni yönetmelikler yayınlanmalıdır.

Teknik Altyapılar

Dünyada örnekleri olan üretim tesisleri incelenmeli, üretim ve test aşamaları TSE tarafından konu incelenerek ihtiyaç duyulması halinde yeni sertifikasyon sistemleri oluşturulmalıdır.

İnsan Kaynakları

Yeterli sayıda ve ihtiyaç duyulan yetkinlikte insan kaynağı bulunmaktadır.

Destek ve Teşvikler

Ar-Ge, Proje ve Yatırım Teşviklerine ihtiyaç duyulacaktır.

Referanslar

- [1] J.G. Mathieson, H. Rogers, M.A. Somerville, S. Jahanshahi, P Ridgeway Potential For The Use Of Biomass In The Iron And Steel Industry, BlueScope Steel Research, Newcastle, 2011.
- [2] Z. Hu, J. Zhang, H. Zuo, M. Tian, Z. Liu, T. Yang, Substitution of Biomass for Coal and Coke in Ironmaking Process, School of Metallurgical and Ecological Engineering, University of Science and Technology, Advanced Materials Research Vols. 236-238 (2011), pp 77-82 Beijing, China.
- [3] Japanese Technologies for Energy Savings/GHG Emissions Reduction, New Energy and Industrial Technology Development Organization, 2008.
- [4] Zhiyun Ji, Xiaohui Fan, Dan Zhang, Xuling Chen, Process Safety and Environmental Protection, Volume 135, March 2020, Pp 91-100,
- [5] Vincent Chevrier, DIRECT FROM MIDREX, Midrex Technologies, Inc., North Carolina 28208 U.S.A. 2020.
- [6] KOBELCO Group, ESG Data Book, 2022.
- [7] Baowu Group, The Project Guideline and Declaration Notice of China Baowu Low-carbon Metallurgy Innovation Fund, 2021.
- [8] Minoru ASANUMA, ISIJ International, Vol. 40 (2000), No. 3, pp. 244–251, 2014.
- [9] D. Bhagyaraj, nternational Journal of Research in Engineering and Science -IJRES Volume 09 Issue 10, 2021, PP. 87-92
- [10] Mousa E., Cristobal Feliciano, Sustainability, JMRTEC-90; No. of Pages 11,2022.

Teknolojik Hedef 2:

**SÜREKLİ DÖKÜM VE YARI MAMÜL İŞLENMESİ (HADDELEME,
ISIL VE YÜZEY İŞLEM)**

Sürekli döküm ve yarı mamül işlenmesinde (haddeleme, ısı ve yüzey işlem) prosesinde **verimliliği artırmaya ve proseslerin iyileştirilmesine yönelik yöntemlerin geliştirilmesi**

Kritik Ürün/Teknoloji 2.1.

2.1. Sürekli döküm, haddeleme, ısıtma işlem ve yüzey işlem proseslerinin iyileştirilmesine ve verimliliğini artırmaya yönelik alternatif ve yenilikçi proseslerin ve yöntemlerin geliştirilmesi

Öncelikli Ar-Ge ve Yenilik Konuları

2.1.a. Reküperatör veya Rejeneratif brülörlerin geliştirilmesi

2.1.b. Kesintisiz şerit üretimi çalışmalarının geliştirilmesi

2.1.c. Haddeleme prosesinde konvansiyonel üretim teknikleri yerine yenilikçi üretim tekniklerinin (Direkt haddeleme, Termomekanik Haddeleme, Normalizeli Haddeleme, Ferritik haddeleme, Direkt Su verme Temperleme gibi) geliştirilmesi, uygulanması ve yaygınlaştırılması

2.1.d. Sıcak haddelenecek yarı mamullerin yüzey işlemleri için alternatif yenilikçi ve çevreci teknolojilerin geliştirilmesi, kullanılması ve yaygınlaştırılması

2.1.e. Ürünün oksidasyon ve korozyon direncinin artırılmasına yönelik yenilikçi ve çevreci metalik ve organik/inorganik kimyasal kaplama proseslerinin geliştirilmesi

2.1.f. Direkt şarj, sıcak şarj gibi tekniklerin geliştirilmesi ve yaygınlaştırılması

2.1.g. Direkt şerit döküm teknolojilerinin geliştirilmesi

Kritik Ürün/Teknoloji 2.1.

2.1. Sürekli döküm, haddeme, ısı işlem ve yüzey işlem proseslerinin iyileştirilmesine ve verimliliğini artırmaya yönelik alternatif ve yenilikçi proseslerin ve yöntemlerin geliştirilmesi

A. Teknik Açıklamalar, Yenilikçi Özellikler, Hedeflenen Performans ve Metrikler

ÖNCELİKLİ AR-GE VE YENİLİK KONULARI

2.1.a. Reküperatör veya Rejeneratif brülörlerin geliştirilmesi

Bu sistemler ortam havasıyla çalışan brülörlere kıyasla yüksek enerji verimliliği sağlarlar. Tek reküperatif brülör, gövdeden geri geçen baca gazından enerji yakalamak için brülör gövdesinin bir parçası olan ısı alışveriş yüzeyleri içerirler. Tek rejeneratif brülörler, egzoz gazlarını brülör gövde içerisinden ısıya dayanıklı ortama geçirirler ve rejeneratif fırına benzer yapıda çalışırlar. Tipik olarak rejeneratif brülör sistemler daha az ısı değişim alanına sahiptirler. Bu yüzden enerji dönüşümleri daha düşüktür. Fakat düşük maliyetli olmaları ve sonradan güçlendirme kolaylıkları, onları enerji dönüşümü için cazip bir seçenek haline getirmiştir.

Reküperatör, ısının sürekli olarak yanma havasına transfer edildiği, atık gaz çıkış bölgesinde bulunan ısı değiştiricisidir. Çeşitli şekilde dizayn edilebilirler. Kendinden ön ısıtmalı yakıcılarda, yanma havasının ön ısıtılması için entegre ısı değiştiricileri vardır. Atık gaz sıcaklığının ısı aktarımı ile yanma havası sıcaklığı, proses sıcaklığına bağlı olarak 550–620°C'ye ısıtılır. Daha yüksek ön ısıtma sıcaklıkları teknik olarak mümkündür fakat konstrüksiyon-malzeme ısı direnci sebebiyle çok fazla maliyet gerektirir. Yaklaşık %65 ısı verimliliğine ulaşılabilir.¹

Türkiye ve dünyada reküperatörlü sistemler iki şekildedir; bir tanesi merkezi reküperatörden sıcak havayı brülörlere aktarmaktır, ikincisi kendinden reküperatör olan brülörleri kullanmaktır. Her iki teknolojide de ülkemiz ve dünya kullanımında ileri seviyededir. Yalnızca Koreli bir firmanın merkezi reküperatör konusunda daha verimli bir sistemleri olduğu bilinmektedir, ancak bu reküperatör de Türkiye'de bir çok firma tarafından halihazırda kullanılmaktadır. Mevcut reküperatörler maksimum 450 C'ye kadar çıkıyorken Koreli firmanın reküperatörü 700 C'ye kadar sıcak hava üretebilmektedir. Kendinden reküperatörlü brülörlerde yapılacak iyileştirmelerde ise, oksijen zenginleştirme veya hidrojen kullanma en iyi seçenek olacaktır

¹ Örenay, S. 2011. "Sanayi fırınlarında merkezi reküperatör, reküperatif ve rejeneratif yakıcılar" III. Enerji Verimliliği Kongresi.

çünkü bu brülörlerin kapasiteleri en fazla 600kW kadar olduğu için oksijen veya hidrojen adaptasyonu zor olmayacaktır.²

Rejeneratif brülör uygulamalarında ülkemiz bu teknolojiye yakındır ancak ilk yatırım maliyetlerinin yüksek olması bir sorun olarak karşımıza çıkmaktadır. Hadde fırınlarındaki ilk uygulama BCS Enerji firması tarafından 2021 yılında yapılmıştır, 2023 yılında ise firma Osmaniye’de ülkemizdeki ikinci uygulamayı yapacaktır. Bugünkü doğalgaz enerji maliyetlerinin yüksek olması sebebiyle LPG’ye geçişler olmaktadır. Bu geçişler rejeneratif brülörlerle beraber yapılırsa ortalama %50-%65 oranında tasarruf sağlanmaktadır, bu tasarrufta hem rejeneratif brülör etkisi hem de LPG fiyatlarının daha uygun olması etkilidir.

Hidrojen brülörü konusunda, 2020 yılında BCS Enerji tarafından Osmaniye’de yapılan uygulamada pilot bir hadde fırını yapılmıştır. Bu hadde fırınında Türkiye ve dünyada üretilen tüm hadde kütükleri hem hidrojenle hem de doğalgazla tavlansmıştır. Bu tavlama sırasında sırasıyla %100 doğalgaz, %70 doğalgaz %30 hidrojen, %50 doğalgaz %50 hidrojen, %30 doğalgaz %70 hidrojen ve %100 hidrojen ile tavlama kıyaslamalı bir şekilde yapılmıştır. Özellikle %100 doğalgaz ile %100 hidrojen kıyaslamasının kayda değer sonuçlar verdiği; tavlama süresinin daha kısa sürdüğü, tufalın gözle görülür şekilde düştüğü gözlemlenmiştir. Bu hidrojen brülöründe en büyük avantaj oksijeninin çok rahatlıkla kullanılabilmesi olmasıdır. Bu sayede fan kapasitesini düşürüp, NO_x değerlerini çok daha fazla düşürebilmesiyle, ileride üretimi artacak olan hidrojen brülörlerine geçiş için ön fizibilite yapılmış olmaktadır.

2.1.b. Kesintisiz şerit üretimi (KŞÜ) çalışmalarının geliştirilmesi

Sonsuz şerit üretim teknolojisi ile kombine edilmiş, sürekli ve kesintisiz bir döküm ve haddeleme prosesi ile sıcak şerit üretilir.

Bu tür bir tesiste, enerji tüketimi ve buna bağlı maliyetler, geleneksel döküm ve haddeleme işlemlerinden yüzde 45'e kadar daha düşüktür. Bu aynı zamanda CO₂ emisyonlarında da önemli bir azalma anlamına gelir. Yaklaşık 180 metre uzunluğundaki tesisler ayrıca geleneksel döküm ve haddehanelerden çok daha kompakt boyutlara sahiptir. Sonsuz döküm haddeleme işlemi ile çok çeşitli yüksek kaliteli sıcak haddelenmiş ultra ince çelik kaliteleri üretilebilir.

KŞÜ işlemleri sayesinde şerit, tüm şerit uzunluğu boyunca üniform ve tekrarlanabilir mekanik özelliklerle üretilebilir ve baş ve kuyruk ucu şerit kırıntıları neredeyse tamamen ortadan kaldırıldığı için verim kayıpları en aza indirilir. Slabların ayrı ayrı haddelendiği ve hadde merdanesindeki aşınmanın yoğun olduğu kesintili haddelemesinin aksine, hadde boşluğu ve

² MNE Proje, 2019. “Rekuperatör ve Rekuperatif Brülör Teknolojisi”.

basınç ayarlarının tüm haddeleme işlemi boyunca sabit olması, kesintisiz haddeleme operasyonlarında, daha uzun bir merdane ömrü belirgin bir avantaj olarak ortaya çıkar.

KSÜ çelik ürünlerinin kalitesi, en azından geleneksel bir sıcak şerit haddehanesinde üretilen çeliğin kalitesine eşittir. KŞÜ'de üretilen çelikten üretilebilen ürün örnekleri arasında otomotiv uygulamaları ve ev aletleri için zorlu gereksinimler de yer almaktadır.

Türkiye' de bu teknolojinin uygulandığı tek tesis İskenderun Dörtüoldaki MMK'dır. Diğer tesislerde yassı çelik üretiminde öncelikle sürekli döküm tesislerinde slab üretilir ve stoklanır. Daha sonrasında üretilen slablar tav fırınlarında 1200-1250°C arasına ısıtılır ve haddeleme işlemine gönderilir.

Sonsuz şerit üretim teknolojisi ile kombine, sürekli ve kesintisiz bir döküm ve haddeleme prosesinde sıcak şerit üretilebilir. Bu sayede enerji tüketimi ve buna bağlı maliyetler, geleneksel döküm ve haddeleme işlemlerine göre ciddi miktarda azaltılabilir. Buradan yola çıkılarak, KŞÜ hatları, mini haddehaneler veya yılda yaklaşık üç milyon tona kadar ek üretim kapasitelerinin gerekli olduğu mevcut çelik fabrikalarındaki kurulumlar için teşvik edilebilir.

2.1.c. Haddeleme prosesinde konvansiyonel üretim teknikleri yerine yenilikçi üretim tekniklerinin (*Direkt Haddeleme, Termomekanik Haddeleme, Normalizeli Haddeleme, Ferritik Haddeleme, Direkt Su Verme Temperleme*) geliştirilmesi, uygulanması ve yaygınlaştırılması

Termomekanik Haddeleme: Haddeleme veya dövme gibi mekanik veya plastik deformasyon işlemlerini ısıtma işlemi, su verme, çeşitli oranlarda ısıtma ve soğutma gibi termal işlemlerle tek bir işlemde birleştiren metalürjik bir yöntemdir. İlk olarak Japonya'da, Nippon Steel ve Kawasaki Steel Corporation daha katma değerli çubuk ürünlerine geçtiğinde, haddeleme teknolojileri geliştirilmiştir ve 1990 yıllarında tanıtılmıştır [1].

Termomekanik haddeleme prosesi (TMCP) kabaca, yarı mamulün şekillendirme sıcaklığına (yaklaşık 1200-1250°C) kadar ısıtılması sonrasında, ilk kaba işleme geleneksel üretim yöntemi ile gerçekleştirilir. Son finiş işleme ise geleneksel yöntemlere göre daha düşük bir sıcaklıkta gerçekleştirilir. Düşük sıcaklıktaki plastik deformasyon, ince tane boyutlu yapının elde edilmesini sağlar. Nihai sıcak çalışma, Ar₃ kritik sıcaklığının (östenitten-ferrite dönüşüm) altındaki sıcaklıklara kadar devam etmektedir. Çeliği düşük sıcaklıkta deforme edebilen güçlü haddeleme ekipmanlarına ihtiyaç vardır [1].

Normalize Haddeleme: Normalizasyon çeliğe homojen ve ince taneli yapı kazandırma işlemidir. Normalize haddelenmiş çelikler, ayrı olarak yapılan (off line) normalizasyon ısıtma

işlem sürecine alternatif olarak haddeleme esnasında finiş işleme sıcaklığının 900-1000°C'lerde uygulanması ile elde edilmektedir. Östenit taneler bu sıcaklıklarda deforme olur ve yapı yeniden kristalleşerek yeni östenit taneleri oluşur. Bu taneler orijinal yapıdan daha küçük ferrit taneleri oluşturma eğilimindedir. Nihai çelik özellikleri, normalize tavından çıkmış malzemelerinkine benzer. Bu nedenle ikinci bir normalize işlemine artık gereksinim duyulmaz [2].

Ferritik Haddeleme: Ferrit haddeleme işlemi, yüksek deformasyonun uygulandığı termomekanik bir işlemdir. Proses yüksek karbonlu ve alaşımlı çelik ürünleri için kullanılmaktadır. Süreçte 600-800°C'lik bir sıcaklıkta yaklaşık %80'lik redüksiyon oranı uygulanarak ferritin yeniden kristalleştiği sıcaklığın üzerinde, östenit dönüşümün meydana geldiği sıcaklığın altında uygulanmaktadır [3]. Bu uygulama ile düşük yeniden slab ısıtma sıcaklığının kullanılmasından elde edilen enerji tasarrufu, yeniden ısıtma fırınında daha az oksidasyon, düşük haddeleme sıcaklığı ve daha az ara merdane değişimi nedeniyle daha az iş merdanesi aşınması, dönüşmüş ve homojen bir mikro yapı üzerinde haddeleme ve soğutma yoluyla daha iyi şerit düzgünlüğü, çok ince kalınlıktaki şeridinin sıcak haddelenmesinde ortaya çıkan metalürjik sınırlamaların kalması gibi avantajlar elde edilmektedir.

Mevcut proseslerin geliştirilerek termomekanik haddelemeye olanak sağlanması, geleneksel haddeleme sonrasında uygulanan ısıl işlem, normalizasyon, küreselleştirme tavlama gibi proseslere ihtiyaç duymadan nihai ürün üretme kabiliyeti sağlayacaktır. Bunun içinde çeliklerin istenilen mikro yapıların elde ederek termomekanik haddeleme (TMCP), normalize haddeleme prosesinin geliştirilmesi, metalürjik özellikleri iyileştirmek amacıyla hadde ekipmanlarının (güçlü kaba ve şerit hadde motorları, soğuma ya da bekletme masası, güçlü soğuma kapasitesine sahip duşlu masa) yerleşimi, verimli bir üretim için haddeleme senkronizasyonu, bilinçli bir haddeleme stratejisi, model ve yazılımlar gerekmektedir.

Bugün, standartlar ve özel müşteri beklentilerini karşılayacak şekilde katma değeri yüksek bu tür birçok uzun ve yassı ürün termomekanik haddeleme ile üretilmektedir. Ancak daha yüksek mukavemet ile iyi bir tokluk (DWTT gibi) gerektiren bu grubun üst kaliteleri için yeterli deneyim ve bilgi birikimi henüz oluşmamıştır. Özellikle gelecekte uluslararası bir enerji merkezi olma olasılığı çok yüksek olan Türkiye'ye getirilecek doğal gazın taşınmasında kullanılacak yüksek basınçlı boru hatları üretimi zor olan daha kalın, daha yüksek mukavemet ve tokluk özelliğine sahip termomekanik haddelenmiş boru çeliklerine olan talebi arttıracaktır. Yine geleceğin çevreci yakıtı olarak görülen hidrojenin üretim mahallinden kullanım yerine taşınmasında boru hatlarının kullanılması daha ekonomik olacaktır. Ekonomiklik için boru hatlarındaki gaz basınçlarının mevcut uygulamalardaki limitleri aşması beklenmektedir. Veriler

daha yüksek gaz basınçlarında mevcut çelik kalitelerinin hidrojen kırılma dayanıklılığına karşı daha hassas olduğunu göstermektedir [4].

Yukarıdaki nedenlerden dolayı, uzun vadede sanayi tarafında ve üniversitelerde bu tür kalitede ürünlerin üretimi ve geliştirilmesi konusunda yapılacak çalışmalar desteklenmelidir. Kısa vadede ise yurt dışından teknoloji transferi yapılabilir. Bu konuda bazı mikroalaşım elementi sağlayıcı firmaların verdikleri teknik desteklerden faydalanılabilir.

Türkiye’de normalize haddeme, genel yapı çelikleri, kazan sacları ve gemi yapım sacları gibi bazı yassı çelik kalitelerinde kullanılan bir yöntemdir. Olası diğer kalitelerde de yöntemin sağladığı avantajlardan yararlanmak için sanayide bu konuda yapılacak çalışmalar desteklenebilir. Benzeri teşvikler henüz hiçbir çelik endüstrisinde kullanılmayan ferritik haddeme teknolojisinin mevcut soğuk haddelenmiş çelik ürünlerin yerini alacak şekilde ince kalınlıklarının üretimine yönelik çalışmalar için de kullanılabilir.

2.1.d. Sıcak haddelenecek yarı mamullerin yüzeylerinin kondisyonlanması için alternatif yenilikçi ve çevreci teknolojilerin geliştirilmesi, kullanılması ve yaygınlaştırılması

Kusursuz kalitede çelik ürünler üretmek için yüzey safsızlıklarından arındırılması gerekir. Çatlak ve boşluklar nihai üründe maddi zarara yol açar ve görünmeyen bir risktir. Bu kusurların çoğu, malzeme yüzeyinin 5 mm’si içinde meydana gelir. Uzun yarı mamüllerde bu işlem taşlama ile yapılırken, yassı yarı mamüllerde alevle skarfla işlemi en pratik ve en uygun maliyetli çözüm olarak görülmektedir. İşlem spot olarak yalnızca görünür kusurları gidermeye yönelik yapılabilirken, görünmeyenleri ortaya çıkarmak için test skarfla şeklinde belirli alanlara ya da yüzeylere de manuel şekilde uygulanabilir. Yüzey hassas belirli kalitelerde işlem makine ile tüm yüzeylere de uygulanabilmektedir.

Endüstriyel kütük taşlama makinesi; çelik kütük, külçe, çelik levha ve benzeri yüzeylerde dekarburize edilmiş tabaka, oksit skalası, kat ve çatlakları gidermek için kullanılır. Taşlamadan sonra yarı mamüllerin yüzey kalitesi geliştirilecektir.

Yüzey işleme makinesi, tam otomatik çapak alma işlemini gerçekleştirmek için PLC tarafından kontrol edilir, kolay çalıştırılır ve bakım için elverişlidir.

Taşlama işlemi uzun yarı mamüllerde yaygın olarak kullanılırken, alevle skarfla işlemleri düşük karbonlu yassı yarı mamüllerde kullanılmaktadır. Taşlama, paslanmaz, düşük/orta karbonlu ve otomotive yönelik çelik kalitelerinin kondisyonlanması alevle skarfla işleme birincil alternatif olarak görülmektedir. Son yıllarda bu alanda önemli ilerlemeler kaydedilmiştir. Sıcak slab ve kütüklerin makineyle skarfla edilmesi, sıcak taşlama ile kombine edildiğinde, sıcak

kondisyonlama kapasitesini, yarı mamüllerin yüzey kalitesini ve sıcak şarjlı haddeleme oranını büyük ölçüde arttırmıştır.

Alevle yapılan skarf işlemlerinde gaz, duman ve toz çıkışı olmaktadır. Yassı yarı mamüllerin yüzeylerin kondisyonlanmasında daha az çevresel etkiye sahip olan taşlama işlemi yaygınlaştırılmalıdır.

2.1.e. Ürünün oksidasyon ve korozyon direncinin artırılmasına yönelik yenilikçi ve çevreci metalik ve organik/inorganik kimyasal kaplama proseslerinin geliştirilmesi

Çelik ürünlerinin korozyonu, tümü atmosferde bulunan su (H₂O), oksijen (O₂) ve klorür iyonları (Cl⁻) gibi iyonların varlığında cereyan eden elektrokimyasal bir reaksiyondur.

Korozyon; oksitlenme yoluyla metalleri olumsuz etkileyen ve bozulmalarına neden olan çok yönlü bir olgudur. Metal endüstrisindeki milyonlarca ABD doları tutarlarını bulan kayıp, metal korozyonuna bağlanabilir. Farklı potansiyellere sahip iki metal birbirine bağlandığında ve bu metaller iletken bir elektrolit içinde bulunduğunda, akım akacak ve korozyon oluşmaya başlayacaktır. Ayrıca, birbirine benzemeyen iki metal birbiriyle temas halindeyse, daha reaktif olan metal, daha az reaktif olan metale tercih edilerek korozyona uğrayacaktır.

Oksidasyon; oksijenin çelikte bulunan bir element ile reaksiyonudur. En yaygın oksidasyon şekli pas oluşumudur. Pas, çeliklerin yüzeyinde kırmızımsı renkli filmi oluşturan binlerce demir oksit molekülünün birikmesi ile teşekkül eder.

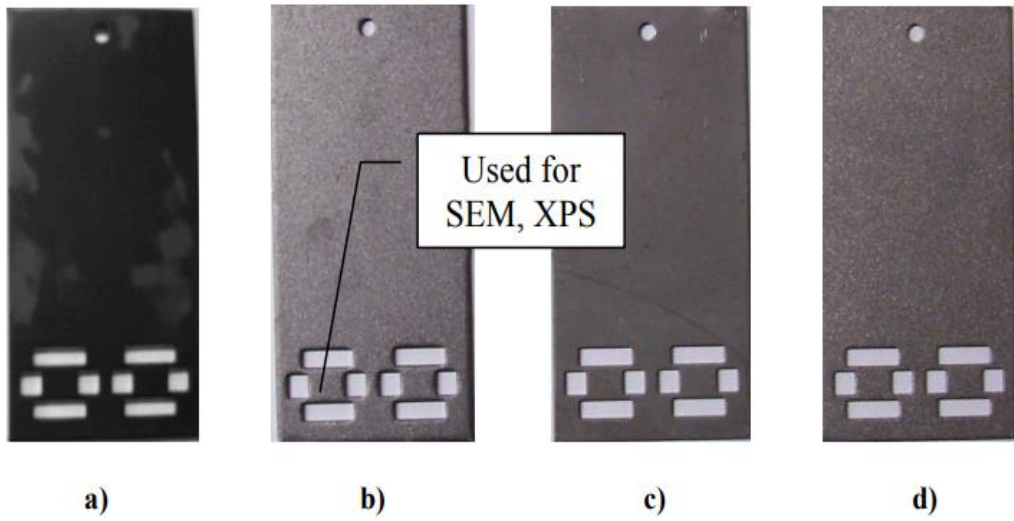
Çelik ürünlerinden sıcak haddeyi korozyondan korumak için kullanılacak yöntem galvanik koruma metodudur. Galvanik korumada; farklı metaller arasındaki reaksiyonlar, çeliği korozyona karşı korumak için kullanılabilir. Çeliğin korunması için en yaygın kullanılan metal çinkodur. Çeliğin alt tabakası ile doğrudan temas halindeki çinko metalinin seçimli oksidasyonu yoluyla koruma sağlanabilir. Çinko, çeliği korumak için iyi bir seçimdir, çünkü çeliğe nazaran korozyona uğramaz, ayrıca korozyon hızı genellikle daha yavaştır. Ancak bu hız, kıyı bölgelerinde klorür gibi iyonların varlığında hızlanır [5].

Alüminyum ile kaplanmış yapı çeliklerinde oksidasyon ve korozyon dayanımının önemli ölçüde iyileşme gösterdiği literatürde belirtilmektedir. Alüminyum kaplı çelikler, endüstriye girişlerinden bu yana araçlarda, köprülerde, otoyol yapılarında, basınçlı kaplarda ve daha birçok yerde yaygın olarak kullanılmaktadır.

Çeliği alüminyum ile kaplamak için birçok yöntem vardır; ark/plazma sprej kaplama, kaplama, elektrolitik kaplama ve sıcak daldırma kaplama bunlardan bazılarıdır. Sıcak daldırma alüminizasyon, ısı ve oksidasyon direncinin birincil gereklilikler olduğu çeliklere uygulanır. Aynı

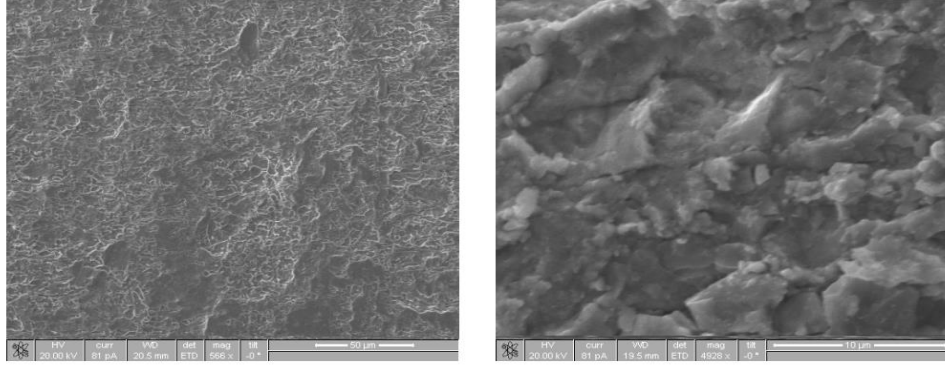
zamanda çevrenin korunması, satın alınabilirlik, seri üretime uygunluk ve üstün korozyon direnci göz önüne alındığında; sıcak daldırma alüminyum kaplama verimli ve kullanışlı bir yöntemdir. Çelik yüzeye sıcak daldırma ile alüminyum kaplama işlemi yapıldığından çelik ve alüminyum tabakalar arasında farklı intermetalik fazlar oluşur. Bu fazlar genellikle çok sert, kalın ve kırılğan bir yapıya sahiptir.

Sıcak haddelenmiş çeliğin zirkonyum tabanlı nano yapılı dönüşüm kaplaması da konvansiyonel fosfatlama kaplamalarına göre daha iyi özellikler sunarak bu yöntemin yerine geçebilecek potansiyeli taşımaktadır.



a) Sıcak Haddelenmiş Çelik b) Bilyalı Kumlamadan Sonraki Hali c) Kimyasal Temizlikten Sonraki Hali d) Mekanik ve Kimyasal Temizlikten Sonraki Hali

Literatürde yer alan çalışmalara göre; geleneksel fosfatlamaya alternatif olan Zr bazlı çevre dostu dönüşüm kaplaması kullanılarak sıcak haddelenmiş çelikler için korozyon, kabarma direnci ve yapışmanın iyileştirilebileceği görülmektedir. Aynı zamanda sıcak hadde çelikleri üzerindeki oksit tufalinin herhangi bir dönüştürme ve toz boya uygulamasından önce temizlenmesi gerektiği de belirtilmektedir. Mekanizmanın, dönüşüm kaplama çözeltisindeki bileşenlerin oranında sıcak haddelenmiş çelik üzerinde kullanılmaya uygun olduğu açıkça görülür.



Şekil: Zr tabanlı dönüşüm kaplamasının SEM görüntüleri

Spesifik olarak, 150 ppm H_2ZrF_6 (Heksaflorozirkonik asit), γ -APS ve Mg kullanmak bu tip kaplama yöntemleri için en uygun çözelti hazırlığı olacaktır. Bu tip yöntemler, toz boya öncesi sıcak haddelenmiş çelik için ekonomik ve çevre dostu bir ön işlem çözümü olabilmektedir ve problemlili fosfatlama ön işlemlerine alternatif arayan endüstriler için idealdir. Literatürde yer alan test sonuçları, Zr bazlı dönüşüm kaplamasının uygun ortam sıcaklığında çalıştığı, çevre dostu olduğunun ve toz kaplamada sıcak haddelenmiş çelik için daha iyi bir korozyon korumasına ve yapışmayı artırıcı niteliklere sahip olduğunu göstermektedir. Ayrıca farklı çözelti denemeleri ile geliştirilmeye de açıktır. Bu tip özelliklere sahip olması bu gibi kaplama sistemlerini endüstri için daha cazip kılmaktadır [6].

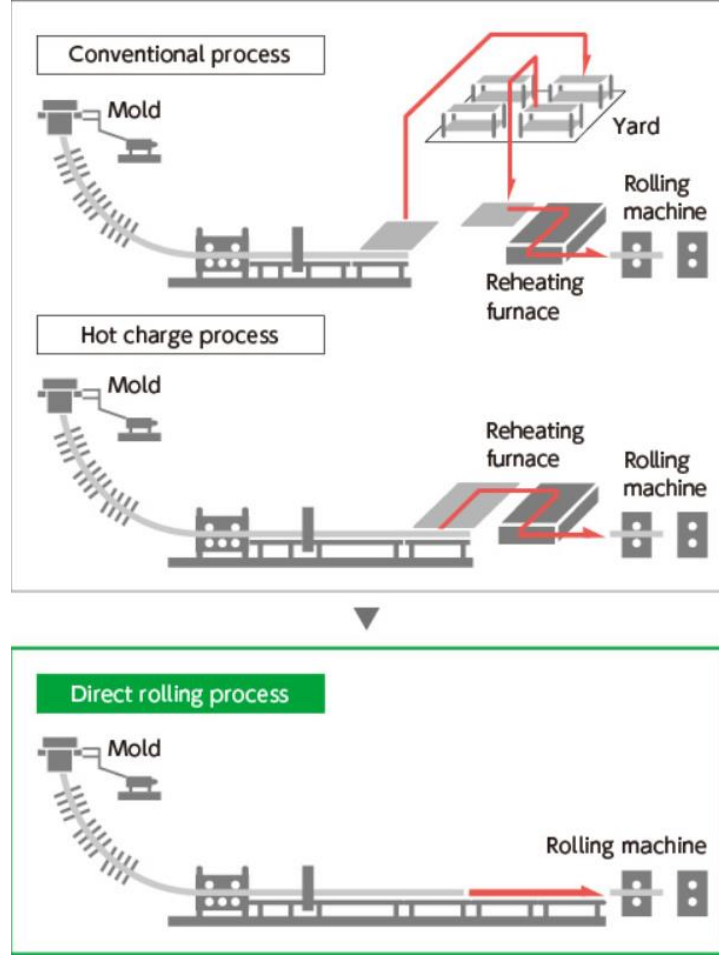
Çelik ürünlerinin galvanik koruma (galvanizleme) metoduyla oksidasyon ve korozyona karşı korunmasında çinko kaplama, düşük maliyet ve üstün tükenir elektrotla koruma gibi özelliklere sahip olsa da; çinko metali için mineral kaynakların yetersizliği ve de fiyatında meydana gelen dalgalanmalar endüstriyi alternatif kaplama kimyasallarının kullanımına yöneltmektedir. Yapı çelikleri için kullanılan bir diğer kaplama yöntemi ise alüminyum kaplamadır.

Çelik yüzeyler için kimyasal dönüşüm kaplaması, genellikle yüzeyi korozyona dayanıklı hale getirmek ve yapışmayı desteklemek için uygulanır. Toz kaplama genellikle ön işlem uygulamasından sonra sıcak haddelenmiş çelik'e (HRS) uygulanır. Toz boya uygulamaları, korozyona karşı en yüksek direnci sunar ve ömür boyu günlük kullanıma dayanma potansiyeline sahiptir. Alt tabaka, kaplama veya uygulama ne olursa olsun, finisajın etkinliğini artırmak için, parçaların çoğunun kaplamadan önce yaygın olarak dönüşüm kaplaması olarak bilinen bir yüzey işlemine ihtiyacı vardır. Bu, yapışmayı teşvik eder, parça kaplama etkileşimlerini azaltır, korozyon direncini geliştirir ve kabarma direncini artırır [7]. Dönüşüm kaplamaları tipik olarak çinko fosfat (ZnP) ve demir fosfat (FeP) kimyasallarını içermektedir. Bu kimyasallar püskürtme veya daldırma yöntemi ile yüzeye biriktirilirler. Fosfatlama, ağırlıklı olarak toz kaplamadan önce çok iyi sonuçlar sunar. Bununla birlikte, fosfatlama tankının ısıtılması ve çevresel kaygılar nedeniyle artan enerji maliyetleri, araştırmacıları ve metal

kaplama endüstrilerini ekonomik ve çevre dostu ön işleme tabi tutma sistemlerini geliştirmeye yönelmektedir. Bu kapsamda Si ve Zr bazlı dönüşüm kaplamaları, çelik dönüşüm kaplamaları için finansal ve çevresel gereksinimleri karşılayan popüler sistemlerdir. Bu tip sistemlerin dezavantajı ise; bu sistemlerin, sıcak haddeme işlemi tarafından oluşturulan yüzeyde oksit tufalıyla birlikte gelen sıcak haddelenmiş çeliğe uygunluk açısından geniş çapta test edilmemiş olmasıdır. 570°C sıcak haddeme sıcaklığının üzerinde alt tabaka üzerinde wustite (FeO) iç katman, manyetit (Fe₃O₄) orta katman ve hematit (Fe₂O₃) dış katman olarak bilinen üç katmanlı bir oksit tufali oluşur [8]. Alt tabaka üzerine gevşek bir şekilde yapılmış oksit tortusu genellikle kaplamanın bozulmasına neden olur; bu nedenle, herhangi bir kaplama uygulamasından önce mekanik veya kimyasal yöntemlerle veya her ikisinin bir kombinasyonu ile giderilmelidir. En iyi teknoloji özel uygulamaya bağlıdır, bu sebeple de yeni geliştirilecek olan projeler sıcak haddelenmiş çelikte yeni nesil dönüşüm kaplamalarının değerlendirilmesini içermelidir. Yeni nesil zirkonyum florobazlı (H₂ZrF₆) dönüşüm kaplaması benzeri uygulamalar, konvansiyonel metot olan sıcak haddelenmiş çeliğe fosfatlama işlemlerinin yerine geçecek şekilde geliştirilebilir. Dönüşüm kaplama mekanizması, oksitle temizlenmiş sıcak haddelenmiş çelik üzerinde hazırlanmış zayıf florozirkonik asit ön işlem solüsyonu ile temas halindeyken çalışmak üzere tasarlanabilir; bunun nedeni olarak da anotta dağlama reaksiyonu ve katotta hidrojenin indirgeme reaksiyonunun cereyan etmesi gerekçe gösterilebilir.

2.1.f. Direkt şarj, sıcak şarj gibi tekniklerin geliştirilmesi ve yaygınlaştırılması

Fırınlarda için ilk bakışta oldukça iyi bir enerji tasarruf yöntemi olan sıcak şarj yöntemi kullanılabilir. Bu uygulamada malzemenin stoklandığı ve soğuduğu sistemlerin tersine sürekli döküm makinasından çıkan yarı mamül kütükler, blumlar, slablar; tamamen soğumaları beklenmeden üzerinde kalan ısı ile direk olarak şarj edilirler. Sıcak şarj denildiğinde 300–600°C arası, direk haddemede ise 900–1000°C malzeme anlaşılır. Böylelikle yarı mamülün fırınlarda haddeme için istenen sıcaklığa getirilmesi çok daha az enerji tüketimiyle ve kısa sürede gerçekleşmekte, üretimde ve verimlilikte artış sağlanabilmektedir. Aynı zamanda depolama faaliyetlerini de azaltarak stok maliyetlerini de düşürecektir. Bu uygulamanın yapılabilmesi için çok iyi bir üretim planlamasının yanında; çelikhane ile haddehanenin lojistik olarak uygun bir yerleşim planı içerisinde bulunması şarttır. Bu uygulama özellikle çelikhane ve haddehane tesisleri arasında lojistik imkanı kolay olan ve aynı tip nihai mamülleri seri olarak imal eden üreticiler için bir avantaj olarak değerlendirilebilmektedir. Geleneksel, sıcak şarj ve direkt şarj uygulaması proses şematik gösterimine aşağıda yer verilmektedir [9].



Tabloda, sıcak şarjın enerji tüketimi üzerindeki etkisi ve tavlama için gerekli süre verilmiştir. Örneklerde verildiği gibi sıcak şarj sıcaklığı 400°C olduğunda üretim kapasitesinde %10'luk ve şarj sıcaklığı 700°C olduğunda %25'lik üretim artışı mümkün olabilmektedir.

Şarj Sıcaklığı			
	20 °C	400 °C	700 °C
Spesifik enerji tüketimi (yakıt)	1.55 GJ/t	1.25 GJ/t	0.94 GJ/t
Yüzde indirgeme	0%	19%	39%
Çeliğe geçen ısı	0.80 GJ/t	0.56 GJ/t	0.37 GJ/t
Fırındaki bekleme süresi ¹	100 dak.	90 dak.	75 dak.
¹ Örnek; kütük, yumuşak çelik, üstten ateşlemeli itmeli fırından alınmış, çıkış sıcaklığı 1200 °C'dir.			

Farklı uygulama yöntemlerinin özelliklerinin ve etkilerinin gösterildiği tablo aşağıda paylaşılmaktadır [10].

Yöntem	Sıcak Şarj Sıcaklığı (°C)	Yakıt Tüketimi (10 ⁶ kJ/t)	Oksidasyon Kaybı (%)	Fırın İçerisinde Yeniden Isıtma Süresi (h)	Bitmiş Ürün Alınma Zamanı (h)
CC-CCR	400 altı	1,338	2,0-1,0	4	40-30
CC-HCR	400-700	0,878	0,7-0,5	3,2	10-5
CC-DHCR	700-1000	0,335	0,5-0,2	1	2-1
CC-HDR	1100 üzeri	0	0	0	1-0,5

CC-CCR : sürekli döküm-soğuk şarjlı haddeleme

CC-HCR : sürekli döküm-sıcak şarj haddeleme

CC-DHCR : sürekli döküm-doğrudan sıcak şarjlı haddeleme

CC-HDR : sürekli döküm-sıcak doğrudan haddeleme

İşletme stratejisi ve fabrika yerleşimi nedeniyle bazı mevcut tesislerde uygulaması sınırlı olabilir. Önemli teknik parametreler haddeleme tipi, kurulumu, sürekli döküm makinesi ile olan uzaklığı (çelikhaneden haddehaneye kadar transfer zamanı) ve çelik özelliğidir. Bazen brülörsüz ön ısıtma bölgesi olan fırınlarda uygulanamaz.

Sıcak şarj uygulamasında çelikte tam olarak soğuma ve katılaşma tamamlanamadığı için, içerisinde özellikle bakır sülfür (CuS) veya kurşun (Pb) gibi düşük sıcaklıkta ergiyen inklüzyonlar sıvı halde kalarak haddeleme aşamasında çapak oluşturma gibi sorun teşkil edebilmektedir. Bunu gidermenin bir yolu da yarı mamüllerin, belirli bir soğutma zamanından sonra uygun sıcaklıklara tekrar ısıtılarak fırına şarj edilmesini sağlamaktır. Dolayısıyla sıcak şarj özellikle yüzey kalitesinin yüksek olduğu üretimlerde her zaman beklendiği verimi göstermeyebilir.

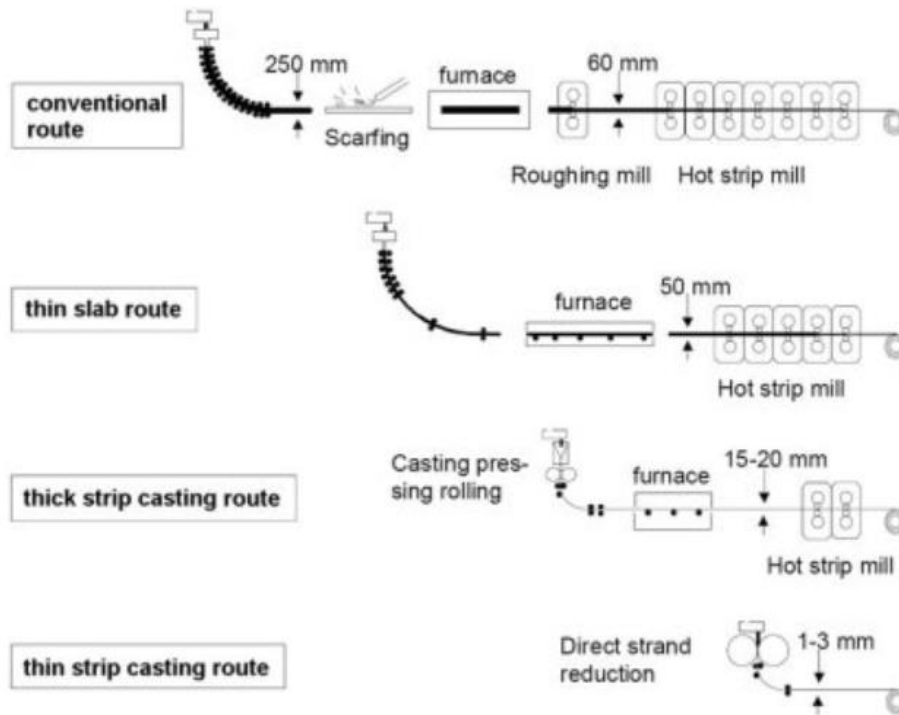
Sıcak şarjın ve direk haddeleme tekniğinin uygulanması, fırının üretim kapasitesindeki artışı destekleyecek ekipman yerleşimine, sıcaklık normalizasyonu (kenar ısıtıcıları gibi) gevşek haddeleme programı, haddeleme ve çelikhane üretim programının senkronize edilebilir olması ve malzeme yüzey kalitesinin çok yüksek olması gibi parametrelerden etkilenmektedir.

Uygulamanın avantajları aşağıda verilmektedir:

- Fırında malzemenin daha az durması
- Üretim hızında artış (%10-25)
- Azalan tufal ve azalan dekarbürizasyon nedeniyle kalitede ve verimde artış
- Daha sonraki proseslerde atıkların azalması tufal temizliğinde azalma baca gazı sıcaklığı yükselebilir [12].

2.1.g. Direkt şerit döküm teknolojilerinin geliştirilmesi

Şerit döküm işleminde, ergimiş metal doğrudan hareketli bir alt tabakaya (bant veya tambur) dökülerek, kalınlıkları birkaç milimetre arasında değişen metal şeritler üretilir. Döküm metal şeritler nihai ürün kalınlığına yakın olduğundan, Geleneksel Sürekli Döküm ve İnce Slab Döküm proseslerinde gerekli olan maliyetli ve enerji yoğun boyut küçültme ve bitirme adımları en aza indirilebilir ve doğrudan döküm prosesine entegre edilebilir. Döküm ve haddelemeyi tek bir kompakt ve verimli süreçte birleştiren şerit döküm, çelik üretim endüstrisine birçok ekonomik, çevresel ve teknik fayda sağlama potansiyeline sahiptir [13].



Farklı çelik sac üretim yaklaşımları [14]

Şerit döküm, ergiyikten ince şeritlerin doğrudan üretimini mümkün kılar ve geleneksel sürekli döküm işlemlerinde gerekli olan sonraki sıcak haddeleme aşamalarının çoğunu ortadan kaldırır. Proses yolunun bu şekilde kısaltılması, yatırım maliyetlerini 4 ila 10 kat azaltabilir. Spesifik yatırım maliyetleri, bir ton çelik başına %40'a kadar azaltılabilir. Şerit dökümün avantajlarına ilişkin aşağıdaki bilgiler verilmiştir [15]:

- (i) İnce slab döküm tesisinin sermaye maliyetinde %68'e kadar azalma,
- (ii) İnce slab döküm tesisinin kapladığı alanda %40'a kadar alan azaltma,

(iii) İnce slab döküm tesisinin enerji tüketiminde %50 azalma,

(iv) Entegre bir tesise kıyasla daha düşük atmosferik emisyonlar (CO₂, SO₂ ve NO_x'in %70-90'ı).

Mevcut pilot çapta üretim tesislerinde nihai kalınlıkta çeşitli çelik kalitelerinin üretimi üzerine kapsamlı araştırma çalışmaları yapılmış olsa da, hala aşılması gereken zorluklar konusunda araştırma yapılması gerektiren önemli konular hala vardır.

B. Dünyada ve Türkiye’de Teknolojik Hazırlık Seviyeleri

2.1.a. Reküperatör veya Rejeneratif brülörlerin geliştirilmesi

Hidrojen Brülör

Dünyada THS 9, Türkiye’de THS 7

Reküperatör ve Rejeneratif Brülör

Dünyada THS 9, Türkiye’de THS 6-8

2.1.b. Kesintisiz şerit üretimi çalışmalarının geliştirilmesi

Dünyada THS 9, Türkiye’de THS 3-4

2.1.c. Haddeme prosesinde konvansiyonel üretim teknikleri yerine yenilikçi üretim tekniklerinin (*Direkt Haddeme, Termomekanik Haddeme, Normalizeli Haddeme, Ferritik Haddeme, Direkt Su Verme Temperleme*) geliştirilmesi, uygulanması ve yaygınlaştırılması

Direkt haddeme Dünyada THS 9, Türkiye’de THS 8’dir.

Termomekanik haddeme Dünyada THS 9, Türkiye’de THS 9’dur.

Normalizeli haddeme Dünyada THS 9, Türkiye’de THS 9’dur.

Ferritik haddeme Dünyada THS 8, Türkiye’de THS 3-4’tür.

Direkt su verme ve temperleme Dünyada THS 9, Türkiye’de THS 8’dir.

2.1.d. Sıcak haddelenecek yarı mamullerin yüzeylerinin işlemleri kondisyonlanması için alternatif yenilikçi ve çevreci teknolojilerin geliştirilmesi, kullanılması ve yaygınlaştırılması

Dünyada THS 9, Türkiye’de THS 7-9’dur.

2.1.e. Ürünün oksidasyon ve korozyon direncinin artırılmasına yönelik yenilikçi ve çevreci metalik ve organik/inorganik kimyasal kaplama proseslerinin geliştirilmesi

Dünyada THS 9, Türkiye’de THS 7-9’dur.

2.1.f. Direkt şarj, sıcak şarj gibi tekniklerin geliştirilmesi ve yaygınlaştırılması

Sıcak şarj Dünyada THS 9, Türkiye’de THS 8’dir.

Direkt şarj Dünyada THS 9, Türkiye’de THS 3-4’tür.

2.1.g. Direkt şerit döküm teknolojilerinin geliştirilmesi

Dünyada THS 9, Türkiye’de THS 3-4’tür.

C. Dünyada ve Türkiye’deki Mevcut Duruma İlişkin Başarılı Örnekler

2.1.a. Reküperatör veya Rejeneratif brülörlerin geliştirilmesi

Yukarıda da bahsettiğimiz gibi reküperatif brülörler konusunda dünyadaki uygulamalar iyi noktadadır. Türkiye’de kullanımın iyi seviyede olmasına rağmen üretimi konusunda hiç bir çalışma bulunmamaktadır. Rejeneratif brülörler konusunda demir çelik sektörünün kararlı adımlarıyla kısa zamanda çok büyük ivme kazanabilir. BCS Enerji Mühendislik firmasının yaptığı ve yapacağı rejeneratif brülör uygulamaları sonrası bu ivmelenme daha etkin olabilir. Bu projenin tamamen yerli olması, bu alanda dışa bağımlılığın önlenmesi açısından çok değerlidir [16, 17].

2.1.b. Kesintisiz şerit üretimi çalışmalarının geliştirilmesi

Bu teknoloji ilk kez Kawasaki Steel Corporation’nun Chiba İşletmelerinde tanıtılmıştır ve halen bu tesiste kullanılmaktadır. Arvedi ESP (Kesintisiz şerit üretim) süreci, 2009’dan beri Acciaieria Arvedi S.p.A.’nın (Arvedi), İtalya’daki çelik fabrikalarında başarılı bir şekilde çalışmakta ve

sıcak haddelenmiş ruloların geliştirilmiş üretimini mümkün kılmaktadır. Bunlar ve diğer uluslararası başarılı uygulamalara aşağıdaki bağlantılardan erişilebilir:

Kawasaki Steel Corporation'nun Chiba İşletmeleri

- https://www.jfe-steel.co.jp/archives/en/ksc_giho/no.37/e37-065-072.pdf

İtalya ve Çin' de Primetals ve Danieli firmaları tarafından geliştirilen proses uygulamaları bulunmaktadır.

- <https://www.primetals.com/portfolio/endless-casting-rolling/arvedi-esp>
- <https://www.scientific.net/MSF.944.344>
- https://www.danieli.com/en/news/news-events/new-danieli-universal-endless-ductile-strip-plant-shougang-jingtang-united-iron-steel-co-ltd-p-r-china_37_110.htm

2.1.c. Haddelenme prosesinde konvansiyonel üretim teknikleri yerine yenilikçi üretim tekniklerinin (*Direkt Haddelenme, Termomekanik Haddelenme, Normalizeli Haddelenme, Ferritik Haddelenme, Direkt Su Verme Temperleme*) geliştirilmesi, uygulanması ve yaygınlaştırılması

Voestalpine üretim hatlarında termomekanik, normalize haddelenme ile ilgili üretimlerin yapıldığı gözlemlenmiştir. SMS, Danielli, Primetals firmalarının sunmuş olduğu teknolojiler ile haddelenme proseslerinde termomekanik haddelenme imkanları sağlanabilmektedir. Bunlar ve diğer uluslararası başarılı uygulamalara aşağıdaki bağlantılardan erişilebilir:

- <https://www.voestalpine.com/stahl/en/Companies/voestalpine-Grobbelch-GmbH/Technology/As-delivered-conditions/Thermomechanical-rolling>
- <https://www.voestalpine.com/stahl/en/Companies/voestalpine-Grobbelch-GmbH/Technology/As-delivered-conditions/Normalizing-rolling>
- <https://www.sms-group.com/services/x-pact-thermo-mechanical-rolling>
- https://www.danieli.com/en/products/products-processes-and-technologies/plate-mills_26_59.htm
- <https://www.primetals.com/portfolio/hot-rolling-long/rod-mill-equipment>

Direkt haddelenme şu an yalnızca İskenderun Dörtüol'daki MMK tesisinde gerçekleştirilmektedir. Termomekanik haddelenme Türkiye'deki birçok yassı ve uzun çelik üretimi yapan tesiste gerçekleştirilmektedir. Normalizeli haddelenme yassı çelik üretimi yapan Erdemir ve İsdemir tesislerinde gerçekleştirilmektedir. Ferritik haddelenme konusunda

Erdemir’de denemeler yapılmış ancak bu teknik fizibilite açısından uygun bulunmamıştır. Bunun dışında Türkiye’de üretimi yoktur. Türkiye’nin tek levha üreticisi olan Erdemir’de bu tür teknolojiler kullanılmamaktadır. Türkiye’deki birçok uzun çelik üreticisinde beton çelik çubukların üretiminde bu teknoloji “Tempcor” prosesi altında gerçekleştirilmektedir.

2.1.d. Sıcak haddelenecek yarı mamullerin yüzey işlemleri için alternatif yenilikçi ve çevreci teknolojilerin geliştirilmesi, kullanılması ve yaygınlaştırılması

Danieli Centro Maskin firması Posco/Güney Kore’de; uzun ve yassı ürünler, paslanmaz çelik ve düşük/orta karbonlu kaliteler için bugüne kadar 18’i levha taşlama için olmak üzere toplam 30 öğütücüyü devreye almıştır. SMS Logistics firmasının Belçika’daki Ugine ve ALZ (Carinox) tesislerinde slab taşlama tesisi bulunmaktadır. Bunun dışında slabların taşlanmasına yönelik ekipman satan Egon Evertz KG (GmbH & Co.), BRAUN Maschinenfabrik Gesellschaft m.b.H. firmaları bulunmaktadır.

İtalyan tesis ekipmanı tedarikçisi Danieli’nin bağlı kuruluşu Danieli Centro Maskin’in ArcelorMittal Brazil’e, NGS16 kodlu kayışlı kütük taşlama makinesi tedarik edeceğini açıklanmıştır. Yeni makinenin 2023 yılının ilk çeyreğinde devreye alınması planlanmaktadır. Taşlama işlemi 13 metreye kadar uzunluklarda 150-170 mm kare kütükleri kapsayacak ve makine yılda 48.000 mt ürünü işleyecektir [18].

Türkiye’deki yassı çelik üreticileri şu an slabların yüzeylerinin işlenmesinde alevle skarf işlemi kullanmaktadır. Uzun ürün sektöründe ise taşlama işlemi kullanılmaktadır. Uzun ürün sektörünün kullandığı taşlama işleminin yassı çelik üretim sektöründe kullanımına yönelik herhangi bir girişim şu aşamada yoktur.

2.1.e. Ürünün oksidasyon ve korozyon direncinin artırılmasına yönelik yenilikçi ve çevreci metalik ve organik/inorganik kimyasal kaplama proseslerinin geliştirilmesi

İngiltere’de ve ABD’de bazı kaplama firmalarında, çeliklerin polimerik kaplaması noktasında geliştirilmiş başarılı örnekler ve endüstriyel ticarileşmiş uygulamalar bulunmaktadır. EonCoat CR adı verilen bir kaplama uygulamasında; çeliğin yüzeyi önce korozyona dayanıklı bir alaşıma dönüştürülür ve bu alaşım daha sonra kendiliğinden yanan, aşınmaya dayanıklı seramik katmanlarla kaplanır. Çift bileşenli bir püskürtme tabancası, A kısmını (asit fosfat) B kısmıyla (su bulamacındaki baz mineraller ve metal oksitler) karıştırır. Karışım, püskürtülen kaplamanın birkaç dakika içinde ortam koşullarına bağlı olarak sıcaklığının 1°C ila 8°C yükselmesine neden olan egzotermik bir reaksiyon oluşturur. Reaksiyon, çelik substrattan gelen demiri içerir. B kısmındaki metal oksitler, A kısmındaki potasyum ve fosfatla birlikte,

metal substrat ile birleşerek kimyasal olarak bağlı, sert ve kararlı oksitlerden oluşan bir tabaka oluşturur. Bu alaşım tabakası kararlı bir metal kompleksi haline gelir. Bu kompleks neredeyse çözünmez, kalıcı olarak inerttir, oksijen ve neme de daha fazla tepki veremez. Bu sayede korozyonu önlemiş olur [19, 20].

2.1.f. Direkt şarj, sıcak şarj gibi tekniklerin geliştirilmesi ve yaygınlaştırılması

Dünyadaki başarılı uygulamalar aşağıda verilmektedir:

- EKO Stahl, [Input-HR-1]
- Rotherham Engineering Steels, [ETSU-CS-263]
- Stahlwerke Thueringen [StuE-118-2]
- Nippon Steel Corporation Oita Works
- Sıcak şarj uygulaması - <https://www.psimetals.de/en/met-metals-software/hot-savings-with-hot-charging/>

Türkiye’de direkt şarj uygulayan bir tesis bulunmaktadır. Sıcak şarj konusunda ise Erdemir ve İsdemir’de başarılı örnekler bulunmaktadır.

2.1.g. Direkt şerit döküm teknolojilerinin geliştirilmesi

Dünya’da Thyssen, CSM, Krupp, Nippon Steel, Mitsubishi, BHP, Hitachi, Posco gibi büyük demir çelik üreticilerinin direkt şerit döküm konusunda çalışmaları bulunmaktadır. RWTH Aachen Üniversitesi Metal Şekillendirme Enstitüsünde Şerit Döküm için bir araştırma grubu bulunmakta ve burada elektrik sacları, feritik ve ostenitik paslanmaz çeliklerin üretimi konusunda çalışmalar yapılmaktadır³. Laboratuvar ve pilot çaptaki çalışmaların devam ettiği bu uygulamayla bilindiği kadarıyla henüz bu konuda ticari bir üretim gerçekleştirilmemiştir.

D. Ar-Ge ve Yenilik Sürecinde Biraraya Gelmesi Gereken Disiplinler ve Sektörler

2.1.a. Reküperatör veya Rejeneratif brülörlerin geliştirilmesi

Metalurji ve Malzeme Mühendisleri, Makine Mühendisleri, Kimya Mühendisleri, Tasarımcılar, Demir-Çelik Sektörü, Üniversiteler, Araştırma Kurumları, Enerji Grupları, Özel sektör firmaları ve kamu kuruluşları biraraya gelerek çalışmalıdırlar.

³ <https://www.ibf.rwth-aachen.de/cms/IBF/Forschung/Arbeitsgruppen/~peps/Bandgiessen/?lidx=1>

2.1.b. Kesintisiz şerit üretimi çalışmalarının geliştirilmesi

Çelik malzemeler ve üretim prosesleri konusunda deneyimli ve uzmanlaşmış Metalurji, Makine, Elektrik, Otomasyon ve Yazılım mühendisi gibi farklı disiplinlerden uzmanlara ihtiyaç duyulacaktır. Çalışmaların hızlanması için yurtdışında bu konuda uzmanlaşmış kişilerden destek alınmalıdır. Bu konuda çalışan yurt araştırma kurumlarına ve üniversitelere araştırmacı olarak Yüksek Lisans, Doktora ve Doktora Sonrası uzmanlık için burslu öğrenci gönderilmelidir.

Büyük demir ve çelik kuruluşları, Makine İmalat Sektörü, TÜBİTAK Araştırma Merkezi/Enstitüleri ve Üniversiteler bu konuda yapılacak çalışmalara katkıda bulunabilir.

2.1.c. Haddelenecek konvansiyonel üretim teknikleri yerine yenilikçi üretim tekniklerinin (*Direkt Haddelenecek, Termomekanik Haddelenecek, Normalizeli Haddelenecek, Ferritik Haddelenecek, Direkt Su Verme Temperleme*) geliştirilmesi, uygulanması ve yaygınlaştırılması

Bahsi geçen teknolojik ilerlemeler için demir-çelik üretim konusunda uzmanlaşmış Metalurji Mühendisleri, Makine Mühendisleri, Elektrik, Otomasyon Mühendisleri ve Yazılım Mühendislerinin bir arada çalışması gerekmektedir.

Büyük demir ve çelik kuruluşları, Makine İmalat Sektörü, TÜBİTAK Araştırma Merkezi/Enstitüleri ve Üniversiteler bu konuda yapılacak çalışmalara katkıda bulunabilir.

2.1.d. Sıcak haddelenecek yarı mamullerin yüzey işlemleri için alternatif yenilikçi ve çevreci teknolojilerin geliştirilmesi, kullanılması ve yaygınlaştırılması

Slabların taşlama ile yüzeylerinin iyileştirilmesi için bu sektörde çalışmış, deneyimli Metalurji Mühendisleri, Makine Mühendislerinin bir arada çalışması gerekmektedir.

Uzun ve yassı çelik üretimi yapan çelik kuruluşları, TÜBİTAK Araştırma Merkezi/Enstitüleri ve Üniversiteler bu konuda yapılacak çalışmalara katkıda bulunabilir.

2.1.e. Ürünün oksidasyon ve korozyon direncinin artırılmasına yönelik yenilikçi ve çevreci metalik ve organik/inorganik kimyasal kaplama proseslerinin geliştirilmesi

Metalurji ve Malzeme Mühendisleri, Makine Mühendisleri, Kimya Mühendisleri, Kimya Bölümü, Demir-Çelik Sektörü, Metal kaplama sektörü, Kimya sektörü, Üniversiteler, Araştırma Kurumları, Özel sektör firmaları ve kamu kuruluşları biraraya gelerek çalışmalıdırlar.

2.1.f. Direkt şarj, sıcak şarj gibi tekniklerin geliştirilmesi ve yaygınlaştırılması

Bahsi geçen teknolojik ilerlemeler için demir-çelik üretim konusunda uzmanlaşmış Metalürji Mühendisleri, Makine Mühendisleri, Elektrik, Otomasyon Mühendisleri ve Yazılım Mühendislerinin bir arada çalışması gerekmektedir.

Demir-Çelik sektörü, Makine İmalat Sektörü, Üniversiteler ve Araştırma Kurumları yapılacak çalışmalara katkıda bulunabilir.

2.1.g. Direkt şerit döküm teknolojilerinin geliştirilmesi

Bahsi geçen teknolojik ilerlemeler için demir-çelik üretim konusunda uzmanlaşmış Metalürji Mühendisleri, Makine Mühendisleri, Elektrik, Otomasyon Mühendisleri ve Yazılım Mühendislerinin bir arada çalışması gerekmektedir.

Demir-Çelik sektörü, Makine İmalat Sektörü, Üniversiteler ve Araştırma Kurumları yapılacak çalışmalara katkıda bulunabilir.

E. Ar-Ge, Yenilik, Demonstrasyon İşbirliği Modeli ve Destek Mekanizması

2.1.a. Reküperatör veya Rejeneratif brülörlerin geliştirilmesi

Orta ölçekli Ar-Ge ve Yenilik Projeleri desteklenmelidir.

2.1.b. Kesintisiz şerit üretimi çalışmalarının geliştirilmesi

Büyük ölçekli Ar-Ge ve Yenilik Projeleri desteklenmelidir. Yeni tesisler kurulmasına ilişkin yatırım desteği gerekmektedir.

2.1.c. Haddelenecek yarı mamullerin yüzey işlemleri için alternatif yenilikçi ve çevreci teknolojilerin geliştirilmesi, kullanılması ve yaygınlaştırılması

2.1.d. Sıcak haddelenecek yarı mamullerin yüzey işlemleri için alternatif yenilikçi ve çevreci teknolojilerin geliştirilmesi, kullanılması ve yaygınlaştırılması

2.1.e. Ürünün oksidasyon ve korozyon direncinin artırılmasına yönelik yenilikçi ve çevreci metalik ve organik/inorganik kimyasal kaplama proseslerinin geliştirilmesi

2.1.f. Direkt şarj, sıcak şarj gibi tekniklerin geliştirilmesi ve yaygınlaştırılması

2.1.g. Direkt şerit döküm teknolojilerinin geliştirilmesi

Büyük ölçekli Ar-Ge ve Yenilik Projeleri desteklenmelidir.

F. Zaman Boyutu

(Kısa Vade: 1-3 yıl, Orta Vade: 3-5 yıl, Uzun Vade: 5 yıldan fazla)

2.1.a. Reküperatör veya Rejeneratif brülörlerin geliştirilmesi

Kısa Vade

2.1.b. Kesintisiz şerit üretimi çalışmalarının geliştirilmesi

Uzun Vade

2.1.c. Haddelenecek yarı mamullerin yüzey işlemleri için alternatif yenilikçi üretim tekniklerinin (*Direkt Haddelenecek, Termomekanik Haddelenecek, Normalizeli Haddelenecek, Ferritik Haddelenecek, Direkt Su Verme Temperleme*) geliştirilmesi, uygulanması ve yaygınlaştırılması

Orta vade

2.1.d. Sıcak haddelenecek yarı mamullerin yüzey işlemleri için alternatif yenilikçi ve çevreci teknolojilerin geliştirilmesi, kullanılması ve yaygınlaştırılması

Kısa Vade

2.1.e. Ürünün oksidasyon ve korozyon direncinin artırılmasına yönelik yenilikçi ve çevreci metalik ve organik/inorganik kimyasal kaplama proseslerinin geliştirilmesi

Kısa Vade

2.1.f. Direkt şarj, sıcak şarj gibi tekniklerin geliştirilmesi ve yaygınlaştırılması

Orta Vade

Ticarileşmiş uygulama teknikleri olduğundan özellikle çelikhane ve haddehane tesisleri arasında lojistik imkanı kolay, yerleşim planı uygun olan ve aynı tip nihai mamülleri seri olarak imal eden üreticilerde uygulanabilir.

2.1.g. Direkt şerit döküm teknolojilerinin geliştirilmesi

Uzun Vade

G. Teknolojik İlerlemenin Sağlanması İçin Kritik Hususlar

Konulara hedefli destek çağrılarının açılması, Sanayi-Üniversite işbirliklerinin artırılması ve projelerin desteklenmesi gerekmektedir.

Teknik Altyapılar

Ekipman tasarımı, yerleşimi ve yatırımlar sonrasında yerli üretim, test ve sertifikasyon kaynakları yeterlidir.

Destek ve Teşvikler

Büyük ölçekli projelerde ekipman ve teknolojik yatırım teşviklerine ihtiyaç duyulmaktadır.

Referanslar

- [1] Merigo, A., Anelli, E., Folgarait, P. 2005. “New thermo-mechanically processed wire rods for drawing and cold heading applications (Thermorod), Publications Office”.
- [2] <https://uslular.wordpress.com/haddeleme/>.
- [3] Appell, B., Wallner, G. 1979. “Ferrite Rolling”, *Metals Technology*, 6:1, 369-373.
- [4] Marchi, C. S., Ronevich, J. A. November 2022. “Fatigue and Fracture of Pipeline Steels in High-Pressure Hydrogen Gas”, Conference: ASME 2022 Pressure Vessels & Piping Conference, DOI:10.1115/PVP2022-84757.
- [5] Kalan, F. “Corrosion and High Temperature Oxidation Behavior of Structural Steels Coated with Aluminum Alloys”.
- [6] Tepe, B., Gunay, B. 2008. “Evaluation of pre-treatment processes for HRS (hot rolled steel) in powder coating”, *Progress in Organic Coatings*. 62. 134-144. 10.1016/j.porgcoat.2007.10.004.
- [7] Rausch, W. 1990. “The Phosphating of Metals” ASM International, Finishing Publication Ltd.
- [8] Birks, N., Meier G. H. 1983. “Introduction to High Temperature Oxidation of Metals” (Edward Arnolds Publications Ltd.
- [9] <https://www.kyoeisteel.co.jp/en/csr/esg/environment.html>
- [10] ISIJ International, Vol. 55 (2015), No. 9, pp. 1816–1821.
- [11] Control of Steel Plant Scarfing Emissions Using Wet Electrostatic Precipitators, U.S. Environmental Protection Agency, September 28, (2012).
- [12] Avrupa Birliği, Demir Haddeleme Prosesinde Mevcut En İyi Teknikler Referans Dokümanı (2001).
- [13] Ge, S., Isac, M., Guthrie, R.I.L. 2013. “Progress in Strip Casting Technologies for Steel; Technical Developments”, *ISIJ International*, Vol. 53, No. 5, pp. 729–742.
- [14] <https://www.dierk-raabe.com/sustainable-steel-production-strip-casting-of-steel/>
- [15] Hohenbicher, G., Tolve, P., Capotosti, R., Damasse, J.M., AlbrechtFruh, U. 2002. “EUROSTRIPs Direct Strip Casting of Carbon and Stainless Steels? Latest Results from Terni and Krefeld. Proc. 4th European Continuous Casting Conference”, Birmingham, England, IOM Communications, Vol. 2, pp. 869–881.
- [16] <https://www.bcsmuhendislik.com/portfolio/rejeneratif-brulor-ve-yakma-sistemleri-bcs-enerji-muhendislik/>
- [17] <http://www.iipinetwork.org/wp-content/letd/content/regenerative-burners-reheating-furnaces.html>
- [18] <https://tr.steelorbis.com/celik-haberleri/guncel-haberler/arcelormittal-brazil-kutuk-taslama-makinesi-siparis-etti-1246172.htm>
- [19] <https://www.spiperformancecoatings.com/product/eoncoat-cr-alloyed-coating-for-steel/>
- [20] <https://www.spiperformancecoatings.com/media/EonCoat-brochure.pdf>

Teknolojik Hedef 3:

**HURDADAN ÇELİK ÜRETİMİ – ELEKTRİKLİ ARK OCAĞI,
İNDÜKSİYON OCAĞI VE POTA OCAĞI FIRINLARI**

Hurdadan çelik üretiminde elektrikli ark ocağı, indüksiyon ocağı ve pota ocağının verimliliğinin artırılması ve karbon ayak izinin azaltılmasına yönelik teknolojilerin ve uygulamaların geliştirilmesi

Kritik Ürün/Teknoloji 3.1.

3.1. Hurda ayıklama ve hazırlama proseslerinin iyileştirilmesine yönelik yöntemlerin ve uygulamaların geliştirilmesi

Öncelikli Ar-Ge ve Yenilik Konuları

3.1.a. Hurda temizleme ve ayıklama proseslerinin ve uygulamalarının geliştirilmesi ve çelik hurdadan, bakır, kalay ve diğer problemli elementlerin kontaminasyonunun giderilmesine yönelik çalışmaların gerçekleştirilmesi

Kritik Ürün/Teknoloji 3.1.

3.1. Hurda ayıklama ve hazırlama proseslerinin iyileştirilmesine yönelik yöntemlerin ve uygulamaların geliştirilmesi

A. Teknik Açıklamalar, Yenilikçi Özellikler, Hedeflenen Performans ve Metrikler

Elektrik Ark Ocak(EAO/EAF)'ları için ana hammadde, çelik fabrikalarında proses sırasında açığa çıkan hurdalar, çelik ürün üreticilerinden (örneğin araç üreticileri) gelen kesilmiş parçalar ve tüketim sonrası demir hurdalardır (örneğin ömrünü tamamlamış ürünler). Doğrudan indirgenmiş demir (DRI), düşük gang içeriği, değişken hurda fiyatları ve daha düşük istenmeyen metal içeriği (örneğin Cu) nedeniyle hammadde olarak giderek daha fazla kullanılmaktadır. Ferroalyajlar, nihai çelikte istenen demir dışı metal konsantrasyonlarını ayarlamak için daha çeşitli miktarlarda ilave hammadde olarak kullanılmaktadır [1].

Hurdanın yeni demir ve çelik ürünlerinde geri dönüştürülmesi avantajlıdır, çünkü demir cevherinden (demir oksit) metalik bir ürün elde etmek için, bunun genellikle oksijeni uzaklaştıran ve demiri izole eden kömürle yüksek sıcaklıklarda reaksiyona sokulması gerekir. Bu işlem çok yüksek bir enerji harcamasına sahiptir, fırının belirli bölgelerinin 2000 °C üzerine çıkması gerektiğinden; işlem birçok gaz, partikül, katı atık (cüruf) ve sıvı halde pik demir üretir. Hurdadan çelik üretmek için, genel anlamda sadece hurdayı ergitmek (~2000 °C) ve bileşimi ayarlamak gerekmektedir.

Enerji harcaması ile ilgili olarak, hurdadan bir kilogram metal elde etmek için cevherden bir kilogram çelik üretiminde tüketilen tüm enerjinin sadece 2/3'üne ihtiyaç duyulduğu tahmin edilmektedir. Diğer ilginç noktalar ise, cevherden çelik üretimi ile karşılaştırıldığında hurdanın geri dönüştürülmesi sonucunda oluşan partikül maddenin sadece %3'ünün ve katı atığın %30'unun oluşmasıdır. Ayrıca azotlu ve kükürt bileşiklerinin daha az gaz emisyonları ile artılacak, daha basit sıvı atıklar elde edilmektedir.

Çelik hurdası, hurdanın görsel olarak sınıflandırılmasını zorlaştıran büyük kamyonlarla çelik fabrikalarına gelmektedir. Yük optimizasyonu nedeniyle genellikle ağır hurdalar alta, küçük ve karışık hurdalar ise üzerine yerleştirilir. Bu, sevk edilen hurda tipini ve görünür yükün altında kalan malzeme tipini doğrulamayı zorlaştırır. Ayrıca tamamen kişisel ve finansal faktörler de sınıflandırmayı yapan kişileri etkileyerek hurda alımında maddi kayıplara yol açabilmektedir. [2].

Dünyada ve ülkemizde çelik üretmek için (Bazik Oksijen Fırını -BOF veya EAF) gerekli olan hurda kaynakları ve hurda arzı sonsuz değildir ve sınırlıdır. Endüstriyelleşme arttıkça

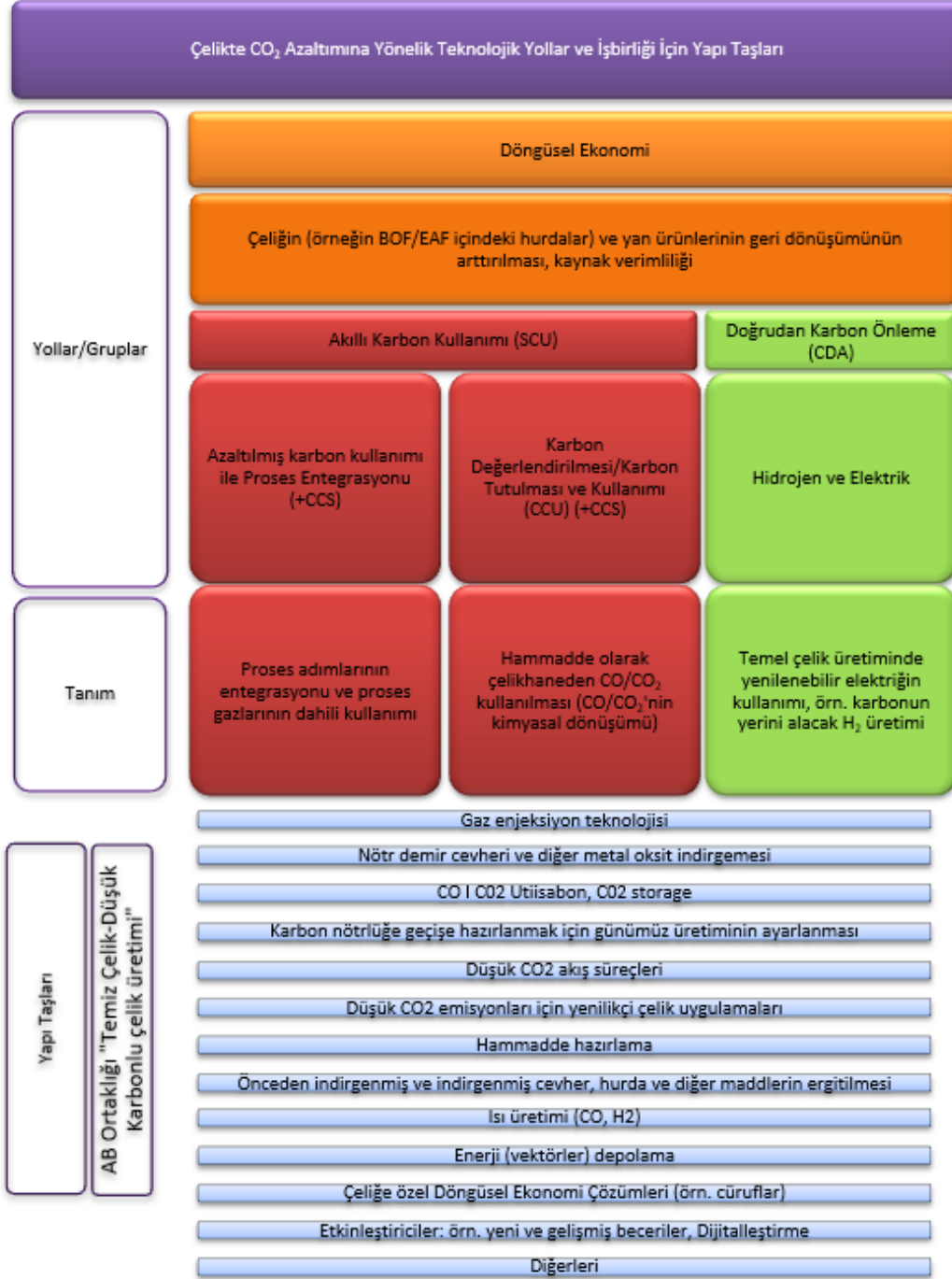
kontamine hurdalar ortaya çıkacaktır. Otomotiv ve beyaz eşya hurdaları artacaktır ve bu şekildeki hurdalarda bakır ve kalay artacaktır. Maliyet unsuruna göz atarsak, hurda fiyatlarının arz-talep prensibine göre belirlenmesinden dolayı, demir-çelik üreticilerimiz çoğu zaman fiyat makasında kalmaktadır ve zarar etmektedirler. Bu açıdan da sürdürülebilir değildir. Mutlaka çelik üretiminde çeşitli hurda kaynaklarından gelen ve birincil elden temizlenmeleri oldukça zor ve pahalı olan, daha da önemlisi cürufa alınarak metalürjik olarak giderilemeyen bakır ve kalay gibi istenmeyen elementlerin yerine DRI tesisleri kullanılarak sürdürülebilir bir çözüm üretilmelidir. [3–5]

Hurdanın yeşil ekonomiyle birlikte önemi daha da artmıştır. Hurda ile çelik üretimde dışa bağımlı olan bir ülke olan Türkiye'nin bu durumdan olumsuz etkilenebileceği öngörülmektedir. Ticaret savaşlarının yeni bir versiyonu olarak hurda savaşlarının gelecek yıllarda gündeme oturabileceği düşünülmektedir. Hurdaya ulaşımın zorlaşacağı ve hurda kalitesinin düşme eğilimi göstereceği beklendiğinden bu tip proseslerin geliştirilmesine ihtiyaç duyulacaktır.

Küresel çelik üretiminin % 75 civarı karbon emisyonu yüksek olan bazik oksijen fırınlarında gerçekleşirken, % 25 civarı ise elektrik ark ocaklarında üretilmektedir. Türkiye'deki ham çelik üretiminde ise bu oran tam tersidir. Dolayısıyla mevcut durumda Türkiye, ağırlıklı olarak daha temiz demir-çelik üreten bir teknoloji ile üretim yapmaktadır ve emisyon oranları göreceli olarak daha düşüktür. Bu durum, Türkiye için ciddi bir avantaj olarak gözükse de Türkiye, gelişmiş ekonomiler gibi yeterli hurda üretebilen bir ekonomi olmadığından, üretimde kullanılan hammaddenin neredeyse % 80'ini ithal etmektedir.

Çelik üretimi bağlamında, AB'de iklim değişikliği ve sürdürülebilir büyümenin zorluklarıyla mücadele etmek için tasarlanan Temiz Çelik Ortaklığı (CSP) tarafından Yeşil Büyüme'ye önemli bir katkı sağlanmaktadır. Ortaklığın genel amacı, AB çelik üretiminden kaynaklanan CO₂ emisyonlarını 2050 yılına kadar 1990 seviyelerine kıyasla % 80-95 oranında azaltacak ve sonuçta iklim nötrlüğüne yol açacak teknolojileri geliştirmektir.

Bu nedenle CSP, altı farklı müdahale/yenilik alanında çözümler sağlamak için Ar-Ge faaliyetlerini özetleyen 12 teknolojik yapı taşı (BB) önererek çelik sektöründen karbon ve CO₂ emisyonlarının azaltılmasının desteklenmesine odaklanmıştır. Bunlar Şekil 3.1'de gösterilmektedir [6].



Şekil 3.1 Temiz Çelik Ortaklığının Teknoloji Yoluyla eşlenen Yapı Taşları [6]

Çelik üretim uygulamasında fiziksel ya da kimyasal açıdan istenilen özellikteki hurdanın elde edilebilmesi için çeşitli özelliklere sahip hurdalar karıştırılır (paçal yapma). Burada önemli olan parçaların değil, istenilen kalitede çelik üretimi için gerekli olan karışımın bütünsel özelliğidir. Kaliteli mamül elde edebilmek için, hammadde olarak kullanılan hurdaların içindeki bakır, kalay, nikel, krom, molibden gibi elementlerin çok düşük seviyelerde olması gerekmektedir.

Ancak genelde mevcut hurda kaliteleriyle istenen mamul kalitesine ulaşamadığından, mevcut demir çelik işletmelerinde hurda ayıklama ve hazırlama üniteleri ve prosesleri vardır; ancak bu proseslerin değişen şartlara göre iyileştirilmesine ihtiyaç bulunmaktadır. Ayrıca mevcut en iyi teknikler üzerinde çalışılarak yeni yöntemlerin ve uygulamaların geliştirilmesi ve yaygınlaştırılması gerekmektedir. Bunun yanında hurdaya göre daha kararlı bir bileşime sahip olan sünger demir (direkt indirgenmiş demir) kullanımına yönelmesi zorunluluktur. Hurda kaynaklarının artmadığı düşünülduğünde, sünger demir kullanım oranının uzun vadede artması beklenmektedir.

Hurda ile üretim yapan EAF tesislerinde, yassı ürünlerin de üretileceği öngörülmektedir. Hurdanın bakır impüritesinin yüksek olması ürün kalitesini bozacağından; yassı ürünlerde istenen kaliteyi düşüreceği ve üretimi zorlaştıracığı öngörülmektedir ve bu durum Türkiye için sürdürülebilir değildir. Bu açılarla Türkiye bakır ve kalay impüritelerini dengelemek için, birincil kaynakları kullanarak üretilen EAF şarj malzemesi olarak DRI (Direct Reduced Iron) ve HBI (Hot Bricketed Iron) üretme projelerini acil olarak gündeme almalıdır.

ÖNCELİKLİ AR-GE VE YENİLİK KONULARI

3.1.a. Hurda temizleme ve ayıklama proseslerinin ve uygulamalarının geliştirilmesi ve çelik hurdadan, bakır, kalay ve diğer problemlili elementlerin kontaminasyonunun giderilmesine yönelik çalışmaların gerçekleştirilmesi

Hurda metal normalde açık havada, büyük, üzeri örtülmemiş ve genellikle asfaltlanmamış bir zeminde depolanır. Demirli hurda metal, mıknaatıslar veya kepçelerle sepetlere yüklenir. Hurda, metalik olmayan kalıntıları en aza indiren belirli uluslararası spesifikasyonlara göre satın alınır. İşleme; taş, ahşap veya demir dışı metaller gibi manyetik olmayan herhangi bir hileli malzemenin sürece girmesini en aza indirir. Metal depolama ve tasnif operasyonları sırasında bazı hurda türleri ve kaliteleri, ağır metallerin ve hidrokarbonların yanı sıra artık malzemelerin zeminde birikmesine neden olabilir.

Ayırma operasyonları, işlenmekte olan hurdanın cinsine ve kalitesine bağlı olarak belirli hava koşullarında inorganik (toz) ve organik emisyonlara da yol açabilmektedir. Bazı hurda türleri de ayırma sırasında gürültü emisyonlarına neden olabilir [1].

Tehlikeli kirleticilerin dahil edilmesi riskini azaltmak için bazı hurda tasnif işlemleri gerçekleştirilir. Şirket içinde üretilen hurda, oksijen püskürtme kullanılarak yönetilebilir boyutlarda kesilebilir. Hurda, hurdalıkta yükleme sepetlerine yüklenebilir veya ergitme atölyesi içindeki geçici hurda bölmelerine aktarılabilir.

Stokta bulunan hurda malzemeler iki temel sebepten dolayı sınıflandırılır.

- Hurda malzemeler içerisindeki alaşım elementlerini korumak.
- Üretilmesi istenen malzemenin kimyasal bileşimini sağlamak.

Çeşitli bileşimlere sahip kaliteli çelik üreten fabrikaların yapacağı gruplandırma ile hep aynı çelik üreten fabrikanın yapacağı gruplandırma arasında farklılıklar vardır. Çeşitli kimyasal bileşimlere sahip çelik üretimi yapan fabrikaların gruplandırma sistemi çok daha karmaşıktır ve çok fazla sayıda grup vardır.

Çok farklı kullanım alanlarından temin edilmiş çok çeşitli malzeme türlerinin bir karışımı olan hurda malzemeler, malzeme bileşimleri ve bileşimindeki elementleri doğrultusunda gruplandırılır. Bu gruplandırma işlemi yapılırken hurda malzemelerin fiziksel özelliklerinin de göz önünde bulundurulması gerekir. Fiziksel özelliklerinin de göz önünde bulundurulduğu gruplandırma ile şarj sepetlerinin yüklenmesi kolaylaşmış olur.

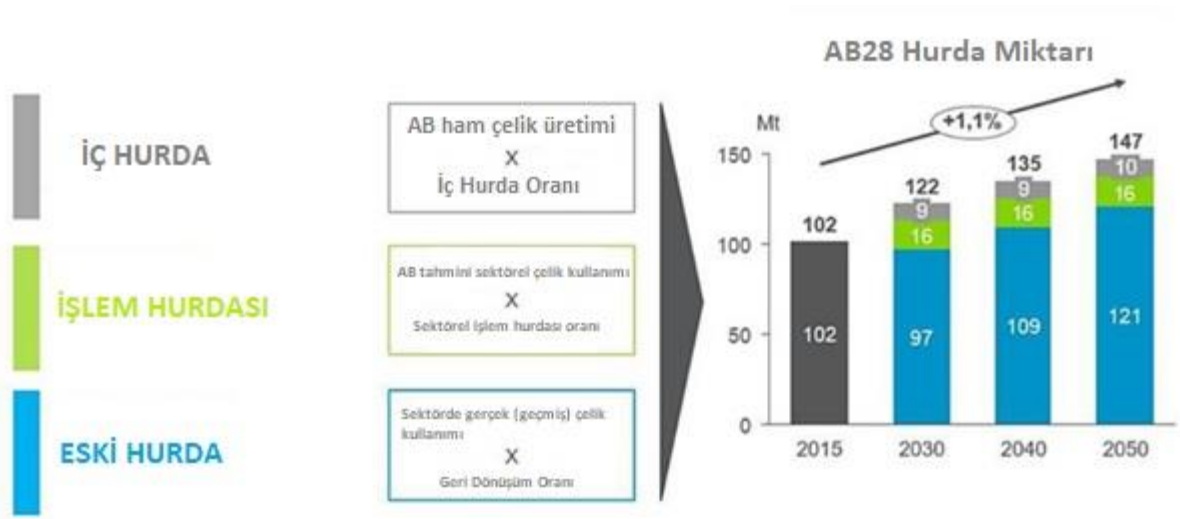
Bu gruplandırma ve depolama işlemlerine gerekli özen gösterilmemesi durumunda, nikel, kalay ve bakır gibi sıvı çelik banyo içinde sıvıdan ayrıştırılamayan elementler çelik bileşimi içerisine girebilir ve çelikten beklenen özelliklerde değişimlere neden olabilir [3].

Türkiye’de faaliyet gösteren tüm demir-çelik fabrikalarında üretimde yerli piyasadan ve/veya yurtdışından ithal temin edilen hurda kullanılmaktadır. Hurdalar tesislere geldiğinde işçi sağlığı ve iş güvenliği, proses güvenliği ve çevre mevzuatları açısından temizleme ve ayıklama işlemlerinden geçirilmek zorundadır.

Çeliğin kalitesi çelik hurdanın kimyasal özellikleri yani hurda içindeki elementlerin (krom, nikel, molibden, bakır, kalay, kurşun, çinko, fosfor ve sülfür gibi) miktarına bağlı olarak değişir. Kükürt, fosfor, molibden ve mangan üretim yöntemi ve kullanılan cevherden ötürü çeliğin yapısında bulunur ve çeliğin kalitesinin belirlenmesinde önemli olan elementlerdir. Kalay ve çinko kaplama amaçlı, bakır ve kurşun da otomobil gibi çelik ürünlerinde kullanılmaktadır. Hurda, odun parçaları, plastik, kauçuk, toprak, yağ vb gibi kirliliklerden arındırılmış olmalıdır. Bunlar çelikteki fosfor ve sülfür oranını artırır, elektrik ark ocaklarında hasara neden olabilir, metalik olmayan materyaller iletken değildir ve elektrod kırılmasına sebep olabilirler. Ürünler ve enerji tüketimi bundan etkilenebilir. Her bir çelik kalitesinin belirti bir analiz aralığı bulunmaktadır. Problemler bazı elementlerin varlığı durumunda üretilen çelik ürünü kullanılamaz olmaktadır ve divert edilmekte yada farklı bir kaliteye saptırılmaktadır. Bu durum enerji, maliyet ve verimsizliklere neden olmaktadır.

Dolayısıyla mümkün olduğu kadar hem çelik üretiminde kirlilik (emprüte) olarak kabul edilen bu elementlerin azaltılması hem de çelik kalitesinin iyileştirilmesi için öncelikli olarak bakır ve kalayın hurdadan temizlenmesi gerekmektedir.

EUROFER, hurdanın CO₂ emisyonlarının azaltılmasına yönelik AB çelik stratejisinde daha önemli bir rol oynayacağını tahmin etmektedir. Yapılan çalışmaya göre 2050'ye doğru kullanılabilirliği, iç hurda, işlem hürdası ve eski hurda kaynağı modellenmiş ve hurda bulunabilirlik modelinin sonuçları Şekil 3.2'de gösterilmektedir. İç hurda ve işlem hürdasının payını koruması beklenirken, eskimiş hurdanın artarak hurda bulunurluğunda küresel bir artışa yol açacağı tahmin edilmektedir [6].



Şekil 3.2 Kaynağa göre milyon ton olarak hurda kullanılabilirliği [6]

Özellikle eski hurda karakteristiğinin önemli ölçüde değişeceği ve kullanılabilir demir esaslı malzemenin karmaşıklığının ve heterojenliğinin artması (örneğin çeliğin plastik ve liflerle kombinasyonu, daha karmaşık bağlantılar, teknik kaplamalar, vb.) ve tekrarlı geri dönüşüm sayısının da artması ile hem kalitesinde hem de geri dönüşüm oranında düşüş beklenmektedir [6].

Düşük kaliteli veya eski hurda kullanımının artmasının, tüketim mallarının daha karmaşık hale gelmesinin (arabaların giderek daha fazla elektronik cihaz içermesi, hurdada daha fazla bakır oluşmasına neden olması gibi), tekrarlanan geri dönüşümün çelik üretim sürecine daha yüksek seviyelerde artık kirlilik elementlerinin girmesine yol açtığı akılda tutulmalıdır. Bu nedenle, demir dışı metaller gibi kaçak elementlerin varlığı, belirli çelik kalitelerinin üretimi için demir hurda kullanımını sınırlayabilir. Bu konuyla ilgili araştırma çabaları gereklidir, çünkü daha önce de belirtildiği gibi, düşük kaliteli hurda akışları, bir bütün olarak çelik üretiminin çevre dostu geçişini destekleyen temel unsurlardan biridir. Özellikle, elektrikli çelik üretim süreçlerinde

hurda ayırma, ön işlem, karakterizasyon, saha yönetimi ve alternatif demirli malzeme kullanımı için stratejiler gereklidir [6].

Türkiye çelik hurdasında dışa bağımlı bir ülkedir ve hurdada yaşanacak arz sıkıntısı teknoloji avantajını yok edecektir. Önümüzdeki dönemde Türkiye bu duruma mutlaka alternatifler geliştirmek zorundadır. Üretimin devamlılığı için yerli ve ithal temin edilecek hurdalarda yaşanabilecek kalite problemleri için hazırlık yapma zorunluluğu vardır. Çelik hurdalarının içinde bulunan bakır, kalay, nikel ve molibden, krom, manganez, çinko ve kurşun, alüminyum, silisyum ve titanyum vb. elementler çelik kalitesi üzerinde olumsuz etkilere sahiptir. Hurda içinde bu elementlerin bir veya birkaçının konsantrasyonunun yüksek olması bazı çelik kalitelerinin üretiminin önünde engel oluşturmaktadır. Bu nedenle, özellikle yüksek saflık gerektiren talepleri karşılamakta ikincil üretim yetersiz kalmaktadır. Özel alaşım elementlerinin ve kalıntıların geri dönüşüm süreci üzerinde etkilerini, bunları metalden ayırma mekanizmaları ve maliyet ile rekabet ilişkileri üzerine çalışma yapılması gerekmektedir.

Çelik hurdasının etkili bir şekilde sınıflandırılması ve değişkenliğinin uygun şekilde yönetilmesi gereklidir. Bu, aşağıdaki beş temel hususa odaklanarak yapılabilir.

- i. Hurdanın geliştirilmesi (temizlik, boyut kontrolü, kontamine elementlerin uzaklaştırılması), standardizasyon ve pazar iyileştirme

Çelik fabrikalarında ve hurda geri dönüşüm tesislerinde daha verimli ve çelik sektörünün ihtiyaçlarına daha uygun yeni hurda işleme teknikleri geliştirilmeli ve (bireysel veya entegre olarak) uygulanmalıdır. Ayrıca, demirli geri dönüştürülmüş malzemelerdeki örneğin Cu gibi istenmeyen elementlerin parçalayıcı hurdadan fiziksel-mekanik yollarla uzaklaştırılması için yeni endüstriyel çözümler geliştirilmelidir.

Ayrıca hurdanın kalite özelliklerine göre standart tanımı iyileştirilmeli: menşei, tipolojisi, kontamine element içerikleri gibi bilgiler paylaşarak bilinmelidir. Bu nedenle, dijital dönüşüm trendlerini takip ederek, satın alma aşamasında müzakereyi şeffaf hale getirmek için yeni yaklaşımların dikkate alınması gerekmektedir. Bu amaca ulaşmak için, eTicaret platformu tarafından desteklenen, kendi kendini yöneten bir hurda piyasası, kaynak piyasalarının genel eğilimi ile uyumlu olmalıdır.

- ii. Demir esaslı malzemelerin karakterizasyonu

Hem menşe hem de varış noktasında hurda kalitesinin yakından kontrolünün uygulanması, yüksek heterojenliği, büyük hacimler, farklı menşeler, farklı ön işlem süreçleri, harmanlama kalitesi, hurda tedarikçilerinde hurdanın karıştırılması vb. nedeniyle hurda özelliklerinin kontrolünde genellikle zorluklar yaratan çok karmaşık bir işlemdir.

Demir esaslı malzemelerin yerinde karakterizasyonu (kimyasal bileşim ve fiziksel özellikler) için yeni teknolojilerin geliştirilmesi gerekmektedir. Bu, tüm paydaşların hurda yönetimi uygulamalarını standartlaştırmasına yardımcı olmak için küçük numunelerin ve yüzey analiz yöntemlerinin yanı sıra toplu analiz ve tüm hurda teslimatının karakterizasyonunu içerir. Uzun vadede, farklı uluslararası hurda spesifikasyonlarını daha iyi tanımlamak için yeni metodolojiler türetilmelidir.

iii. Hurda/şarj malzeme yönetiminin dijitalleştirilmesi ve akıllı malzeme kullanımı

Mevcut şarj malzemelerinin kullanımında etkinliğin en üst düzeye çıkarılması amacıyla hurdalık yönetimi faaliyetlerini destekleyecek dijital sistem ve araçlar geliştirilmeli ve uygulanmalıdır. Bu, farklı hurda türlerinin ayrıntılı bir şekilde çeşitlendirilmesiyle birlikte hurdalıktaki şarj malzemelerinin mevcudiyetini takip eden hurdalık envanter sistemini içerir. Envanter veri tabanı, tesise her hurda teslimatı girdiğinde ve bir hurda sepeti yüklenip fıırına her yüklendiğinde otomatik olarak güncellenmelidir. Örneğin, görsel sistemler geliştirilme aşamasındadır ve bazıları, hurdayı sınıflandırmak ve hurda sahasında bulunup bulunmadığına bağlı olarak en iyi şarjı önermek için verileri AI ve ML uygulamalarını içermelidir. Bu bağlamda, EAF işleminde kullanılan farklı demirli malzemelerin gerçek "Kullanımdaki Değerini" değerlendirmek için yeni yöntemler de geliştirilmelidir.

iv. C/Fe kaynağı olarak endüstriyel artıkların zenginleştirilmesi

Önümüzdeki yıllarda farklı endüstriyel sektörlerde geliştirilecek olan yeni malzeme işlemleri, EAF çelik üretiminde C/Fe hammadde kaynakları olarak kabul edilebilecek kalıntılar üretecektir. Ancak, AB'nin farklı ülkelerindeki mevzuat göz önünde bulundurularak yan ürünlere dönüştürülme potansiyellerinin tam olarak uygulanabilmesi için bu kalıntıların analiz edilmesi gerekir.

v. EAF sürecinde alternatif demir ürünlerinin (HBI/DRI) optimize edilmiş kullanımı

DRI/HBI veya pik demir/sıcak metal gibi alternatif demir kaynakları, özellikle tüketici sonrası ve modası geçmiş hurdalar tarafından ortaya çıkan kontamine elementler gibi artan safsızlık içeriğini telafi etmek için kullanılabilir. Bununla birlikte, daha yüksek eritme enerji talebi, daha yüksek karbon içeriği ve bu alternatif şarj malzemeleri tarafından indüklenen daha yüksek miktarda EAF cürufu dikkate alınmalıdır [6].

B. Dünyada ve Türkiye’de Teknolojik Hazırlık Seviyeleri

3.1.a. Hurda temizleme ve ayıklama proseslerinin ve uygulamalarının geliştirilmesi ve çelik hurdadan, bakır, kalay ve diğer problemli elementlerin kontaminasyonunun giderilmesine yönelik çalışmaların gerçekleştirilmesi

Dünyada THS 7-8; Türkiye’de THS 2-3’tür.

C. Dünyada ve Türkiye’deki Mevcut Duruma İlişkin Başarılı Örnekler

3.1.a. Hurda temizleme ve ayıklama proseslerinin ve uygulamalarının geliştirilmesi ve çelik hurdadan, bakır, kalay ve diğer problemli elementlerin kontaminasyonunun giderilmesine yönelik çalışmaların gerçekleştirilmesi

i. Hurdanın geliştirilmesi (temizlik, boyut kontrolü, kontamine elementlerin uzaklaştırılması), standardizasyon ve pazar iyileştirme ile ilgili özellikle standardizasyon ve pazar iyileştirme konusunda belirgin çalışmalar bulunamamakla birlikte bu işlemlerin uygulanabilmesi ulusal ve uluslararası regülasyonlara ve standardizasyona bağlıdır.

ii. Son projelerde malzeme karakterizasyonu için çeşitli teknikler araştırılmıştır, bunlar;

- Lazer kaynaklı parçalanma spektroskopisi, LIBS (LCS [7] veya IPRO [8],
- Hızlı Gama Nötron Aktivasyon Analizi [9],
- Darbeli Hızlı Termal Nötron Aktivasyonu, PFTNA, Muons tomografisi [10]
- Ek olarak, yakın tarihli bir HORIZON 2020 projesi, yani REVaMP, yeni güçlendirme sistemlerinin geliştirilmesi, uyarlanması ve uygulanmasına odaklanmaktadır.

iii. Çelik üretim operasyonlarında hurdanın en iyi ve en ekonomik kullanımını arayan RFCS projelerine bazı örnekler: CONOPT SCRAP, FLEXCHARGE, AdaptEAF, SUPERCHARGE EAF ve OptiScrapManage [6]'dir.

iv. Hem hurda iyileştirme kalıntılarının hem de diğer endüstriyel kalıntıların zenginleştirilmesi hâlihazırda araştırılmaktadır; PROTECT, RIMFOAM veya URIOM, daha fazla iyileştirme için başlangıç noktası olarak değerlendirilebilecek son araştırmaların iyi örnekleridir [6].

v. Örneğin, LOWCNEAF, bu yaklaşımın uygulanmasıyla ilgili iyi bir proje örneğini temsil eder. Ancak, şu anda AB'de (yani Almanya ve İsveç'te) yılda yaklaşık 0,7 milyon ton toplam üretim

kapasitesine sahip yalnızca iki DR tesisi bulunmaktadır. Ek olarak, HYBRIT, H2H, SALCOS veya tkH2Steel projesi, hidrojen kullanan DRI ile ilgilidir [6].

Bunların yanında Primetals Technologies ve SICON firmaları ise, hurda ayıklama ile ilgili süreçleri otomatikleştirmek ve dijitalleştirmek için bir süredir özellikle çelik üreticileriyle iş birliği yapmaktadır. Üretilen çelik kalitelerine yönelik sürekli artan talepler nedeniyle, kimyasal saflık ve ön ayırmaya ek olarak, hurdadaki yabancı maddelerin optik olarak algılanması ve lojistik süreçlerin tam otomasyonu giderek daha önemli hale gelmektedir. İş birliğinin bir parçası olarak her iki şirket de artık komple hurda depolarının dijitalleştirilmesi için bütünsel çözümler geliştiriyor. Çözüm portföyü, hurdanın tesliminden ergitme ünitelerinin beslenmesine kadar tüm zinciri kapsar. Farklı modüller arasındaki arayüzler standardize edilmiştir. Veri ve bilgiler tüm çözümlerde kullanılabilir. Bu, çelik üreticilerine arayüzleri tanımlama ve programlamada ve uygulamayı koordine etmede zaman ve çaba tasarrufu sağlar. Proje gereksinimlerine bağlı olarak, bireysel modüller seçilebilir ve gerekirse daha sonraki bir tarihte eklenebilir.

Artan hurda kullanımı yoluyla CO₂'i azaltmaya yönelik önlemlerle bağlantılı olarak, özellikle çelik endüstrisinde bu tür çözümlere büyük ilgi var. Hurdadaki yabancı elementlerin optik tespiti ve hurda parçalarının eksiksiz optik ve kimyasal karakterizasyonu için değerli metal izabe tesislerine yönelik ilk ön projeler halihazırda yapım aşamasındadır [11].

Türkiye’de hurda elle ve manyetik ayırma ile ayrılmaktadır. Dolayısıyla hurda özelliklerini iyileştirmek için hurda ergiten firmaların öncelikle hurdayı parçalaması (shredding) ardında da daha önce bahsedilen çeşitli yöntemlerle ayırma işlemi yapması gerekmektedir.

D. Ar-Ge ve Yenilik Sürecinde Biraraya Gelmesi Gereken Disiplinler ve Sektörler

3.1.a. Hurda temizleme ve ayıklama proseslerinin ve uygulamalarının geliştirilmesi ve çelik hurdadan, bakır, kalay ve diğer problemlili elementlerin kontaminasyonunun giderilmesine yönelik çalışmaların gerçekleştirilmesi

Öncelikle hurda temizleme ve ayıklama prosesleri için özellikle demir-çelik üretim konusunda ve ileri karakterizasyon teknikleri (Lazer kaynaklı parçalanma spektroskopisi, Hızlı Gama Nötron Aktivasyon Analizi, Darbeli Hızlı Termal Nötron Aktivasyonu, vb.) konularında uzmanlaşmış Metalurji Mühendisleri, Kimya Mühendisleri, parçalama makinaları (shredder) konusunda uzmanlaşmış Makine Mühendisleri, algoritma ve derin öğrenme gibi konularda uzmanlaşmış, Matematik Mühendisleri ve/veya, Bilgisayar Mühendislerinin bir arada çalışmaları gerekmektedir. Bunun yanında çevresel konularda destek verecek tecrübeli Çevre mühendislerinin de tasarımda faydası bulunacaktır.

Bunun yanında DRI/HBI kullanımını için ise özellikle EAF ile demir-çelik üretimi ve hammadde harmanı hazırlama konusunda uzmanlaşmış Metalurji Mühendislerinin çalışması gerekmektedir. EAF kullanan demir-çelik üreticileri ile makine ve karakterizasyon cihazı yapan kuruluşların bir arada çalışması gerekmektedir. TÜBİTAK Araştırma Merkezleri/Enstitüleri, Üniversiteler, Demir-Çelik Üreticileri Derneği, Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı; Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı gibi paydaşların biraraya gelmesi gerekmektedir.

E. Ar-Ge, Yenilik, Demonstrasyon İşbirliği Modeli ve Destek Mekanizması

3.1.a. Hurda temizleme ve ayıklama proseslerinin ve uygulamalarının geliştirilmesi ve çelik hurdadan, bakır, kalay ve diğer problemlerli elementlerin kontaminasyonunun giderilmesine yönelik çalışmaların gerçekleştirilmesi

Büyük ölçekli Ar-Ge ve Yenilik Projeleri, özellikle devlet destekli projeler ve Avrupa'daki ülkeler ile işbirliği sağlanarak geliştirilmelidir.

F. Zaman ve Bütçe Tahminleri

(Kısa Vade: 1-3 yıl, Orta Vade: 3-5 yıl, Uzun Vade: 5 yıldan fazla)

3.1.a. Hurda temizleme ve ayıklama proseslerinin ve uygulamalarının geliştirilmesi ve çelik hurdadan, bakır, kalay ve diğer problemlerli elementlerin kontaminasyonunun giderilmesine yönelik çalışmaların gerçekleştirilmesi

Avrupa Birliği, EAF'de hurda kullanımında önemli bir artış sağlayan sağlam çözümlerin geliştirilmesi için toplam maliyetin 2030 yılına kadar yaklaşık 50 M€ olduğu tahmin etmektedir. Bu miktar, dikkate alınan zaman aralıklarında aşağıdaki gibi bölünmüştür:

- Kısa vadede proseslerin geliştirilmesi: 2021-2023 dönemi için 8 M€
- Orta vadede proseslerin pilot denemeleri: 2024-2025 dönemi için 17 M€
- Uzun vadede proseslerin endüstriyel olarak uygulanması: 2026-2030 dönemi için 25 M€

Ancak regülasyonların oluşturularak devreye alınması kısa vadede gerçekleşebilmekle beraber, önemli bir bütçe gerektirmeyen Ar-Ge faaliyetleriyle tamamlanabilirler.

G. Teknolojik İlerlemenin Sağlanmasında Kritik Hususlar

Mevzuat ve Yasal Düzenlemeler

Özellikle hurda temini ülkemiz için büyük bir problem teşkil etmektedir. Yerli ve ithal hurdaların yüksek oranda kirlilik içermesi ve bu kirliliklerin ülkemizde yalnızca elle ayıklama ile ayrılması sonucu EAF'larına çelik kalitesini proses parametrelerini kötü yönde etkileyecek element ve bileşikler şarj edilmektedir. Bu problemin önüne geçilebilmesi için hurda temini konusunda regülasyonlar getirilmesi ve kontrol edilmesi gerekmektedir.

Temiz atık çelik bulma sorunu ve bunun dış piyasadan temin ediliyor olması, Türkiye'de çeliğin temiz bir şekilde toplanması için bir sistem kurulması ihtiyacına işaret etmektedir. Bu da önemli bir çalışma konusudur. Çelik atıkların, yeniden kullanım/veya geri dönüşüme uygun şekilde toplanması için nasıl bir atık yönetim sistemi kurulması gerektiği ve bunun nasıl hayata geçirileceği bir süreç yönetimi problemi olarak çalışılmalı ve uygulanmalıdır.

MKE'ne bağlı Geri Dönüşüm İşletme Müdürlüğü'nün çelik hurdalarını satan ulusal veya uluslararası kuruluşları sertifikalandırması, temin edilen hurdalar örneklerini kontrol ederek kabul veya reddetmesi gibi düzenlemeler yapılabilir.

Bunun yanında hurdaların daha düzenli ve kontrollü toplanması, elleçlenmesi ve kullanıma hazır hale getirilmesi için "Hurda İhtisas Bölgeleri" nin oluşturulması önerilmektedir.

Teknik Altyapılar

Bu konuda alt yapı olmasına rağmen, daha da geliştirilmesi gerekmektedir.

İnsan Kaynakları

İlgili konuda yetkinliğe sahip insan kaynakları bulunmaktadır ancak konunun çalışılabilmesi için bir araya getirilmelidir.

Destek ve Teşvikler

Devlet kaynaklı teşvikler ve regülasyonlar sağlanarak entegrasyon sağlanabilir.

Kritik Ürün/Teknoloji 3.2.

3.2. Hurdadan çelik üretiminde alternatif hammaddelerin kullanılmasına yönelik yöntemlerin geliştirilmesi

Öncelikli Ar-Ge ve Yenilik Konuları

3.2.a. EAF ve İkincil metalurji uygulamalarında kok tozuna alternatif olabilecek hammaddelerin kullanılmasına yönelik çalışmaların gerçekleştirilmesi

3.2.b. Dolomit ve kireçtaşı yerine daha az CO₂ salımı olan alternatif cüruf yapıcılarının geliştirilmesine yönelik çalışmaların gerçekleştirilmesi

Kritik Ürün/Teknoloji 3.2.

3.2. Hurdadan çelik üretiminde alternatif hammaddelerin kullanılmasına yönelik yöntemlerin geliştirilmesi

A. Teknik Açıklamalar, Yenilikçi Özellikler, Hedeflenen Performans ve Metrikler

Fosil kömürün indirgeyici veya köpürtücü madde olarak değiştirilmesi, Temiz Çelik Ortaklığının teknoloji yol haritasında bulunmaktadır (Şekil 3.1). Karbon, elektrik ark ocaklarında ısı verici olarak kullanılmalarının yanında, elektrik enerjisi giriş verimliliğini en üst düzeye çıkarmak için cüruf köpürtme maddesi ve indirgeyici madde olarak kullanılmaktadır.

Kömür kullanımı, 10 kg/t çelik mertebesindedir. Kömür parça veya toz halinde şarj edilebilir ve toplam CO₂ emisyonunun yaklaşık %10'una katkıda bulunur.

EAF üretiminde fosil kömür kullanımının azaltılması, alternatif karbon içeren malzemeler kullanılarak gerçekleştirilebilir. Bunlar arasında biyokütle ile ısıl işleminden elde edilen kalıntıları; ayrıca polimerler, lastikler ve benzeri maddeler bulunmaktadır. Bununla birlikte, antrasit ile karşılaştırılabilir fiyatlara (150 €/t) sahip ürünler elde etmek ve şu anda bazı ülkelerde yaklaşık 300 €/ton maliyetle çöpe atılan düşük dereceli biyokütle kullanmak gereklidir. Ayrıca biyokütle ile beslenen gazlaştırma ve enerji santrallerinden de yan ürün olarak kalıntılar elde edilebilmektedir. Bu durumda çözülmesi gereken sorunlar, malzemenin mevcut miktarları ve toplanması, ön arıtma (genellikle ince toz halindedir) ve nakliye ile taşıma sırasında tutuşma ve patlama riskine ilişkindir.

Öte yandan, grafit elektrotlar, EAF çelik üretim sürecinin maliyetinin önemli bir bölümünü oluşturur ve CO₂ emisyonuna katkıda bulunur. Elektrot tüketimi iki türe ayrılabilir:

- Hava ve su buharı ile oksidasyonun neden olduğu yan kayıp;
- Metalde ve cürufta kırılma, pullanma, erozyon ve arkın yüksek sıcaklığından kaynaklanan süblimleşmeden kaynaklanan uç kaybı.

Grafit elektrot tüketiminin azalması ayrıca CO₂ emisyonunda faydalar sağlayabilir [6].

Tablo 3.1'de EAF'na beslenen şarj maddeleri ve elde edilen ürünler 1 ton sıvı çelik başına verilmektedir.

Tablo 3.1 1 ton sıvı çelik başına EAF şarj dengesi [1]

Giren			Çıkan		
Hammaddeler			Ürünler		
Metalik girdi:			Sıvı çelik (SÇ)	kg	1000
Hurda	kg/t	1039 –			
Pik demir	kg/t LS	0 – 153			
Sıvı sıcak metal (1)	kg/t LS				
DRI (HBI)	kg/t LS	0 – 215	Hava Emisyonları		
Kirec/Kirectası (²)	kg/t LS	25 – 140	Gaz Çıkışı	Milyon Nm ³ /h	1 – 2
Kömür (antrasit ve Kok dahil)	kg/t LS	3 – 28		Nm ³ /t LS	8000 – 10 000
Grafit Elektrot	kg/t LS	2 – 6	Toz	g/t LS	4 – 300
Refrakter astar	kg/t LS	4 – 60		mg/m ³	0.35 – 52
Alaşımalar:			Hg	mg/t LS	2 – 200
Karbon Çeliği	kg/t LS	11 – 40	Pb	mg/t LS	75 – 2 850
Yüksek alaşımlı ve Paslanmaz çelik	kg/t LS	23 – 363	Cr	mg/t LS	12 – 2 800
			Ni	mg/t LS	3 –
Gazlar			Zn	mg/t LS	200 – 24000
Oksijen	m ³ /t LS	5 – 65	Cd	mg/t LS	1 – 148
Argon	m ³ /t LS	0.3 – 1.45	Cu	mg/t LS	11 – 510
Azot	m ³ /t LS	0.8 – 12	HF	mg/t LS	0.04 – 15000
Buhar (³)	kg/t LS	33 – 360	HCl	mg/t LS	800 – 35250
Enerji			SO ₂	g/t LS	5 – 210
Elektrik	kWh/t LS	404 – 748 1454 – 2693	NO _x	g/t LS	13 – 460
Yakıtlar (doğal gaz ve sıvı vakıtlar)	MJ/t LS	50 – 1500	CO	g/t LS	50 – 4500
Su	m ³ /t LS	1 – 42.8	CO ₂	kg/t LS	72 – 180
			TOC	g C/t LS	35 – 260
			Benzen	mg/t LS	30 – 4 400
			Klorobenzenler	mg/t LS	0.2 – 12
			PAH (⁴)	mg/t LS	9 – 970
			PCB (⁵)	mg/t LS	0.01 – 5
			PCDD/F	g I-TEQ/t LS	0.04 – 6
			Üretim artıkları (atık/yan ürünler)		
			Fırından çıkan cüruf	kg/t LS	60 – 270
			Pota curufu	kg/t LS	10 – 80
			Tozlar	kg/t LS	10 – 30
			Atık Refrakterler	kg/t LS	1.6 – 22.8
			Ses	dB (A)	90 –

- (1) Sıcak metal sadece çok özel durumlarda kullanılır (yaklaşık 275 kg/t LS), bu durumda hurda miktarı daha düşüktür.
(2) Tipik olarak kireç kullanılır, ancak birkaç durumda tek başına dolomit veya dolomit ve kireç kombinasyonları kullanılır (örneğin ağırlık oranı 63/37).
(3) Vakum işlemine sahip ikincil metalurjiye sahip tesisler dışında, EAF çelik üretiminde buhar genellikle kullanılmaz.
(4) Tutarlı veri tabanı yok, bazı sonuçlar toplam 16 EPA PAH'ı temsil ediyor, diğerleri ise bunların yalnızca bir bölümünü.
(5) Tutarlı veri tabanı yok, değerler farklı PCB seçimlerini temsil ediyor (bunlardan 2'si yukarıda belirtilen Ballschmüter PCB'ye, 3'ü WHO-TEQ'ya ve 2'si başka bir gösterge olmaksızın).

NB: — Bazı ölçüm metodolojileri ülkeden ülkeye ve fabrikadan tesise önemli ölçüde farklılık gösterebilir. Yayılan maddelerin tamamı tüm tesislerde ölçülmez. Ölçüm programları, izin gereksinimlerine bağlı olarak büyük ölçüde değişir.
— Veriler, üretilen 37,4 Mt çeliği temsil eden EAF çelikhane operatörleri (karbon çeliği, alaşımlı çelik ve paslanmaz çelik) tarafından sağlanan bilgilerden derlenmiştir. Bu, 2004 yılında 11 farklı AB ülkesinde AB'deki toplam EAO çelik üretiminin yaklaşık %50'sini temsil ediyordu.
— SÇ = Sıvı çelik.

Kaynak: [140, Eurofer 2009] [200, Commission 2001] [220, Eurofer 2008] [234, Poland 2007] [367, Prüm et al. 2005] [371, Eurofer 2007] [372, Czech TWG member 2008].

Tablo 3.1’de verildiği üzere, karbon salınımına neden olan hammaddelerin azaltılması açığa çıkacak CO₂ oranlarının da azalmasına sebep olacaktır.

ÖNCELİKLİ AR-GE VE YENİLİK KONULARI

3.2.a. EAF ve İkincil metalurji uygulamalarında kok tozuna alternatif olabilecek hammaddelerin kullanılmasına yönelik çalışmaların gerçekleştirilmesi

Alternatif karbon taşıyan malzemelerin kullanımının dikkate alınması gereken bazı teknolojik ve teknolojik olmayan yönleri vardır. Bu yönler şunlarla ilgilidir:

- İşletme uygulamalarının ve enjeksiyon sistemlerinin uyarlanmasını gerektiren alternatif karbon içeren malzemelerin farklı özellikleri;
- Çelik üretimi için bu malzemeler için henüz oluşturulmamış olan ve dolayısıyla mevcut fiyatı ve bulunabilirliği etkileyen değerler zinciri.

Elektrot tüketiminin azaltılması ile ilgili olarak, üretim sürecinin iyileştirilmesi ve erozyon mekanizmasının anlaşılması için daha fazla çaba gösterilmesi gerekmektedir.

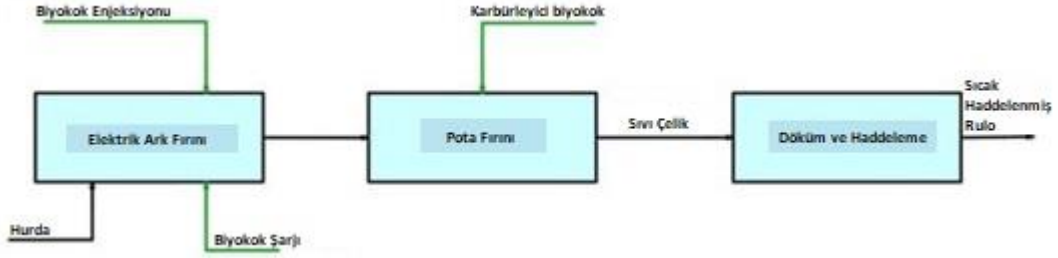
Çalışma pratiğinin ve enjeksiyon sistemlerinin uyarlanması

Biyokütleden ve genel olarak alternatif karbon içeren malzemelerden elde edilen kömür (örneğin işlenmemiş biyokütle, polimerler, diğer üretim döngülerinden gelen atıklar); fosil karbon kaynaklarına kıyasla daha yüksek uçucu madde içeriği, daha düşük yoğunluk ve demir oksitçe zengin olan cüruf ile farklı kimyasal etkileşim gibi bazı farklılıklara sahiptir. Ayrıca, hurda ile birlikte sepete doldurulacaksa veya enjeksiyon için uygun boyutta (2-5 mm arasında) taneler halinde mevcut olmaları gerekiyorsa, topaklanma ve briketler halinde yoğunlaştırma için ön işlem gerektirebilirler.

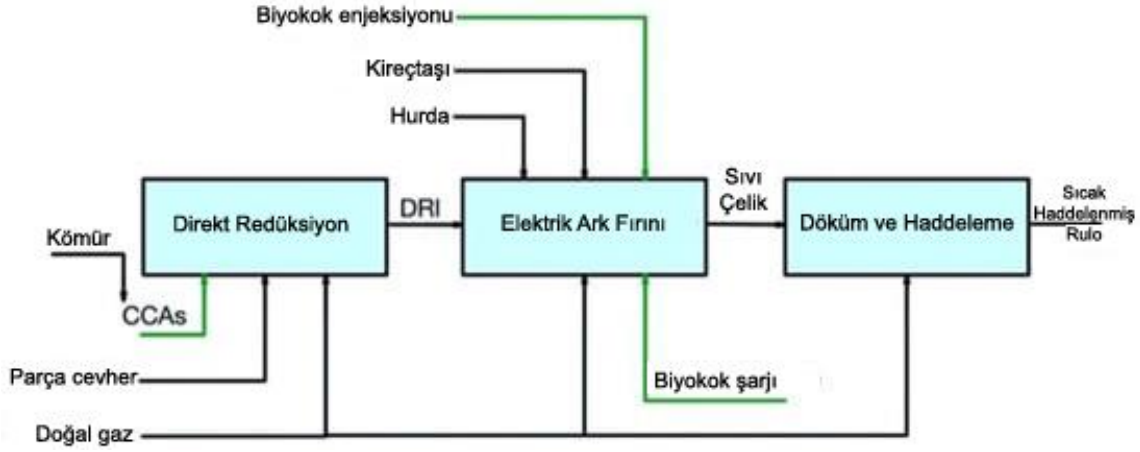
Kömür ve alternatif karbon taşıyan malzemelerin mevcudiyeti ve maliyeti

Çelik üretiminde kullanımı sınırlayabilecek ve bu nedenle ele alınması gereken kilit bir hususlar mevcudiyet ve maliyettir. Biyokömür, şu anda kullanılmak üzere üretilen biyokütlenin pirolizinden elde edilen bir kömürdür. Belirli sektörlerde (tarım, kozmetik, gıda, hayvan yemi) küçük ölçekli enerji üretimi söz konusudur. Bu nedenle, üretilen miktarlar genel olarak düşük (EAF çelik üretimi ihtiyacı ile karşılaştırıldığında) ve nispeten yüksek fiyatlıdır. Düşük dereceli biyokütle kullanımından maliyet tasarrufu elde edilebilir ve düşük dereceli biyokütle maliyetlerine göre özel üretim ile maliyetler antrasit değerleri ile karşılaştırılabilir [6].

Şekil 3.3 ve Şekil 3.4, hurdanın ana hammadde olarak kullanıldığı EAF'de, sonraki pota fırınında ve DRI-EAF rotalarında ikincil karbon biyokömürleri için akış şemalarını göstermektedir.



Şekil 3.3 Hurdanın ana hammadde olarak kullanıldığı EAF'de ikincil karbon biyokömürleri kullanmanın ana yolları [12].



Şekil 3.4 DRI/EAF rotasında ikincil karbon biyokömürleri kullanmanın ana yolları [12].

İkincil karbon biyo-taşıyıcılarını (biyokok) uygulamanın birkaç olası yolu vardır:

- EAF'ye şarj edilen karbon;
- EAF'ye enjekte edilen karbon;
- Pota fırınında karbür kaynağı.

DRI/EAF yolunda, kavrulmuş biyokütle kullanılarak elde edilen karbon içeren aglomeratlar olarak kullanmanın da mümkün olduğu belirtilmelidir.

Yukarıdaki gerekliliklere dayanarak, kavrulmuş biyokütle kullanımının pratik olarak sınırlı olduğu sonucuna varılabilir. Ancak kömür harmanında %50'ye kadar kavrulmuş biyokütlenin yüksek katkı miktarıyla bile karbon kaynağı olarak %100'e kadar biyokok kullanımı mümkündür. Çünkü VM açısından bu prosesin gerekliliklerini karşılayabilir ve eritme prosesinin enerji verimliliğini artırmak için çeliği karbonlamak veya köpüren cüruf oluşturmak için yeterli

miktarda FC > %85'e sahiptir. Ek olarak, fırının özelliklerinden dolayı bir EAF'de kullanıma yönelik karbon kaynağının mukavemeti için katı gerekliliklerin olmadığını belirtmek önemlidir. Bu nedenle, yüksek miktarda kavrulmuş biyokütle içeren biyokokun kullanılması, gelecekteki araştırmalar için umut verici bir yoldur [12].

CO₂ azaltımı dikkate alındığında, alternatif karbon içeren malzemelerin kullanılması, antrasit karbon içeriğine bağlı olarak üretilen yaklaşık 30-35 kg CO₂/t sıvı çelik emisyonunu önleyebilir. Bu nedenle, alternatif karbon taşıyan malzemenin kullanılması, toplam CO₂ emisyonlarında yaklaşık %10'luk bir tasarruf sağlayabilir.

Azaltılan CO₂ miktarı, elektrot tüketiminin azaltılması ve yenilenebilir karbonun enerji sağlayıcı olarak EAF çevriminde daha fazla kullanılması ve NG yakmanın (kısmen veya prensipte tamamen) değiştirilmesiyle artırılabilir. Bu son seçenek, rekabetçi fiyat ve ilgili miktarda yenilenebilir karbon kaynaklarının mevcudiyetini gerektirir.

Ayrıca, EAF çelik üretiminde alternatif karbon içeren malzemelerin kullanılması, yeni yerel ekonomiler yaratılmasına katkıda bulunacak ve özellikle AB dışındaki ülkelerden gelen malların taşınmasının etkisini azaltacaktır [6].

3.2.b. Dolomit ve kireçtaşı yerine daha az CO₂ salımı olan alternatif cüruf yapıcılarının geliştirilmesine yönelik çalışmaların gerçekleştirilmesi

Dolomit, kalsiyum ve magnezyumlu karbonat birleşiminde meydana gelen bir mineraldir. Kırılgan bir mineral olup, özgül ağırlığı 2,8 g/cm³ ve sertliği 3,5-4 arasındadır. Isıtıldığında köpürerek çözüldüğü için kalsitten ayrılmaktadır. Kireç taşı genellikle mercan, foraminifera ve yumuşakçalar gibi deniz canlılarının iskelet parçalarından oluşan bir karbonat tortul kayadır. Başlıca maddeleri kalsiyum karbonatın farklı kristal formları olan kalsit ve aragonit mineralleridir.

Ark ocaklı tesislerde bazik cüruf elde etmek için kullanılırlar. Refrakter malzemenin zarar görmesini engellemek amacıyla cürufun bazik olması istenir. Bazik cüruf refrakter malzemenin zarar görmesini minimuma indirir. Kireç taşı ve dolomit karışımları 40-50 kg/t çelik miktarlarında kullanılmaktadır.

Karbonatlı hammaddeler olan dolomit ve kireçtaşı kullanımının azaltılması, CO₂ salınımlarında da azalmaya sebep olacaktır. Bu sebeple karbon salınımı yapmayacak veya minimum oranlarda yapacak hammaddelerin kullanımı gün geçtikçe önem kazanmaktadır.

Avrupa'nın 300 çelik fabrikasında her yıl yaklaşık 4,8 milyon ton beyaz cüruf atık malzeme üretilmektedir. Bu malzeme, arıtılması için gerçek anlamda yaygın bir teknoloji

benimsenmediğinden, çoğunlukla düzenli depolama alanında bertaraf edilmesini gerektiren özel bir atıktır. Bununla birlikte, SNOW (Submerged Nozzle Oxygenated Waterjet) teknolojisi, beyaz cürufun serbest kireç bileşenlerinin çelik üretimi için bir katkı maddesi olarak yeniden kullanılması için yeni fırsatlar sunmaktadır. Serbest kireç (CaO), beyaz cüruf malzemesinin yaklaşık %40-45'ini oluşturur ve bunun yeniden kullanılması doğal kireçtaşı kaynakları verimli kullanılmasını sağlamaktadır.

İtalya'da ve Avrupa'nın geri kalanındaki birçok çelik tesisi, ikincil metalurjiden çıkan cürufu Elektrik Ark Ocakları için cüruf oluşturuçu olarak farklı yöntem ve tekniklerle geri dönüştürmektedir [13,14]. AB'nin öngörülerinde dolomitin %50 kadarını geri dönüştürülmüş cüruf ile ikame etmek bulunmaktadır [6]. Hidratların kullanımına literatürde rastlanmamış olup, hidratların daha yüksek maliyetli olması, hidratların yine karbonatlardan sentetik olarak üretiliyor olması ve doğal olarak bulunsa bile hidratların düşük sıcaklıkta hızlıca parçalanarak patlama riski oluşturduğundan, doğrudan kullanımın çalışılmadığı düşünülmektedir. Bunun yanında yalnızca demir-çelik endüstrisinden gelen cürufun değil de farklı endüstrilerden gelen (ferro alyaj endüstrisi, demir dışı metaller endüstrisi vb.) cüruf ve atıkların da kireçtaşı veya dolomit yerine kullanımının araştırılması gereklidir.

B. Dünyada ve Türkiye'de Teknolojik Hazırlık Seviyeleri

3.2.a. EAF ve İkincil metalurji uygulamalarında kok tozuna alternatif olabilecek hammaddelerin kullanılmasına yönelik çalışmaların gerçekleştirilmesi

Dünyada THS 5-6, Türkiye'de THS 3-4'tür.

3.2.b. Dolomit ve kireçtaşı yerine daha az CO₂ salımı olan alternatif cüruf yapıcıların geliştirilmesine yönelik çalışmaların gerçekleştirilmesi

Dünyada THS 8-9, Türkiye'de THS 6-7'dir.

C. Dünyada ve Türkiye'deki Mevcut Duruma İlişkin Başarılı Örnekler

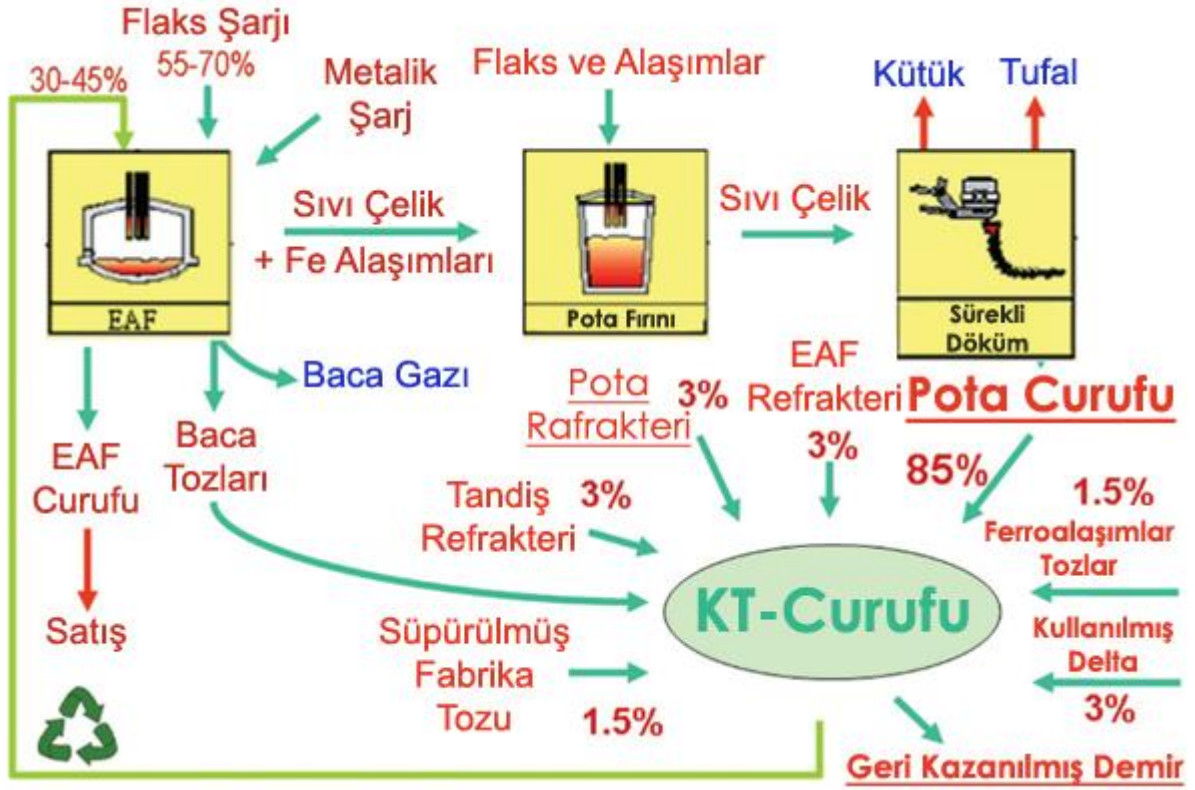
3.2.a. EAF ve İkincil metalurji uygulamalarında kok tozuna alternatif olabilecek hammaddelerin kullanılmasına yönelik çalışmaların gerçekleştirilmesi

Avrupa'da ilgili konuda çeşitli araştırmalar mevcut olup (örneğin GREENEAF ve GREENEAF2, RIMFOAM), önemli bir deneyim kazanılmıştır; ancak daha fazla iyileştirme ve uyarlama

gerekmektedir. Ek olarak, bu özel malzemeler için enjektör, özellikle bunların köpürtme maddesi olarak kullanılması durumunda, optimize edilmelidir. AB tarafından finanse edilen projelerin çıktıları halihazırda yayınlanmaktadır: (Onlyplastic ve POLYNSPIRE) [6].

3.2.b. Dolomit ve kireçtaşı yerine daha az CO2 salınımı olan alternatif cüruf yapıcılarının geliştirilmesine yönelik çalışmaların gerçekleştirilmesi

İtalyan elektrikli çelik üretim endüstrisi tek başına yılda 2 milyon tondan fazla cüruf ve kullanılmış refrakter, duman tozu ve haddehane tufalını içeren diğer çeşitli türde artıklar üretir. Bu yan ürünlerin geri dönüştürülmesinin üç sonucu vardır: Doğal kaynakların kullanımının en aza indirilmesi, dökülen malzeme miktarının azaltılması ve çelik üretim dengesi için önemli olan EAF akışlarının maliyetinin düşürülmesi. Geri dönüşüm işlemi, KT-cüruf işlemi olarak bilinir (Şekil 3.5). 2005 yılında, beyaz cüruf olarak da adlandırılan pota fırını cürufunu ve kullanılmış refrakteri, elektrik ark ocağına enjekte edilebilecek nihai bir toz ürüne dönüştüren ikinci bir İtalyan endüstriyel tesisi faaliyete geçmiştir. Tesis, yılda yaklaşık 1 milyon ton filmaşın ve kireç üreten bir çelik tesisi olan StefanaSpA'nın Ospitaletto Fabrikasında bulunmaktadır. Bu endüstriyel uygulama, bu özel geri dönüşüm prosedürünün hem maliyet hem de süreç açısından sürdürülebilirliğini göstermektedir. Önemli faydalar, özellikle cüruf boşaltma maliyetinin azalması, EAF'ye yüklenen kireç miktarının azalmasından kaynaklanmaktadır. Bu tesisin başarısı için kilit konulardan biri, LF cürufunun, EAF cürufunun metalürjik özelliklerinin ve bunların geri dönüştürülmüş tozla etkileşiminin doğru bir şekilde incelenmesi olmuştur [13,14].



Şekil 3.5 Sıvı çelik üretimi ve geri dönüşümünün temel akışı: KT cüruf süreci [13].

D. Ar-Ge ve Yenilik Sürecinde Biraraya Gelmesi Gereken Disiplinler ve Sektörler

3.2.a. EAF ve İkincil metalurji uygulamalarında kok tozuna alternatif olabilecek hammaddelerin kullanılmasına yönelik çalışmaların gerçekleştirilmesi

Özellikle EAF ile demir-çelik üretimi ve hammadde harmanı hazırlama ve kömür konusunda uzmanlaşmış Metalurji Mühendisleri, Kimya Mühendisleri ve Çevre Mühendislerinin çalışması gerekmektedir.

3.2.b. Dolomit ve kireçtaşı yerine daha az CO2 salımı olan alternatif curuf yapıcılarının geliştirilmesine yönelik çalışmaların gerçekleştirilmesi

Özellikle EAF ile demir-çelik üretimi ve hammadde harmanı hazırlama konusunda uzmanlaşmış Metalurji Mühendisleri, Kimya Mühendisleri ve Çevre Mühendislerinin çalışması gerekmektedir.

E. Ar-Ge, Yenilik, Demonstrasyon İşbirliği Modeli ve Destek Mekanizması

3.2.a. EAF ve İkincil metalurji uygulamalarında kok tozuna alternatif olabilecek hammaddelerin kullanılmasına yönelik çalışmaların gerçekleştirilmesi

EAF kullanan demir-çelik üreticileri ile kömür ve biyokömür konusunda çalışan endüstrilerin beraber çalışması gerekir. TÜBİTAK Araştırma Merkezleri/Enstitüleri, Üniversiteler, Demir-Çelik Üreticileri Derneği, Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı, Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı gibi paydaşların biraraya gelmesi gereklidir.

Büyük ölçekli Ar-Ge ve Yenilik Projeleri, özellikle devlet destekli projeler ve Avrupa'daki ülkeler ile işbirliği sağlanarak geliştirilmelidir.

3.2.b. Dolomit ve kireçtaşı yerine daha az CO2 salınımı olan alternatif curuf yapıcılarının geliştirilmesine yönelik çalışmaların gerçekleştirilmesi

EAF kullanan demir-çelik üreticileri ile üniversitelerin ortak çalıştığı düşük bütçeli bir Ar-Ge çalışması yeterli olacaktır.

F. Zaman ve Bütçe Tahminleri

(Kısa Vade: 1-3 yıl, Orta Vade: 3-5 yıl, Uzun Vade: 5 yıldan fazla)

3.2.a. EAF ve İkincil metalurji uygulamalarında kok tozuna alternatif olabilecek hammaddelerin kullanılmasına yönelik çalışmaların gerçekleştirilmesi

AB'ne göre bu konuda gerçekleştirilen ve önerilen projelerin ortalama bütçe değeri ve grafit elektrot tüketiminin azaltılmasına ilişkin inceleme dikkate alındığında, THS 8'e ulaşmak için gereken toplam bütçenin, on yılda yaklaşık 20 M€ mertebesinde olduğu tahmin edilmektedir.

Bu tutar, değerlendirme süresi ufkunda aşağıdaki gibi bölünebilir:

- 2021-2023 dönemi için 5 M€
- 2024-2025 dönemi için 6 M€
- 2026-2030 dönemi için 9 M€

3.2.b. Dolomit ve kireçtaşı yerine daha az CO2 salınımı olan alternatif curuf yapıcıların geliştirilmesine yönelik çalışmaların gerçekleştirilmesi

Kısa vadede düşük bütçeyle kolayca yapılabilir. Ancak endüstriyelmesi uzun vadede gerçekleşebilir.

G. Teknolojik İlerlemenin Sağlanmasında Kritik Hususlar

Kamunun adım atması gereken husus, temel olarak biyokömür kullanımının özendirilmesi olabilir.

Mevzuat ve Yasal Düzenlemeler

Biyokömür kullanımı ile ilgili mevzuata eklemeler yapılabilir.

Teknik Altyapılar

Altyapılar yeterli olup, yalnızca biyokömür özelliklerinin standartlaştırılması gereklidir.

İnsan Kaynakları

Üniversitelerde ve sanayide yeterli sayıda ve ihtiyaç duyulan yetkinlikte insan kaynağı mevcuttur.

Destek ve Teşvikler

İlgili projelere maddi ve regülasyonlara bağlı teşvikler yeterli görünmektedir.

Kritik Ürün/Teknoloji 3.3.

3.3. Elektrikli ark ve pota ocaklarından çıkan katı atıkların döngüsel ekonomi süreçleriyle geri dönüşümüne yönelik yenilikçi proseslerin ve uygulamaların geliştirilmesi

Öncelikli Ar-Ge ve Yenilik Konuları

3.3.a. Elektrik ark fırın tozlarından (EAFD) pirometalürji, hidrometalürji veya kimyasal ayırma yöntemleriyle Zn/ZnO ve pik Fe kazanımıyla ilgili çalışmaların gerçekleştirilmesi

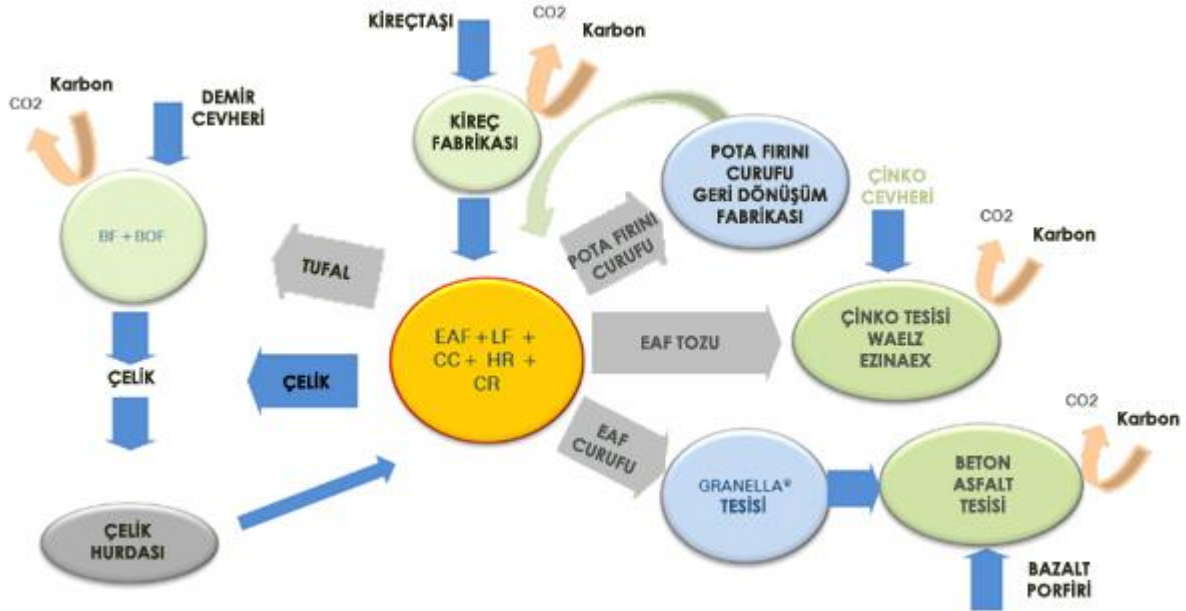
Kritik Ürün/Teknoloji 3.3.

3.3. Elektrikli ark ve pota ocaklarından çıkan katı atıkların döngüsel ekonomi süreçleriyle geri dönüşümüne yönelik yenilikçi proseslerin ve uygulamaların geliştirilmesi

A. Teknik Açıklamalar, Yenilikçi Özellikler, Hedeflenen Performans ve Metrikler

"Sıfır Atık" projesi başladığından bu yana, EAF prosesinin ana ikincil malzemeleri (EAF'den gelen cüruf, pota fırını cürufu, EAF tozu, demir tufal ve refrakterler) gözden geçirilmiş ve yeniden değerlendirilmiştir. Artık birçok şirket bu malzemelerle ilgili araştırmalar yapmakta ve bunları hazırlamak, dönüştürmek ve nihayetinde kullanmak için önemli ve istikrarlı simbiyoz ilişkileri kurmaktadır. Hurdacılarından, kireç üreticilerinden, çinko üreticilerinden, agrega ve asfalt üreticilerinden, otoyol şirketlerinden oluşan bir şirket ağı; yeni ürünlerin düzenli bulunabilirliğine ve kalitesine güvenmektedir. Bu malzemelerin yeniden kullanılması; demir cevheri, bazalt, porfir, kireçtaşı, çinko ve kurşun mineralleri gibi eşdeğer miktarda doğal kaynak tasarrufu sağlamaktadır [15].

Sıfır atık deneyiminden sonraki yeni duruma genel bir bakış Şekil 3.6'da verilmektedir.



Şekil 3.6 Sıfır Atık projesinden sonra döngüsel ekonomi mantığında Ferriere Nord Prosesi [15]

Ferriere Nord firmasında ana ikincil malzemeler yeni ürünlere dönüştürülür ve beton asfalt tesislerinde EAF cürufu, çinko üretiminde EAF tozu, demir üretiminde demir tufal, aynı EAF'de kirecin yerine geçen LF cürufu gibi diğer proseslerde yeniden sirküle edilir. Bu yeni süreç konfigürasyonunun net sonucu; doğal malzemeler, demir cevheri, kireç taşı, çinko cevheri,

bazalt taşları tasarrufu sağlar. Ayrıca, tasarruf edilen her bir doğal kaynak için (demir veya çinko cevheri, bazaltlar, kireçtaşı) birincil dönüşüm olmaması, nakliye olmaması veya yeni ürünler teslim edildiğinde sınırlı nakliye olması durumunda madencilik yapılmamasının bir sonucu olarak, ilgili enerji ve CO₂ tasarrufu da önemli bir sonuçtur [15].

Dünya'da ve Türkiye'de EAF baca tozu (EAFD) geri dönüştürülerek değerli metaller elde edilmektedir. İçeriğinde yüksek oranda bulunan çinko (Zn) geri dönüşümü sağlanmaktadır. Zn'nin yanında kurşun (Pb) ve demir (Fe)'inde geri dönüşümü az da olsa yapılmaktadır. Fakat ülkemizde de yoğun olmakla birlikte Zn geri kazanımına daha fazla önem verilmektedir. Ülkemizde yer alan Marzinc firması çinkonun geri kazanımını sağlamaktadır; geriye kalan kısım ise tehlikeli atık sınıfında olup, yakın zamana kadar depolanırken, artık çimento fabrikalarında kullanılmak üzere gönderilmektedir.

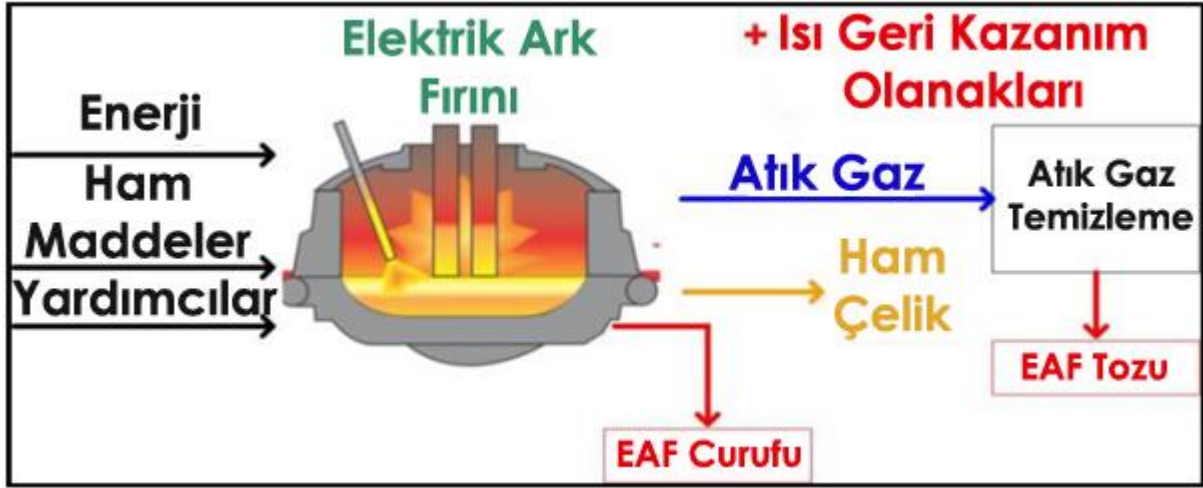
Çimento fabrikalarına gönderilen ve demir içeriği nispeten yüksek olan bu ürünün içerisindeki demir ve diğer metallerin geri kazanımı yapılmamakla beraber; önemli olabilecek bir metal hammaddesi de katma değeri olmayan bir alanda kullanılmaktadır.

ÖNCELİKLİ AR-GE VE YENİLİK KONULARI

3.3.a. Elektrik ark fırın tozlarından (EAFD) pirometalürji, hidrometalürji veya kimyasal ayırma yöntemleriyle Zn/ZnO ve pik Fe kazanımıyla ilgili çalışmaların gerçekleştirilmesi

Demir ve çelik üretimi için BAT belgesine göre, her ikisi de ham çelik tonu başına 60-270 kg cüruf ve 10-30 kg toz, ana katı EAF kalıntıları olarak üretilir. 2019 yılında yaklaşık 65 Mt olan EAF güzergahı üzerinden AB çelik üretimi dikkate alındığında, potansiyel ikincil kaynaklar olarak sırasıyla 3,9-17,5 Mt EAF cürufu ve 0,6-1,9 Mt EAF tozu üretilmiştir [1,6].

Böylece, atık ısı ve enerji geri kazanım olanakları ile, iki ana EAF çıktı kaynağı daha (Şekil 3.7'de görüldüğü gibi toz ve cüruf) dahili ve harici kullanım için değerlendirilebilir. Özetlemek gerekirse, 2030 yılına kadar sıfır atık çelik üretimine yaklaşmak için belirli EAF rotası ve Ar-Ge hedefi tanımlanabilir [1,6].



Şekil 3.7. EAF hammadde ve ürün akışı [6]

EAFD yüksek oranda Zn içeriğinden dolayı da tehlikeli atık sınıfında yer almaktadır ve güvenli depolanması önemlidir; bu da işletmelere ilave yüksek maliyet kalemi oluşturmaktadır. Bu yüzden bu atığın Zn ayrıştırması önemlidir.

Yapılan araştırmalar EAFD'den dünyada yoğun olarak Zn kazanımı görülmektedir. Fe ve Pb geri kazanımı da yapılarak sektörde tekrar kullanılması sağlanmaktadır. Özellikle de Fe metali çelik sektöründe, Pb de enerji depolama çalışmalarında kullanılmaktadır.

Değerli metaller ayrıştırıldıktan sonra geriye kalan atık ile ilgili çalışmalar yapı sektöründe kullanımına yöneliktir. Beton, asfalt, seramik, tuğla vb. yapılarda kullanılmasına yönelik çalışmalar yapılmıştır. Seramik ve tuğlada, mekanik değerleri olumlu yönde etkilediği gözlemlenmiştir.

Ülkemizde yapılacak çalışmalarda aşağıda yer alan konulara önem verilmesi gerekmektedir.

- Demir, Kurşun, Bakır geri kazanımı proseslerinin geliştirilmesi
- EAF baca tozunun ayrıştırılması sonra çıkan atığın geri dönüştürülmesi [14–17]

İlgili performans ve metrik Tablo 3.1 ve önceki başlıklarda verilmiştir. Ayrıca çıkış gazlarının (çoğunlukla ikincil çıkış gazları ile birlikte birincil çıkış gazları) arıtılması, torba filtrelerde sıklıkla gerçekleştirilir. Karbon, düşük alaşımlı ve yüksek alaşımlı çelik üretiminden kaynaklanan tozların kimyasal bileşimi Tablo 3.2'de gösterilmektedir [1].

Tablo 3.2 Karbon çeliği/düşük alaşımlı çelik ve yüksek alaşımlı çelik ve paslanmaz çelik üretiminden kaynaklanan EAF tozlarının kimyasal bileşimi [1]

Bileşen	Karbon/düşük alaşımlı çelik üretiminden kaynaklanan toz (ağırlıkça %)	Alaşımlı çelik üretiminden kaynaklanan toz (ağırlıkça %)	Paslanmaz çelik üretiminden kaynaklanan toz (ağırlıkça %)
Fe _{tot}	10 – 45	17 – 37	20 – 65
SiO ₂	0.6 – 5.1	1.7 – 5	3 – 9
CaO	3 – 17	2 – 16	8 – 20
Al ₂ O ₃	0.3 – 3	1 – 4	0.4 – 2
MgO	0.5 – 6	1.2 – 3	1 – 5
P ₂ O ₅	0.1 – 0.37	0.01 – 0.1	0.03 – 0.1
MnO	1.1 – 6	1.5 – 6.9	2.2 – 6.3
Cr ₂ O ₃	0.13 – 2	0.12 – 6	9 – 20
Na ₂ O	0.3 – 3	NA	0.6 – 2
K ₂ O	0.5 – 2.3	NA	0.7 – 3
Zn	21 – 43	2 – 15	2 – 25
Pb	0.4 – 10	0.05 – 3.6	0.2 – 4.5
Cd	0.02 – 0.18	0.01 – 0.04	0.01 – 0.08
Cu	0.08 – 0.5	0.01 – 0.8	0.015 – 0.5
Ni	0.01 – 0.8	0.01 – 0.5	1 – 8
V	0.01 – 0.09	0.01 – 0.2	0.05 – 0.12
W	NA	0.5 – 1.5	NA
Co	0.001 – 0.01	0.01 – 0.2	0.02 – 0.04
As	0.001 – 0.02	0.001 – 0.01	0.01
Hg	0.0001 – 0.005	0.05 – 0.7	0.0002 – 0.015
Cl	0.8 – 5	0.7 – 1.7	0.8 – 1
F	0.02 – 0.9	0.01 – 0.65	0.3 – 2.4
S	0.1 – 3	0.25 – 1.42	0.2 – 0.5
C	0.4 – 3.3	0.5 – 3.1	0.05 – 1.3
Baziklik	2.0 – 6.5	NA	NA
Nem	6 – 16	NA	NA

Not: NA = Veri mevcut değil.
Kaynak: [39, EUROFER EAF 1997] [62, Hoffmann 1997] [134, Strohmeier et al. 1996] [277, Wiesenberger 2007] [376, Eurofer 2007] [391, Tavernier et al. 2004].

Son yıllarda, atık yönetimine ilişkin düzenlemenin ardından, düzenli depolama alanlarına konulan toz yüzdesi önemli ölçüde azaltılmıştır. Demir dışı metaller için tozun büyük bir çoğunluğu geri kazanım operasyonlarına getirilir (esas olarak karbon çeliği tozları durumunda Zn ve Pb ve paslanmaz çelik tozları durumunda Cr ve Ni).

%18 – 35 çinko içeren EAF tozunu işlemek için farklı teknolojiler mevcuttur. Bunlar, demir dışı metal üretim endüstrilerinde kullanılan köklü süreçlerdir. Bununla birlikte, çinko endüstrisi normalde daha yüksek çinko konsantrasyonuna sahip ham maddeler kullanmaktadır. Sonuç olarak, çinko geri kazanılmadan önce EAF tozu başka bir işleme tabi tutulur ve bu işlemler çinko içeriğini %55 – 65'e yükseltir.

2006 yılında 36 EAF tesisi ve 342.949 ton tozu kapsayan bir ankete göre, EAF tozu Şekil 3.8'de gösterildiği gibi başlıca üç farklı şekilde kullanılmaktadır. [1]



Şekil 3.8 EAF tozunun kullanım oranları [1]

EAF çelik üretim rotasında üretilen önemli miktarda atık, kalıntı ve yan ürün, farklı yaklaşımlardan yararlanılarak, çelik üretim sürecinin hem içinde hem de dışında değerlendirilebilir. Bununla birlikte hem teknik hem de yasal açıdan birkaç kilit unsurun dikkate alınması gerekir ve bu değerlendirmeleri artırmak için farklı araştırma hatları tanımlanabilir.

EAF çelik üretiminde üretilen kalıntıların çoğu, önemli miktarda değerli metal ve mineral malzeme fraksiyonlarına sahiptir, ancak bu malzemeleri geri kazanmak veya diğer kaynak tasarrufu sağlayan uygulamalarda kullanılmaya uygun hale getirmek için genellikle geçici işleme gerekir. Örneğin, sıvı ve katılaşmış cürüflardan metal ve mineral fazların geri kazanımının maksimize edilmesi ve/veya özelliklerinin iyileştirilmesi için sırasıyla mevcut arıtma proseslerinin (örneğin ayırma prosesleri) veya şartlandırma adımlarının (örneğin hızlı kuru soğutma) kombinasyonu dikkate alınmalıdır. Mevcut arıtma işlemlerinin yanı sıra, metallerin ve oksitlerin geri kazanımını artırmak ve sonuç olarak doğrudan eritme işleminde (örneğin katı veya sıvı demir) veya değer zincirinde birincil kaynaklara olan talebi azaltmak için yeni işlemler de geliştirilmelidir. EAF filtre tozundan Zn ve Çinko oksit geri kazanılabilir ve yeni prosesler geliştirilmelidir. Hem tozlardan hem de cürüflardan demirli ve demirsiz malzemelerin (örneğin Zn) geri kazanımı, yeni pirometalürjik indirgeme süreçleriyle geliştirilebilir.

Baca tozlarında bulunan çinkonun yanı sıra diğer metallerin de ayrı ayrı kazanılarak üretim metalurjisinde hammadde olarak kullanımı yenilikçi bir proses olacaktır. Hali hazırda Zn

kazanımı devam ederken, diğer yandan da özellikle demir içeriğinin de çelik üretiminde hammadde olarak yerini alması önem arz etmektedir.

B. Dünyada ve Türkiye’de Teknolojik Hazırlık Seviyeleri

3.3.a. Elektrik ark fırın tozlarından (EAFD) pirometalürji, hidrometalürji veya kimyasal ayırma yöntemleriyle Zn/ZnO ve pik Fe kazanımıyla ilgili çalışmaların gerçekleştirilmesi

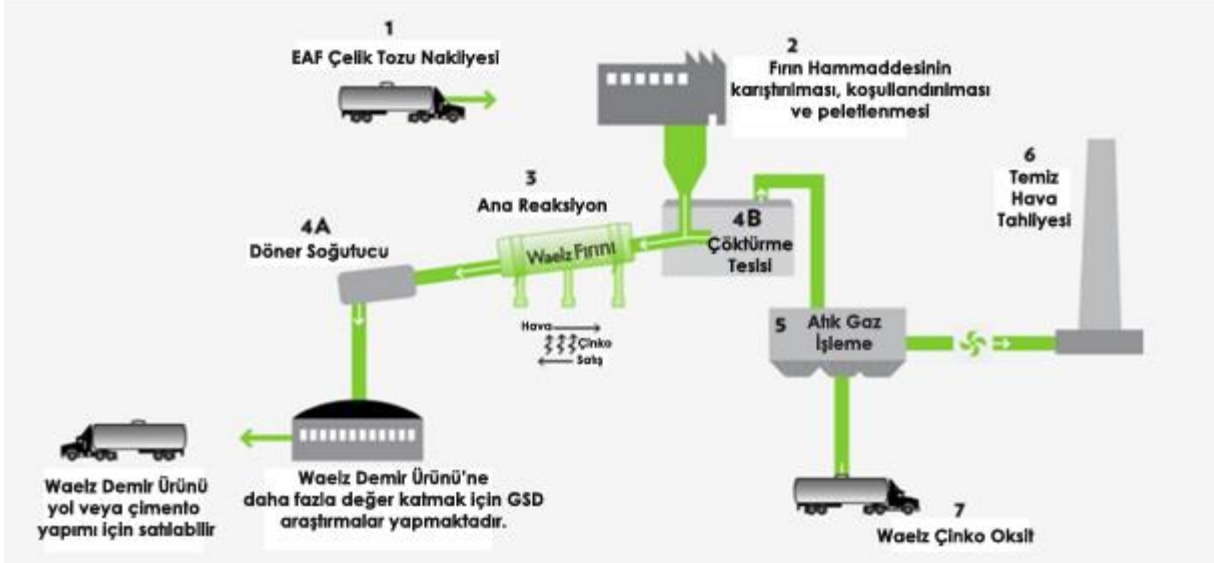
Dünyada THS 8-9, Türkiye’de THS 5-6’dır.

C. Dünyada ve Türkiye’deki Mevcut Duruma İlişkin Başarılı Örnekler

3.3.a. Elektrik ark fırın tozlarından (EAFD) pirometalürji, hidrometalürji veya kimyasal ayırma yöntemleriyle Zn/ZnO ve pik Fe kazanımıyla ilgili çalışmaların gerçekleştirilmesi

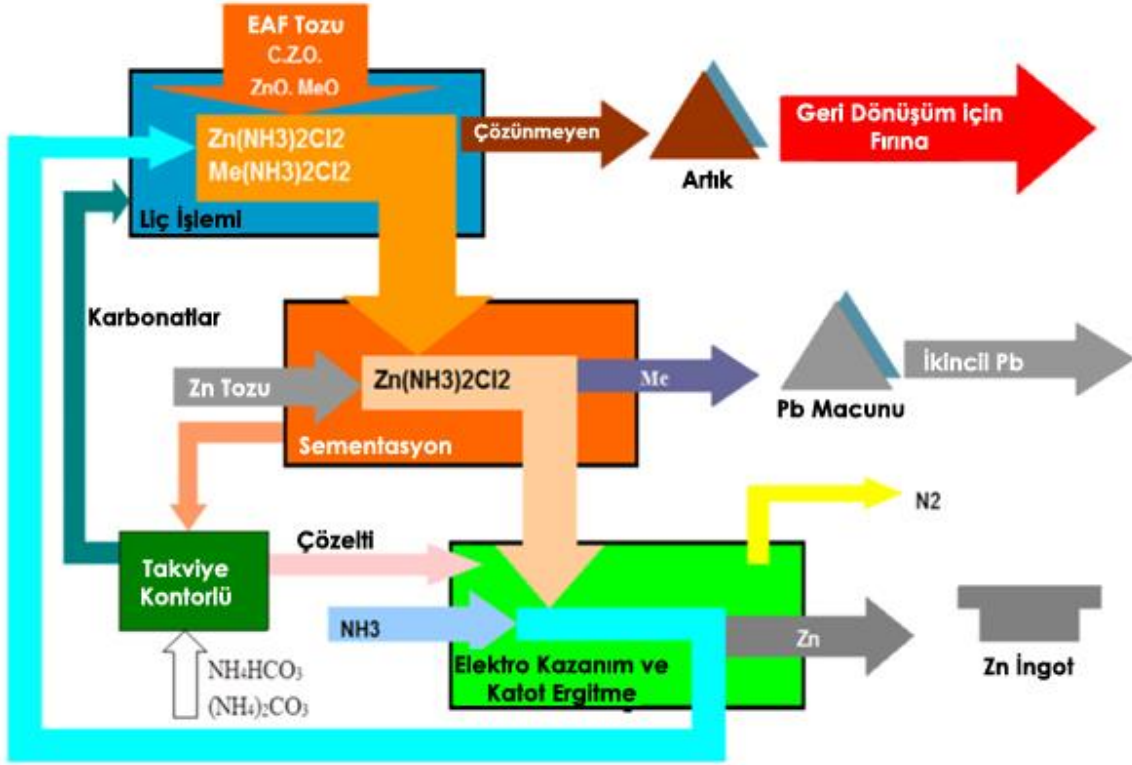
EAF prosesinde tozsuzlaştırma sistemi tarafından toplanan tozun analizi, tozun doğal cevherlerden daha zengin çinko ve kurşun bakımından zengin bir mineral (Zn %20-30, Pb %5) olduğunu göstermiştir. EAF’da toz giderme sistemlerinde toplanan tozlar öncelikle demir ve çinko oksitlerden, ardından kurşun, bakır, nikel, kalsiyum ve magnezyum oksitlerden oluşur.

Demir, manyetit (Fe_3O_4), wustite (FeO), hematit ($\alpha-Fe_2O_3$ ve/veya $\gamma-Fe_2O_3$) veya metalik formu Fe olarak mevcut olabilirken; çinko, metalik formu $Zn(s)$, çinko oksit $ZnO(s)$ ve çinko ferrit ($ZnO.Fe_2O_3(s)$) olarak bulunur. Endüstriyel açıdan bakıldığında Waelz işlemi, dünyadaki rafine çinko üretiminin %5,2’sini temsil eden, çinko içeren elektrikli çelik fabrikalarından çıkan atıkların en eski yöntemi ve ana geri dönüşüm yoludur. İşlem şeması Şekil 3.9’da gösterilen Waelz işlemi, katı bir karışımdan (EAF tozu + bağlayıcı + indirgeyici + su) çinko, kurşun ve kadmiyum gibi demir dışı metallerin buharlaştırılmasıyla karakterize edilen pirometalürjik bir yöntemdir. Bu tür karıştırma, sıvı cüruf oluşturmadan bir döner fırında kömür veya petrokok (indirgeyici maddeler) ile indirgenir. EAF tozu daha sonra Waelz oksite dönüştürülür ve daha sonra çinko metali geri kazanmak için rafinerilere götürülür [18].



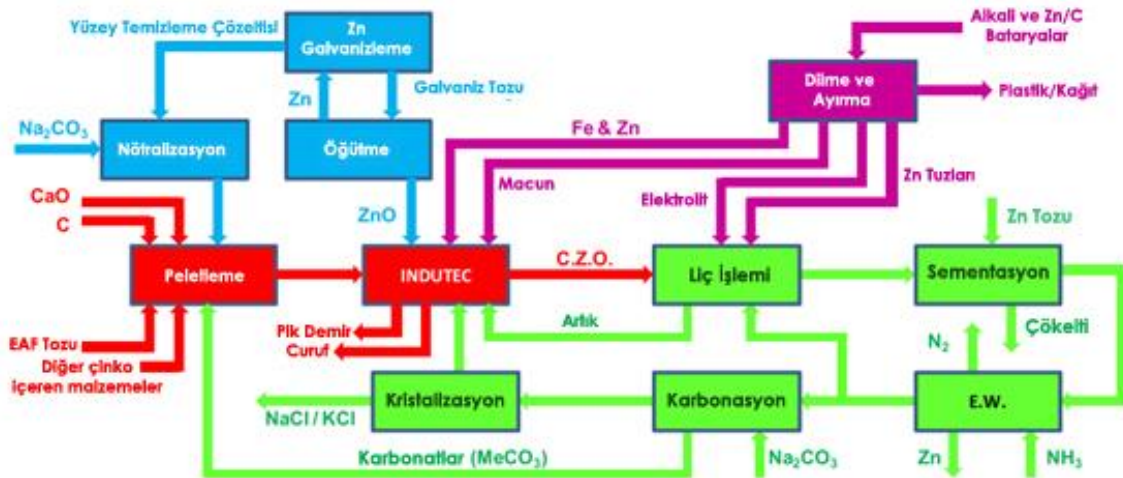
Şekil 3.9 Waelz Prosesi akım şeması [18]

Ezinex prosesi akım şeması Şekil 3.10'da verilmiştir. Orijinal fikir, genellikle klorür içeren EAF tozuyla uyumlu, nötr bir amonyum klorür çözeltisinde süzdürmesidir. Liç, esas olarak çinko, kurşun ve tüm ağır metalleri etkiler, bu da çözünmez demir oksidin geri dönüşüm için ayrılmasını sağlar. Çözelti daha sonra ikincil kurşun endüstrisine teslim edilen Pb pastası olarak bulunan tüm ağır metalleri ayırmak için çinko ile işlenir. Elde edilen çözelti, çinko katotları üretmek için elektro-kazanma işlemine beslenir. Reaktanların (NH_3), pH'nın ve birikim kontrolünün eklenmesinden sonra tükenmiş çözelti, süzme fazına yeniden sirküle edilir. Fazla NaCl ve KCl satılmak üzere tuz olarak çıkarılır [15].



Şekil 3.10 Ezinex prosesi akım şeması [15]

Özel olarak tasarlanmış bir endüksiyon fırını ile çinko ferrit içeren malzemelerden çinko tütsüleme ve aynı anda pik demir üretimi patentlenmiş ve INDUTEC prosesi olarak adlandırılmıştır. Kullanılan pilot tesisin akış şeması Şekil 3.11'de gösterilmektedir. Pik demir pazarlanabilir kalitede iken, çinko ve diğer metal değerlerinin geri kazanımı neredeyse tamamlanmıştır. Cüruf (beslemenin %40'ı) inerttir ve EPA TCLP testi standartlarını karşılamaktadır [19].



Şekil 3.11 Entegre INDUTEC/EZINEX prosesi—kavramsal blok diyagramı [19].

Türkiye’de EAF tozlarında geri dönüşüm Waelz prosesi ile çeşitli firmalar tarafından yapılmakla birlikte, Waelz oksit adı verilen Fe içerikli ürün çimento sanayinde hammadde olarak kullanılmaktadır. Ayrıca çeşitli entegre demir-çelik üretim tesislerinde sinter harmanına katılması denenmiş ancak cüruf miktarının artırdığı gözlemlenmiştir. Bununla beraber yanında Waelz prosesiyle Zn giderimi tam yapılamadığı için sintere Waelz oksidi katıldığında yüksek fırına fazladan Zn girmesi ve bunun da yüksek fırın operasyonlarına kötü etki etmesi nedeniyle çalışmalara devam edilmemiştir.

D. Ar-Ge ve Yenilik Sürecinde Bir araya Gelmesi Gereken Disiplinler ve Sektörler

3.3.a. Elektrik ark fırın tozlarından (EAFD) pirometalürji, hidrometalürji veya kimyasal ayırma yöntemleriyle Zn/ZnO ve pik Fe kazanımıyla ilgili çalışmaların gerçekleştirilmesi

EAF ile demir-çelik üretimi, çinko üretimi, Waelz prosesi konusunda uzmanlaşmış Metalurji Mühendisleri, Kimya Mühendisleri ve Çevre Mühendislerinin çalışması gerekmektedir.

E. Ar-Ge, Yenilik, Demonstrasyon İşbirliği Modeli ve Destek Mekanizması

3.3.a. Elektrik ark fırın tozlarından (EAFD) pirometalürji, hidrometalürji veya kimyasal ayırma yöntemleriyle Zn/ZnO ve pik Fe kazanımıyla ilgili çalışmaların gerçekleştirilmesi

EAF kullanan demir-çelik üreticileri ile çinko üretimi ve DRI üretimi konusunda çalışan endüstrilerin beraber çalışması gerekir.

TÜBİTAK Araştırma Merkez/Enstitüleri, Üniversiteler, Demir-Çelik Üreticileri Derneği, Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı, Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı gibi paydaşların biraraya gelmesi gereklidir.

Büyük ölçekli Ar-Ge ve Yenilik Projeleri, özellikle devlet destekli projeler ve Avrupa’daki ülkeler ile işbirliği sağlanarak geliştirilmelidir.

F. Zaman Boyutu

(Kısa Vade: 1-3 yıl, Orta Vade: 3-5 yıl, Uzun Vade: 5 yıldan fazla)

3.3.a. Elektrik ark fırın tozlarından (EAFD) pirometalürji, hidrometalürji veya kimyasal ayırma yöntemleriyle Zn/ZnO ve pik Fe kazanımıyla ilgili çalışmaların gerçekleştirilmesi

Kısa vadede Ar-Ge, orta vadede pilot tesis ve uzun vadede endüstriyelmesi gerekleŒebilir.

G. Teknolojik İlerlemenin Sağlanmasında Kritik Hususlar

Proses sırasında açığa çıkan atıkların tekrar sanayide katma değerli ürün üretiminde kullanılmasına özendirilmesi gerekmektedir.

Mevzuat ve Yasal Düzenlemeler

Mevzuatlarda atıkların tekrar sanayide katma değerli ürün üretiminde kullanılmasına özendirilecek düzenlemelerin yapılması gerekmektedir.

Teknik Altyapılar

Üretim, test ve sertifikasyon altyapıları yeterlidir.

İnsan Kaynakları

Üniversitelerde ve sanayide yeterli sayıda ve ihtiyaç duyulan yetkinlikte insan kaynağı mevcuttur.

Destek ve TeŒvikler

İlgili projelere maddi ve regülasyonlara bağlı teŒvikler yeterli görünmektedir.

Referanslar

- [1] R. Remus, M.A. Aguado-Monsonet, S. Roudier, L.D. Sancho, JRC REFERENCE REPORT “Best Available Techniques (BAT) Reference Document for Iron and Steel Production,” Seville, Spain, 2013. <https://doi.org/10.2791/98516>.
- [2] M. Robalinho, P. Fernandes, Software 2.0 for Scrap Metal Classification, in: Proc. 16th Int. Conf. Informatics Control. Autom. Robot., SCITEPRESS - Science and Technology Publications, 2019: pp. 666–673. <https://doi.org/10.5220/0007977506660673>.
- [3] U. UYSAL, Demir-Çelik Hurda İthalatında Yaşanan Sorunların Belirlenmesi ve Çözüm Önerileri, MUSTAFA KEMAL ÜNİVERSİTESİ, 2015.
- [4] Birsen Atakan ALBAYRAK, Dünya Hurda Hareketleri ve 2020 Türkiye Projeksiyonu, İTÜ, 2011.
- [5] S. Kiral, Döküm Yöntemi ile Üretimde Hurda Kaynakları ve Özelliklerinin Araştırılması, YTÜ, 2008.
- [6] ESTEP The Circular Economy Focus Group, Improve the EAF scrap route for a sustainable value chain in the EU Circular Economy scenario, Brussels, Belgium, 2021. <https://www.estep.eu/assets/Uploads/Improve-the-EAF-scrap-route-Roadmap-Final-V2-3.pdf>.
- [7] A. Bengtson, F. Vestin, V. Sturm, D. Eilers, P. Werheit, R. Noll, J. Laserna, L.M. Cabalín, J. Ruiz, A. González, U. Chiarotti, V. Volponi, V. Moroli, B. Husson-Tissier, P. Russo, U. DeMiranda, M. Zanforlin, M. Zani, H. Nören, L.-E. Berg, Laser-induced breakdown spectroscopy for advanced characterisation and sorting of steel scrap (LCS), Luxembourg PRINTED, 2012. <https://doi.org/10.2777/82355>.
- [8] R. Noll, A. Bengtson, J. Gurell, U. Chiarotti, R. Grieco, V. Volponi, M. Zani, A. Appell, M. Brunk, Inline elemental characterisation of scrap charging for improved EAF charging control and internal scrap recycling (IPRO), Luxembourg, 2015. <https://doi.org/10.2777/277589>.
- [9] S.J. Mannanal, S. Dehnhardt, T. Eickmeyer, K. Fußholz, A. Gesser, S. Tiedke, A. Boston, J. McGrath, P. Nolan, G. Monfort, P. Desneux, J. Sved, N. Menduev, F. Koehrmann, P. Russo, B. Husson-Tissier, On-line bulk composition analysis of steel scrap using PGNAAs (Scrap Probe), Luxembourg, 2013. <https://doi.org/10.2777/43463>.
- [10] M.R. E. Marton, G. Bomben, L. Marton, G. Calvagno, P. Ronchese, G. Zumerle, G. Cortellazzo, G. Viesti, L. Cossutta, P. Zanuttig, M. Benettoni, E. Conti, G. Nebbia, S. Squarcia, P. Calvini, M. Furlan, A. Mantero, S. Vanini, P. Checchia, F. Gonella, M. Pegoraro, Muons scanner to detect radioactive sources hidden in scrap metal containers, Luxembourg, n.d. <https://doi.org/10.2777/75975>.
- [11] R. Schulze, PRIMETALS TECHNOLOGIES AND SICON SIGN COOPERATION AGREEMENT FOR DIGITALIZATION OF SCRAP YARDS, Primetals News. (2021) 3. <https://www.primetals.com/press-media/news/primetals-technologies-and-sicon-sign-cooperation-agreement-for-digitalization-of-scrap-yards> (accessed December 4, 2022).
- [12] L. Kieush, J. Rieger, J. Schenk, C. Brondi, D. Rovelli, T. Echterhof, F. Cirilli, C. Thaler, N. Jaeger, D. Snaet, K. Peters, V. Colla, A Comprehensive Review of Secondary Carbon Bio-Carriers for Application in Metallurgical Processes: Utilization of Torrefied Biomass in Steel Production, Metals (Basel). 12 (2022) 2005. <https://doi.org/10.3390/met12122005>.

- [13] F. Memoli, C. Mapelli, M. Guzzon, Recycling of ladle slag in the EAF: A way to improve environmental conditions and reduce variable costs in steel plants, *Iron Steel Technol.* 4 (2007) 68–76.
- [14] M. Guzzon, C. Mapelli, V. Sahajwalla, N. Saha-Chaudhury, F. Memoli, M. Pustorino, The behaviour of the secondary metallurgy slag into the EAF. How to create a good foamy slag with the appropriate basicity using a mix of lime and recycled ladle slag as EAF slag former, *Proc. 38th Semin. Aciaria, Belo Horizonte, Brazil.* (2007) 1–12. https://www.researchgate.net/publication/267216928_The_behaviour_of_the_secondary_metallurgy_slag_into_the_EAF_How_to_create_a_good_foamy_slag_with_the_appropriate_basicity_using_a_mix_of_lime_and_recycled_ladle_slag_as_EAF_slag_for_mer.
- [15] L. Bianco, S. Porisiensi, G. Baracchini, L. Battigelli, C. Ceschia, Circular Economy in EAF Process: How to Make It Sustainable with Zero Waste Project in Ferriere Nord, *Univers. J. Manag.* 6 (2018) 190–197. <https://doi.org/10.13189/ujm.2018.060602>.
- [16] F.F. Grillo, J.L. Coleti, D.C.R. Espinosa, J.R. Oliveira, J.A.S. Tenório, Zn and Fe Recovery from Electric Arc Furnace Dusts, *Mater. Trans.* 55 (2014) 351–356. <https://doi.org/10.2320/matertrans.M2013385>.
- [17] A.T. Nair, A. Mathew, A. A R, M.A. Akbar, Use of hazardous electric arc furnace dust in the construction industry: A cleaner production approach, *J. Clean. Prod.* 377 (2022) 134282. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134282>.
- [18] L.J.H. Buitrago, I.D. Prada, G. Amaral-Labat, F. Beneduce Neto, G.F.B.L. e Silva, Microstructural, thermochemistry and mechanical evaluation of self-reducing pellets using electric arc furnace (EAF) dust containing zinc for Waelz process, *Matéria (Rio Janeiro)*. 23 (2018). <https://doi.org/10.1590/s1517-707620180002.0343>.
- [19] M.G. Maccagni, INDUTECH®/EZINEX® Integrate Process on Secondary Zinc-Bearing Materials, *J. Sustain. Metall.* 2 (2016) 133–140. <https://doi.org/10.1007/s40831-016-0041-0>.

Teknolojik Hedef 4:
**DR (DOĞRUDAN İNDİRĞEME) VE DİĞER ALTERNATİF DEMİR-
ÇELİK ÜRETİM YÖNTEMLERİ**

İklim etkileri daha az olan ve dünyada sıkça kullanılmaya başlanan doğrudan indirgeme proseslerinin geliştirilmesi, pilot tesislerin ve uygulamaların hayata geçirilmesi

Kritik Ürün/Teknoloji 4.1.

4.1. DRI ve diğer alternatif Demir-Çelik üretim yöntemleri geliştirilmesi, pilot gösterimleri ve ölçek büyütme çalışmaları

Öncelikli Ar-Ge ve Yenilik Konuları

4.1.a. Demir içerikli atıkların en etkin şekilde değerlendirilmesini sağlayacak doğrudan indirgeme (DR) proseslerinin ve tesislerin tasarımı

4.1.b. İndirgeyici Ergitme (SR) proseslerinin geliştirilmesi ve tesislerinin tasarımı

4.1.c. Yakıt olarak hidrojen veya doğal gaz kullanılabilen proseslerin geliştirilmesi ve pilot tesis çalışmalarının yapılması

4.1.d. Ülkemizde bulunan düşük tenörlü demir cevherlerinin kullanımına özel proseslerin tasarlanması

4.1.e. Plazma teknolojisi kullanılarak cevherden doğrudan çelik üretimi

Kritik Ürün/Teknoloji 4.1.

4.1. DRI ve diğer alternatif Demir-Çelik üretim yöntemleri geliştirilmesi, pilot gösterimleri ve ölçek büyütme çalışmaları

A. Teknik Açıklamalar, Yenilikçi Özellikler, Hedeflenen Performans ve Metrikler

Hurda tedarikindeki dışa bağımlılık ve yüksek fırın kurulum maliyetlerinin çok yüksek olması gibi durumlar, sektörü daha az sermaye gerektiren ve koklaşabilir kömüre gereksinim duymayan alternatif metalik demir üretim yöntemleri arayışına itmiştir.

Demir cevherinden ergime noktasının altında oksijen uzaklaştırılması suretiyle yüksek oranda (% 92'den fazla) metalik demir içeren katı bir ürünün elde edilmesini sağlayan «Direk İndirgenme Prosesleri» günümüzde en gelişmiş alternatif üretim yöntemleri olarak kabul görür hale gelmiştir.

DRI üretim yöntemleri kullanılan redükleyici türüne göre iki ana gruba ayrılır;

- ✓ *Gaz redükleyici kullanılan yöntemler*
- ✓ *Katı redükleyici kullanılan yöntemler*

Dünyada toplam DRI üretimi, 2019 yılında 108 milyon tona ulaşmıştır. En büyük gaz redükleyici sistem olan Midrex üretimin %60,5'ini oluştururken, katı redükleyici prosesler % 24'lük oran ile ikinci sırada, HyL prosesleri ise % 13,2'lik payla üçüncü sırada yer almaktadır. Geri kalan % 2,3'lük oran ise Finmet ve diğer gaz redükleyici kullanan proseslere aittir. Katı redükleyici kullanılan yöntemler yüksek karbon emisyonları sebebiyle değerlendirilmemiştir. Redükleyici olarak, gaz esaslı maddelerin kullanıldığı yöntemler bu sebeple ön plana çıkmaktadır. Dünya sünger demir üretiminin yaklaşık % 80'inde bu yöntem kullanılmaktadır. Yöntemin kolay kontrol edilmesi, proseslerin verimli gerçekleşmesi ve oluşan ürünün yüksek kalitede (Karbon oranı %1–3 ve düşük kükürt % 0,005) olmasından dolayı gaz esaslı yöntemler daha çok tercih edilmektedir [1].

Diğer bir alternatif demir üretim prosesi ise İndirgeyici Ergitmedir. İndirgeyici Ergitme (SR) kok kömürü olmadan demir cevherinden sıcak metal üretimi ile ilişkilidir.

Günümüz demir – çelik teknolojisine bakıldığında çelik üretiminde genel olarak iki farklı yol izlendiği görülmektedir. Bunlar doğal hammaddelerden başlayarak son ürünlere kadar giden entegre demir çelik üretim tesislerinde, demir cevheri ve kok kömürü ile çelik üretimi veya elektrik ark fırınlı sistemlerde hurdanın (veya sünger demir gibi hurda benzeri malzemenin) ergitilmesi ile son ürünlere kadar giden yöntemlerdir.

Ülkemizde çelik üretiminin % 65'i elektrik ark fırınları ile gerçekleştirilmektedir. Ülkemiz yurt içi hurda kaynakları yetersiz olduğundan, elektrik ark ocaklı çelik kuruluşlarımız için gerekli olan hurda büyük oranda ithalat yolu ile karşılanmaktadır.

Bureau of International Recycling'in 2018 ve 2019 yıllarını baz alarak hazırlamış olduğu rapora göre, Türkiye ortalama 18 milyon ton hurda ithalatıyla dünyada birinci sıradadır. 28 Avrupa ülkesi ve Amerika ise dünyanın en büyük hurda ihracatçısı konumundadır. Yine aynı rapora göre Almanya, Fransa, Hollanda ve İngiltere'nin içinde bulunduğu 28 Avrupa ülkesi toplam hurda ihracatının yarısından fazlasını Türkiye'ye yapmaktadır [2].

Mevcut duruma bakıldığında çelik üretiminin büyük kısmında dışa bağımlı durumda olan ülkemizde, yıllık yaklaşık 108 milyon ton üretim kapasitesine ulaşmış DRI prosesleri dikkat çekmektedir. Üretilen doğrudan redüklenmiş demirin elektrik ark ocakları ile çelik üretiminde, çelik kalitesini yükseltmek amacıyla hurda ile birlikte veya hurda yerine girdi olarak kullanılması giderek yaygınlaşmış ve DRI uluslararası pazarda önemli bir ticari mal haline gelmiştir. Özellikle ucuz doğal gaz kaynağına sahip, doğal gaz zengini ülkelerde bu kaynağa dayalı prosesler başarılı olmuş ve önemli üretim kapasitelerine ulaşmıştır. Ülkemizde özellikle Karadeniz açıklarında bulunan önemli bir doğal gaz rezervi ve bu rezervin daha da artma potansiyeli taşıması, DRI yönteminin ülkemizde uygulanabilirliğine dönük çalışmalar yapılmasını zorunlu kılmaktadır. Bu amaçla mevcut teknolojilerden yararlanabileceği gibi, yerli proses ve teknoloji geliştirme çalışmaları da gerçekleştirilebilir. Ayrıca DRI yönteminde hidrojenin kullanılmasına dönük projeler sayesinde pilot tesis kurularak, önümüzdeki yıllarda hidrojen teknolojisinin DRI yönteminde kullanılmasına dönük çalışmalar yapılabilir.

Elde edilen sünger demirin de hızlı bir şekilde oksitlenmesi ve depolanma ömrünün çok kısa olması nedeniyle hammadde olarak kullanacak tesis ile entegrasyonu sağlanmalıdır.

ÖNCELİKLİ AR-GE VE YENİLİK KONULARI

4.1.a. Demir içerikli atıkların en etkin şekilde değerlendirilmesini sağlayacak doğrudan indirgeme (DR) proseslerinin ve tesislerin tasarımı

Küresel çelik endüstrisinde, üretilen her ton çelik için 400 kg'dan fazla katı yan ürün oluşmaktadır. Bu yan ürünün çoğu (%70-80) cüruf formundadır ve gerekli hazırlama ve ön işlemler yapıldıktan sonra çimento endüstrisinde ve/veya yol ve inşaatlarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Kalan katı yan ürünler, tozlar, çamur ve yağlı/yağsız hadde tufalı olarak sınıflandırılabilir [3-4].

Entegre çelik tesislerinde oluşan demir içeren toz ve çamurun geri dönüşümü; soğuk bağlı aglomerasyon, enjeksiyon, doğrudan indirgeme ve indirgeyici ergitme ile gerçekleştirilebilir. Bunlardan soğuk bağlı aglomerasyon; teknik, ekonomik ve çevresel açılardan kapsamlı bir bakış açısıyla, çelik endüstrisi yan ürünü olan ince toz ve çamurun geri dönüştürülmesi için en uygun süreç olarak kabul edilir [3-5].

Soğuk bağlı aglomerasyon yöntemi genellikle iki yoldan biriyle elde edilmektedir; briketleme veya peletleme. Hammadde karışımı, önemli miktarlarda hem ince hem de kaba parçacıklar içeren geniş bir parçacık boyutu dağılımına sahip olduğunda, soğuk bağlı briketleme, peletlemeye göre daha üstündür. Hammadde harmanı yaklaşık %80 < 200-250 µm'lik bir parçacık boyutu dağılımına sahip olduğunda, soğuk bağlı peletlemenin en uygun aglomerasyon yöntemi olduğu kabul edilir [4].

Katı karbon içeren demir oksit aglomeratlarındaki kendi kendini indirgeme özelliklerinin iyi anlaşılması, çelik imalat endüstrisinde geri dönüşümde kullanılmak üzere yan ürünler içeren soğuk bağlanmış aglomeratların daha da geliştirilmesi için gereklidir. Demir içeren bu tür atıkların çelik üretim endüstrisi için hammadde olarak kullanılmak üzere briketlenmesi fikri birçok fabrikada başarıyla uygulanmaktadır [4].

Yanmamış karbon ve nispeten yüksek miktarda demir oksit içeren yüksek fırın baca tozları, 25-35 kg/ton sıcak metal miktarında, yüksek demir oksit ve kireç içeren BOF çamurları ise 25-35 kg/ton ham çelik miktarında oluşmaktadır. Ayrıca esas olarak demir oksitlerden oluşan tufal, 20-50 kg/ton sıcak metal miktarında açığa çıkmaktadır. Bu atıkların tümü yüksek demir oksit içeriği nedeniyle demir üretimi için bir hammadde olarak anılabilir [3, 4, 6].

Kok kullanımının azaltılması ve artan çevresel endişeler, alternatif demir-çelik üretim proseslerinin geliştirilmesi üzerinde yeni çalışmalar yapılmasına sebep olmuştur. Demir-çelik üretim endüstrisinde büyük miktarlarda demir ve karbon içeren metalürjik toz ve çamur açığa çıkmaktadır. Zayıf ıslanabilirliğe sahip bu ince tanelerin aynı zamanda yüksek oranda Zn, Pb ve alkali içermeleri nedeniyle doğrudan sinter harmanı içerisine katılarak yüksek fırında hammadde olarak kullanılması ve geri dönüştürülmesi, hem zorlaşmakta hem de tufal gibi yüksek demir içeren bu hammaddelerin nispeten yüksek safiyetinden faydalanılamamaktadır.

Demir-Çelik tesislerinin atıklarının mümkün olduğunca en az demir kaybıyla tekrar kullanılabilmesi ve yüksek temizliğe sahip demir oksit içeren tufallerin değerlerinin kaybedilmeden hammadde olarak kullanılabilmesi beklenmektedir.

4.1.b. SR (İndirgeyici Ergitme) proseslerinin geliştirilmesi ve tesislerinin tasarımı

Günümüzde sıvı ham demir (SHD) üretimi için hakim olan proses, katı şarj malzemelerinin (kok ve demir oksit) indirgeyici gazla karşı ters akış prensibi ile indirgenerek ergitildiği Yüksek Fırın (YF) prosesidir. Bu süreçte şarj yığınının düzgün bir şekilde fırın içerisinde aşağıya doğru hareket etmesi ve reaktif gazların iyi bir şekilde şarja nüfuz etmesi için hem kok hem de demir cevherinin belirli bir parça tane boyutunda olması gerekmektedir [7].

Madenden çıkarılan demir cevheri hem iri parçalar hem de toz halinde olmasına rağmen yüksek fırına sadece belirli boyutlarda parça cevherler şarj edilebilmektedir. Bununla birlikte, bugün üretilen demir cevherinin %80'inden fazlası, yalnızca sinterleme veya peletleme işlemleriyle şarj malzemesine aglomere edilerek fırında kullanılabilen ince tanelerden oluşmaktadır. Sinterleme için kullanılan demir cevherinin maksimum tane boyutu 8–12 mm ve ortalama tane boyutu 0,2–1 mm'dir. Peletleme işlemi için kullanılan cevher ise, demir içeriğini zenginleştirmek için uygulanan cevher hazırlama işlemleri ile üretilen (maksimum toz boyutu yaklaşık 60-40 mikrometre) çok daha ince boyut dağılımındaki tozlardan oluşmaktadır. Entegre bir çelik fabrikasında demir üretimi kısmı yüksek fırın tesisi ile birlikte hem kok tesisi hem de sinterleme tesisinden oluşmaktadır. Peletler normalde maden sahasına yakın tesislerde üretilir ve yüksek fırının olduğu entegre tesise taşınır [8].

Günümüzde bir yüksek fırından daha düşük yatırım maliyeti, enerji tüketimi ve düşük emisyonları olan bir demir üretim prosesine olan talepler artmaktadır. Ergitme indirgeme (Smelting Reduction-SR) prosesleri sıvı ham demir üretimi için ortaya çıkan alternatif proseslerdir. Bu proseslerin ortak noktası yüksek fırına kıyasla kok yapımının bulunmadığı kömürün doğrudan kullanılabilirdiği prosesler olması ve üretilen demirin sıvı halde olmasıdır. Bu

prosesler için ilk geliştirmeler 1970-80'lerde farklı ülkelerde başlatılmıştır. Proseslerin geliştirilmesinde koklaşabilir taş kömürlerinin elektrik santrallerinde kullanılan kömürler gibi ucuz ve koklaşmayan kömürlerle ikame edilmesi; böylece kok üretimi ortadan kaldırılmasıyla daha düşük işletme maliyetleri ve düşük emisyon değerlerine ulaşılması hedeflenmiştir [8].

SR prosesleri iki ana gruba ayrılabilir:

– Corex, FINEX ve Redsmelt NST gibi cevherlerin ön indirgenmesini içeren prosesler: Bu proseslerde ergitme bölümünde çıkan gazlar ön indirgeme aşaması için kullanılmaktadır.

– Hismelt® gibi ön indirgeme aşaması olmayan prosesler: Ergitme, demir cevherlerinin ve kömürün karıştırıldığı bir reaktörde tek bir işlemdede gerçekteştirilmektedir.

Bazı veriler, ergitme sırasında kok kömürün yerini kömür aldığında açığa çıkan CO₂'in azaldığını göstermektedir. Her iki proses grubunda da proses gazları daha yüksek CO₂ üreten YF'na göre daha az olmaktadır. İndirgeyici ergitme proseslerinin önemli bir dezavantajı yüksek miktarlarda O₂'ye ihtiyaç duymalarıdır. Günümüzde önemli indirgeyici ergitme proseslerine ait özellikler Tablo 4.1 de verilmiştir [7].

Tablo 4.1. Önemli indirgeyici ergitme proseslerine ait özellikler [7].

	Corex®	FINEX®	Hismelt
şarj edilen demir oksit	Parça cevher	İnce taneli cevher	İnce taneli cevher, Atık oksitler
Ön İndirgeme Fırını	İndirgeme şaftı	Akışkan yatak	Opsiyonel ön indirgeme
Ön indirgeme oranı, %	80-95	85	10
Ön indirgeme sıcaklığı, °C	800-850		700
Kömür şarjı	Parça	Parça ve pulverize	İnce taneli
İndirgeyici ergitme	Ergitme-gazlaştırma	Ergitme-gazlaştırma	Düşey demir ergitme banyosu
Ergitme	Cevherin ergitilmesi, kömürün gazlaştırılması	Cevherin ergitilmesi, kömürün gazlaştırılması	Banyo içerisinde
Basınç, kPa	300-450	300-450	80
Oksitleyici gaz	Oksijen	Oksijen	Sıcak hava, oksijen
Yanma sonrası oranı, %	-10	-10	50-70
Kömür tüketimi, kg/t SHD	900-1050	700	700-810
Oksijen tüketimi, m ³ /SHD	>500	>500	260
SHD Sıcaklığı, °C	1490-1520	1520	1420
SHD bileşimi, %	C 4.5–4.7 Si 0.6–0.8 S 0.01–0.04 P < 0.1	C 4.5 Si 0.65 S 0.03 P < 0.1	C 4.4 Si <0.1 S 0.1 P 0.02
Çıkış gazı, MJ/m ³	7.5-8.5	7.5-8.5	3.2
Proses süresi	Saatler	Saatler	Çok hızlı
Enerji tüketimi, GJ/tSHD	18.9-21.7		18.9-20

SR prosesleri, kok yapımı ve sinterlemenin yüksek enerji ve emisyon seviyelerine sahip yoğun süreçlerinin getirdiği zorlukların ortadan kaldırılması amacıyla geliştirilmiştir. Bu proseslerde demir cevheri önce bir ön indirgeme ünitesinde katı halde iken indirgenir. Bu ilk aşamada ortaya çıkan doğrudan indirgenmiş demire benzer nitelikteki ürün, daha sonra kömürün gazlaştırıldığı ergitme indirgeme haznesinde alınarak ergitilir. Bu ikinci aşamada demir oksitler daha da indirgenirken, ergitme için gerekli ısı ve CO bakımından zengin sıcak gaz üretilir. Kömürün gazlaştırılması, sıvı haldeki ön indirgenmiş demir oksitler ve oksijen ile oluşan reaksiyon sonucunda meydana gelir. Burada açığa çıkan ısı, demiri ergitmek için kullanılırken indirgeyici sıcak gaz prosese üst kısımdan giren demir oksitlerin indirgenmesi için ön indirgeme ünitesine taşınır. Yanma sonrası (post combustion) olarak adlandırılan bu süreçte üretilen gazın ön indirgeme potansiyeli artarken ergitme için gerekli olan ısı da sağlanmış olur. Bu proseslerin enerji tüketimi yüksek fırına göre daha düşüktür ve kok üretimine gerek duymamaktadırlar [7].

Bu proselerde daha düşük kaliteli hammaddeler kullanılması durumunda bile üretilen sıvı ham demirin kalitesi YF' da üretilen ham demire benzer nitelikte olmaktadır. Ancak çok düşük kalitede ham maddeler kullanılması durumunda proste daha fazla kömüre ihtiyaç duyulması nedeniyle CO₂ emisyonları artmaktadır. Daha az enerji tüketimi ve düşük CO₂ emisyon değerlerine daha kaliteli demir cevheri ve kömür kullanımı ile ulaşılabilmektedir [7].

Geleneksel entegre demir çelik tesislerinde üretimi yapılan Sıvı Ham Demir (SHD) üretimi, demir oksitli demir hammaddelerinin kok kömürünün kullanılarak indirgendiği Yüksek Fırınlarda (YF) yapılmaktadır. Buna bağlı olarak hem yüksek fırınlardaki SHD üretiminde hem de kok tesisi ve YF sobaları gibi sistemlerde CO₂ emisyonları ortaya çıkmaktadır. Tablo 4.2 de spesifik CO₂ emisyon değerleri verilmiştir. Geleneksel YF demir üretim sisteminin toplam doğrudan CO₂ emisyonu, ton SHM başına 1699,0 kg CO₂'dir. Enerji üretimi için atık ısı geri kazanımı ve çıkış gazlarının enerjisinden faydalandığı dikkate alındığında, toplam CO₂ emisyonu ton SHD başına 1222,7 kg CO₂ dir [7].

Tablo 4.2. Yüksek Fırın SHD üretim sisteminin malzeme tüketimi ve CO₂ emisyonu [7].

Malzeme	Tüketim /t SHD	Emisyon Faktörü	Spesiifik CO ₂ emisyonu (kg)
Doğrudan Emisyon			
Koklaşabilir Kömür	370 kg	0.787 tC/t SHD	1067.7
Kömür Tozu	216 kg	0.703 tC/t SHD	557.3
Kireçtaşı	59 kg	432 kg CO ₂ / t SHD	25.5
Dolomit	98 kg	468 kg CO ₂ / t SHD	45.9
Kalsiyum oksit	22 kg	116 kg CO ₂ / t SHD	2.6
Toplam			1699 kg
Dolaylı Emisyon			
Elektrik	185 kWh	0.9518 kg CO ₂ / kWh	176.1
Satın alınan Pelet	239 kg	154 kg CO ₂ / t SHD	36.8
Kok Kuru Söndürme	26.7 kWh	0.9518 kg CO ₂ / kWh	-25.4
Enerji Santrali için Baca Gazı	488.7 kWh	0.9518 kg CO ₂ / kWh	-465.1
Granüle Curuf Kullanımı	265 kg	750 kg CO ₂ / t SHD	-198.7
Doğrudan ve Dolaylı Emisyon Toplamı			1222.7

Genel olarak SR (Smelting Reduction-İndirgeyici Ergitme) prosesleri, DR (Direct Reduction-Doğrudan İndirgeme) olarak sınıflanan indirgeme ve ergitme prosesleridir. Bu prosesler demir cevherinin katı halde indirgenmesi ve ardından sistemin reaktör kısmında ergitilmesi kademelerinden oluşmaktadır. Ürün, yüksek fırından çıkan sıvı metal yüksek fırın ile üretilen demirle aynı şekilde işlenip rafine edilebilen sıvı ham demirdir. Demir cevherinin doğrudan indirgenmesi, çelik üreticisine sinterleme ve kok yapımına ihtiyaç duymadan ham maddeleri kullanma fırsatı sağlamak için BF işleme alternatif bir çözüm olmuştur [9].

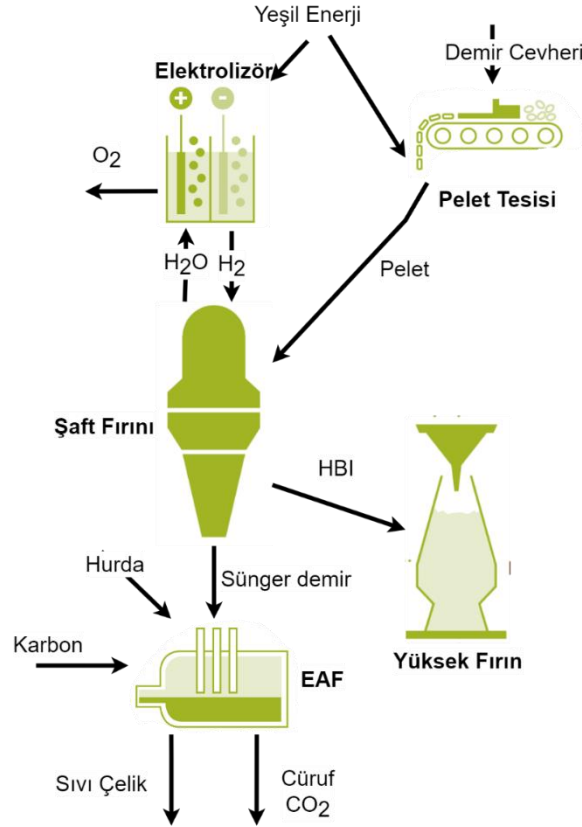
Bu proseslerin en önemli avantajı, ana enerji kaynağı ve indirgeyici madde olarak kömürü kullanılmasıdır. Kömür, daha kolay erişilebilirliği ve düşük maliyeti nedeniyle kok veya doğal gazı göre daha çok tercih edilmektedir. Bu proseslerde küçük taneli cevher veya konsantre kullanılması durumunda sinterleme maliyeti de ortadan kaldırılabilir. İndirgeyici Ergitme proseslerinin temel özellikleri şu şekildedir:

- İndirgeme işlemleri daha yüksek sıcaklıklar gerektirirler.
- Önceden sinterleme yapılmadan toz cevherlerin (konsantreler) kullanımı mümkündür.
- Kömür koklaştırılmadan kullanılmaktadır.
- Üretilen demir sıvı ham demirdir.
- Mümkün olan düşük yatırım ve üretim maliyeti ile daha küçük tesislerin inşasına olanak sağlamaktadır.
- Çevreye olan zararı daha azdır [9].

4.1.c. Yakıt olarak hidrojen veya doğal gaz kullanılabilen proseslerin geliştirilmesi ve pilot tesis çalışmalarının yapılması

Yeşil enerji kullanılarak elektroliz yolu ile üretilen hidrojen gazı (H_2) ve pelet, şaft fırınına beslenmektedir. Şaft fırınında üretilen DRI (sünger demir), çelik üretimi için hurda ile ark ocağına beslenmektedir. Karbonsuz çelik üretimine giden yolu açacak bir geçici teknoloji olarak, yüksek kaliteli bir DRI olan "sıcak briketlenmiş demir" (HBI) biçiminde bir yüksek fırına da beslenebilir. Bu, yüksek fırın verimliliğini önemli ölçüde artırır ve kok kullanımını azaltır [10].

Tenova, Salzgitter ve Paul Wurth dâhil olmak üzere birçok firmayı içeren ve AB tarafından finanse edilen GrInHy 2.0 Projesi, MIDREX ve HYL'de kullanım için dünyanın en büyük H_2 üreten buhar elektrolizörünü geliştirmeyi amaçlamaktadır (Şekil 4.1).

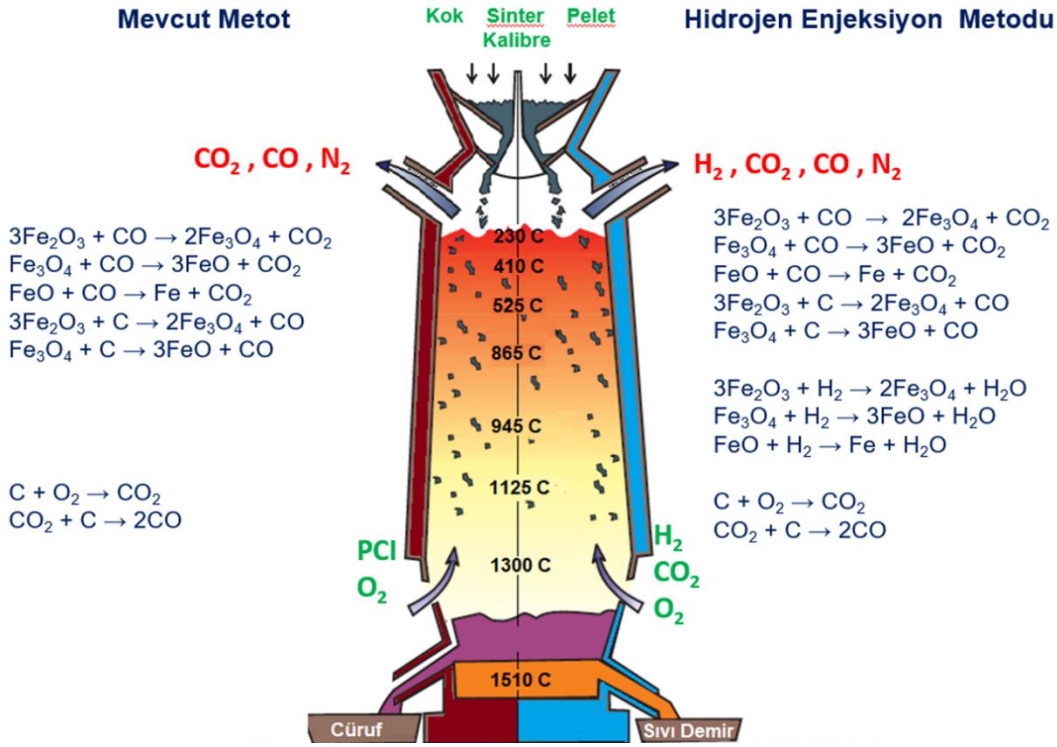


Şekil 4.1. Hidrojen temelli şaft fırınlı demir üretimi [10].

Hidrojen, tüm yakıtlar arasında birim kütle başına en yüksek enerji içeriğine sahip iklim dostu bir yakıttır. Ayrıca yeşil hidrojen, yenilenebilir üretimle güçlendirilen su elektrolizinden kaynaklandığı için karbonsuz bir yakıt olarak işlenir. Hidrojen güçlü bir indirgeyici ajandır ve güçlü yanıcılık ve yayılma özelliğine sahiptir. Sıfır CO_2 emisyonuna yönelik birçok endüstriyel alan için umut verici bir temiz yakıt olarak kabul edilmektedir. Özellikle bu avantajlar, hidrojeni demir yapım sürecinde karbon bazlı hammaddeler için üstün bir ikame yapmaktadır.

Demir üretim sürecinde, geleneksel yakıtların tümü, ısıtma ve demir cevheri indirilmesi amacıyla metalürjik kok ve toz haline getirilmiş kömür gibi karbon kaynaklarıdır. Örneğin, pulverize kömür enjeksiyonunda (PCI), kok tasarrufu sağlamak için yüksek fırın tüyerlerinden toz haline getirilmiş kömür enjekte edilmekte ve böylece yakıt maliyetleri önemli ölçüde azalmaktadır. Yüksek fırınlarda hidrojen kullanımı, potansiyel olarak bu karbon türevli yakıtların yerini alabilir ve CO₂ emisyonlarını azaltabilmektedir [11].

Yüksek fırın içerisinde demir oksitler ile tepkimeye giren CO ve C'nin gerçekleştirdiği her reaksiyonu, H₂ ile de gerçekleştirmektedir Şekil 4.2.



Şekil 4.2. Yüksek Fırın reaksiyonları [11].

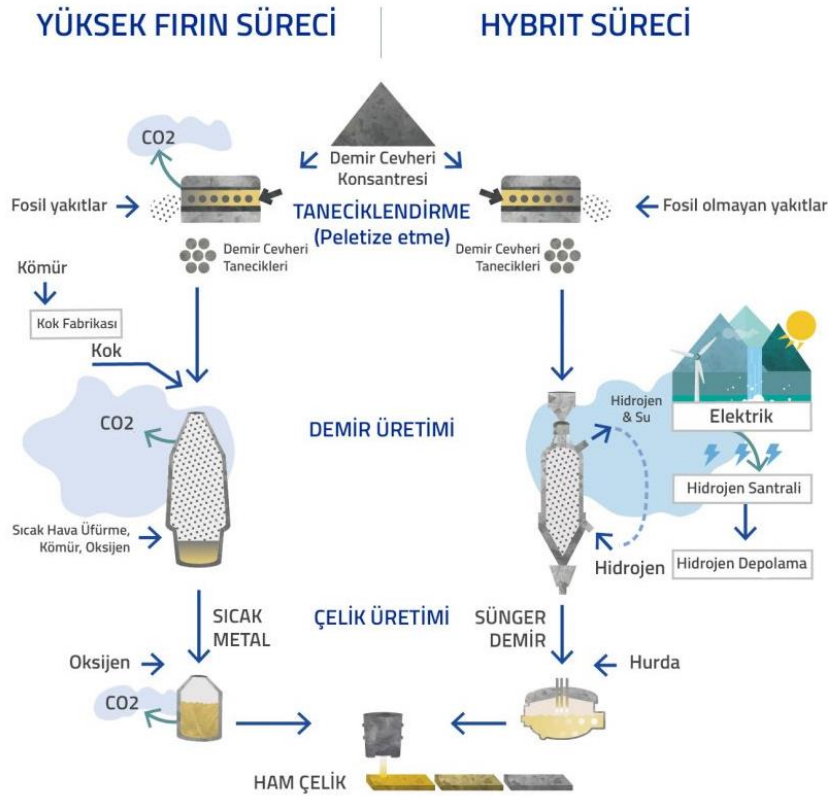
Fırın içerisindeki gerçekleşen reaksiyonların:

- %60'ını CO redüksiyonu,
- %10 H₂ redüksiyonu,
- %30 doğrudan redüksiyon oluşturması öngörülmektedir.

Kömür ve kok kömürü yerine tüyer enjeksiyonu yoluyla yüksek fırınlara 2 farklı hidrojen enjeksiyonu vardır. Bunlar:

- Hidrojen ile kömürün tüyerlerden enjeksiyonu,
- Hidrojenin tüyerlerden enjeksiyonudur.

SSAB, LKAB ve Vattenfall, fosil içermeyen demir ve çelik üretimi için bir teknoloji geliştirmek amacıyla 2016 yılında HYBRIT, Hidrojen Çığır Açan Demir Üretim Teknolojisini yaratmıştır. Haziran 2021'de üç şirket, HYBRIT'in Luleå'daki pilot tesisinde üretilen, dünyanın ilk hidrojeni azaltılmış sünger demiri ile ilk yeşil çeliği üretmiştir. HYBRIT sisteminde sıvı ham demir üretimi sırasında geleneksel olarak kullanılan sinter, metalürjik kok kullanılmamaktadır. Yenilenebilir kaynaklardan üretilen hidrojen gazı ile demir cevheri doğrudan redüklenmektedir. Girişim, karbondioksit emisyonlarını İsveç'te %10 ve Finlandiya'da %7 azaltma potansiyeline sahiptir. Ağustos 2021'de Hybrit prosesinden ilk ürün alınmıştır [12].



Şekil 4.3. Yüksek Fırın ve Hybrit süreç [12].

Midrex, doğrudan indirgenmiş demir (DRI) üretimi için geliştirilmiş bir demir üretim prosesidir. Proses, gaz bazlı bir şaft fırını işlemini içerir, genellikle doğal gazdan ve/veya hidrojenden oluşan indirgeyici gazı kullanarak demir cevheri pelletlerini veya parça cevheri ergitmeden DRI'ye indirgeyen katı hal indirgeme işlemidir.

Redükleyici gazın elde edilmesi doğalgaz veya hidrokarbonların ayrıştırılmasıyla gerçekleştirilir. Kullanılan redükleyici gazın hidrokarbonca zengin, reaksiyon hızının yüksek olması istenir. Demir cevherleri, reaktöre bir taşıyım vasıtası ile şarj edilmektedir. Bu sistemde, demir cevherleri, atmosferik basınçta reaktörü dolduruncaya kadar şarja devam edilir. Demir

cevherleri, yüksek basınçta redüklendikten ve soğutulduktan sonra, reaktörün alt kısmından dışarı alınır [13].

MIDREX® Tesisleri, 1969'dan beri % 50'nin üzerinde hidrojen ile yapılmış 955 milyon tondan fazla DRI üretmiştir. Midrex ve Primetals tarafından ortaklaşa yazılan ve Haziran 2017'de ESTAD Konferansı'nda sunulan "Avrupa'da Doğrudan İndirgemenin Geleceği - Orta ve Uzun Vadeli Perspektifler" başlıklı makalede belirtildiği gibi, hidrojen bir DRI tesisinde iki şekilde kullanılabilir. Bir miktar H₂, doğal gazın bir kısmının yerine doğal gaz temelli bir tesise eklenebilir veya DR tesisi % 100 H₂'ye dayanabilir. Bir MIDREX® Tesisine H₂ eklenmesi durumunda, gereken doğal gazın üçte biri ikame edilebilir. Örneğin, 20.000 Nm³/h doğal gaz yerine 60.000 Nm³/h H₂ ikame edilebilir [14].

İlk modelleme ve laboratuvar deneylerine dayanarak, bir MIDREX® Şaft Fırınında DRI yapmak için neredeyse saf hidrojen kullanmak mümkündür. Hidrojen tüketimi yaklaşık 550 Nm³/t DRI'dir. Ayrıca, indirgeme gazı ısıtıcısı için yakıt olarak 250 Nm³ / t DRI H₂ veya atık ısı, elektrik ve / veya doğal gaz gibi diğer çevre dostu ısı kaynakları gereklidir. Bu süreçle CO₂ emisyonları, BF/BOF çelik üretim rotasına kıyasla %80'e kadar azaltılabilir [14].

Çin, Pekin'de bulunan Sinosteel Engineering & Technology Co., Ltd., hidrojen bazlı 1.000.000 ton/yıl ENERGIIRON® doğrudan indirgeme (DR) tesisinin tasarımı ve tedarigi için kısa süre önce Tenova ile sözleşme imzalamıştır. Tesis, Çin'in Guangdong Eyaleti, Zhanjiang Ekonomik ve Teknolojik Bölgesi'nde bulunan Baosteel Zhanjiang Iron & Steel Co. Ltd'de kurulması planlanmaktadır. Tenova ve Danieli tarafından ortaklaşa geliştirilen teknolojiye dayanan yeni ENERGIIRON® tesisi, doğal gaz (NG) ve Kok Fırın Gazı (COG) ile karıştırma imkânı ile indirgeyici gaz olarak esas olarak hidrojen kullanacaktır. Aynı ENERGIIRON® ZR şemasını kullanarak herhangi bir kombinasyon veya oranda farklı indirgeyici gazları kullanma esnekliği sağlaması öngörülmektedir. Tesis ayrıca piyasada CO₂ yakalama ve satma kapasitesine sahip olacak şekilde tasarlanacak olup, CO₂ emisyonlarını daha da azaltacak ve tesis operasyonları için ek bir gelir akışı sağlayacağı düşünülmektedirler [15].

Tosyalı, bu süre zarfında, 2018 yılı sonunda dünyada sayılı olan soğuk ve sıcak şarj ile çalışabilen 2,5 milyon ton yıl kapasiteli dünyanın en büyük doğalgaz ile çalışan DRI tesislerini kurmuştur. DRI tesisleri ile demir cevherinden üretilen peleti, çelik kütük üretiminde hammadde olarak kullanılabilir duruma gelmiştir. Demir cevherini işleyerek yarı mamul olan peletlerin üretilmesi için kurulan 4 milyon ton kapasiteli pelet tesisleri 2018'nin sonunda faaliyete geçmiştir. Tosyalı Holding çatısı altında Cezayir'de faaliyet gösteren Tosyalı Algerie, 2021'de

tek bir doğrudan indirgenmiş demir (DRI) modülüyle yıllık 2,3 milyon tondan fazla üretim gerçekleştirerek yeni bir dünya rekoru daha kırmıştır.

Yüksek Fırınlarda Hidrojen Kullanımı Uygulamaları

KİMİTSU STEEL

2018'de Kimitsu Steel, hidrojen enjeksiyonunu 12 m³ deneysel BF pilot ölçeğinde test etmiştir.

NEDO, Kobe Steel, Ltd ile birlikte; JFE Çelik A.Ş.; Nippon Steel & Sumitomo Metal Corp.; Nippon Steel & Sumikin Engineering Co., Ltd.; ve Nisshin Steel Co., Ltd., dünyanın en büyük deneysel yüksek fırınının (12 m³ hacimli) CO₂ emisyonlarını azaltma kapasitesinin test işlemlerini tamamlamıştır. Yüksek fırın, 2016 yılında Kimitsu Works, Nippon Steel & Sumitomo Metal bünyesinde inşa edilmiştir.

Üç boyutlu matematiksel bir yüksek fırın modeli kullanılarak, hidrojen içeren gaz halindeki indirgeyicilerin yüksek fırınlara enjekte edilmesinin CO₂ emisyonları üzerindeki etkisi simüle edilmiştir. Simülasyon sonuçlarına dayanarak, 12 m³lük deneysel yüksek fırında uygulama testleri yapılmış ve aşağıdaki bulgular elde edilmiştir.

- Toplam hidrojen giriş oranı kullanıldığında 277 Nm³/tshd dir. Deneysel yüksek fırından CO₂ emisyonlarının %12 oranında azaltılabileceği doğrulandı. Bu sonuç, deneysel yüksek fırının 32 gün boyunca sürekli çalıştırılmasıyla kanıtlanmıştır.
- Hidrojen girişi ile hidrojen indirgeme oranı arasında pozitif bir korelasyon gözlemlenmiştir.
- Yüksek fırına toplam hidrojen girişi aynı olduğunda, CO₂ emisyonlarını azaltmanın etkisi enjekte edilen gazın türüne göre değişmektedir. CO₂ emisyonunun azalmasının, gaz halindeki indirgeyicinin bozunma ısısından ve oksijen enjeksiyon hızından etkilendiği simülasyonla açıklığa kavuşturulmuştur [16].

THYSSENKRUPP

2019'da ThyssenKrupp AG, Almanya'da 9 No.lu yüksek fırında 28 tüylerden biri aracılığıyla hidrojen enjeksiyonunu ilk kez test etmiştir.

- Proje süresi: 14 ay
- Proje bütçesi: 2,7 milyon Euro
- %40'ı Whestphalia devlet bütçesinden karşılanmış
- 25.000 Nm³/saat enjeksiyon ile 4600 ton günlük üretim

- 1 ton pik demir için 11,7 kg hidrojen
- Ton pik demir başına %19 oranında CO₂ emisyon azaltımına ulaşılmıştır.

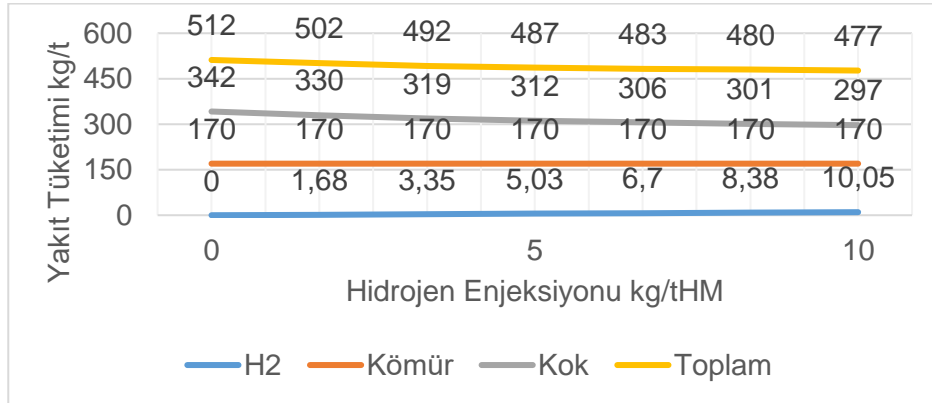
2023 senesinde en az 3 adet Yüksek Fırın'ı tamamıyla hidrojen ile çalıştırmayı planlamaktadır [17].

CASSOTIS

İtalyan Cassotis firması tarafından Cassotis Entegre Çelik Fabrikası modeli simülasyonu oluşturulmuştur.

Her iki reaksiyon da süreçte aynı anda meydana gelir. Bununla birlikte, yüksek fırını kok ve kömür ile doldururken, CO₂'ye dayalı indirgeme reaksiyonu, katı yakıtların bileşimi nedeniyle daha yüksek oranda gerçekleşir ve daha fazla CO₂ üretir. Üretimi azaltmanın alternatif, demirin yerine su üretecek olan hidrojen tarafından indirgenmesini desteklemek olacaktır.

Bu, yüksek fırına hidrojen gazı (H₂) enjekte edilerek yapılabilir (Şekil 4.4). Ampirik testler, tüketilen her bir kilogram H₂'nin yaklaşık 3,9 kilogram kok yerine geçtiğini gösterdi. Aşağıdaki resimler, bu teknolojinin yakıt tüketimi* ve dolayısıyla CO₂ emisyonu üzerindeki etkisini göstermektedir. Optimizasyon, bir ton sıcak metal (tshd) başına 10 kg H₂'nin CO₂ emisyonunu ton başına 0,123 t CO₂ azalttığını göstermektedir [18].



Şekil 4.4. Yüksek Fırın yakıt tüketimi [18].

Redükleyici olarak hidrojen kullanımı için birtakım hususlar vardır, bunlardan ilki sıcaklıktır. Çok fazla hidrojenle DRI, demir yapımı reaksiyonu nedeniyle indirgeme gazı şaft fırınına girdikçe soğur. Bu nedenle, istenen indirgeme sıcaklığını korumak için doğal gaz eklemek gerekir. Midrex modellemesine göre, 50 Nm³/t DRI oranında doğal gaz ilavesi bunu sağlamalıdır [14].

İkinci konu DRI karbon içeriğidir. DRI'nin büyük çoğunluğu EAF'lerde kullanılır. Günümüzde EAF çelik üretimi uygulaması genellikle ya DRI, HBI ve pik demir gibi metalik yüklü malzemelere ya da saf karbon olarak eklenen karbonu kullanır. Bu karbonu enjekte edilen oksijenle yakmak, elektrik tüketimini azaltan ve daha hızlı erimeyi sağlayan önemli bir ısı oluşturur. Pik demir, karbonla doymuş BF sıcak metalden yapıldığı için % 4-4,5 karbon içerir. DRI, prosese, kullanılan gazın azaltılmasına ve DR tesisinin çalışma şekline bağlı olarak yüzde 1-4,5 karbon içerebilir. Çoğu EAF çelik üreticisi, yüzde 1,5-3 karbonlu DRI kullanmayı tercih eder; ancak optimum karbon seviyesi, metalik yük karışımına ve üretilen çelik kalitesine göre değişir [14].

İndirgeyici gazda yüksek miktarda hidrojen bulunduğundan, istenen karbon düzeyini elde etmek için işlemin herhangi bir yerine hidrokarbon eklemek gerekecektir. DRI karbonlama seçenekleri, soğutma bölgesine veya fırın alt konisine hidrokarbon eklenmesini içerir. Sıcaklık kontrolü için 50 Nm³ / t doğal gaz ilavesi, DRI karbonunun yaklaşık % 1,4 olmasını sağlar. Çelik üretimindeki bir sonraki evrim, demiri karbon kullanmadan eritmek olacaktır, ancak bu, karbon içeriği azaldıkça çeliğin erime noktası arttığı için çok enerji yoğun olacaktır [14].

Bugün, çelik endüstrisinin CO₂ ayak izini büyük ölçüde azaltmak için en iyi olasılık, demir cevheri için enerji kaynağı ve indirgeyici olarak saf hidrojenin kullanılmasıdır. Bu hedefe ulaşmak için dünya çapında birçok çaba sarf edilmektedir. Hidrojen doğrudan indirgeyici demir yapımını uygulamanın önündeki ana engel, büyük bir CO₂ ayak izi olmadan saf hidrojen üretmenin zorluğudur. Bu engele rağmen, hükümetler ve endüstri, yakın gelecekte bir Hidrojen Ekonomisini gerçeğe dönüştürmenin ve onunla birlikte demir ve çelik üretmenin daha temiz bir yolunun yollarını aramaktadır.

4.1.d. Ülkemizde bulunan düşük tenörlü demir cevherlerinin kullanımına özel proseslerin tasarlanması

Ülkemizde doğrudan yüksek fırına beslenebilecek kalitede (>%50 Fe içerikli) parça demir cevheri rezervlerinin giderek azaldığı bilinen bir gerçektir. Düşük tenörlü demir cevherleri genellikle zenginleştirme işlemine tabi tutulduktan sonra yüksek fırında kullanılabilir hale gelmektedir.

Ülkemizde yaklaşık %55-56 Fe tenörlü manyetit demir cevheri zenginleştirilerek, sinter tesisleri için % 63 Fe tenörlü sinterlik konsantre, yüksek fırınlar için de % 67 Fe tenörlü pelet üretilmektedir. Divriği B Kafa demir cevheri yatağından, demir-çelik fabrikalarının

gereksinimleri doğrultusunda yılda ortalama 500.000 ton civarında %56-58 Fe tenörlü hematit demir cevheri üretilerek entegre tesislere sevk edilmektedir.

Ülkemizde silis, kükürt, bakır, karbonat, alümina, titan, fosfor ve arsenik içeren ve sektörde maliyeti, kaliteyi ve üretimi doğrudan etkileyen sorunlu demir cevheri yataklarımız da mevcuttur. Demir tenörleri % 20-54 arasında olan bu yataklar Malatya-Sivas-Erzincan-Bingöl, Kayseri-Kahramanmaraş, Balıkesir-Aydın, Ankara ve Kırşehir bölgelerinde yer almaktadır. Bu sorunlu yataklardan % Fe'si 39, % Mn'si 4 olan Malatya-Hekimhan siderit cevherinden yılda $500-600 \times 10^3$ ton üretilerek özellikle İsdemir'de %20 oranlarında sinter harmanında kullanılmaktadır [19].

Yüksek TiO_2 içeriği, yüksek SiO_2 oranı, çok düşük tenörlü cevherlerin zenginleştirilmesi ve peletlenmesi ise ekonomik olmadığı için sorunlu cevherler arasında yer almaktadır. Bu cevherlerin ülkemizde tek cevherden üretim yolu olan YF-BOF prosesinde kullanılamaması, var olan rezervlerden yararlanılamaması anlamına gelmektedir.

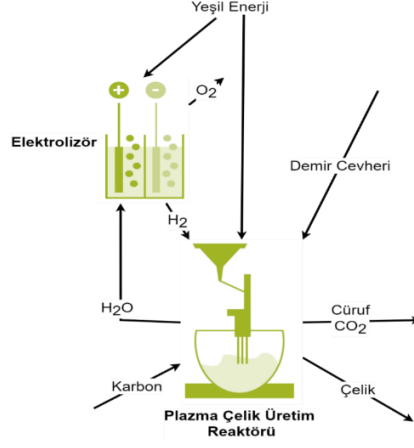
Ülkemizde yeteri kadar arama faaliyetleri yapılmamış 27 adet sahada toplam yaklaşık 320×10^6 ton potansiyel rezerv belirlenmiştir. Bu yatakların tenörleri %14-52 Fe arasında değişmektedir. Bu yatakların hemen hemen tamamı entegre tesislerin kabul edemeyeceği sınırlar içerisinde safsızlıklar içermektedir. Bu rezervlerin kullanılabilmesi için ise DRI teknolojisi önem arz etmektedir [19].

Düşük tenörlü cevherlerin kullanılarak DRI elde edilmesi, var olan rezervlerin daha efektif kullanılması ve ithal hurdaya bağımlı olan EAF kullanan tesislerimizin bu bağımlılığını azaltacak yönde olacaktır.

4.1.e. Plazma teknolojisi kullanılarak cevherden doğrudan çelik üretimi

Plazma çelik üretim reaktöründe demir cevheri, yeşil enerji kullanılarak elektrolizörde üretilen hidrojen gazı (H_2) kullanılarak indirgenir. Aynı zamanda, çelik üretimi esnasında reaktördeki karbon oranını artıracak malzemeler de eklenir. İşlemden, termal plazma (doğrudan H_2 'nin ısıtılmasıyla üretilir) veya termal olmayan plazma (doğru akım veya mikrodalgaların H_2 'den geçirilmesiyle üretilir) kullanılabilir.

Voestalpine, Sürdürülebilir Çelik (SuSteel) projesinin bir parçası olarak, Donawitz sahasında küçük bir pilot hidrojen plazma indirgeme reaktörü kurmuştur.



Şekil 4.5. Plazma Reaktörü ile Çelik Üretim Süreci [6].

Geleneksel demir çelik üretim yöntemlerine bakıldığında oldukça yoğun emisyon kaynaklarının (kok fabrikası, sinter fabrikası) bir arada bulunduğu sistemler görülmektedir.

Plazma çelik üretim reaktöründe indirgeyici olarak yenilenebilir enerji kaynaklarından üretilen hidrojen indirgeyici olarak kullanıldığında karbon kaynaklı emisyonların büyük oranda önüne geçilmiş olacaktır.

B. Dünyada ve Türkiye’de Teknolojik Hazırlık Seviyeleri

4.1.a. Demir içerikli atıkların en etkin şekilde değerlendirilmesini sağlayacak doğrudan indirgeme (DR) proseslerinin ve tesislerin tasarımı

Dünyada THS 9’da bulunan bu çalışmalar Türkiye’de ise THS 3-4 seviyelerindedir.

4.1.b. SR (İndirgeyici Ergitme) proseslerinin geliştirilmesi ve tesislerinin tasarımı

Dünyada THS 9’da bulunan bu çalışmalar Türkiye’de ise THS 3-4 seviyelerindedir.

4.1.c. Yakıt olarak hidrojen veya doğal gaz kullanılabilen proseslerin geliştirilmesi ve pilot tesis çalışmalarının yapılması

Dünyada THS 8’da bulunan bu çalışmalar Türkiye’de ise THS 3-4 seviyelerindedir.

4.1.d. Ülkemizde bulunan düşük tenörlü demir cevherlerinin kullanımına özel proseslerin tasarlanması

Bu proseslerin dünya çapında THS 6-7 olduğu söylenebilir. Türkiye’de ise THS 2-3 seviyelerindedir.

4.1.e. Plazma teknolojisi kullanılarak cevherden doğrudan çelik üretimi

Dünyada THS 4’da bulunan bu çalışmalar Türkiye’de ise THS 1 seviyelerindedir.

C. Dünyada ve Türkiye’deki Mevcut Duruma İlişkin Başarılı Örnekler

4.1.a. Demir içerikli atıkların en etkin şekilde değerlendirilmesini sağlayacak doğrudan indirgeme (DR) proseslerinin ve tesislerin tasarımı

Aglomeratlar alanındaki araştırmalar, yeni geri dönüşüm proseslerinin geliştirilmesine yol açmış ve optimizasyonu daha da kolaylaştırmıştır. Tecnored ve OxiCup şaft fırını olmak üzere, kendi kendini redükleyebilen aglomeralardan yararlanan ve sıvı demir üreten iki proses bulunmaktadır. Her iki proses de pilot tesisler olarak test edilmiş ve şu anda endüstriyel üretime dönüştürülmüştür.

TECNORED: Tecnored Prosesi, klasik ekipmanlar kullanan ve iki yenilikle öne çıkan hareketli yataklı bir şaft fırını kullanır: Katı yakıtlar için yan besleyiciler ve ikincil yakma. Kendi kendini redükleyen aglomeratlardan oluşan şarj, merkezi bir hazneden yüklenir, ardından yukarı akış gazları tarafından karşı akışta ısıtılır ve yaklaşık olarak 20 dakika gibi kısa sürelerde redüklenir. Baca yüksekliğinin az olması nedeniyle çeşitli türlerde katı yakıtlar kullanılabilir (örneğin biyokütle, lastik parçaları, koklaşmayan kömürler, vb.). Tecnored fırınının hacimsel verimliliği yaklaşık 20 t/(m³ · gün) olmakla birlikte nihai ürünler, sıvı sıcak metal ve cüruftur.

OxiCup Şaft Fırını: Kendi kendini redükleyen briketlerin geliştirilmesinde yapılan araştırmalar sonucunda, ThyssenKrupp Stahl AG, Huttenwerken Krupp Mannesmann GmbH, Küttner GmbH, B.U.S. AG ve Messer U.K. Ltd. tarafından birlikte geliştirilen, OxiCup Şaft Fırını geliştirilmiştir. Endüstriyel testler için bir pilot tesis, 1999 yılında Almanya’nın Duisburg kentinde üretime alınmış ve 2004 yılında bir endüstriyel tesise dönüştürülmüştür.

Fırın, optimize edilmiş bir sıcak hava kupol fırınına dayanmaktadır. Demir içeren tozlar ve kurutulmuş çamurlar, soğuk bağlı kendiliğinden redüklenen aglomere briketler şeklinde şarj edilir. Aglomeralar, hurda veya demir içeren atıklar, kok kömürü ve katkı maddeleri ile birlikte fırına yüklenir. Bazı durumlarda %70’e kadar briket şarj edilebilmektedir.

Sıcak hava üfleme, 600°C'lik bir sıcaklıkta altı bakır tüyer tarafından sağlanır. Ek olarak, lanslar aracılığıyla 3000 m³/saate kadar oksijen eklenebilir. Metal ve cüruf, fırını bir sifon musluğu aracılığıyla terk eder. Şaft Fırını, 15 t/h sıvı metal ve 5 t/h cüruf üretmektedir. Bu oran şarj malzemelerinin karışımına bağlıdır.

OxiCup şaft fırını, iyileştirmelerinden dolayı saf eritme agregası olarak Cupola fırını ve indirgeme agregası olarak yüksek fırın arasında yer almaktadır.

Fastmet/Fastmelt ve ITmk3: Diğer proseslerin yanında yine ticari olarak kullanılan Fastmet/Fastmelt ve ITmk3 prosesleri de hem kendi kendini redükleyen aglomeratlar kullanılması hem de ürün çeşitliliği bakımından önem kazanmaktadır. Bu prosesler hammadde olarak redükleyici içeren pelet ve fırın olarak da döner hazneli redükisyon fırını (RHF) kullanmaktadır ve proses şartları ve elde edilen ürünlere göre Fastmet, Fastmelt ve ITmk3 prosesleri adlarını almaktadır. FASTMET/FASTMELT prosesi, 100.000 ton/yıl ile 500.000 ton/yıl arasında değişen kapasitelerde demir üretimine alternatif bir yol sunmaktadır.

Fastmet prosesinde 1300 °C'ye kadar çıkan sıcaklıklarda redüklenmekte ve 8-16 dk arasında sıcak sünger demir üretilebilmektedir. Elde edilen ürün, soğutulduğunca soğuk sünger demir, briketlendiğinde sıcak briketlenmiş demir olmaktadır. Fastmelt prosesinde ise hemen döner hazneli fırın çıkışı bir elektrikli demir ergitme ünitesi (EIF) kullanılırsa sıvı pik demir veya döküm uygulanırsa soğuk pik demir elde edilmektedir.

Döner hazneli fırın sıcaklığı 1350-1400 °C'ye çıkarıldığında ise RHF içerisinde kısmi ergimeyle metal ve cüruf birbirinden ayrılmakta ve demir tanesi elde edilmektedir.

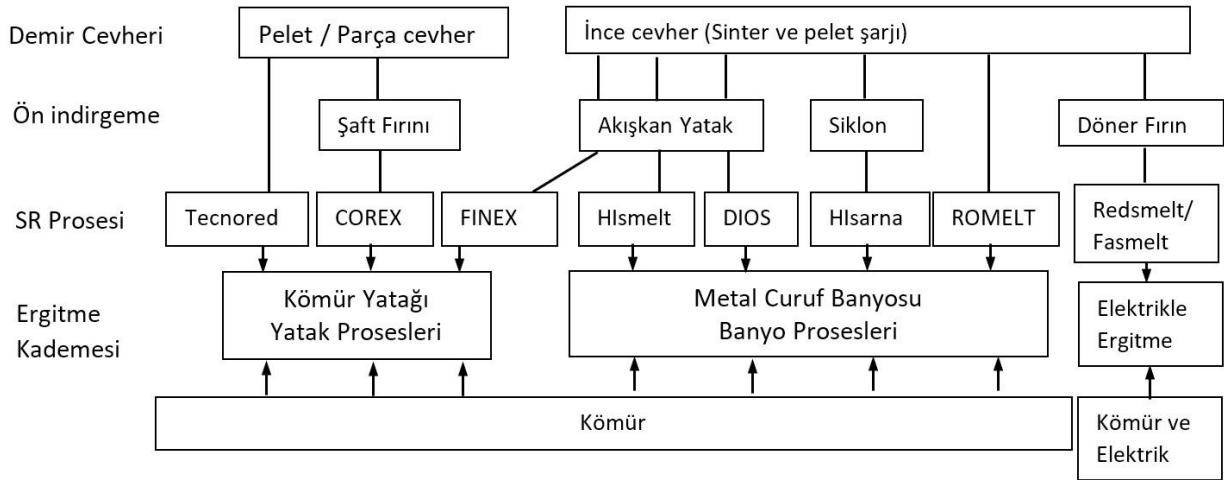
Elde edilen sünger demirin yüksek yüzey alanı ve kolay oksitlenmesi nedeniyle uzun süreli depolama veya nakliye için çok uygun olmamaktadır. Bu nedenle ya sünger demirin doğrudan kullanılacağı tesisin yakınında bu üretimin yapılması ya da ürünün sıcak briketlenmiş demir, döküm pik veya demir tanesi olarak elde edilmesi avantajlı olacaktır.

Fastmet/Fastmelt yöntemiyle BOF tozunun geri dönüşümü Nippon Steel tarafından, YF baca tozunun ve BOF tozunun geri dönüşümü JFE Steel tarafından, YF baca tozunun ve BOF tozu ve EAF tozlarının geri dönüşümü KSL tarafından 2000'li yılların başından beri yapılmaktadır. Elde edilen ürünler ise genellikle kullanılan hammaddeye göre BOF'a ve YF'a hammadde olmakla beraber ayrıca DRI ve HBI olarak da kullanılmaktadır [20].

4.1.b. SR (İndirgeyici Ergitme) proseslerinin geliştirilmesi ve tesislerinin tasarımı

Dünyada SR üretimi için laboratuvar ve pilot ölçekli birçok çalışma yapılmaktadır. Koklaşmayan kömür kullanan bazı SR prosesleri halen geliştirme aşamasındadır ve günümüzde yalnızca COREX prosesi ticari olarak üretim yapmaktadır. Diğer proses varyantları, reaktör sayısı, üretilen sıcak gaz miktarı, cevher şarjı (pelet, parça cevher veya ince taneler) açısından farklılıklar göstermektedir. Bunlara örnek olarak Hismelt, Hlsarna, DIOS, ROMELT ve AISI-DOE/CCF dir. Bu proseslerden ön indirgemeye ihtiyaç duyulmayan Hismelt, Hlsarna ve FINEX prosesleri COREX prosesinin ardından öne çıkan proseslerdir. Bu proseslerden farklı olarak günümüz modern yüksek fırınlar temelinde daha az karbon tüketiminin hedeflendiği ULCOS (TGRBF) yüksek fırın prosesi deneysel yüksek fırın çalışmalarının tamamlandığı bir prosestir [21].

Ergitme ve ön indirgeme aşamaları için uygulanan teknolojilerin yanı sıra demir cevheri ve enerji kaynakları dikkate alınarak SR proseslerinin teknolojik bir sınıflandırması Şekil 4.6 da gösterilmektedir [7].

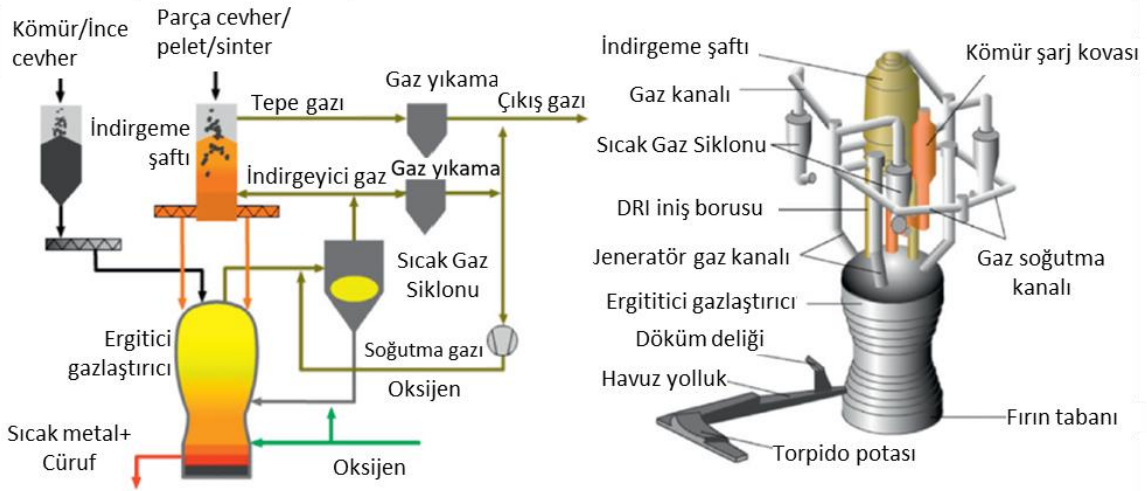


Şekil 4.6. SR proseslerinin sınıflandırılması [7].

COREX prosesi

COREX prosesi, birinci aşamada demir cevherinin bir şaft fırınında indirgeyici gaz ile sünger demir benzeri bir yapıya indirgenmesi ve ikinci aşamada bu ön indirgenmiş demirin ergitme gazlaştırma haznesinde ergitildiği iki aşamadan oluşan bir prosestir. İndirgeme şaft fırınında kullanılan indirgeyici gaz (CO ve hidrokarbonlar), kömürün oksijen aracılığıyla gazlaştırılmasıyla sağlanır ve ergitici-gazlaştırıcıda sabit veya akışkan bir yatak oluşturur. Ergitici-gazlaştırıcıda kömürün kısmi yanması, indirgenmiş demiri ergitmek için ısı üretir. Sıvı

demir ve cüruf, yüksek fırın operasyonunda kullanılan benzer geleneksel boşaltma prosedürü ile tabandan dışarıya alınmaktadır. Demir indirgeme ve demir ergitme/kömür gazlaştırma işlemlerinin iki adımda ayrılması sayesinde, çok çeşitli kömürlerin kullanılabilceği bir esneklik elde edilmektedir. Proses, 5 bar'a kadar yükseltilmiş basınçta çalışacak şekilde tasarlanmıştır. Kömür ve demir cevherinin şarjı, tepe kısmındaki kilitli besleyici sistem ile gerçekleştirilir. İndirgeyici gaz %65–70 CO, %20–25 H₂ ve %2 - 4 CO₂ içerir. Ergitici-gazlaştırıcıdan ayrıldıktan sonra, sıcak gaz, sıcaklığı yaklaşık 850 C'ye ayarlamak için soğutma gazıyla karıştırılır. Gaz daha sonra sıcak siklonlarda temizlenir ve indirgeyici gaz olarak şaft fırınına beslenir. Gaz ergitme gazlaştırma fırınından çıktığında, hala nispeten yüksek bir ısı değere sahiptir ve mümkün olduğu durumlarda haricen çıkış gazı olarak kullanılabilir. Aşağıdaki şekilde 4.7' de COREX prosesinin şematik gösterimi verilmiştir [21].



Şekil 4.7. COREX prosesinin akış şeması (solda) ve COREX reaktörünün şematik görünümü (Sağ) [21].

COREX'in doğrudan CO₂ emisyonu, ton sıcak metal başına 2304,9 kg CO₂'dir. Baca gazlarının elektrik üretimi ve granül cüruf kullanımına yönelik olarak kullanımı dikkate alındığında, toplam CO₂ emisyonu ton SHD başına 1212,3 kg CO₂ olmaktadır. COREX prosesinin doğrudan emisyonu, kullanılan kömür ve demirli hammadde özelliklerine bağlı olarak artan yakıt tüketimi nedeniyle YF demir üretim sistemininkinden daha yüksek olabilmektedir. Enerji üretim verimliliği ve elektrik üretiminde açığa çıkan CO₂ emisyon faktörü dikkate alındığında COREX SR prosesinin, sadece kombine çevrim elektrik santralinin (CCPP) verimliliğinin %45'ten yüksek olduğu ve elektriğin emisyon faktörünün 0,9 kg CO₂/kWh'den yüksek olduğu durumlarda Yüksek Fırına göre CO₂ emisyonlarını azaltılmasında avantajları olduğu

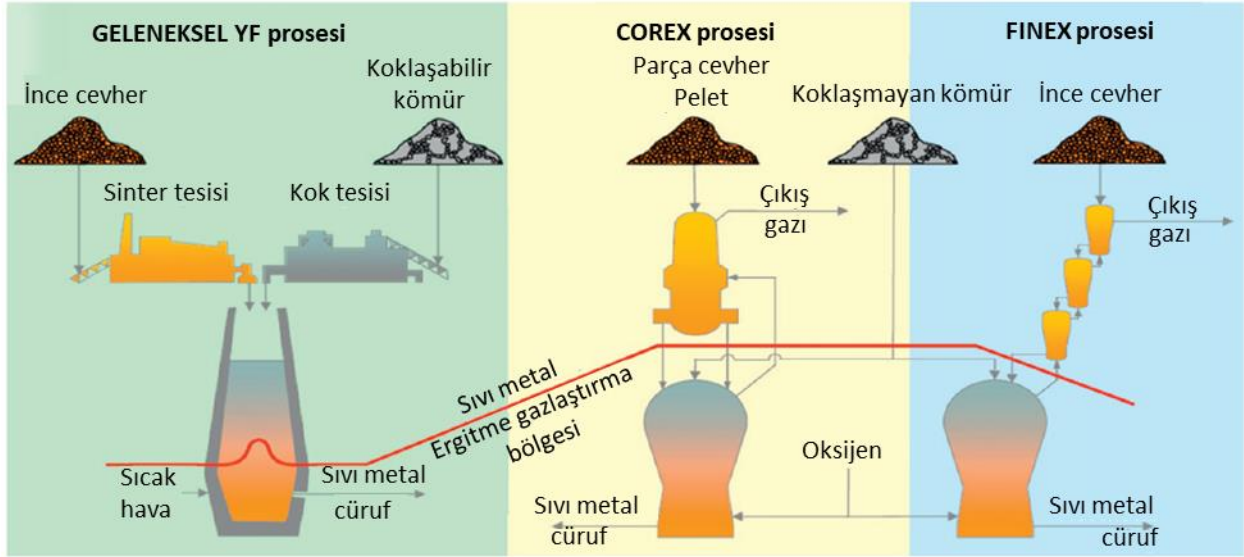
gösterildiği belirtilmektedir. Tablo 4.3 de COREX prosesinin malzeme tüketim ve CO₂ emisyon değerleri verilmiştir [7].

Tablo 4.3. COREX prosesinin malzeme tüketimi ve CO₂ emisyonu [7]

Malzeme	Tüketim /t SHD	Emisyon Faktörü	Spesifik CO ₂ emisyonu (kg)
Doğrudan Emisyon			
Koklaşabilir Kömür	122 kg	0,787 tC/t SHD	352,1
Kömür Tozu	900 kg	0,55 tC/t SHD	181,5
Kireçtaşı	163 kg	432 kg CO ₂ / t SHD	70,4
Dolomit	144 kg	468 kg CO ₂ / t SHD	67,4
Toplam			2304,9 kg
Dolaylı Emisyon			
Elektrik	547 kWh	0,9518 kg CO ₂ / kWh	520,6
Satın alınan Pelet	750 kg	154 kg CO ₂ / t SHD	115,5
Kok Kuru Söndürme	8,4 kWh	0,9518 kg CO ₂ / kWh	-8
Enerji Santrali için Baca Gazı	1532 kWh	0,9518 kg CO ₂ / kWh	-8
Granüle Curuf Kullanımı	350 kg	750 kg CO ₂ / t SHD	-262,5
Doğrudan ve Dolaylı Emisyon Toplamı			1222,3

COREX prosesi, 1970'lerin sonlarında Alpine Industrieanlagenbau'da (Siemens-VAI) tarafından geliştirilmiş ve 1980'lerde uygulanabilirliği gösterilmiştir. Güney Afrika, Iscor Pretoria'da bir COREX C-1000 tesisinin (1000 TSM/gün) ilk endüstriyel uygulamasının ardından Posco/Kore, Mittal Steel/Güney Afrika ve JSW Limited/Hindistan'da dört C-2000 tesisi (2000 TSM/gün) faaliyete geçmiştir. 2007 yılında ilk COREX C-3000 tesisi Çin, Baosteel'de faaliyete geçmiştir. Bu tesisin yıllık üretim kapasitesi 1,5 milyon TSM/yıl' dır [21].

Son yıllarda COREX prosesinin bir çeşidi olan FINEX prosesi, VAI ve Posco ortaklığı tarafından toz demir cevheri ve koklaşmayan kömürün doğrudan kullanımına dayalı sıvı ham demir üretimi için geliştirilmiştir. FINEX prosesinde ince demir cevheri, bir dizi akışkan yataklı reaktöre yüklenir ve ince demir cevheri taneleri kömürün gazlaştırılmasından elde edilen ve cevhere ters yönde yukarıya doğru hareket eden indirgeyici gaz aracılığıyla ısıtılarak DRI' ye indirgendikleri dört reaktörden aşağıya doğru ilerler. 1,5 milyon ton/yıl kapasiteli ilk ticari FINEX tesisi, 2007 yılının başından itibaren Pohang Works'te faaliyete geçmiştir. Şekil 4.8 de COREX ve FINEX için ham maddelerin ve proses adımlarının geleneksel yüksek fırın prosesiyle karşılaştırmasını gösterilmektedir [21].



ULCOS (Ultra Düşük Karbondioksit Çelik Üretimi), çelik üretiminden kaynaklanan karbondioksit emisyonlarında ciddi bir azalma sağlamak için ortak bir araştırma ve geliştirme girişimi başlatan, 15 Avrupa ülkesinden 48 Avrupalı şirket ve kuruluşun oluşan bir konsorsiyumdur. Konsorsiyum, tüm büyük AB çelik üreticilerinden, enerji ve mühendislik ortaklarından, araştırma enstitülerinden ve üniversitelerden oluşmakta ve Avrupa Komisyonu tarafından desteklenmektedir. ULCOS programında günümüzün geleneksel Yüksek Fırın demir üretim prosesinde ortaya çıkan CO₂ emisyonlarını en az %50 oranında azaltılması hedeflenmektedir. ULCOS programı, 2004 yılında başlatılan ve 2020 lerde devam etmesi öngörülmüş olan koordineli bir dizi projeden oluşmaktadır. Toplam bütçesi 75 milyon € olarak belirlenmiş olan ULCOS programında yaklaşık 80 farklı proses süreci incelenmiş, fosil yakıt (kömür veya doğal gaz) ve karbon yakalama depolama veya doğrudan elektrik kullanımına dayalı dört farklı ULCOS çözümü belirlenmiştir:

1. Tepe gazı geri dönüşümlü yüksek fırın (TGRBF-top gas recycling blast furnace): CO₂ emisyonunun %50 azaltılmasının hedeflendiği bu proseste, hava yerine O₂ kullanarak istenmeyen azot bileşiklerinin ortadan kaldırılırken tepe gazından gelen CO₂, CO ve H₂ karışımı, CO₂ in ayrılarak CO ve H₂'nin geri kazanıldığı bir gaz ayırma tesisine gönderilmektedir. Burada CO₂ den ayrılan gaz yüksek fırına geri gönderilerek indirgeyici gaz olarak yeniden kullanılmakta ve fırında ihtiyaç duyulan kok miktarı azaltılmaktadır. ULCOS un bir alt projesi olan bu proses MEFOS Lulea İsveç'te LKAB'nin deneysel Yüksek Fırınında başarıyla test edilmiştir. Tesiste CO₂'yi tepe gazdan ayırma işlemi, vakum basınç salınımı (Vacuum pressure swing adsorption-VPSA) tekniği ile Air Liquide (Fransa) firması tarafından yapılmıştır. VPSA ünitesi 7 hafta boyunca başarılı ve güvenilir bir şekilde çalıştırılmıştır. İlk ULCOS kampanyasından itibaren CO₂ giderimi ve tepe gazı geri dönüşümü sayesinde YF'de

önemli ölçüde CO₂ azaltımı olmuştur. Açığa çıkan CO₂ için yakalama ve depolama prosesleri uygulandığında emisyonların yarı yarıya azaltılabileceği ifade edilmektedir.

2. Hlsarna: Siklon ve ergitme fırını temelinde geliştirilen Hlsmelt indirgeyici ergitme prosesindeki benzer olan Hlsarna prosesi IJmuiden'de kurulan 8 t/s'lik bir pilot tesiste uygulanmıştır.

3. ULCORED: modelleme düzeyinde değerlendirilen ve doğrudan CO₂ azaltımının hedeflendiği düşük CO₂ prosesi konseptidir. Prosesde demir üretimi için demir cevheri ve gaz bazlı bir DR prosesi kullanılarak CO₂ emisyonunu azaltmayı hedeflenmektedir. Proseste %100 oksijen ve indirgeyici olarak doğal gaz veya kömür/biyokütleden elde edilen sentez gazı kullanılmaktadır. Üretilen DRI, EAF işlemi kullanılarak çeliğe dönüştürülebilecektir.

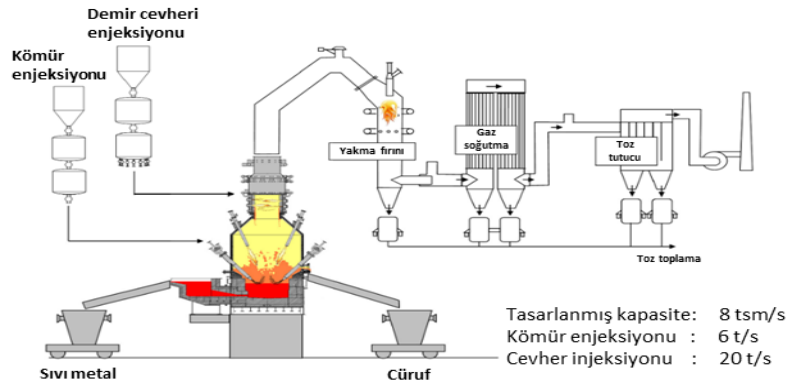
4. Elektroliz Temelli Sistemler: ULCOS kapsamında ULCONWIN ve ULCOLYSIS olarak anılan iki farklı elektroliz işlemi tasarlanmıştır. Her ikisi de laboratuvar düzeyindedir. ULCOWIN hematiti 110 °C'de su bazlı bir alkali çözeltide indirgemeyi hedeflemektedir. ULCOLYSIS prosesi ise demir cevherinin yüksek sıcaklıklarda ergimiş bir oksit karışımı içinde çözüldüğü bir ergimiş oksit elektroliz işlemini içermektedir. Oksijen anotta gaz olarak çıkarken metalik demir, katotta sıvı metal olarak üretilmektedir [22].

2014 yılında yayınlanan ULCOS Projesi kapsamındaki TGRBF (Top Gas Recycling Blast Furnace) prosesine ait sonuç rapor dokümanında yüksek fırının 4 farklı versiyon çalışmasına ait sonuçlar verilmiştir. Raporda versiyon 4'e ait sonuçlarda %90'lık bir tepe gazı geri dönüşüm oranıyla %24'lük bir karbon tasarrufu sağladığı ve kok ve kömür tüketimi açısından referans işletme dönemine kıyasla 123 kg/tSHD e varan tasarruf sağlandığı belirtilmektedir. Deneysel yüksek fırın kampanya sonuçlarına göre fırına enjekte edilen her 100 Nm³ (CO+H₂) gazın karbon girdisin ortalama 17,0 kg azaltılabildiği ve prosesin modern yüksek fırınlarda uygulanması ile karbon tüketiminin mevcut ~405 kgC/tSHD seviyesinden ~295 kgC/tSHD seviyesine düşürülmesinin sağlayacağı belirtilmektedir. Raporda ayrıca geleneksel şarj malzemeleri olan sinter, pelet ve kokun ULCOS yüksek fırın prosesi için uygun olduğunun ve yüksek fırını gaz ayırma tesisi VPSA ile kapalı bir döngüde çalıştırmanın mümkün olduğunun gösterildiği ifade edilmektedir [22].

Hlsarna prosesi, Avrupalı çelik üreticileri tarafından 2004 yılında başlatılan çelik üretiminde CO₂ emisyonlarının % 50 oranında azaltılmasının hedeflendiği dört ULCOS projesinden birisidir. 2007 yılından itibaren Tata Steel, Rio Tinto ve ULCOS kömür bazlı bir indirgeyici ergitme prosesi olan Hlsarna prosesini geliştirmektedirler. İnce boyuttaki cevher kömürün

doğrudan kullanıldığı proses, düşük tenörlü demir cevheri ve düşük kalite kömür kullanımına olanak vermesi ve yatırım maliyetlerinin düşük olması ile ekonomik bir gelişme sağlamayı hedeflemektedir. Proseste açığa çıkan CO₂ geleneksel üretime göre % 20 daha düşük olmakta ve bu değer karbon yakalama sistemleri ile % 80 değerine çıkarılabileceği belirtilmektedir. Ayrıca NO_x ve SO_x gaz emisyonlarında da azalma sağlanabilmektedir. Hlsarna prosesinin en önemli avantajı sıvı ham demirin ince cevher ve koklaşmayan kömürden doğrudan üretilebilmesidir. Tek bir fırında birleştirilmiş iki kademeyi içeren proses fırını, ön indirgeme ve ergitmenin yapıldığı bir siklon bölümü ve nihai indirgeme ve kömürün gazlaştırılmasının yapıldığı ergitme indirgeme bölümünden (SRV Smelting Reduction Vessel) oluşmaktadır. Ergitme bölümü Hlsmelt teknolojisi temel alınarak tasarlanmış siklon teknolojisi ise 1990 larda IJmuiden' de "Avrupa Kömür Bazlı Demir Üretimi" projesi kapsamında geliştirilmiştir. Şekil 4.9 da Hlsarna prosesi pilot tesisinin şematik görünümü verilmiştir [23].

2010 yılında Tata Steel tarafından IJmuiden'de inşa edilen ilk pilot tesisi Pilot tesis yılda 65.000 ton SHD üretme kapasitesine sahiptir. İlk deney kampanyası 2011 baharında tamamlanmış ve bunu beş başarılı deneysel kampanya daha izlemiştir. Beşinci kampanya süreci 2017 yılında başlamıştır. Proje, ikinci Sanayi İçin Sürdürülebilir Düşük Karbon Programı II (SILC-II Sustainable Industry Low Carbon II) tarafından AB'den Horizon 2020 Çerçeve Programı EU FP6, Avrupa Kömür ve Çelik Araştırma Fonu (RFCS Research Fund for Coal and Steel) ve Hollanda devleti tarafından finanse edilmektedir [24].



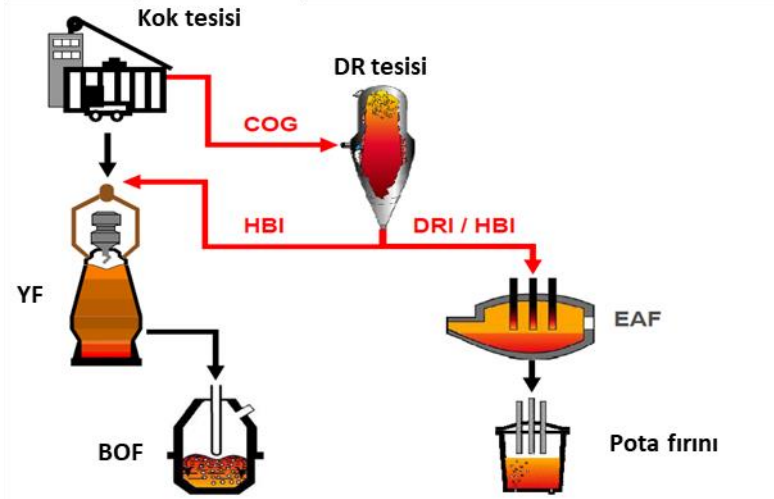
Şekil 4.9. Hlsarna prosesi pilot tesisi [25]

Hlsarna teknolojisi, geleneksel yüksek fırınların, kok fırınlarının ve sinter tesislerinin yerini alma konusunda uzun vadede potansiyele sahiptir ve bugün ergitme indirgeme alanında umut verici bir alternatif demir üretim prosesi olarak değerlendirilmektedir. Prosesin ilk pilot tesisi IJmuiden, Hollanda' da kurulmuştur Beşincisi 2019 yılında yapılan pilot tesis kampanyaları ile prosesin pratikte beklenen sonuçları verebildiği gösterilmiştir. Prosesin Karbon Yakalama ve Depolama (CCS) sistemleri ile birleştirilmesi durumunda SHD üretiminden kaynaklanan

karbondioksit emisyonlarının %50'den fazla azaltılabileceği belirtilmektedir. Günümüzde prosesin fikri mülkiyet haklarına sahip Tata Steel firması Hindistan'da daha büyük ikinci bir pilot tesisi kurarak prosesin endüstriyel ölçekte denemeler yapacağını belirtmektedir [26].

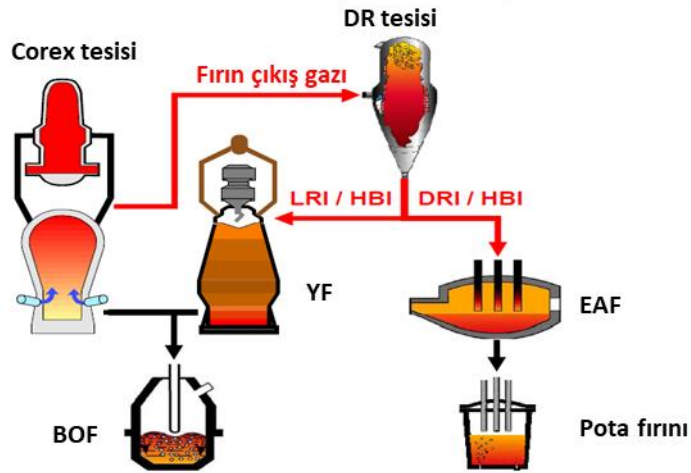
Birleşik Sistemler; özellikle Avrupa ve Asya bölgesinde demir cevheri indirgeme proseslerine yönelik olarak yapılan gelişmeler, çelik üretiminde CO₂ emisyonlarını azaltma talebine bağlı olarak oluşmaktadır. Günümüzde geliştirilen prosesler; tepe gazı geri dönüşümünün uygulandığı bir yüksek fırın prosesini içeren Avrupa ULCOS TGRBF prosesi, Hlsmelt ve CCF (Siklon Dönüştürücü Fırını) proseslerinin bir kombinasyonu olan Hlsarna ergitme indirgeme prosesi, doğal gaz bazlı çelik üretimi ve hidrojen bazlı çelik üretimi prosesleridir. Bu proseslerin deneysel ölçekler veya pilot tesis ölçekleri düzeyinde çalışmaları devam etmektedir. İlk denemeler, spesifik tesis işletimi CO₂ azaltımının geleneksel yüksek fırına kıyasla %20 seviyesinde olduğunu göstermekle birlikte hedeflenen CO₂ emisyonlarının büyük ölçüde azaltılması için tesislerde CO₂ yakalama ve depolama (CCS) sistemlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Baca gazı dönüşümünün uygulandığı bir yüksek fırın prosesinde ise entegre demir çelik fabrikasının toplam enerji ağıının yeniden yapılandırılması gerekmektedir [27].

ULCOS projesinden ayrı olarak, son zamanlarda yüksek fırın prosesinin doğrudan indirgeme (DR) ve indirgeme ergitme (SR) tesisleriyle birleştirilmesi konusunda yenilikçi fikirler ortaya çıkmaktadır. Avrupa için DR tesislerinde kullanılan doğal gaz yüksek fiyatları gibi nedenlerle dezavantajları olan bir indirgeyicidir. Entegre demir çelik tesisinde uygun bir enerji ağı dengesi kurulması durumunda, kok fırını gazının gaz bazlı bir DR tesisinde DRI üretmek için indirgeyici ajan olarak kullanılabilmesi düşünülmektedir (Şekil 4.10). Burada üretilen DRI, yüksek fırında kullanılan indirgeyicileri azaltmak amacıyla ön indirgenmiş malzeme olarak yüksek fırına şarj edilebilmesinin yanı sıra sıcak halde bazı oksijen fırınına veya tesise kurulacak bir elektrik ark fırınına şarj malzemesi olarak kullanılabilir. Farklı proseslerin birleştirilmesi ile oluşturulacak olan böyle bir sistemin getireceği avantajların değerlendirilmesi için kapsamlı bir CO₂ dengesinin yapılması gerektiği belirtilmektedir [27].



Şekil 4.10. Doğrudan indirgeme için kok fırını gazının kullanımı [27].

Buna benzer diğer bir birleştirilmiş sistem, paralel çalışan bir Corex/Finex tesisinin yüksek fırın prosesi ile kombine olarak çalıştırılmasıdır. Bu konseptte Corex/Finex tepe gazının bir DR tesisi için indirgeyici olarak kullanılması hedeflenmektedir. Finex prosesi ile üretilen DRI, yüksek fırında, Bazik oksijen fırınlarında veya bir elektrik ark ocağında çelik üretiminde kullanılabileceği öngörülmektedir (Şekil 4.11) [27].



Şekil 4.11. Corex baca gazının doğrudan indirgeme ve yüksek fırında kullanımı [27].

4.1.c. Yakıt olarak hidrojen veya doğal gaz kullanılabilen proseslerin geliştirilmesi ve pilot tesis çalışmalarının yapılması

A kısmında mevcut performans ve metrikler kısmında verilmiştir.

4.1.d. Ülkemizde bulunan düşük tenörlü demir cevherlerinin kullanımına özel proseslerin tasarlanması

Almanya merkezli Thyssenkrupp (thyssenkrupp), batık ark ocağı (SAF) eritme aşamasını içeren yeni bir çelik üretimi (çelik üretimi) rotası planlıyor. Şirketin planı, 2045 yılına kadar dört yüksek fırını yeni DRI-SAF teknolojileriyle değiştirmektir. Önerilen üretim rotası, Thyssenkrupp'un (thyssenkrupp) DRI süreçlerinde yüksek fırın kalitesinde demir cevheri (demir cevheri) peletleri kullanmasına izin verecektir.

Dünyanın en büyük ikinci çelik üreticisi olan ArcelorMittal de benzer bir DRI-SAF kombinasyonunu uygulamayı planlamaktadır.

Bunun yanında Avustralyalı çelik üreticisi BlueScope, düşük kaliteli cevherlerin kullanımına izin vermek için bir DRI-Ergitme-BOF çelik üretim prosesi üzerinde çalışmaktadır.

Ayrıca İtalyan çelik teknolojisi sağlayıcısı Tenova, düşük kaliteli peletler kullanarak doğrudan indirgenmiş demir üretmek için yeni teknoloji kombinasyonları da geliştirmektedir [28, 29].

4.1.e. Plazma teknolojisi kullanılarak cevherden doğrudan çelik üretimi

A kısmında mevcut performans ve metrikler kısmında, teknik açıklamalarla birlikte başarılı örnekler de verilmiştir.

D. Ar-Ge ve Yenilik Sürecinde Biraraya Gelmesi Gereken Disiplinler ve Sektörler

4.1.a. Demir içerikli atıkların en etkin şekilde değerlendirilmesini sağlayacak doğrudan indirgeme (DR) proseslerinin ve tesislerin tasarımı

Bahsi geçen teknolojik ilerleme için özellikle demir-çelik üretim konusunda uzmanlaşmış Metalurji Mühendisleri, Kimya Mühendisleri ile fırın tasarımı uygulamasında tecrübeli Makine mühendislerinin bir arada çalışmaları gerekmektedir. Bunun yanında çevresel konularda destek verecek tecrübeli Çevre mühendislerinin de tasarımda faydası bulunacaktır.

Var olan atıkların ortaya çıktığı Entegre Demir-Çelik tesisleri, elde edilen ürünleri kullanacak olan Elektrik Ark Ocağı tesislerinin bir arada çalışması gerekmektedir.

Demir-Çelik Üreticileri Derneği, Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı, Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı ve benzeri paydaşların biraraya gelmesi gereklidir.

4.1.b. SR (İndirgeyici Ergitme) proseslerinin geliştirilmesi ve tesislerinin tasarımı

SR proseslerinde hedeflenen teknolojik ilerlemenin sağlanabilmesi için öncelikle ülkemizde faaliyet gösteren entegre demir çelik üreticileri ve bu kuruluşlara demirli hammadde ve kömür üreten veya ithal eden kuruluşlar ile refrakter üreticileri, enerji üretimi konusunda çalışan firmalar ile üniversitelerin bir arada çalışmaları öngörülebilir. Proses dizaynı ve tesisi kurulumu için konstrüksiyon imalatı konusunda faaliyet gösteren kuruluşların da katkı vermesi gerekmektedir. Ayrıca özellikle dünyada bu konularda geliştirilmiş ve halen geliştirilmekte olan proseslerin ülkemizde uygulanabilmesi için ülkemiz dışında faaliyet gösteren uzman diğer kurum ve kuruluşlar ile uluslararası konsorsiyumlar oluşturularak planlanan hedeflere yönelik faaliyetler planlanabilir.

Demirli hammaddeler ve kömür üretimi, demir çelik üretimi, refrakter üretimi, kimya ve enerji sektöründe faaliyet gösteren kuruluşlar ve üniversitelerin ilgili bölümlerinin işbirliği önemlidir.

Düşük tenörlü demirli hammaddeler konusunda hammadde üreticileri, kullanılacak kömür bazlı indirgeyicilerin temini için kömür üreticileri, uygun refrakter temini için refrakter üreticileri; gazlardan karbondioksit ayrıştırılması, dönüştürülmesi, yakalanması ve stoklanması için kimya mühendisliği, çevre mühendisliği ve enerji konusunda faaliyet gösteren kuruluşlar; ayrıştırılan CO ve hidrokarbonların tesis içerisinde enerji üretimi ve proses içinde veya dışında kullanılması konusunda enerji üreticisi firmalardan katkı alınmalıdır. Bu kuruluşların yanı sıra belirtilen tüm konularda üniversitelerimizin ilgili bölümlerinden destek alınmalıdır.

Demir-Çelik Üreticileri Derneği, Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı, Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı ve benzeri paydaşların biraraya gelmesi gereklidir.

4.1.c. Yakıt olarak hidrojen veya doğal gaz kullanılabilen proseslerin geliştirilmesi ve pilot tesis çalışmalarının yapılması

Yakıt olarak hidrojen ve doğalgaz kullanılabilen proseslerin geliştirilmesi, karbon emisyonunun azaltılması ve hurdaya alternatif olacak sistemlerin geliştirilmesi ile aynı anlama gelmektedir. Bu sebeple bu konu hakkında demir çelik üretiminde yer alan tüm ana ve yan paydaşların birarada çalışması gerekmektedir.

Bunun için TÜBİTAK Araştırma Merkez/Enstitüleri, Üniversiteler ve demir çelik üreticileri derneklerinin katkıları alınmalıdır.

Demir-Çelik Üreticileri Derneği, Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı, Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı ve benzeri paydaşların biraraya gelmesi gereklidir.

4.1.d. Ülkemizde bulunan düşük tenörlü demir cevherlerinin kullanımına özel proseslerin tasarlanması

Bahsi geçen teknolojik ilerleme için özellikle demir-çelik üretim konusunda uzmanlaşmış Metalurji Mühendisleri, Kimya Mühendisleri ile fırın tasarımı uygulamasında tecrübeli Makine Mühendislerinin bir arada çalışmaları gerekmektedir. Bunun yanında çevresel konularda destek verecek tecrübeli Çevre mühendislerinin de tasarımda faydası bulunacaktır.

Demir madenciliği sektöründe yer alan kuruluşların ve demir çelik üreticilerinin bir arada çalışması gerekmektedir.

Demir-Çelik Üreticileri Derneği, Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı, Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı ve benzeri paydaşların biraraya gelmesi gereklidir.

4.1.e. Plazma teknolojisi kullanılarak cevherden doğrudan çelik üretimi

Teknolojik ilerleme için mevcut demir çelik üreticilerinin yanısıra, konusunda uzmanlaşmış mühendis (elektrik, metalurji ve makine) kadrolarına ihtiyaç duyulacaktır.

E. Ar-Ge, Yenilik, Demonstrasyon İşbirliği Modeli ve Destek Mekanizması

4.1.a. Demir içerikli atıkların en etkin şekilde değerlendirilmesini sağlayacak doğrudan indirgeme (DR) proseslerinin ve tesislerin tasarımı

Büyük ölçekli Ar-Ge ve Yenilik Projelerinin desteklenmesi gereklidir.

4.1.b. SR (İndirgeyici Ergitme) proseslerinin geliştirilmesi ve tesislerinin tasarımı

Büyük ölçekli Ar-Ge ve Yenilik Projelerinin desteklenmesi gereklidir.

4.1.c. Yakıt olarak hidrojen veya doğal gaz kullanılabilen proseslerin geliştirilmesi ve pilot tesis çalışmalarının yapılması

Özellikle hidrojen özelinde düşünürsek karbon emisyonunun azaltılmasına yönelik dünya çapında gerek devletler gerekse şirketler ciddi çalışmalar yürütmektedirler. Bu tür çalışmalar, özellikle Avrupa'daki ülkeler ile konsorsiyum sağlanarak geliştirilmelidir.

4.1.d. Ülkemizde bulunan düşük tenörlü demir cevherlerinin kullanımına özel proseslerin tasarlanması

Büyük ölçekli Ar-Ge ve Yenilik Projelerinin desteklenmesi gereklidir.

4.1.e. Plazma teknolojisi kullanılarak cevherden doğrudan çelik üretimi

Büyük ölçekli Ar-Ge ve Yenilik Projelerinin desteklenmesi gereklidir.

F. Zaman Boyutu

(Kısa Vade: 1-3 yıl, Orta Vade: 3-5 yıl, Uzun Vade: 5 yıldan fazla)

4.1.a. Demir içerikli atıkların en etkin şekilde değerlendirilmesini sağlayacak doğrudan indirgeme (DR) proseslerinin ve tesislerin tasarımı

Kısa vadede tasarım, Orta vadede pilot tesis ve uzun vadede de ticari uygulamaya geçilebilir. Uzun vade hedeflenmelidir.

4.1.b. SR (İndirgeyici Ergitme) proseslerinin geliştirilmesi ve tesislerinin tasarımı

Kısa vadede tasarım, Orta vadede pilot tesis ve uzun vadede de ticari uygulamaya geçilebilir. Uzun vade hedeflenmelidir.

4.1.c. Yakıt olarak hidrojen veya doğal gaz kullanılabilen proseslerin geliştirilmesi ve pilot tesis çalışmalarının yapılması

Kısa vadede tasarım, Orta vadede pilot tesis ve uzun vadede de ticari uygulamaya geçilebilir. Orta vade hedeflenmelidir.

4.1.d. Ülkemizde bulunan düşük tenörlü demir cevherlerinin kullanımına özel proseslerin tasarlanması

Kısa vadede tasarım, Orta vadede pilot tesis ve uzun vadede de ticari uygulamaya geçilebilir. Uzun vade hedeflenmelidir.

4.1.e. Plazma teknolojisi kullanılarak cevherden doğrudan çelik üretimi

Kısa vadede tasarım, Orta vadede pilot tesis ve uzun vadede de ticari uygulamaya geçilebilir. Uzun vade hedeflenmelidir.

G. Teknolojik İlerlemenin Sağlanmasında Kritik Hususlar

Teknik Altyapılar

Yerli kaynaklarla yeterli üretim, test ve sertifikasyon uzun vadede hedeflenmelidir. Ancak kısa vadede bu teknolojilerin uygulanmasına ilişkin teknoloji transferi yapılabilir.

İnsan Kaynakları

Üniversitelerde ve sanayide yeterli sayıda ve ihtiyaç duyulan yetkinlikte insan kaynağı mevcuttur.

Referanslar

- [1]. Midrex Technologies, 2020. "2019 World Direct Reduction Statistics", New Jersey, USA.
- [2]. Bureau of International Recycling, 2019. "World Steel Recycling in Figures", Representing the future Leading Raw Material Suppliers, Belgium.
- [3]. Takano, C., Nascimento, R. C., Silva G.F.B.L.E., et al. 2001. "Recycling of Solid Wastes from Integrated Steelmaking Plant: A Sustainable Alternative", Mater Trans, 42, 2506–2510.
- [4]. Robinson, R. 2008. "Studies in low temperature self-reduction of by-products from integrated iron and steelmaking", Doctoral Thesis, Luleå University of Technology, Luleå, Sweden.
- [5]. Robinson, R. 2005. "High temperature properties of by-product cold bonded pellets containing blast furnace flue dust", Thermochem Acta, 432, 112–123.
- [6]. Birol, B. 2019. "Investigating the utilization of blast furnace flue dusts and mill scale as raw materials in iron nugget production", Mater Res Express, 6, 0865d1.
- [7]. Cavaliere, P. 2019. "Clean Ironmaking and Steelmaking Processes", Springer Cham, Switzerland AG.
- [8]. Schenk, J.L. 2011. "Recent Status of Fluidized Bed Technologies for Producing Iron Input Materials for Steelmaking", Particuology, 9 (1), 14-23.
- [9]. Markotić, A., Dolić, N., Trujić, V. 2002. "State of the Direct reduction and Reduction Smelting Processes", Journal of Mining and Metallurgy, 38, 3-4, 123-141.
- [10]. Ito, A., Langefeld, B., Götz, N. 2020. "The future of steelmaking – How the European steel industry can achieve carbon neutrality", Roland Berger GmbH, Germany.
- [11]. Yıran, L., Zhongjie, H. and Yansong, S. 2021. "Study of Hydrogen Injection in Blast Furnaces: Tuyere Co-injection of Hydrogen and Coal", Metall Mater Trans B, 52, 2971–2991.
- [12]. İnternet: 2021. "<https://www.ssab.com.tr/haberler/2021/03/ssabs-annual-report-2020-published>" Son erişim tarihi 29 Aralık 2022.
- [13]. Dutta, S.K. and Rameshwar, S. 2016. "Direct Reduced Iron: Production. In Encyclopedia of Iron, Steel, and Their Alloys" CRC Press, Taylor and Francis Group, New York.
- [14]. Ripke, J. Kopfle, J. 2017. "Future of Direct Reduction in Europe – Medium and Long-Term Perspectives", ESTAD Conference.
- [15]. İnternet: 2022. "<https://ww4w.energiron.com/energiron-IAr-Gest-hydrogen-based-dri-facility-in-china-for-baosteel-zhanjiang/>", Son erişim tarihi 29 Aralık 2022.
- [16]. İnternet: 2018. "https://www.nedo.go.jp/english/news/AA5en_100371.html", Son erişim tarihi 30 Aralık 2022.
- [17]. İnternet:2019. "<https://www.thyssenkrupp.com/en/newsroom/press-releases/world-first-in-duisburg-as-nrw-economics-minister-pinkwart-launchestests-at-thyssenkrupp-into-blast-furnace-use-of-hydrogen-17280.html>" Son erişim tarihi 29 Aralık 2022.
- [18]. İnternet:2021. "<https://www.cassotis.com/insights/the-environmental-impacts-of-hydrogen-injection-in-a-blast-furnace>", Son erişim tarihi 29 Aralık 2022.
- [19]. Coşar, Ş. 2006. "Demir Konsantrelerinin Peletlenmesinde Bor Minerallerinin ve Atıklarının Kullanımının Araştırılması", Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye.

- [20]. Lockwood Greene Technologies, 2005. "Ironmaking Process Alternatives Screening Study Volume I: Summary Report", United States.
- [21]. Yang, Y., Raipala, K. and Holappa, L. 2014. "Ironmaking Treatise on Process Metallurgy, Volume 3: Industrial Processes", Elsevier.
- [22]. Feiterna, A., Zagaria, A., Feilmayr, C., et al. 2014. "ULCOS top gas recycling blast furnace process (ULCOS TGRBF)", Final Report.
- [23]. İnternet:2019."https://ec.europa.eu/research/participants/documents/downloadPublic?documentId s=080166e5c8f59abd&appId=PPGMS", Son erişim tarihi 29 Aralık 2022.
- [24]. Grisvard, C., Lövgren, J., Boggelen, J., et al. 2015. "Hisarna experimental campaigns B and C (HISARNA B and C)", Final Report.
- [25]. Stel, J. 2017. "HISARNA Smelting Reduction a Solution for Sustainable Hot Metal Production. Reducing the Carbon Footprint in the Steel Industry Event Presentation", Netherlands.
- [26]. İnternet:2020."<https://www.tatasteeleurope.com/sites/default/files/tata-steel-europe-factsheet-hisarna.pdf>", Son erişim tarihi 29 Aralık 2022.
- [27]. Schmöle, P., Lungen, H.B., Noldin, J.H. 2012. "New Ironmaking Technologies: Will the Dominance of the Blast Furnace Be Ever Challenged", 6th ICSTI – International Congress on the Science and Technology of Ironmaking, Rio de Janeiro, Brazil, 2093-2104.
- [28]. Nicholas, S., Basirat, S. 2022. "Iron Ore Quality and Zero Emissions Steel", Fact Sheet, Institute for Energy Economics and Financial Analysis (IEEFA).
- [29]. İnternet:2022. "https://www.steelorbis.com/steel-news/latest-news/steelmakers-research-new-technologies-for-lower-grade-iron-ore-use-in-dri-processes-1255735.htm", Son erişim tarihi 29 Aralık 2022.

Teknolojik Hedef 5:

PARÇA DÖKÜM

Parça döküm prosesinde **proses ve enerji verimliliğini** artırmaya yönelik yöntemlerin geliştirilmesi ve atık yönetimi

Kritik Ürün/Teknoloji 5.1.

5.1. Parça dökümde proses ve enerji verimliliğini artırmaya yönelik alternatif proseslerin ve yöntemlerin geliştirilmesi

Öncelikli Ar-Ge ve Yenilik Konuları

5.1.a. Döküm proseslerinde ısı, enerji ve sarf maddelerinin minimize edilmesine yönelik çalışmaların gerçekleştirilmesi

5.1.b. Eklemeli imalat tekniklerinin (3D üretim gibi) döküm proseslerinde kullanımının araştırılmasına yönelik çalışmaların gerçekleştirilmesi (Kalıp, maça vb. üretiminde) ve uygulamalarının yaygınlaştırılması

Kritik Ürün/Teknoloji 5.1.

5.1. Parça dökümde proses ve enerji verimliliğini artırmaya yönelik alternatif proseslerin ve yöntemlerin geliştirilmesi

A. Teknik Açıklamalar, Yenilikçi Özellikler, Hedeflenen Performans ve Metrikler

Metal döküm prosesi; metalleri işlemek ve şekillendirmek konusunda yüzyıllardır kullanılagelen en önemli üretim metotlarından biri olarak önemini korumaktadır. Gündelik hayatın her aşamasında; kuyumculuktan, ağır sanayi tezgâhlarına, tarım makinelerinden gemi makinelerine, otomotivden havacılık ve uzay sanayiine kadar çeşitli alanlarda döküm metodu ile üretilen parçalar kullanılmaktadır.

Türkiye’de metal döküm sektörü ve zanaatı köklü tarihsel geçmişi ile sanayileşme döneminde özel teşebbüs yatırımları ile gelişerek Avrupa’da ve dünyada önemli bir noktaya ulaşmıştır. Türkiye Metal Döküm üretimi 2021 yılı rakamları itibari ile Almanya’yı takiben Avrupa’da 2. sıraya yerleşmiş olup dünyanın önde gelen döküm üreticileri arasında yükselmeye devam etmektedir. Sektör, 2020 yılı dünya sıralamasında ise üretim miktarı bazında 9. sıradadır [1].

Demir ve çelik parça döküm sanayi; indüksiyon, ark veya kupol ocaklarında, çeşitli pik demir türlerinin, metal hurdalarının ve ferro alaşımların ergitilmesiyle elde edilen sıvı metalin, kalıplama tesislerinde hazırlanmış kum, seramik veya metal kalıplar içerisinde şekillendirilmesi ve özel ısı işlemler ile değişik mekanik özellikler kazandırılması sureti ile ham döküm üreten, akabinde uygulanan tamamlama ve talaş kaldırma işlemleri doğrultusunda işlenmiş döküm ve bitmiş mamuller sunan bir sektördür.

Demir dışı alaşımlardan parça dökümünde de benzer yöntemler kullanılmakta, özellikle alüminyum ve zamak alaşımı parça üretiminde yüksek hız ve verimlilikte basınçlı (yüksek – alçak) döküm yöntemleri hızla gelişmektedir.

Demir ve çelik parça dökümünde kullanılan üretim süreçleri; metalin ergitilmesi, kumun hazırlanması, maça ve kalıp imali, kalıba sıvı metalin dökümü, temizleme, ısı işlem, taşlama ve kaplama şeklinde özetlemek mümkündür [2].

Katma değeri çok yüksek olan bu sektörde en önemli girdiler hammadde, enerji ve işçiliktir. Dolayısıyla, enerji ve malzeme kullanım verimliliğini arttıracak Ar-Ge çalışmaları ve sağlanacak tasarruflar sektörün rekabet gücünü olumlu yönde etkileyecektir. Sektörel politikalar belirlenirken bu konulara özel önem verilmesi ve Ar-Ge çalışmalarının desteklenmesi faydalı olacaktır.

Ekllemeli imalat teknolojileri metal döküm parça üretiminde çok ciddi bir enerji verimliliği sağlayabilmektedir. Bu alanda kullanılabilir ekllemeli imalat (üç boyutlu) kum yazıcı sistemleri, püskürtmeli bağlayıcı tekniğiyle çalışmakta olup silis kumunu bir Furan/Fenol ya da inorganik reçine ile bağlayarak katmanlar halinde üretim gerçekleştirmektedir. Bu sistemlerin temel üretim girdileri silis kumu, bağlayıcı, aktivatör ve temizleyici sıvısı olmaktadır. Geometriden bağımsız her türlü kalıp ya da maça tasarımı bir üç boyutlu kum yazıcı ile kolaylıkla üretilebilir. Kum yazıcılar diğer yazıcı tiplerinin aksine seri üretime entegre edilebilecek kapasitede çalışmaktadır. Örneğin 2x1x1 metrelik üretim alanını tam dolu olarak 18 saatte tamamlayabilmektedir.

Döküm parça üretiminin gerek parça tasarım süreçleri gerekse de üretim teknikleri günümüzde gelenekçi yöntem ve uygulamalarla ilerlemektedir. İlk çağlardan bu yana gelen döküm çalışmaları köklü bir altyapıya sahip olup, sürdürülebilir prosesler içerse de süreçlerde enerji verimliliğini ve kalite düzeyini artırmaya yönelik yenilikçi proseslerin ciddi derecede artırılması gerekmektedir. Üç boyutlu kum yazıcılar ile model ve maça sandığı ihtiyacı olmadan üç boyutlu teknik çizimlerin yazıcıya aktarılması ile direkt parça üretimi mümkün kılınmaktadır. Bunun yanı sıra sistem metal döküm parça üreten dökümhanelere; hızlı ve düşük maliyetli prototip imalatı, daha düşük maliyetle seri üretime giriş, geleneksel yönetmelerle üretilemeyecek döküm parçalarının imalatı ve gerekli durumlarda seri imalata destek üretimi gibi çok çeşitli avantajlar sunmaktadır.

Döküm çalışmalarının girdisi olan parça tasarımı öncelikli olarak iyileştirilmesi gereken alandır. Döküm üretiminde üç boyutlu yazıcı teknolojilerinin kullanılmasıyla parça tasarımları çok daha hafif olacak şekilde ve işleme alanları azaltılarak geliştirilebilecektir. Bu durum en temelde çok daha az malzeme kullanarak çok daha uzun ömürlü sistem/parça üretimlerinin sağlanabileceği, çok daha çevreci ve enerji verimliliği sağlayacak bir alternatiftir.

Döküm alanında üç boyutlu yazıcı kullanımı üretim süreçlerinde çok önemli enerji verimliliği alanları oluşturmaktadır. En temelde döküm için kullanılacak kum kalıpların oluşturulması için farklı üretim tekniklerine ihtiyaç ortadan kalkmaktadır. Buradaki model üretimi için dolu malzemedan talaş kaldırma için harcanan malzeme, süre, enerji gibi konuların tamamına gerek duyulmamaktadır. Beraberinde yazıcı ile talebe göre anında kalıp üretilebilmekte ve hemen ertesinde döküm yapılabilmektedir. Bu durumun aksine geleneksel proseslerde kum kalıp üretmek için elde edilen model ve kalıpların üretimde kullanılmadığı durumlarda bu materyalleri saklama ve stoklama ihtiyacı doğmaktadır. Bu durumda herhangi bir üretim alanının %20'sine kadar bir alanın bu amaç için kullanılması gerekmektedir. Üç boyutlu yazıcı ile üretim doğrultusunda bu gereksinim ortadan kalkmakta, kalıp ya da model stoklamak yerine 3D veri stoklamak yeterli olmaktadır.

Döküm üretimlerinde karmaşık geometriye sahip parçaların geleneksel yöntemde çoklu maçaları oluşmakta ve bu durum çok ciddi işçilik çalışmaları yaratmaktadır. Bu çalışmalar; döküm öncesinde bu maçaları bir araya getirmek ve sonrasında da bu maçaların birleşim yüzeylerindeki çapakları temizlemek şeklindedir. Özellikle çapak temizlemek için tüketilen enerji yenilikçi bir üç boyutlu yazıcı üretim hattıyla tamamıyla ortadan kaldırılabilecektir.

Hassas döküm teknolojilerinde de mum model üretiminde Eklemeli İmalat teknolojileri kullanılabilen olup kalıp süreçlerini ortadan kaldırmaktadır. Bu durum kalıp üretiminde geçen süreçler için çok ciddi bir enerji verimliliği yaratmaktadır. Beraberinde çok daha hızlı ve hatasız bir süreçle üretime geçilebilmektedir. Bu alanda üç boyutlu mum yazıcı kullanımı çekme değerleriyle ilgili hesap ya da kaygıları ortadan kaldırdığı için tek seferde doğru sonuç alınabilecek bir teknolojik altyapı oluşturmaktadır.

ÖNCELİKLİ AR-GE VE YENİLİK KONULARI

5.1.a. Döküm proseslerinde ısı, enerji ve sarf maddelerinin minimize edilmesine yönelik çalışmaların gerçekleştirilmesi

Dökme demir, karbon içeriği %2,4 - 4 arasında ve minimum %1,8 olan bir demir-karbon alaşımıdır. Silisyum, manganez, kükürt ve fosfor gibi diğer elementler de çeşitli miktarlarda bulunabilir. Temel dökme demir dökümhane süreci dört ana faaliyetten oluşur:

- Ergitme ve sıvı metal prosesleri,
- Kalıpların ve maçaların hazırlanması,
- Ergimiş metalin kalıplara dökülmesi, katılaşması ve dökümün kalıplardan çıkarılması;
- Ham döküm parçanın tamamlama işlemlerine tabi tutularak sevke hazır hale getirilmesi.

Metal dökümhanelerinde ergitme ve metal işleme prosesleri tüm süreçler içerisindeki ana enerji tüketim aşamalarıdır. Kupol ocakları ile ergitme yapılan tesislerde kupol ocağı enerji tüketiminin toplam dökümhane tüketimi içindeki yüzdesi yaklaşık %50'dir. İndüksiyon ocakları için bu oran %70'e kadar çıkabilmektedir. Dökme demirin cinsine göre ergime yaklaşık 1450-1500°C'de gerçekleşmektedir. Elde edilen sıvı metal ergitme ocağından potaya alınmakta ve uygulanan pota metalurjisi süreçleri sonrasında hazır durumdaki kalıplara otomatik veya manuel şekilde döküm yapılmaktadır [3].

Günümüzde mevcut enerji kaynakları ve enerji tedarik zincirleri göz önüne alındığında koşullar günden güne değişmekte ve enerji arzı güvenliği kadar enerji tasarrufu da tartışmasız büyük

önem taşımaktadır. Metal döküm sektörü, dünyanın en enerji yoğun endüstrilerinden biri olmakla beraber bu özelliği sayesinde önemli bir geri kazanım potansiyeli taşıyan bir alandır.

Yeni nesil ileri teknoloji dökümhane ekipmanlarının ulaştığı enerji verimliliği seviyeleri bir yanda olmak üzere; özellikle ergitme, pota metalurjisi, kalıp ve maça üretimi ve akabinde döküm yapılan kalıpların soğuma sürecinde dahi endüstriyel atık ısının geri kazanılması çok sayıda yöntemle sağlanabilmektedir. Yakma havası ön ısıtması, kazan besleme suyu ön ısıtması, ocak şarjı ön ısıtması, enerji üretimi gibi atık ısı için birçok alternatif mevcuttur [4].

İndüksiyon ocakları ile ergitme yapılan metal dökümhanelerinde enerji verimliliği uygulamaları

Metal dökümhanelerinde şebeke frekansı (50 Hz) beslenen geleneksel ocaklar günümüzde yerini daha verimli orta frekanslı (250 Hz'e kadar) ocaklara bırakmaktadır. Yeni teknoloji ocaklar daha yüksek güç yoğunluğuna ve daha küçük pota kullanımı doğrultusunda minimum ısı kaybı oranlarına sahiptir. Ayrıca orta frekanslı fırınlarda trafo, kondansatörler ve besleme hatlarından kaynaklanan kayıplar minimum seviyededir. Nüvesiz indüksiyon ocakları olarak da adlandırılan bu sistemlerde bakır bobin su ile soğutulur; dış kısım yalıtılıp çelik bir kabuk içine alınırken iç kısım refrakter astarlıdır; üst kısım ise genellikle şarj etme ve cüruf giderme işlemleri için açık şekildedir.

Ocaktaki enerji kayıplarının en büyük kısmı (yaklaşık %70) bobinlerde gerçekleşmektedir. Bobinler temel olarak 40-45°C civarında bir sıcaklığa kadar soğutulmaları gerektiğinden, bu noktada yapılacak ısı geri kazanımı uygulamaları çok önemlidir. Buradan geri kazanılacak ısı örneğin binaların ısıtılmasında kullanılabilir.

Düşük yoğunluklu, düşük termal iletkenliğe ve düşük termal kütleyle sahip seramik elyaf malzemelerin sıcak yüzey astarı olarak kullanılması, ocak yapısındaki ısı kaybının azaltılmasına katkı sağlayabilir. Burada düşük mekanik mukavemet dezavantajını ortadan kaldırmak için yüksek yoğunluklu tuğla veya dökülebilir malzemeler, yalıtım tuğlası veya düşük sıcaklık levhaları gibi diğer refrakter malzemeler ile bir karışım oluşturulabilir.

Ayrıca enerji verimliliği açısından düşük ısı iletkenliğe sahip refrakter veya seramiklerden yapılan, iletim ve radyasyon ısı kayıplarını azaltan ocak kapaklarının kullanımı büyük önem taşımaktadır. Farklı üretim aşamalarının (ocağa şarjın yüklenmesi, cüruf giderme, sıcaklık ölçümü, numune alma ve döküm), genel olarak bir vardiya süresinin %25'i ile %50'si arasında değişen sürelerle ihtiyaç duyduğu göz önüne alınarak kapak açılış sürelerinin optimizasyonunun, yeni nesil kontrol ve izleme sistemleri geliştirilmesinin enerji kayıplarını önleyeceği açıktır [3-7].

Kupol ocağı ile ergitme yapılan metal dökümhanelerinde enerji verimliliği uygulamaları

Metal dökümhanelerinde ergitme süreçlerinde indüksiyon ocaklarının yanı sıra kupol ocakları, pota ergitme ocakları ve elektrik ark fırınları da kullanılmaktadır. Kupol ocakları metal döküm sektöründe gri dökme demir parça üretiminde kullanılan yüksek fırınlar olarak konumlanmaktadır. Fırın çıkışında cehennemlik bulunmakta ve eksik yanma tamamlanarak daha yüksek sıcaklıkta atık gazlar elde edilmektedir. Bu atık gaz, "Designatör" ile hava ısıtma işlemi için kullanılmakta ve ısıtılmış hava ocağın iç yanmasında kullanılmak üzere ocağa verilmektedir. Buna rağmen atık gazın bacadaki sıcaklığının 300-600°C arasında değiştiği görülmektedir. Kupol ocaklarının baca gazlarındaki bu sıcaklıktan faydalanılarak maça üretim süreçlerindeki doğalgaz tüketiminin azaltılması mümkündür.

Demir ve çelik parça döküm prosesinin en önemli yapı taşlarından olan maçalarda istenilen özelliklerin sağlanabilmesi için, özellikle kalıp kumuyla yapılan maçaların, kullanılmadan önce kurutulmaları gerekmektedir. Bu kurutma işlemi killi kumlarda nemin (rutubetin) kalıp veya maça içerisinden giderilmesi için yapılmaktadır [3, 8, 9].

Farklı katkı maddeleriyle yapılan maçalarda ise yapının sertleştirilmesi için bekleme veya pişirme (kürleme) mecburiyeti bulunmaktadır. Bu mecburiyetler katkı maddelerine göre sınıflandırılmaktadır. Pişirme işleminin dayanım ve sertlik üzerinde büyük etkisi olmakla beraber bu özellikler kum henüz hazırlanma aşamasında karıştırılırken bağlayıcı ilaveleriyle daha da yükseltilebilmektedir.

Maçaların kurutulması veya sertleştirilmesi şu şekillerde yapılmaktadır;

- Açık havada bekletilerek sertleştirme ve kurutma: Maçalar, killi kum (kalıp kumu) kullanılarak yapılmış, sertleştirici olarak reçine veya cam suyu karıştırılmışsa bu maçalar açık havada en az 24 saat bekletilerek kurutulabilir.
- Maça fırınlarında kurutma:Maçalar içerisindeki nemin (rutubetin) dışarı atılması için fırınlanmaktadır; maçalar fırına yerleştirildikten sonra kademeli olarak sıcaklık yükseltilmekte ve sıcaklık 100°C üzerinde bir müddet tutularak suyun tamamen buharlaşması sağlanmaktadır.

Genel olarak elektrikli ve doğalgazlı maça kurutma fırınları tercih edilmektedir. Elektrikli kurutma fırınları maliyeti yüksek olduğu için, en verimli yöntem olmasına rağmen, daha az tercih edilmektedir. Doğalgazlı maça kurutma fırınları ise homojen ısı dağılımı sayesinde maksimum verimlilikte kurutma sağlamak ve doğalgaz yakıcıları sayesinde düşük enerji ihtiyacı bulunmaktadır.

Metalin kupol ocağı ile ergitildiği metal döküm tesislerinde kupol ocağında oluşan baca gazı sıcaklığı direkt olarak maça kurutma fırınlarında kullanılmaya uygun olmadığı için ilave ekipman kullanılması gerekmektedir. Bu amaçla serpantin ya da evaporatör gibi ekipmanlara ihtiyaç duyulmaktadır.

Isının değiştirilmesinin gerekli olduğu yerlerde tekli veya gruplandırılmış olarak kullanılan serpantinler bacaya yerleştirilmekte ve serpantinlerde yer alan soğuk su baca gazı ile temas etmeden ısınırken baca gazının da soğuması sağlanmaktadır. Serpantin temel olarak ısıtılan veya soğutulan akışkanların, soğuk veya sıcak yüzeyle temas alanını artırmak amacıyla kullanılmaktadır. Ağırlıklı olarak ısı akışını yaygınlaştırmak amacıyla kullanılan bir ekipman olarak tanımlanmaktadır.

Bu noktada soğuyan hava maça kurutma fırınlarında kullanılırken ısınan su ise başka amaçlarla (sıcak su ihtiyacını gidermek üzere tesiste kullanım suyuna ihtiyaç duyulan birimlerde) rahatlıkla kullanılabilir [11, 12].

Doğalgaz bilindiği gibi yanma sırasında kül ve cüruf gibi atıklar üretmemesi ve yanma sonucu havayı kirletici kükürt dioksit ve karbondioksit gazlarını salmaması neticesinde, çevreye en az zarar veren fosil yakıt olarak kabul edilmektedir. Bu nedenle doğalgaza talep zamanla artmıştır.

Diğer yandan doğalgaz tedariğinde yurtdışına bağlı olunması ve dönemsel jeopolitik gelişmelerin etkisiyle olası kısıtlamalara ya da kesintilere karşı hazırlıklı olunması gerekmektedir. Özellikle Türkiye metal döküm sektörünün Avrupa'da bulunan ana sanayi müşterilerinin üretimde doğalgaz ile çalışan ekipmanlar için alternatif yöntemlerin tanımlı olup olmadığı ile ilgili bilgi ve aksiyon talepleri söz konusu olmaktadır.

Ayrıca bu durumlar maliyetlerin de yükselmesine neden olmuştur [10].

SATIŞ FİYATI		Abone Satış Fiyatı	
Tarih Aralığı	Kademe	TL/m3	TL/kwh
01-31 Ocak 2020	100.001 - 1.000.000	1,503049	0,14126400
01-31 Ocak 2021	100.001 - 1.000.000	1,547529	0,14544445
01-31 Ocak 2022	100.001 - 1.000.000	2,198947	0,20666795
01-31 Aralık 2022	1.000.001 - 10.000.000	4,397908	0,41333722

Bu kapsamda metal döküm sektöründe kupol ocakları ile çalışarak döküm parça üretimi gerçekleştirilen tesislerde atık ısı geri kazanım sistemlerinin uygulanması geliştirilmeli ve yaygınlaştırılmalıdır.

Maça üretiminde yeni teknoloji reçine ve katkı malzemelerinin geliştirilmesi ve yaygınlaştırılması

Demir ve çelik döküm parça üretiminde yukarıda önemi vurgulanan maçalar; kalıp boşluklarına yerleştirilen ve kapladıkları kısımların dökümden sonra boşluklu olarak çıkmasını sağlayan şekillerdir. Döküm sırasında ergimiş metal ile direkt temas halinde olmaları nedeniyle aşınmaya, ani sıcaklık değişimlerine, metal sızmalarına ve kırılmaya dayanıklı olmaları gerekmektedir. Maçalar; metal, seramik ve kum esaslı olabilmektedir. Kum kalıba dökümde son dönemde maça ve kalıp hazırlama alanındaki yeni teknolojilere paralel olarak soğukta katılaştıran tipte (cold box) bağlayıcılar ile döküm parça imalatı üretime hem kalite hem de hız getirmiştir.

Kum kalıba metal dökümde maça ve kalıplar hazırlandıktan sonra yüzeylerine sıvı metalin etkilerine karşı korumak ve daha temiz bir yüzey elde ederek döküm parça kalitesini arttırmak amacıyla refrakter (ısıya dayanıklı) boyalar uygulanmaktadır. Kalıp ve maçalarda refrakter boya kullanımı döküm sonrası parça temizliğini de kolaylaştırmaktadır.

Diğer taraftan boyama prosesi kapsamında da hem boyama hem de kurutma için enerji ihtiyacı ortaya çıkmaktadır. Bu noktada soğuk kutu maça üretimi alanında geliştirilen yeni reçine ve katkı malzemeleri önemli ekonomik potansiyele sahip olarak öne çıkmaktadır. Bunun sebebi bir yandan döküm hatalarından kaçınılırken, diğer taraftan boyama prosesinin ortadan kaldırılması ile proses maliyetlerinde tasarruf sağlanma imkânı bulunmasıdır.

Ayrıca, boyama prosesleri için gerekli olan çevresel ekipmanlara yatırım ihtiyacı da ortadan kalkabilecektir. Konveksiyon veya mikrodalga fırınlar gibi pahalı kurutma ekipmanlarına, boyama havuzlarına veya depolama alanlarına da gerek kalmaması doğrultusunda metal dökümhaneleri için yeni katkı malzemelerinin yerli ve milli imkanlarla üretimi ve kullanımı geliştirilmeli ve yaygınlaştırılmalıdır.

Dökme demir parça mamül üretiminde gaz hataları veya yüzey hataları gibi refrakter boya kaynaklı döküm hataları bu yeni reçine ve katkı malzemeleri sayesinde önlenmektedir. Boyama ve kurutma prosesini ortadan kaldırmak ve refrakter boya kaynaklı mamul hatalarını azaltmak üzere bu teknolojiye geçiş yapılması faydalı olacaktır.

Boyasız döküm üretimi için yeni nesil reçine ve katkı malzemelerinin yanı sıra bu malzemelere uygun maça imalat ekipmanlarıyla birlikte uygun nitelikte termal işlem görmüş kum arzının sağlanması gerekmektedir. Söz konusu kum arzının sağlanabilmesi için metal dökümhanelerinde reklamasyon teknolojilerinin yaygınlaştırılması ya da sektöre hizmet verecek bir termal reklamasyon tesisi oluşturulmalıdır. Ayrıca hem reçine ve katkı malzemeleri hem de uygun maça imalat ekipmanları noktasında bu teknolojilerin yerli ve milli imkanlarla

üretilecek uygun maliyetlerde tesislere sunulabilmesi için Ar-Ge çalışmalarına ihtiyaç duyulmaktadır. Bu üç bileşen doğru bir şekilde bir araya geldiğinde boyasız dökümün yapılabilmesi mümkün hale gelebilecektir [13-16].

5.1.b. Eklemeli imalat tekniklerinin (3D üretim gibi) döküm proseslerinde kullanımın araştırılmasına yönelik çalışmaların gerçekleştirilmesi (Kalıp, maça vb. üretiminde) ve uygulamalarının yaygınlaştırılması

Eklemeli İmalat teknolojileri (üç boyutlu kum ve mum yazıcılar) döküm proseslerinde proses zinciri içerisine dahil olacak potansiyele sahiptir. Bu alanda üç boyutlu yazıcı kullanımı üretim proseslerini hızlandırıp enerji verimliliğini artırıcı bir katalizör görevi görerek, dökülecek son nihai parça üzerinde olumsuz bir etki yaratmamaktadır.

Döküm üretimi için kullanılacak Eklemeli İmalat teknolojilerinin hızlı ve sürekli çalışabilecek kararlılıkta olması gerekmektedir. Bu durum itibarıyla mevcut yazıcılardan ayrılarak, sürdürülebilir kararlılıkta çalışacak teknoloji ve alt bileşenlere sahip olmalıdır. Kum ve Mum üç boyutlu yazıcılar toz serme ve püskürtmeli bağlayıcı sistemi ile çalışma prensibine sahip olup, katmanlar halinde bu işlemi devam ettirebilmektedir. Üretim için bir hazne kullanılmakta olup, bu haznenin kapasitesi hacimsel olarak 300 m³, 2.000 m³ ya da 8.000 m³ olabilmektedir. Bu haznenin alt tabanı hareketlidir ve üretim başladığında en üst konuma gelmektedir. Ardından 300-500 µm katman adımlarıyla tabla yüzeyine toz (kum, mum) serilmekte ve tabla katman katman aşağıya doğru hareket etmektedir. Bu esnada her bir katmana toz serildiğinde, bir püskürtmeli bağlayıcı sisteminden x-y düzlemine reçine püskürtülmekte ve serilen tozlar bağlanmaktadır. Bu işlem tasarlanan CAD modelinin bir yazılımda dilimlenmesiyle başlamakta ve her bir dilimde püskürtmeli bağlayıcı sisteminin hangi alana reçine püskürteceği belirlenmektedir. Bu püskürtmeyle birlikte tozların yatay düzlemde ve bir alt katmanla birleşmesi gerçekleşmektedir. Bu şekilde katmanlar halinde üretim devam etmektedir. Üretim tamamlandığında hazne dışarı alınıp tozlar içinde üretilen mum model, kum kalıp ya da kum maçalar dışarıya alınmakta, temizlendikten sonra döküm üretiminde kullanılmaya hazır olmaktadır.

Eklemeli İmalat teknolojisiyle karmaşık model üretimleri geleneksel tekniklere göre çok daha ekonomik ve avantajlıdır. İlk etapta motor blokları, su ceketleri, karmaşık pompa gövdeleri, turbo, strator ve rotorlar parçaları, rüzgâr türbini metal parçalarının üretimini gerçekleştirmek Eklemeli İmalat sistemleriyle çok avantajlıdır. Diğer taraftan bu sistemlerin en büyük avantajı kum döküm prosesinde çoklu maçaların sayısını en aza indirmek ve enerji maliyetlerini minimize etmektir. 5-20 parçalı bir maçayı yekpare bir maçaya dönüştürmek ön işçilik, döküm ve ardıl işlem adımlarında çok büyük bir efor/enerji kazancı elde etmektir. Halihazırda bu

Çalışmaların geleneksel yöntemlerle yapılamaması ya da karmaşık parçaların döküm zorluğu, nitelikli ve katma değeri yüksek alanlarda ülkemiz sanayisine iş ve ihracat kaybı olarak dönmektedir.

Döküm retiminde Eklemeli İmalat teknolojilerinin kullanılması durumunda çok daha nitelikli işler dökülebilecek olup; tasarım süreçleri başta olmak üzere, montaj ve ardıl işlem çalışmalarında çok ciddi bir tasarruf sağlanacaktır. Bu kazanım döküm süreçlerinde kullanılan enerji, döküm malzemesinden tasarruf ve ardıl işlem için gereken enerjiyi eksiltmek gibi çok önemli çevresel kazançlar oluşturur.

B. Dünyada ve Türkiye’de Teknolojik Hazırlık Seviyeleri

5.1.a. Döküm proseslerinde ısı, enerji ve sarf maddelerinin minimize edilmesine yönelik çalışmaların gerçekleştirilmesi

Dünya genelinde indüksiyon ve kupol ocaklı ergitme sistemlerinde enerji verimliliğini arttıracak çözümlerin uygulanması, atık ısının geri kazanılarak üretim süreçlerinde kullanılması, maça üretiminde yeni teknoloji katkı malzemelerinin geliştirilmesi ve yaygınlaştırılmasına yönelik gerçekleştirilen projeler genel olarak farklı THS seviyelerine sahiptir. Dünya genelinde ergitme sistemleri bazındaki uygulamalar ve çözümler THS 6-8 aralığında iken, bu durum Türkiye’de 4-5 seviyelerinde olmaktadır. Maça retiminde uygulanan yeni nesil reçine ve katkı malzemeleri ile özel işlem görmüş kum teknolojileri ise dünya genelinde 6-8 aralığında iken ülkemizde 4-5 seviyelerindedir.

5.1.b. Eklemeli imalat tekniklerinin (3D retim gibi) döküm proseslerinde kullanımın araştırılmasına yönelik çalışmaların gerçekleştirilmesi (Kalıp, maça vb. retiminde) ve uygulamalarının yaygınlaştırılması

Döküm retimi için kullanılan Eklemeli İmalat teknolojileri küresel ölçekte THS 8-9 seviyesindedir. Teknoloji dünya çapında birçok döküm üreticisi tarafından kullanılmakta olup, yakın gelecekte doğrudan bir üretim sistemi olarak fabrikalarda yer alabilecektir. Beraberinde Eklemeli İmalat hatları kurulacak olup bir dizi sistem çok daha düşük alanlara sahip fabrikalarda çalışabilecektir. Yakın gelecekte bu sistemler karanlık fabrikaların da bir parçası olmaya adaydır. Ülkemizde ise söz konusu teknolojiler bazında THS 4-8 aralığındadır.

C. Dünyada ve Türkiye’deki Mevcut Duruma İlişkin Başarılı rnekler

5.1.a. Döküm proseslerinde ısı, enerji ve sarf maddelerinin minimize edilmesine yönelik çalışmaların gerçekleştirilmesi

Dünya genelinde kupol ve indüksiyon ergitme sistemlerinden atık ısı geri kazanım sistemleri ile verimlilik arttırıcı çözümlerin üretim süreçlerinde kullanılması, geliştirilmesi ve yaygınlaştırılmasına dair gerçekleştirilen projeler noktasında önemli örnekler bulunmaktadır.

Demir-çelik parça dökümhaneleri özelinde gerçekleştirilmiş önemli analiz çalışmaları bulunmakta ve özellikle KOBİ ölçekli işletmelerin muhtemel stratejik yatırımlarla birlikte önemli enerji tasarrufları sağlayabileceği belirtilmektedir [3-9].

Ülkemizde gerçekleştirilen analiz ve araştırmalar bulunmakla birlikte bu uygulamaların sektörde yaygınlaştırılabilmesi ve daha da geliştirilebilmesi için Ar-Ge çalışmalarına ihtiyaç duyulmaktadır.

Yeni nesil maça katkı malzemeleri ise dünyanın farklı noktalarındaki dökümhanelerde başarılı bir şekilde uygulanabilmektedir. Yukarıda belirtildiği gibi katkı malzemesinin türü, kullanılan döküm kumunun özelliği ve bunlara uyumlu soğuk kutu reçine sistemi bu sistemin temel taşlarını oluşturmaktadır [13-16].

Ülkemizde bazı metal dökümhanelerinde bu sistemlerin denemesi yapılmakta ve başarılı sonuçlar alınmaktadır. Bu sonuçlar ülkemizde söz konusu reçine ve katkı malzemelerinin üretilebilmesi için çalışmalar yapılabileceğine, kurulacak yeni tesisler ile sektörün karbon ayak izinin iyileştirilmesi adına adımlar atılarak sürdürülebilir üretime katkı sağlanabileceğine işaret etmektedir.

5.1.b. Eklemeli imalat tekniklerinin (3D üretim gibi) döküm proseslerinde kullanımın araştırılmasına yönelik çalışmaların gerçekleştirilmesi (Kalıp, maça vb. üretiminde) ve uygulamalarının yaygınlaştırılması

Döküm üretiminde dünyada birçok firma Eklemeli İmalat teknolojilerine entegre olmuş durumdadır. Özellikle katma değer yüksek olduğu havacılık, savunma ve medikal gibi alanlarda dökümcü firmalar Eklemeli İmalat teknoloji altyapısını halihazırda kurmuş durumda olup çok ciddi esneklik seviyesinde üretim yapabilmektedir.

Başarılı örnek girişimleri bazında ABD menşeli bir hassas döküm üreticisi; ileri itki sistem tasarımlarında verimliliği çok ciddi derecede artıracak bir tasarım geliştirmiş olup, mum modellerini doğrudan Eklemeli İmalat ile gerçekleştirmektedir. Sharrow Marine LLC firması bu teknolojileri çok iyi seviyede kullanmakta olup, devamlı bir yeni sistemi mevcut Eklemeli İmalat hattına entegre etmektedir.

Bir diğere başarılı örnek İtalyan GE Avivo firması olup, sahip olduğu Fenol bağlayıcılı Eklemeli İmalat altyapısı ile başta Türkiye savunma sanayisi olmak üzere tüm dünyaya hassas detaylara sahip havacılık parçalarının kalıp ve maçalarını üretip döküm yapmaktadır. Firma bu alandaki yetkinliğiyle üst düzeyde bir rekabetçi avantaja sahiptir [1-4].

Türkiye’de Döktaş Dökümcülük kuruluşu kısa bir süre önce kurduğu Eklemeli İmalat teknolojisi ile başta Altay tankı motoru olmak üzere raylı sistemler için geliştirilen projedeki raylı sistem motorunun da döküm parça üretimini yapmaktadır. Firma aynı zamanda bu altyapı ile geleneksel üretim proseslerini de ciddi derecede geliştirmiştir [5].

Bunlarla beraber bir dizi döküm üreticisi enerji ve işçilik kazancı sebebiyle Eklemeli İmalat teknolojilerinden yoğun bir şekilde faydalanmaktadır.

D. Ar-Ge ve Yenilik Sürecinde Bir Araya Gelmesi Gereken Disiplinler ve Sektörler

5.1.a. Döküm proseslerinde ısı, enerji ve sarf maddelerinin minimize edilmesine yönelik çalışmaların gerçekleştirilmesi

Öncelikli olarak sektörün gereksinimi gereği Metalurji ve Malzeme Mühendisliği lisans seviyesine sahip uzmanların konuya müdahil olması gerekmektedir. Ancak gerek makine ve ekipman tasarımı gibi detaylara ihtiyaç duyulmasından gerekse katkı malzemeleri üretiminin kimyasal prosesler içermesinden dolayı mutlaka Makine, Mekatronik, Elektrik-Elektronik ve Kimya Mühendisliği’nden uzmanlar ile çalışılmalıdır. Yeni sarf malzemelerinin geliştirilmesi ve yaygınlaştırılması konusunda Fizik ve Çevre Mühendisliği diplomasına sahip uzmanlar bulunmalıdır. Ayrıca, demir ve çelik parça döküm sektöründe çalışan tekniker, teknisyen, formen ve operatörler de çalışma gruplarına dahil edilmelidir.

Metal döküm sektörü ile ilişkili olarak Metalurji, Makine, Kimya sektörleri, makine-imalat firmaları ile kimyasal madde üreten ve satan kuruluşlar paydaş olmalıdır. Bu paydaşlara ilaveten başta üniversiteler, Savunma Sanayi Başkanlığı, Çevre Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, Hazine ve Maliye Bakanlığı, Ticaret Bakanlığı, Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı, Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı gibi kurumların da paydaş olacağı çalışma grupları oluşturulmalıdır. İlave olarak sektördeki sivil toplum kuruluşları ve meslek odalarının da faaliyetlerde yer alması gerekmektedir.

Metal döküm sektörüne hitap eden kalıp, ekipman ve makineler için üreticilerden, sarf malzemeler konusunda ise üreticiler/tedarikçilerden katkılar alınması doğru olacaktır.

Bu noktada üniversiteler, araştırma enstitüleri, tekno parklar ve teknoloji transfer ofisleri ortak paydada buluşturulmalı, endüstriyel ekosistem kurabilmek ve döngüsel ekonomiyi disiplinler arasına yayabilmek adına çalışmalar gerçekleştirilmelidir.

Sektörel sivil toplum kuruluşları (TÜDÖKSAD Türkiye Döküm Sanayicileri Derneği) ile meslek odalarından çalıştay, seminer, konferans, eğitim ve sempozyumlar düzenlenmesi noktasında katkılar alınabilir.

5.1.b. Eklemeli imalat tekniklerinin (3D üretim gibi) döküm proseslerinde kullanımın araştırılmasına yönelik çalışmaların gerçekleştirilmesi (Kalıp, maça vb. üretiminde) ve uygulamalarının yaygınlaştırılması

Döküm üretiminde eklemeli imalat teknolojilerinin daha etkin ve verimli bir şekilde kullanılabilmesi için farklı disiplin ve uzmanlıkların bir arada çalışması ortaya çıkan ürünün katma değerinin artırılması ve enerji verimliliği açısından çok önemlidir.

Döküm üretiminde eklemeli imalatın verimli kullanılabilmesi için tasarımcı ve geliştiricilerin çok daha iyi ve etkin modeller tasarlayabileceğini bilmesi gerekmektedir. Geometri bağımsız modelleme yaparak ve mevcut ürünleri Topolojik Optimizasyon yaklaşımıyla geliştirerek çok daha hafif ve uzun ömürlü ürünler tasarlamak için tasarımcıların bu ekosistemin bir parçası olması gerekmektedir. Bu durum ülkemiz sanayisindeki dökümcülerin, çizime göre değil ihtiyaca göre döküm yapabilecek bir kabiliyet kazanmasını gerektirmektedir. Bu sağlandığında döküm ihracatından elde edilen birim kg başına gelirler ciddi derecede artacaktır.

Eklemeli imalat ile daha etkin çalışmalar yapabilmek için Metalurji Mühendislerinin katkıları çok daha önemlidir. Geleneksel üretim süreçlerine kıyasla elde edilebilecek bir dizi kazançla yenilikçi düşünmeye vakit ayrılabilir. Bu durumla alışım geliştirme, doğrulama ve daha nitelikli döküm parçalar elde etme üzerine çalışmalar yapılmalıdır. Özellikle nitelikli sektörlerde özel alışımlar önerebilmek yetkinliği döküm üretiminde faaliyet gösteren firmalara global ölçekte çok ciddi bir rekabetçilik kazandıracaktır.

Bu alanda yapılacak geliştirmelerde ülkemizde TÜBİTAK gibi kurumların endüstrilere öncülük etmesi ve metal döküm sektörünün üniversitelerin ilgili bölümleriyle sürekli desteklenmesi gerekmektedir. Beraberinde TÜDÖKSAD gibi sektörel sivil toplum kuruluşlarının metal döküm parça üreticilerini bu alanda sürekli gelişen bilgilerle aydınlatması ve ilerletmesi gerekmektedir.

Tüm bu çalışmalara ilaveten Eklemeli İmalat sistemleriyle çalışan metal döküm parça üreticilerinin kalite seviyelerini daha üst sıralara çıkarabilmesi için TSE endüstri standartlarının da güncellenmesi gerekmektedir.

E. Ar-Ge, Yenilik, Demonstrasyon İş Birliği Modeli ve Destek Mekanizması

5.1.a. Döküm proseslerinde ısı, enerji ve sarf maddelerinin minimize edilmesine yönelik çalışmaların gerçekleştirilmesi

İndüksiyon ve kupol ocaklı ergitme sistemlerinde enerji verimliliğini arttıracak çözümlerin uygulanması, atık ısının geri kazanılarak üretim süreçlerinde kullanılması, maça üretiminde yeni teknoloji katkı malzemelerinin geliştirilmesi ve yaygınlaştırılmasına yönelik teknolojilerin Ar-Ge safhasından endüstriyel ölçekli üretime kadar uzanan sürecin teknoloji hedefleri ve endüstriyelleşme potansiyeli göz önünde bulundurularak tasniflenmesi önem arz etmektedir. Bu amaçla ortaya konacak proje çalışmalarının ölçek odaklı aşamalandırılması, sağlanacak desteklerin bu ölçeklere göre düzenlenmesi, her bir ölçek için düşünülen proje çalışmalarının bulunduğu ölçekte hedeflenen ve mümkün olan seviyedeki teknolojik ürünü ortaya koyması zorunlu kılınmalıdır. Proje çalışmaları yalnızca bulunduğu ölçeği ve bu ölçeğin gerekliliklerini yerine getirmekle kalmamalı, aynı zamanda ölçeği bir üst seviyeye taşıyacak şekilde yeni proje çalışmalarının öngörülebilir ve gerçekçi bir projeksiyonunu ortaya koymalıdır.

Öte yandan söz konusu teknoloji için yürütülecek proje çalışmalarının çok farklı disiplinleri tek potada eritecek ve endüstriyel ekosistemlerin kurulmasını mümkün kılacak bir yapıda kurulması önem arz etmektedir.

Maça üretiminde yeni teknoloji katkı malzemelerinin geliştirilmesi ve yaygınlaştırılması ile kupol ocağı bacasından atık ısının geri kazanılarak üretim süreçlerinde kullanılması hususlarının farklı proses ve disiplinleri bir araya getirecek bir ortak çalışma platformu üzerinden açılacak çağrılar vasıtasıyla yönetilmesi faydalı olacaktır. Aynı zamanda farklı endüstrilerin de olası endüstriyel ekosistem fırsatlarını değerlendirebileceği ve geliştirebileceği ve **farklı ölçeklerde proje iş birlikleri kurabileceği bir yapının** oluşturulması gerekmektedir.

Üniversitelerde gerçekleştirilen lisans üstü çalışmaları büyük ve küçük ölçekli sanayi kuruluşlarının ihtiyaçları dikkate alınarak kurgulanmalı ve **Üniversite-Sanayi iş birliği destekleri** artırılmalı ve teşvik edilmelidir. Laboratuvar koşullarında gerçekleştirilen çalışmaların üretime taşınması sırasında Üniversite-Sanayi iş birliği önemlidir. Uluslararası iş birlikleri ile önerilen çalışmalar ülkemizde katma değeri yüksek ürün üretiminin gerçekleşmesini sağlayacaktır.

Destek mekanizmaları özelinde döngüsel ekonomi için artık bir zorunluluk olarak görülebilecek endüstriyel ekosistem kavramı bağlamında projelere destek verilmesi yanında **ölçek büyütme potansiyelin önemsenmesi** doğru olacaktır. Yürütülen projeler devam destekleri ve teşvik mekanizmaları ile hayata geçirilmelidir. Bu noktada projeler için THS odaklı bir ek teşvik mekanizması oluşturularak, proje boyunca veya proje sonrasında atlanacak her bir THS için

ek teşvik sağlanması, nihai ürün niteliğinin yükseltilmesi noktasında yararlı bir yaklaşım olacaktır.

5.1.b. Eklemeli imalat tekniklerinin (3D üretim gibi) döküm proseslerinde kullanımının araştırılmasına yönelik çalışmaların gerçekleştirilmesi (Kalıp, maça vb. üretiminde) ve uygulamalarının yaygınlaştırılması

Belirtilen disiplinler bir destek mekanizması ile bir araya getirilmeli ve küresel ölçekte rekabetçilik zamanını kaçırmamak adına bir an önce çalışmaya başlamalıdır.

Bu alanda destek yapısı oluşturmak için farklı disiplinlerin bir arada çalışma ve tasarım dahil projeleri Eklemeli İmalat teknolojilerinden faydalanarak döküm üretimiyle hayata geçirmeyi hedeflemek gerekir. Bu kültürü mümkün mertebe fazla kullanıcıya bir TÜBİTAK projesi başlığıyla oluşturmak gerekmektedir. Altyapı yatırım projeleri de gerek düşük oranlı hibe gerekse de geri ödemeli olarak bu desteğin içine dahil edilmelidir. Proje süresine ek 1 yıl disiplinler arası çalışma programı da izlenebilir. Bu sayede bu çalışma dinamiği döküm parça üreticilerinde kalıcı bir disiplin haline getirilebilir.

Destek mekanizmasında altyapıya sahip bir döküm üreticisi, bir ana sanayi (müşteri) ve bir üniversite (danışman akademisyen) birlikte yer alabilir. Destek projesi kapsamında belirli sürede bu çalışmanın efektif bir şekilde ilerlediği gözlemlenmeli ve ortaya yapılmış projelerin ötesinde çalışan bir iş modelinin çıkartılması da takip edilmelidir.

F. Zaman ve Bütçe Tahminleri

(Kısa Vade: 1-3 yıl, Orta Vade: 3-5 yıl, Uzun Vade: 5 yıldan fazla)

5.1.a. Döküm proseslerinde ısı, enerji ve sarf maddelerini minimize edilmesine yönelik çalışmaların gerçekleştirilmesi

İndüksiyon ve kupol ocaklı ergitme sistemlerinde enerji verimliliğini arttıracak çözümlerin uygulanması, atık ısının geri kazanılarak üretim süreçlerinde kullanılması, maça üretiminde yeni teknoloji katkı malzemelerinin geliştirilmesi ve yaygınlaştırılmasına yönelik kısa dönem için laboratuvar ölçeğinde araştırılması ve teknolojilerinin ortaya konması adına ortalama 15 milyon TL civarında bir başlangıç bütçesi yeterlidir. Bu noktada orta vadede endüstriyel ölçeğe yakın pilot tesislerin geliştirilmesi ve optimizasyonunun tamamlanması için ise yaklaşık 30 milyon TL seviyesine çıkılması gerekmektedir. Uzun vadede gerçekleştirilecek endüstriyel ölçekli uygulamaların yaygınlaştırılmasına yönelik Ar-Ge faaliyetleri için bütçe oranları fizibilite çalışmalarıyla belirlenmelidir.

5.1.b. Eklemeli imalat tekniklerinin (3D üretim gibi) döküm proseslerinde kullanımının araştırılmasına yönelik çalışmaların gerçekleştirilmesi (Kalıp, maça vb. üretiminde) ve uygulamalarının yaygınlaştırılması

Destek projelerinin 3-5 yıl orta vadeli olarak açılması ve takip edilmesi gerekmektedir. Oldukça geleneksel olan döküm sektörünün gerek Eklemeli İmalat sistemlerine gerekse de üreticiden çok tasarım ve üretim yetkinliğine ulaşması belirli bir plan doğrultusunda bir zaman planına yayılmalıdır.

3-5 yıllık orta vade destek projesinde Eklemeli İmalat sistemi kazanımı için de %40-60'lık bir hibe verilebilmelidir. Ya da bu oranın bir kısmı geri ödemeli olarak da önerilebilir. Tasarım, optimizasyon ve alıştırma geliştirme yazılımları, adam-ay miktarları, diğer disiplinlerden alınacak destekler de bu destek projesinde önerilebilmelidir.

Örnek olarak; 4 yıllık bir proje için yaklaşık olarak desteklenmesi gereken tutarlar;

	Mühendis #	Aylık kazanç	Yıllık Kazanç	4 Yıllık Kazanç	%60 Destek Oranı
Mühendis adam saat	4	₺ 46.000	₺ 552.000	₺ 2.208.000	₺ 1.324.800
			Yıllık Destek		%60 Destek Oranı
Danışmanlık			₺ 250.000		₺ 1.000.000
	Ürün		Lisans Bedeli		%50 Destek Oranı
Yazılım	Catia, Solidworks,		₺ 500.000		₺ 250.000
	Ansys, Altair Inspire, nTopology		₺ 400.000		₺ 200.000
			Sistem Bedeli		%50 Destek Oranı
Eklemeli İmalat Sistemi			₺ 20.000.000		₺ 10.000.000
				Toplam:	₺ 12.774.800

G. Teknolojik İlerlemenin Sağlanmasında Kritik Hususlar

Hedeflenen teknolojilerin mümkün kılınması noktasında en önemli hususlardan biri kamunun mevzuat düzenlemeleri ile izleme, yönlendirme, teşvik etme olgularını sağlam bir zemine oturtabilmesidir. Sürdürülebilir üretim ve karbon ayak izinin azaltılması noktasında en önemli faktörlerden indüksiyon ve kupol ocaklı ergitme sistemlerinde enerji verimliliğini arttıracak

çözümlerin uygulanması, atık ısının geri kazanılarak üretim süreçlerinde kullanılması, maça üretiminde yeni teknoloji katkı malzemelerinin geliştirilmesi ve yaygınlaştırılmasına yönelik teknolojilerin geliştirilmesi ve yaygınlaşması adına, mevcut mevzuatlarda bu dönüşümü endüstriyel ekosistemler çerçevesinde sağlamayı mümkün kılacak revizyonlar gerçekleştirilmelidir.

Kamu öncelikle bu ekosistemin ve kültürün oluşması için istekli firmalara destek sağlamalıdır. Sonrasında destek projesinde detaylı bir şekilde takip etmelidir. Beraberinde çıktılar için Eklemeli İmalat kazanımlarının da içeriğe dahil edildiği TSE tarafından bir standart seti oluşturulmalıdır.

Mevzuat ve Yasal Düzenlemeler

Mevcut mevzuatlar; teknolojik ilerlemelerin sağlanması konusunda herhangi bir engel teşkil etmese de teşvikler yoluyla gelişmelerin sağlanması amacıyla revizyonlara ihtiyaç duyulmaktadır. Bu noktada Sınırdaki Karbon Düzenleme Mekanizması (SKDM) esaslarının dikkate alındığı, döngüsel ekonomiyi teşvik edecek düzenlemelerin ivedi bir biçimde mevzuatlarda yer alması gerekmektedir.

Halihazırdaki destek projelerinde eklemeli imalat üç boyutlu yazıcı yatırımları bütçesi itibariyle dışarıda tutulmaktadır. Bu yatırımların da metal dökümhanelerini desteklemek için belirli oranda gerek hibe gerekse de geri ödeme yoluyla destek kapsamına alınması gerekmektedir.

Teknik Altyapılar

Bu tür çalışmalar Ar-Ge projeleri ile yürütüleceğinden yeterli alt yapılara, test ve cihazlar ile ve bunları destekleyecek ileri seviyede ölçüm cihazlarına ihtiyaç bulunmaktadır. Bu sayede denemeler esnasında oluşabilecek riskleri minimize edebilecek bilgiye ulaşılabilmesi sağlanacaktır. Bu çalışmalar ve destekler sayesinde THS yükseltilmesi son derece önemlidir.

Üretim altyapıları ve iş yapma şekilleri Eklemeli İmalat teknolojilerinin kullanımına göre geliştirilmelidir. Döküm üreticileri test altyapılarını da kendi bünyelerinde ya da üniversitelerin ilgili bölümlerinden temin edecek şekilde kurmalıdır. Standartlar yeniden yazılmalı, Eklemeli İmalat sistemlerine göre yeni standartlar eklenmelidir.

İnsan Kaynakları

İndüksiyon ve kupol ocaklı ergitme sistemlerinde enerji verimliliğini arttıracak çözümlerin uygulanması, atık ısının geri kazanılarak üretim süreçlerinde kullanılması, maça üretiminde

yeni teknoloji katkı malzemelerinin geliştirilmesi ve yaygınlaştırılmasına yönelik Ar-Ge çalışmaları için hem üniversitelerde hem de sanayide yeterli sayıda ve ihtiyaç duyulan yetkinlikte insan kaynağının geliştirilmesinin kritik öneme sahip olduğu düşünülmektedir.

Hali hazırda ülkemizde mevcut üniversiteler ve enstitüler metal döküm sektörünün ihtiyaçlarına cevap verememektedir. Ülkemizde döküm sektörünün ihtiyacı olan insan kaynaklarının karşılanması adına üniversitelerde müfredat programlarının güncellenmesi, lisansüstü çalışmaların teşvik edilmesi ve döküm araştırma enstitülerin kurulması elzemdir.

Kamu (TUBİTAK ve Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı) destekli sanayi doktora programları geliştirilerek ilgili pozisyonlar için yerleştirme şartlarının belirlenmesi gerekmektedir.

Üniversiteler, araştırma enstitüleri, araştırma merkezleri ve kamu kuruluşları, sektörün ulusal ve uluslararası iş birlikleri yetkin insan kaynaklarına ulaşılması noktasında avantaj sağlayacaktır. Metal döküm sektörü her durumda kamunun desteğini almalı ve rekabet gücünü artırmalıdır. Bu amaçla gerekli destek ve teşvik mekanizmaları değerlendirilmelidir.

Ayrıca, meslek liseleri ve üniversitelerin ilgili ön lisans programlarına özel hassasiyet gösterilerek metal döküm sektörünün en kritik ihtiyaçlarından teknik eleman yetiştirilmesine stratejik politikalar içerisinde yer verilmelidir.

Bu alandaki en büyük yoksunluklardan biri yetişmiş insan kaynağıdır. Üniversite-sanayi iş birliği çok daha verimli çalışmalı, liseden ya da üniversiteden mezun olan kişilerin Eklemeli İmalat teknikleriyle ilgili teorik ve hatta pratik bilgileri olmalıdır. Bu alandaki çalışmaları TUDÖKSAD metal döküm parça üreticilerinin sağlayacağı fonla ya da bir destek mekanizmasıyla çok daha ileri bir seviyeye taşınmalıdır.

Destek ve Teşvikler

İndüksiyon ve kupol ocaklı ergitme sistemlerinde enerji verimliliğini arttıracak çözümlerin uygulanması, atık ısının geri kazanılarak üretim süreçlerinde kullanılması, maça üretiminde yeni teknoloji katkı malzemelerinin geliştirilmesi ve yaygınlaştırılmasına yönelik Ar-Ge projelerine girişimcilik aşamasından yatırım aşamasına kadar teşvik ve desteklerin sağlanması bir zorunluluktur.

Üniversite-sanayi iş birlikleri kapsamında gerçekleştirilecek çok disiplinli endüstriyel ölçekli Ar-Ge projeleri elde edilecek çıktılarının ilgili sektöre entegre edilmesinde önemli katkılar sağlayacaktır. Üniversite-sanayi iş birlikleri kapsamında gerçekleştirilecek çok disiplinli endüstriyel ölçekli Ar-Ge projeleri için Yüksek Öğretim Kurulu akademik yükselme kriterleri de teşvik edici şekilde düzenlenmelidir.

Ayrıca, ISO 50001 Enerji Yönetim Sistemi kuruluşların/işletmelerin enerji verimliliği, kullanımı, tüketimi ve yoğunluğunu içeren enerji performansını geliştirmek için gerekli sistemleri ve prosesleri ile ilişkilidir. Kuruluşların/işletmelerin Enerji Yönetim birimleri kurmaları ve devlet desteği almaları önerilmektedir. Üniversite-sanayi iş birlikleri kapsamında gerçekleştirilecek çok disiplinli endüstriyel ölçekli Ar-Ge projelerinde yer alacak araştırmacılara sektörel sivil toplum kuruluşlarının burs, malzeme, altyapı, seyahat vb. destek ve teşvikler sağlaması için bir zemin oluşturulmalıdır.

TÜBİTAK tarafından açılacak Ar-Ge ve Yenilik Desteği Çağruları önemlidir. Beraberinde daha küçük ölçekli firmalar için kısmi KOSGEB destekleri de sunulmalıdır.

Referanslar

- [1]. TÜDÖKSAD Türkiye Döküm Sanayicileri Derneği, *Türk Döküm Sektörünün Genel Değerlendirmesi*, <https://www.tudoksad.org.tr/dosyalar>
- [2]. Günnur Dikeç, Kemal Demire, *Döküm Teknolojisi*, İstanbul, 2019, 2. Baskı.
- [3]. Renato M. Lazzarin, Marco Noro, *Energy efficiency opportunities in the production process of cast iron foundries: An experience in Italy*, Applied Thermal Engineering, Volume 90, 2015, Pages 509-520, ISSN 1359-4311, <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.07.028>.
- [4]. L. Venkatesh Muthuraman, *Energy Conservation in Foundries Using Waste Heat Recovery System*, Procedia Engineering, Volume 97, 2014, Pages 1842-1852, ISSN 1877-7058, <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.12.338>.
- [5]. Stefan Scharf, Bastian Sander, Marc Kujath, Hans Richter, Eric Riedel, Hagen Stein, Joerg tom Felde, *FOUNDRY 4.0: An innovative technology for sustainable and flexible process design in foundries*, Procedia CIRP, Volume 98, 2021, Pages 73-78, ISSN 2212-8271, <https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.01.008>.
- [6]. J. Selvaraj, V.S. Varun, Vignesh, Vishnu Vishwam, *Waste Heat Recovery from Metal Casting and Scrap Preheating Using Recovered Heat*, Procedia Engineering, Volume 97, 2014, Pages 267-276, ISSN 1877-7058, <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.12.250>.
- [7]. Adrian Pocola, Alexandru Serban, Mugur Balan, *Complex and Efficient Waste Heat Recovery System in Aluminum Foundry*, Energy Procedia, Volume 112, 2017, Pages 504-509, ISSN 1876-6102, <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.1134>.
- [8]. Patrik Thollander, Magnus Karlsson, Mats Söderström, Dan Creutz, *Reducing industrial energy costs through energy-efficiency measures in a liberalized European electricity market: case study of a Swedish iron foundry*, Applied Energy, Volume 81, Issue 2, 2005, Pages 115-126, ISSN 0306-2619, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2004.07.006>.
- [9]. Patrik Thollander, Sandra Backlund, Andrea Trianni, Enrico Cagno, *Beyond barriers – A case study on driving forces for improved energy efficiency in the foundry industries in Finland, France, Germany, Italy, Poland, Spain, and Sweden*, Applied Energy, Volume 111, 2013, Pages 636-643, ISSN 0306-2619, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.05.036>.
- [10]. (<https://portal.enerya.com.tr/DogalGazBirimFiyatlari/index.xhtml?city=07>)
- [11]. SAVAT, H., & ATMACA, M., (2020). *Havadan Havaya Plakalı Tip Isı Geri Kazanım Cihazının Isı Değiştiricisinin Isıl Veriminin İncelenmesi*. Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik, Bilimleri Dergisi, 23(2), 80-93.
- [12]. Kilinc, H. (2017). *Endüstriyel tav fırını bacalarından atık ısının geri kazanımı* (Yüksek Lisans Tezi). İskenderun Teknik Üniversitesi / Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Hatay. <http://openaccess.iste.edu.tr/xmlui/handle/20.500.12508/984>
- [13]. Kazım Kubat, *Dökme Demir Üretiminde Boyasız Maçalı Döküm*, 7. ULUSLARARASI ANKİROS DÖKÜM KONGRESİ, 11 – 13 EYLÜL 2014, TÜYAP
- [14]. Gökhan Yıldırım, *Soğuk Kutu Amin Prosesi (PUCB Amin Prosesi) Maça kullanımında Döküm Hatası*, <https://akademi.tudoksad.org.tr/article/file?id=19>
- [15]. Reinhard Stötzel, Christian Koch, Carlos Luft, Friedhelm Meyer, *Hatasız Dökümler İçin Boya ve Katkı Teknolojilerinde Yeni Yaklaşımlar*, <https://akademi.tudoksad.org.tr/article/file?id=49>
- [16]. Qian, Xw., Wan, P., Yin, Yj. et al. *Gas evolution characteristics of three kinds of no-bake resin-bonded sands for foundry in production*. China Foundry 19, 140–148 (2022). <https://doi.org/10.1007/s41230-022-1031-4>

Kritik Ürün/Teknoloji 5.2.

5.2. Parça dökümde proses çıktılarının (döküm kumları, cüruflar, filtre tozları vb.) değerlendirilmesine yönelik yöntemlerin geliştirilmesi

Öncelikli Ar-Ge ve Yenilik Konuları

5.2.a. Döküm kumlarının, cürufların vb. çıktılarının rejenerasyon sistemlerinin geliştirilmesi ve yaygınlaştırılması

5.2.b. Kullanılmış döküm kumunun parça döküm dışındaki diğer sektörlerde değerlendirilmesine yönelik sistemlerin geliştirilmesi ve yaygınlaştırılması

5.2.c. Döküm cürufları ve filtre tozlarının döküm dışındaki diğer sektörlerde değerlendirilmesine yönelik sistemlerin geliştirilmesi ve yaygınlaştırılması

Kritik Ürün/Teknoloji 5.2.

5.2. Parça dökümde proses çıktılarının (döküm kumları, cüruflar, filtre tozları vb.) değerlendirilmesine yönelik yöntemlerin geliştirilmesi

A. Teknik Açıklamalar, Yenilikçi Özellikler, Hedeflenen Performans ve Metrikler

Metal (parça) döküm prosesi; pik demir, çelik veya hurda metaller ile ferro alaşım karışımlarının indüksiyon, elektrik ark veya kupol ocaklarında ergitilip kum, seramik ve çeşitli metal kalıplar kullanılarak şekillendirilmesidir. Çelik, sfero, pik, temper ve demir dışı döküm ürünlerinin ham veya işlenmiş olarak ve spesifik şekillerde üretildiği sanayi sektörü olup; dünya çapında zor, tehlikeli ve ağır sanayi olarak tanımlanmıştır. Dünya üzerinde birçok farklı endüstrilere ürün sağladığı için yüksek bir istihdam oranına sahiptir. Bu yüzden metal döküm sektörü vazgeçilmez sektörlerden birisidir. Döküm, birçok mekanizmaların belirli parçalarını üretmek amacı ile tercih edilmektedir. Karmaşık şekillere sahip bu tarz metal parçalar, herhangi bir başka yöntemle üretildiğinde ekonomik olarak verimsiz olmaktadır. Parça üretiminde yüzyıllardır en çok kullanılan döküm yöntemlerinden biri kum kalıba döküm yöntemidir. Kum kalıba döküm yönteminde kullanılan kum çeşitleri silis kumu, zirkon kumu, kromit kumu ve olivin'dir [1]. Ayrıca döküm sonrası elde edilecek ürünlerdeki boşluklu yapıların oluşturulmasını sağlayan maça, kalıplardaki boşluklara yerleştirilir ve kapladıkları alanla doğru orantılıdır. Bu maçalar kum, reçine ve katalizör karışımıyla elde edilir.

Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı tarafından yayınlanan "Sektörel Atık Kılavuzları, Döküm Sektörü" araştırmasına göre, döküm parçaları elde edilmesi esnasında katı, sıvı ve gaz atıkların üretilmektedir. Bir tonluk bir döküm ürünü elde edilmesinde yaklaşık olarak 0,6 ile 0,8 ton arası atık ortaya çıkar ve bu atıkların 0,4 ile 0,6 tonunu kullanılmış kumlar oluşturmaktadır. Türkiye de ise bu durum %65-70'i kullanılmış döküm kumu, %10-15'i cüruf ve %15-17'si toz-çamur (genellikle filtre tozları) ve kalan kısımlar ise refrakter gibi atıklardan oluşmaktadır [2].

Bu atıkların toplanması, nakliyesi ve bertarafı gibi problemler bulunmaktadır. Atık maddelerin yeniden kullanımı ile atık miktarları azalarak çevre kirliliğinin önüne geçilmesi ve ülke ekonomisine de katkı sağlanması mümkündür. Esas olarak, malzemenin sürdürülebilirlik açısından değerlendirilmesi o malzemeye ait yaşam döngüsü analizinin yapılması anlamına da gelmektedir. Bu yaşam döngüsünün en önemli hedefleri; ortaya çıkan atık miktarının

düşürülmesi veya atığın geri dönüştürülebilir hale getirilmesinin sağlanmasıdır. Çoğu durumda bir prosesin sonucunda çıkan ve atık olarak adlandırılan malzemeler başka prosesler için direkt olarak birer hammadde olabilmektedir.

Doğal kaynak tüketimini arttıran ve çevre kirliliğine neden olan bu atıkların değerlendirilmesi son derece önem arz etmektedir. Ülkemizdeki üretimin artması ile atıkların miktarı da günden güne artmaktadır. Bundan dolayı sektörler arasında endüstriyel simbiyoz çalışmaları yapılması ve desteklenmesi gerekmektedir. Bu çalışmalar doğal kaynak tüketimini ve çevre kirliliğini azaltmaya yarayacaktır.

ÖNCELİKLİ AR-GE VE YENİLİK KONULARI

5.2.a. Döküm kumlarının, cürufların vb. çıktılarının rejenerasyon sistemlerinin geliştirilmesi ve yaygınlaştırılması

Döküm kumu, yüksek oranda silika içerdiği bilinen ve stabil fiziksel özelliklere sahip kaliteli bir kumdur. Döküm kumunun termal dayanıma sahip olması, sıvı metalin ısı ve basıncına karşı direnç gösterebilen bir yapıda olması arzu edilir. Ayrıca ekonomik oluşundan ötürü döküm kumu, demir ve demir dışı döküm sektörünün üretim girdisi olarak uzun yıllardır kullanılmaktadır. Döküm kumu, en yaygın kullanılan kalıplama malzemesidir [3]. Bir ton döküm için 5-10 ton aralığında kum gereklidir [2]. Döküm kumları, genel olarak yarı köşeli ya da yuvarlak şekilde olup tane boyut dağılımı da üniformdur. Kullanılmış döküm kumu; temel olarak silika kumu, artık bağlayıcı (reçine, kömür, bentonit, kimyasal vb) ve tozlardan oluşur. Ergitme işleminde kullanılan metale bağlı olarak %5 civarında metal-oksit bileşeni içerir. Bunların yanı sıra kullanılmış döküm kumunun yapısında %1 seviyesinin altında olmak üzere kalsiyum, magnezyum, kükürt, sodyum, potasyum ve mangan gibi elementlerin oksitlenmiş bileşikleri bulunur. Kullanılmış döküm kumlarının zararlı etkilerini elimine edebilecek teknolojiler mevcuttur.

Döküm kumu dökümhanelerde birden çok üretim döngüsünde kullanılabilir. Ancak belli bir döngü sonunda özelliklerinde meydana gelen bazı değişimler sebebi ile yeni kum ile yenilenmeleri gerekir. Kullanılmış döküm kumu bu noktada kalıplar ve maçalar için gerekli mukavemete sahip olmamakta ve yüzeylerinde sönük kil tabakaları ve oolitik birikintiler bulunmaktadır. Bu yüzden, kullanılmış döküm kumlarının döküm sektöründe direkt kullanımı imkânsız hale gelmektedir. Bu tabakalar, kum tanelerinin yüzeyinden ayrıldığı anda döküm kumları dökümhanelerde daha uzun ömürlü kullanılabilir. Bu nedenle, herhangi bir kum türünü geri kazanmak için uygun maliyetli bir teknolojiye gereksinim duyulmaktadır. Kullanılmış döküm kum yüzeyinden bahsi geçen tabakaların ve birikintilerin temizlenmesi kum

reklamasyon teknolojisi ile gerçekleştirilebilir. Kum reklamasyon teknolojisi, mekanik ve termal reklamasyon olarak ikiye ayrılır.

Mekanik reklamasyon, aşındırma ilkesine dayanmaktadır. Kullanılmış döküm kumu, mekanik reklamasyon makinasına beslenir. Proses başladığında, kullanılmış döküm kumu diskler ile cihazın duvarı arasında kalarak aşınır ve kumun yüzeyinde tabakalardan ayrılır. Bu tabakalar, elekler ve siklon ayırıcılar kullanılarak kumdan uzaklaştırılır.

Termal reklamasyon yöntemi, kullanılmış döküm kumunda mevcut kimyasal bağlayıcıların (fenolik reçine vb.) 700°C sıcaklıkta yakılarak kumdan uzaklaştırılmasını içermektedir. Bu sıcaklıkta, reçineler tamamen yanarak CO ve CO₂ gazlarını oluşturmaktadır. Kullanılmış yaş kumda ise bentonit bağlayıcı olarak kullanıldığından bu sıcaklıkta bentonit, su kaybederek kırılğan hale gelir ve kum tanelerinin yüzeyine güçlü bir şekilde yapışır. Bentonitli kumda, termal reklamasyon yöntemi ise bir ön ısıtma ile bentonitin ve silis kumun genleşme katsayı farkından yararlanarak bentonitin kumdan ayrılması prensibine dayanmaktadır. Bu yüzden, kullanılmış döküm kumlarının sağlıklı dönüşümü için en uygun yöntemler arasında termal reklamasyon sonrası mekanik reklamasyon veya birden çok ardışık mekanik reklamasyon işlemine tabi tutulması yer almaktadır. Termal reklamasyonda aktif kil devre dışı bırakılır, ancak gevşek bağlı sönmüş kil veya oolitik tortular kum tanelerinden uzaklaştırılmaz. Mekanik reklamasyon, kum tanelerinden sönmüş kil kaplamayı kaldırabilir [4]. Böylece kullanılmış döküm kumunun döküm tesislerinde geri dönüşümü sağlanabilmektedir. Silis kumu döngüsü, madenden çıkartılmasından uygun tane boyutunda elenmesine, yıkanmasından kurutulmasına ve paketlenmesinden kullanılacağı yere nakliyesine kadar tüm süreçler göz önüne alındığında; reklamasyon yöntemiyle kullanılmış döküm kumunun geri kazanımı, karbon ayak izi ve enerji verimliliği bakımından ciddi avantajlar sunmaktadır. Kullanılmış döküm kumu, metalürjik bir atık olarak değerlendirilmez, fakat aynı zamanda hem metalürjik proseslerde hem de diğer endüstri uygulamalarında kullanılabilen değerli ikinci bir hammadde olarak düşünülebilir.

Kullanılmış döküm kumu, ayrıca seramik bazlı bir hammadde kaynağı olduğundan seramik sektöründe ikincil bir hammadde olarak kullanılabilir. Geleneksel seramikler; kaolin, kuvars ve feldispat ana hammaddeleri ile talk, kalsit, vollastonit gibi yardımcı malzemelerin yaş yöntemler (slip döküm, basınçlı döküm ve slip döküm) veya kuru yöntemler (kuru presleme, izostatik presleme (soğuk, sıcak)) ile işlenmesi sonucu elde edilir. Kuvars, yüksek silika içeren (%99 SiO₂) bir dolgu malzemesidir ve seramiklerde mukavemeti sağlamak amacıyla kullanılmaktadır. Kaolin, silika ve alümina içeren ve seramik ürünlerin şekillendirmesini sağlayabilmek için ilave edilir. Feldispat ise seramik ürünün pişme sırasında gerekli olan ergiticiliği sağlamaktadır. Bunların yanında, şekillendirmeye katkı sağlayabilmesi için bir miktar bentonit ilave edilmektedir [5]. Kullanılmış döküm kumu ise yüksek silika içerir ve belli

oranlarda seramik ürünlere kuvars yerine ilave edilerek kullanılabilir. Kullanılmış döküm kumu bir miktar da bentonit içermektedir. Bu nedenle de kullanılmış döküm kumu, alternatif hammadde olarak kullanılabilir.

Amerikan Dökümcüler Derneği (American Foundrymen Society-AFS) yayını olan Modern Casting dergisinin 2017 Şubat sayısında yayınlanmış "Kum Bertarafında Tasarruf" başlıklı makalesinde, kullanılmış döküm kumlarının döküm uygulamaları dışında geri dönüşüm ile asfalta dolgu malzemesi olarak kullanılabilirdiği belirtilmektedir. Asfalt üretiminde metal döküm kumu, arzu edilen ürüne bağlı olarak %7-15 oranında kullanılabilir. Kullanılmış döküm kumu, tenis kortları ve bisiklet yolları gibi diğer uygulamalarda da bileşiminin %40'ını oluşturabilir. Ayrıca kullanılmış döküm kumları, inşaat sektöründe de dolgu malzemesi olarak kullanılabilir. Kum, SiO₂ bazlı bir malzeme olduğundan çimento sektörü için en uygun malzemelerden biridir. Çimentonun mukavemetine olumlu katkı verdiği belirtilmektedir [6].

5.2.b. Kullanılmış döküm kumunun parça döküm dışındaki diğer sektörlerde değerlendirilmesine yönelik sistemlerin geliştirilmesi ve yaygınlaştırılması

Cüruf, endüstriyel atık olarak değerlendirilip, dökme demir hammaddesinin (pik demir) veya hurda çeliğin, ergitme ocaklarında ergitilmesiyle oluşan; yoğunluk farkıyla sıvı metal yüzeyinde yer alan üründür. Bu cüruflar genel olarak silika, kalsiyum oksit, magnezyum oksit, alüminyum ve demir oksit karışımlarından oluşmaktadır. Cüruf, sıvı metal yüzeyinde katman oluşturmakta ve sıvı metali dışarıdaki oksijenden ve kirlilikten korumaktadır. Ayrıca sıvı metalin ısı kaybını önlemektedir [7].

Son yıllarda teknolojiye meydana gelen gelişmelere paralel olarak, artış gösteren endüstriyel atıkların sebep olduğu bertaraf sorunu bir yanda olmak üzere endüstrilere ekonomik malzeme kaynakları kazandırmak amacıyla geri dönüşüm projeleri gerçekleştirilmektedir. Yapılan araştırmalar neticesinde cürufun birçok sektörde kullanım potansiyeline sahip olmasından dolayı atık bir malzeme olmaktan çıkıp ve faydalı bir ürün olarak kullanılmasının mümkün olduğu görülmektedir. Cürufların farklı alanlarda kullanımı ile doğal kaynakların tüketimi azalmakta ve çevre kirliliğinin önüne geçilmektedir. Bu durumla ilgili Amerikan Ulusal Cüruf Birliği (National Slag Association, 1998) tarafından cürufların tekrar kullanımının çevre sağlığı ve halk açısından önemli bir risk taşımadığı belirlenmiştir. Cüruf, kullanılmış döküm kumu gibi metalürjik bir atık olarak değerlendirilmez, fakat aynı zamanda hem metalürjik proseslerde hem de diğer endüstri uygulamalarında kullanılabilen değerli ikinci bir hammadde olarak düşünülebilir. Türkiye'de cürufun değerlendirilmesi diğer ülkelerin gerisinde olup, oluşan cüruf dağları yer işgal etmekte ve çevresel problemlere neden olmaktadır.

Bu cüruflar, yüzeyden alınarak atık sahasına taşınıp daha sonra bertaraf edilmektedir. Cürufun, farklı sektörlerde kullanımının artırılması bu problemi çözmek için önemli bir yoldur. Bertaraf edilen bu cürufların, tekrar kullanılarak ve geri kazanılarak sıfır atığa ulaşılması hedeflenmektedir. Cürufu geri kazanma çabalarının hedefi hem çevresel hem ekonomiktir. Ayrıca bu cürufun tekrar kazanılması ile farklı sektörlerde yardımcı hammaddeler kazandırılarak ülke ekonomisine katkı sağlanacaktır.

Cüruflar genellikle silika, kalsiyum oksit, magnezyum oksit, alüminyum ve demir oksit kimyasal yapısına sahip olduğundan seramik sektörü için uygun ikincil hammaddedir. Fakat bu cürufların tane boyutları yüksek olduğundan öğütülmesi gereklidir. Cüruflar, kuru veya yaş öğütmeye uygundur. Bu yüzden cürufların kullanılması için öğütücü sistemlere sahip sektörlerin tercih edilmesi daha uygundur. Seramik üretiminde en önemli aşamalardan biri de seramik çamurların öğütülmesidir. Bu cüruflar öğütülerek seramik sektöründe, cam ve cam-seramik (kristal cam-sektörü,) porselen (stoneware), karo, tuğla, güveç ve refrakter sektörlerinde kullanılabilir. İnşaat sektöründe ise çimento betonu agregası, kara yollarında kaplama ve balast malzemesi olarak tercih edilebilir. Ayrıca gübre üretiminde de kendine yer bulabilir.

5.2.c. Döküm cürufları ve filtre tozlarının döküm dışındaki diğer sektörlerde değerlendirilmesine yönelik sistemlerin geliştirilmesi ve yaygınlaştırılması

Dökümler kum kalıplardan ayrıldıklarından yüzeylerinde kum ve tufal kalıntıları yapışık halde olur. Parça yüzeylerinin kum ve tufaldan arındırılması işlemi kum ve/veya metal parçacıklarının yüksek hızda parça yüzeyine püskürtülmesi ile sağlanır. Parçanın tüm yüzeyinin temizlenmesi için tamburlu ya da askılı bilyalı temizleme makinelerinden yararlanır. Temizlenen parçaların yüzeyinde taşlanması gereken bölgeler taşlama aletleri ile taşlanır ve gerekirse tekrar kumlama yapılır.

Kumlama ve taşlama makinelerinin filtrelerinde toplanan toz, atık olarak ortaya çıkmaktadır. Endüstriyel toz toplama sistemleri, havada bulunan partiküllerin temizlenmesi için kullanılır. Bu tozlar, aşındırma esnasında aşınan ve aşındıran parçadan kopmaktadır. Kopan bu parçalar, filtrelerden geçemeyerek toplanır ve atık olarak değerlendirilir. Aşındırıcı malzeme genellikle seramik bazlı (SiC vb.) olur. Filtre tozlarında yanmış bentonit, yanmış kömür tozu, SiO₂ kum, demir ve besleyici kalıntıları bulunmaktadır. Filtrelerden alınan bu tozlar daha ince boyutlu malzemelerdir. Filtre tozlarının kimyasal yapısı genellikle SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, CaO, MgO, SO₃, TiO₂, K₂O, P₂O₅, MnO, NiO ve ZnO 'den oluşmaktadır. Bu oranlar ortamdaki tozların kimyasal yapısına göre değişim göstermektedir. Aşınan parça da demir bazlı olduğundan, bu tür atıklar kum ve cüruf gibi seramik ve çimento sektöründe tercih edilebilir.

Bunların yanında taşlama ortamında sadece demir esaslı tozlar oluşabilmektedir. Bu demir tozlarının özgül ağırlığı yüksek olduğundan zeminlerde dolgu malzemesi olarak kullanılabilir. Bunlara örnek olarak, asansör sistemlerinde ağırlık oluşturması için demir tozları kullanılmaktadır. Ayrıca, seramik ürünlerinin yüzeyini kaplayan renkli sırlarda da renklendirme amacıyla ikincil bir hammadde olarak tercih edilebilir (genellikle kırmızı sırlarda) [8].

B. Dünyada ve Türkiye’de Teknolojik Hazırlık Seviyeleri

Dünya genelinde THS seviyeleri, atık türüne göre farklı seviyelere sahiptir. Kullanılmış döküm kumu, diğer kullanılmış kumlarına göre daha gelişmiş olduğundan dünya genelinde seviyesi 7-8 arasındadır. Bu durum Türkiye’de 4-5 seviyelerinde olmaktadır. Cüruf ise dünya genelinde THS seviyesi 3-4 değerlerinde yer alırken ülkemizde bu değer 2-3 seviyelerindedir. Filtre tozları diğer atık türlerine göre daha az bilinmekte ve çalışılmaktadır. Bu sebeple, dünya ve ülkemizde THS seviyesi 2-3 değerlerinde görülmektedir.

C. Dünyada ve Türkiye’deki Mevcut Duruma İlişkin Başarılı Örnekler

Kullanılmış döküm kumunun değerlendirilmesi noktasında dünyada önemli örnekler bulunmaktadır. Amerika’da 30 farklı metal döküm tesisinden gelen kumu işleyen ve bir kooperatif olan Coopersville - Michigan’daki Resource Recovery Corporation Başkanı Mike Lenahan’a göre "Bu bir maliyetten kaçınma olayıdır". "Metal döküm kumunun, faydalı bir şekilde yeniden kullanımını sağlamanın anahtarı, mevcut çeşitli uygulamaları ve bunları yöneten eyalet düzenlemelerini anlamaktır. Analizler sonucunda, istenen tedarik döngülerinde metal dökümhanesinin konumunu ve kum miktarının uygun bir seçenek olup olmadığını belirlemektir. Metal döküm kumunun, Portland çimentosunda kullanımı büyük bir imkân yaratmaktadır. Çimento fırınları, döküm kumunun geri kazanımında tercih edilecek tek endüstri değildir. Çimento fırınlarının yanı sıra arazi doldurma örtüsünde kendisine geniş bir alanda uzun yıllardır başarılı bir şekilde yer bulmuştur."

Fakat bu durum ülkemizde beklenen seviyede gelişmemiş durumdadır. Kullanılmış döküm kumlarının bir miktarının geri dönüşümü sağlansa da birçoğu bertaraf edilmektedir. Ülkemizde bu durum, akademi tarafında öğrenciler ile yapılan tez çalışmalarıyla sınırlı durumdadır. Bu çalışmalar sanayi tarafında da kendisine birkaç istisna örnek dışında yer bulamamıştır.

Cüruf atığındaki durum ise dünya genelinde bertaraf şeklidir. Fakat birçok sektörde kullanım çalışmaları yapılmaktadır. Cüruf kendine özellikle çimento sektöründe yer bulmaktadır. Dünya ve ülkemizde de az oranlarda olan bazı çimento firmaları cüruf kullanmaktadır. Ayrıca akademik çalışmaların %90’ı çimento üretiminde dolgu malzemesi olarak kullanılması üzerinedir.

Filtre tozları ile ilgili dünya ve ülkemizdeki çalışmalar ise diğer atık türlerine göre daha yavaş ilerlemektedir. Ülkemizde filtre tozlarına yüksek lisans öğrencilerinin tez konularında yer verilmektedir. Bu tez konularının ilişkili olduğu sektör ise çimento sektörüdür.

D. Ar-Ge ve Yenilik Sürecinde Bir Araya Gelmesi Gereken Disiplinler ve Sektörler

Hedeflenen atıkların kullanılabilmesi için birçok sektörün bir araya gelmesi gereklidir. Kullanılmış döküm kumlarının kuvars (SiO_2) bazlı olması ve cürufların seramik hammaddesinde bulunan oksitlerden oluşması nedeni ile özellikle seramik sektörü ile bir araya gelmesi uygun olacaktır. Seramik sektöründe her iki atığın da kullanılabilme imkânı bulunmaktadır. Çünkü seramikler; inorganik malzemelerden meydana gelen bileşimlerin, farklı yöntemler ile şekil verildikten sonra kullanım amaçlarına göre sırlanarak veya sırlanmayarak yüksek sıcaklıklarda sertlik ve dayanıklılık kazanana kadar pişirilmesi olarak tanımlanır. Geleneksel seramiklerin bu atıkların kullanımı için en uygun alan olduğu düşünülmektedir. Fakat bahsi geçen bu atıkların içerdiği demir oksit seramik sektöründe istenmeyen empüritelerin en başında gelmektedir. Bu yüzden kullanılacak alanların en başında tuğla-kiremit ürünler, drenaj boruları, güveçler, antika eşyalar, şömineleri kaplayan plakalar, duvar ve yer karoları, süs eşyaları vb. gibi ürünler gelmekte olup beyaz ürünlü malzemelerde de renk vermeyecek şekilde küçük oranlarda kullanılabilir. Bundan dolayı seramik malzemelerinde alanında uzman akademisyenlerin ve uzman mühendislerin üniversitelerin metalürji ve malzeme mühendisliği, malzeme bilim mühendisliği, seramik mühendisliği gibi bölümleriyle bir araya gelmesi gerekmektedir. Döküm sektöründe faaliyet gösteren firmalar ile seramik sektöründe faaliyet gösteren firmaların bir araya gelip çalışmalar yapması gerekmektedir. Döküm sektöründeki firmalardan gerekli olan atıklar tedarik edildikten sonra seramik sektöründeki firmaların bu atıkları ürünlerinde belli oranlarda ve laboratuvar ölçeğinde denemeleri gerekmektedir. Kullanılmış döküm kumları, cüruflar ve filtre tozları stabil hale getirildikten sonra büyük ölçekli denemeler yapılması ile bu ürünlerin geri dönüşümü sağlanabilir.

Demir esaslı filtre tozları, özgül ağırlıklarından dolayı inşaat sektöründe zemin dolgu malzemesi olarak kullanılabilir. Bisiklet yolları bunlar için en uygun yerlerdir. Ayrıca bu tür malzemeler asansör sistemlerinde ağırlık kazandırmak amacı ile kullanılabilir.

E. Ar-Ge, Yenilik, Demonstrasyon İş Birliği Modeli ve Destek Mekanizması

Bahsi geçen atıkların geri dönüştürülmesinde Ar-Ge çalışmaları safhasından endüstriyel ölçekli üretime kadar bütün safhalarda döküm, çimento ve seramik sektörleri koordinasyon içerisinde çalışmalıdır. Ar-Ge ve yenilik projelerinde yeni bir alan yaratılacağından atıkların ögütülmesi ve özellikle cürufların istenilen tane boyutlarına getirilmesi noktasında yeni tür

mekanik öğütücülerin ortaya konulması için sağlanacak desteklerin THS'lere uygun şekilde olması gerekmektedir. Ülkemizde TÜBİTAK tarafından sağlanacak bu konuya özel çağrılarla farklı sanayi kuruluşlarının bir araya gelmesi sağlanmalı, projelerin gerçekleştirilmesi için uygun destek mekanizmaları tasarlanmalıdır. Ayrıca bu tür konuların ülkemizde yeni olması nedeni ile üniversite-sanayi iş birlikleri kurularak akademik çalışmalar yürütülebilir. Akademik çalışmaların ulusal ve uluslararası dergilerde yayınlanması sağlanarak, sektörler bir araya getirilmelidir.

F. Zaman ve Bütçe Tahminleri

(Kısa Vade: 1-3 yıl, Orta Vade: 3-5 yıl, Uzun Vade: 5 yıldan fazla)

Bu atıkların geri dönüşümünün laboratuvar ölçeğinde araştırılması ve denenmesi için yaklaşık olarak 250-500 bin TL arasında başlangıç bütçesi yeterlidir. Yeni öğütme sistemleri hariç başka bir teknolojiye ihtiyaç duyulmadığından kısa vadede gerçekleştirilecek çalışmalardır.

G. Teknolojik İlerlemenin Sağlanmasında Kritik Hususlar

Genellikle 1 ton döküm için 4 ila 5 ton kum kullanılması gerekmektedir. 1 ton döküm malzemesi üretimi sonucunda yaklaşık 0,6 ila 0,8 ton atık oluşmaktadır. Bunun 0,4 ila 0,6 tonu atık döküm kumu olmaktadır. Ülkemizde 2018 yılı verilerine göre toplam döküm üretim miktarının 2,3 milyon ton olduğu ve kum kalıba döküm tekniği ile üretim miktarı göz önüne alındığında, geri kazanım potansiyeli olan yaklaşık 800 bin ton kullanılmış döküm kumunun açığa çıktığı hesaplanmaktadır [9].

Kamunun bahsi geçen projeler için gerekli stok alanını oluşturması ve projelerin devlet destekli çağrılarla desteklenmesi gerekmektedir. Tüm bunların yanında devlet, bu atıkların kullanımı için firmalara vergi indirim istisnası vb. gibi teşvikler tanıyarak teşvik etmelidir.

Mevzuat ve Yasal Düzenlemeler

Mevzuat ve yasal düzenlemeler ile ilgili değişikliklere ve düzenlemelere hayati derecede ihtiyaç bulunmaktadır. Teşvik mekanizmaları ve yasal zorunluluklar aracılığıyla firmaların bu tür çalışmalara yönlendirilmesi önem arz etmektedir. **Çevre mevzuatlarında bu atıkların değerlendirilmesi ve düzenlenmesine yer verilmesi gerekmektedir.**

Teknik Altyapılar

Bu tür çalışmalar Ar-Ge projeleri ile yürütüleceğinden yeterli alt yapılara, test ve cihazlar ile ve bunları destekleyecek ileri seviyede ölçüm cihazlarına ihtiyaç bulunmaktadır. Bu sayede denemeler esnasında oluşabilecek riskleri minimize edebilecek bilgiye ulaşılabilmesi sağlanacaktır. Bu çalışmalar ve destekler sayesinde THS yükseltilmesi son derece önemlidir.

İnsan Kaynakları

Üniversite ve Sanayi kuruluşlarında bahsi geçen denemelerin yürütülmesinde yeterli insan kaynakları bulunmaktadır. Ülkemiz bu tür çalışmaları yapabilecek uzman mühendislere sahiptir.

Destek ve Teşvikler

Bu tür projeler yeni olduğundan devlet tarafından çağrılı projeler açılıp, sektörlerin bir araya getirilmesi teşvik edilmelidir. Bu çağrılarının genellikle TÜBİTAK çağrıları olması önem arz etmektedir. Bu çağrılarla üniversite-sanayi iş birliklerinin sağlanması için teşvik mekanizmalarının ortaya konulması son derece önem arz etmektedir. Bu çalışmalar sonucunda, patent/faydalı model desteklerinin artırılması gereklidir. Bu tür atıkların geri kazanımı için firmalara örnek olarak yıllık bazda vergi indirimleri sağlanması suretiyle destekler verilebilir. Ayrıca, bu tür atıklarla üretilen ürünlerin piyasaya sürülmesinde yeni teşvik mekanizmaları oluşturulmalı ve mevcutların artırılması desteklenmelidir. Devlet ihalelerinde bu malzemelerin yol dolgu malzemesi olarak kullanımı gibi hususlarla teknik şartnamelerde belirli oranlarda kullanım zorunluluğu ve/veya teşviki uygulanabilir. Kullanılmış döküm kumlarına finansal bir değer kazandıracak düzenleme ve teşviklerin hayata geçirilmesi ile kullanılan döküm kumlarının alternatif bir hammadde konumu kati surette tescillenmelidir.

Referanslar

- [1] M. Yemen, Metal Kaplama Atık Sularının Arıtımında Döküm Atıklarının Fenton Yöntemine Uygulanabilirliğinin Araştırılması, Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 2019
- [2] Ö. Yılmaz, Ü. Yetiş, T. Karanfil, Sektörel Atık Kılavuzları, Demir Döküm Sanayi, T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, Çevre Yönetimi Genel Müdürlüğü,
- [3] F. Baran, Dökümhanelerde Kullanılan Kalıp ve Maça Kumları Kaynaklı Döküm Hataları ve Önlenmesi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 2022
- [4] M. Kain, S.M. Mahajani, G.N. Jadhav, Mechanical and Thermal Methods for Reclamation of Waste Foundry Sand, Journal of Environmental Management, Volume 279, 111628, 2021
- [5] A. B. Keyvanklı, Kemik Porselen Üretiminde Kemik Külüne Alternatif Malzeme Kullanım İmkanlarının Araştırılması, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 2020
- [6] American Foundrymen Society-AFS, Modern Casting, Saving on Sand Disposal , 2017
- [7] B. Kavasoglu, Çelik Cürufalarının Alternatif Kullanım Alanlarının Değerlendirilmesi, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 2022
- [8] D. Karaman, Dökme Demir İmalatında Açığa Çıkan Fan Tozunun Çimento Harcının Mekanik ve Fiziksel Özelliklerinin Etkisi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 2019
- [9] TÜDÖKSAD Türkiye Döküm Sanayicileri Derneği, *Kullanılmış Döküm Kumunun Değerlendirilmesi ve Geri Kazanımı*, 07.02.2019, https://www.tudoksad.org.tr/upload/files/TUDOKSAD_Dokum_Kumu_Geri_Kazanimi_Raporu_F%20%282%29%20%283%29.pdf

Teknolojik Hedef 6:

**DEMİR-ÇELİK VE PARÇA DÖKÜM SEKTÖRLERİNDE
OPTİMİZASYON, ENERJİ GİRDİSİ, VERİMLİLİK VE ATIK
YÖNETİMİ**

Demir-Çelik ve Parça Döküm sektörlerinde **optimizasyon, enerji girdisi,
verimlilik ve atık yönetimi** yöntemlerin geliştirilmesi

Kritik Ürün/Teknoloji 6.1.

6.1. Demir-çelik ve parça döküm sektörlerinde optimizasyon, enerji girdisi, verimlilik ve atık yönetimine yönelik uygulamaların geliştirilmesi ve yaygınlaştırılması

Öncelikli Ar-Ge ve Yenilik Konuları

6.1.a. Demir-Çelik ve Parça Döküm sektöründe üretim proseslerinin dijital ve elektronik teknolojilerle optimizasyonuna yönelik uygulamaların geliştirilmesi ve yaygınlaştırılması

6.1.b. Demir-Çelik tesislerinin enerji girdisinin ekonomik döngüsellğe uygun ve yenilenebilir kaynaklardan olmasına yönelik çalışmaların gerçekleştirilmesi

6.1.c. Tüm proseslerde enerji, su ve malzeme verimliliğinin artırılmasına yönelik en iyileme çalışmalarının gerçekleştirilmesi

6.1.d. Demir-çelik tesislerinde yan ürün ve atık yönetimine ilişkin yöntemlerin ve uygulamaların geliştirilmesi

6.1.e. Atık gazların ve ısının geri kazanımına yönelik teknolojilerin ve uygulamaların geliştirilmesi ve yaygınlaştırılması

Kritik Ürün/Teknoloji 6.1.

6.1. Demir-çelik ve parça döküm sektörlerinde optimizasyon, enerji girdisi, verimlilik ve atık yönetimine yönelik uygulamaların geliştirilmesi ve yaygınlaştırılması

A. Teknik Açıklamalar, Yenilikçi Özellikler, Hedeflenen Performans ve Metrikler

ÖNCELİKLİ AR-GE VE YENİLİK KONULARI

6.1.a. Demir-Çelik ve Parça Döküm sektöründe üretim proseslerinin dijital ve elektronik teknolojilerle optimizasyonuna yönelik uygulamaların geliştirilmesi ve yaygınlaştırılması

Demir-Çelik ve Parça Döküm sektöründe üretim proseslerinin dijital ve elektronik teknolojilerle optimizasyonuna yönelik uygulamaların geliştirilmesi ve yaygınlaştırılması konusunda yapılması gerekli görülen çalışmalar aşağıda belirtilmiştir:

- Tüm proseslerde ürün, enerji ve su kayıplarını gerçek zamanlı takip edebilecek ve gerekli önlemleri gerçek zamanlı alabilecek yapay zeka tabanlı, akıllı otomasyon sistemlerinin ve kontrol yazılımlarının geliştirilmesi ve uygulanması
- Tüm proseslerde verimlilik artışı sağlayacak şekilde proses parametrelerinin kayıt edilmesi ve öğrenen sistemler (Makine öğrenme, bulanık mantık gibi) ile optimize edilmesine yönelik en iyileme çalışmalarının gerçekleştirilmesi
- Tüm proses süreçlerine yönelik olarak dijital ikizleme tasarımları ve uygulamalarının geliştirilmesi
- Döküm prosesi hazırlama aşamasında (Kum ve kalıp hazırlama gibi) yönelik Magma, Novacast benzeri simülasyon programları geliştirilmesi ve yaygınlaştırılması

Proses Optimizasyonu:

Demir-Çelik sektöründe herhangi bir imalat sürecinin optimizasyonu, kısıtlar altında yarar sağlayacak amaçları Eniyileme (Maximizasyon) veya zarar veren etkenlerin Enküçükleme (Minimizasyonu) olarak ifade edilir. Belirli sıcaklık dereceleri, kullanılan hammadde veya malzeme türleri, işçilik durumları, bu hedefin hangi ortamda gerçekleştirileceğini belirten

kısıtlardır; örneğin enerji verimliliğini eniyilemek veya maliyetleri enküçükmek gibi. Öte yandan, karbon ayakizi ve AB Yeşil Mutabakat konuları ele alındığında emisyonları enküçükmeye çalışırken maliyetleri de enküçükmeye çalışıyoruz. Ancak, çok amaçlı bir yaklaşımla prosesin üretkenliğini (Çıktı/Girdi) eniyilerken, aynı ortamlarda enerji tüketimini enküçükmeye çalışıyorsak o zaman hedefler çeliştiği için “Optimizasyon” sözcüğünü kullanıyoruz. Birçok demir-çelik sektörü optimizasyon çalışmasında görülmüştür ki, çok amaçlı çalışmaların büyük bir kısmında amaçların bazıları kısıt olarak ele alınabilmektedir.

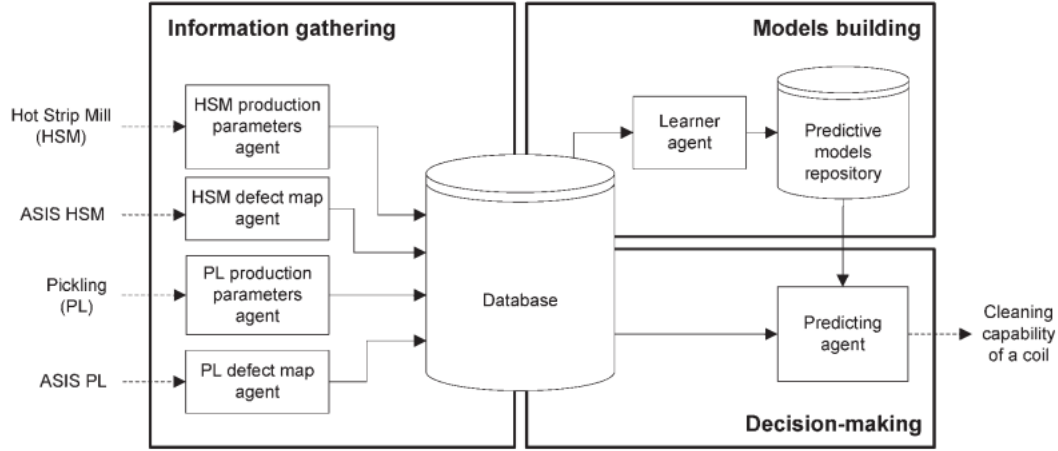
Entegre Çelik Üretim tesisinde bir yandan Ekserji Analizleri, diğer yandan da Enerji Tüketim Analizlerinin yapılması zorunludur. Her prosese göre parametrik girdilerle ve durumun senaryolarını yansıtan benzetişim (simülasyon) uygulamaları ile yapılacak çalışmalarda amaç, enerji kullanımının enküçüklenmesi (Minimizasyon) olacaktır [1]. Demir ve çelik üretiminde, diğer imalat sektörlerine göre çok daha genişletilmiş üretim prosesleri ve çok yoğun enerji kullanımını sürdürülebilir süreçlere dönüştürmek üzere optimizasyon uygulayabilmek için tüm süreçlerin algılayıcılarla (sensörlerle) veya IoT (Nesnelerin İnterneti) kullanımı ile izlenmesi ve kontrol altına alınması gerekmektedir [2;3].

Dijital Dönüşüm:

Alman ekonomisinde demir-çelik sektörünün güncel teknoloji seviyesinin tekno-ekonomik analizini yapan Fishedick ve ark. (2014), büyük yenilikler yapılmazsa bu sektörün karbon emisyonu azaltma hedeflerinin % 80 inde başarısız olacağını gösteriyormektedir[4]. Burada yenilenebilir enerjinin önemi de ısrarla vurgulandığı için, karbon yakalama ve depolama teknolojileri, baca üstü atık geri dönüşümü, “Elektrokazanç” adı verilen demir cevherinin elektrolizi 2030 yılına kadar en önemli teknolojiler olarak vurgulanmıştır. Ancak, Bhaskar ve diğerleri tarafından 2022’de Norveç’te gerçekleştirilen bir tekno-ekonomik analiz, yeşil hidrojen ile hedeflerin çoğuna erişilebildiğini göstermektedir [5] ve bunu Thomassen ve ark. [6] “Düşük Teknoloji Seviyelerinde Yeşil Ürün yaratma” çalışmalarına dayandırmaktadırlar. İki çalışmanın arasındaki fark dijital yatırım seviyesi olarak gösterilmektedir. Dijital uygulamalar her ne kadar entegre tesis veya hurdadan üretim de farklılaşsa da benzer süreçler izlenmektedir.

Demir-Çelik sektöründe üretim süreçlerinde dijitalleşme uygulamalarının ilk aşaması veri derleme olacaktır. Enerji kullanım yüklerinin saatlik olarak yakından takip edilmesi sensörler ile süreçleri takibini ve verilerin bir araya getirilmesi için nesnelerin interneti (IoT) altyapısını gerektirmektedir [3]. Ancak bu altyapılar ve veri tabanı kullanımı sayesinde derlenen veriler daha sonra tahmin, optimizasyon ve kontrol modelleri kullanılarak işletmenin enerji kullanımını azaltmaya yönelik çalışmalar yapılabilir. Her iş süreci için bir ajan tayin edilerek, hem veri toplama hem de daha sonrasında gerekli karbon ve enerji analizleri yapılacağı gibi süreçlerin de daha iyi çalıştırılması mümkün olacaktır [7]. Makine öğrenmesi teknikleri ile en dakik

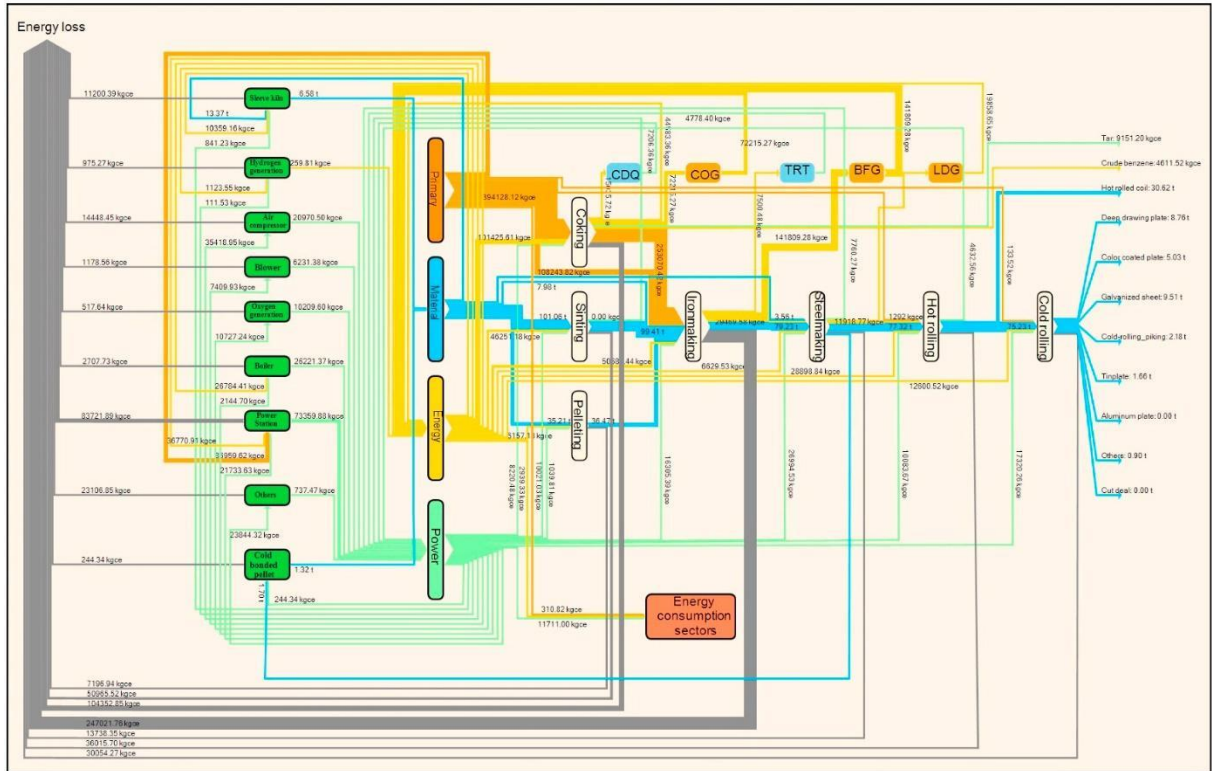
tahminlerin yapılacağı bir enerji kullanım platformu karar destek sistemi olarak kullanılabilir (Şekil1) [8]



2 Proposed multi-agent system

Şekil 1. Demir Çelik Üretiminde Çok Ajanlı Enerji Kullanım Sistemi Örneği

Demir ve çelik endüstrisinde enerji kullanımını ve karbon emisyonlarını eşzamanlı olarak azaltmak ve aynı zamanda üretim süreçlerini daha esnek hale getirmek için “enerji akışı” ile “karbon hesapları” “nexus”u; yani bir arada götürülmesi gerekmektedir [10]. Bunun için tüm tesislerde enerji ve karbon haritalarının süreçlere göre paralele çıkartılması ve bunlara göre enerji ve ekserji indekslerinin hesaplanması yazılım platformunun asıl amacı olmalıdır.



Şekil 2. Enerji kullanımı-Malzeme-Karbon Nexus Haritası Örneği [10]

Enerji ve malzeme kullanımının dinamik tesbiti, daha az harcanması ve en az kullanımı ile çizelgelenmesi için gerçek zamanlı verilerle çalışılması gerekmektedir[11]. Bu haritalardaki gerçek zamanlı verileri inceleme ve değerlendirme için bugün, yapay zekaya dayalı olarak kullanılan iki teknoloji son derece önemlidir:

a) Veri Derleme Altyapısı (Nesnelerin İnterneti ve Büyük Veri)

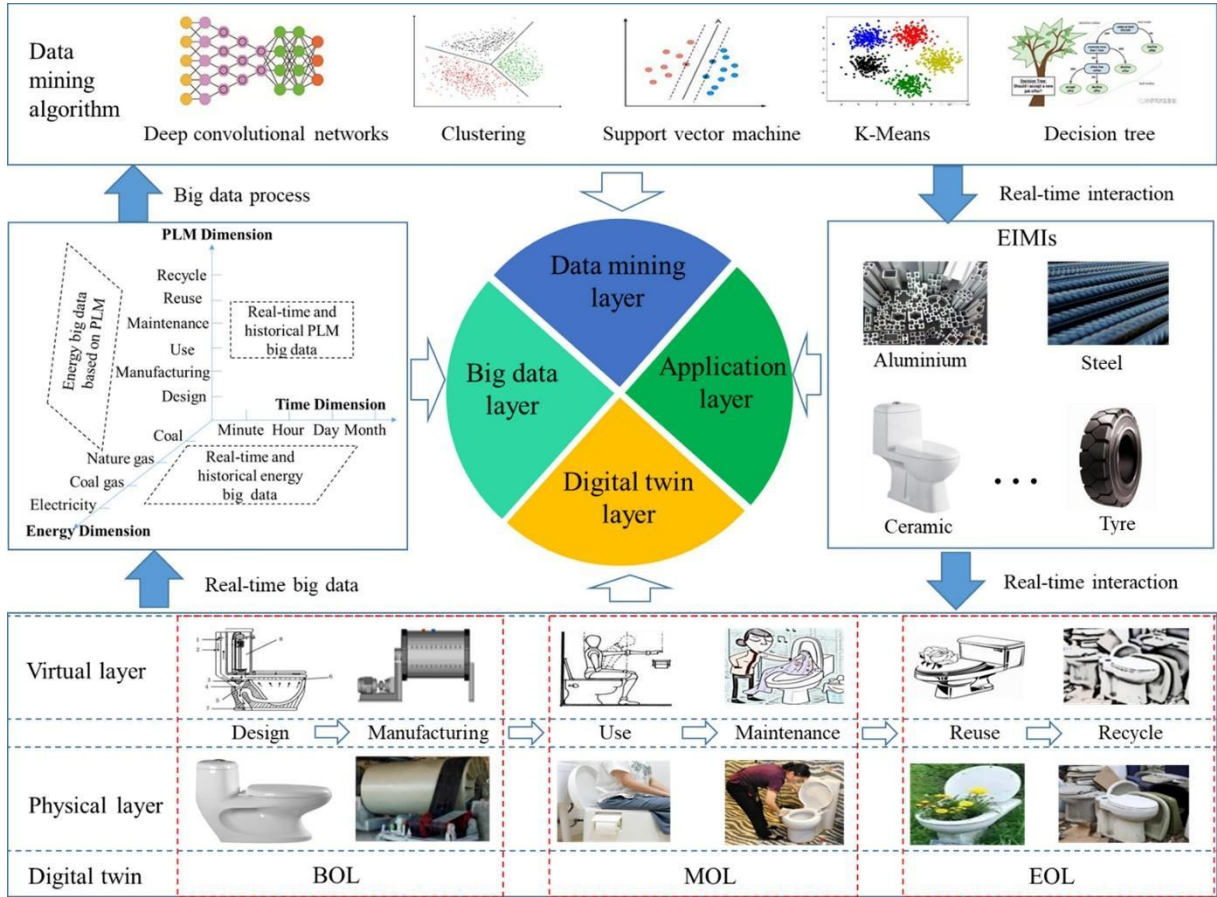
Üretim planma konusunda kurumsal kaynak planlaması bulunmasına benzer şekilde, enerji ve karbon izleme konusunda da nesnelerin interneti ve sensörler kullanılarak veri derleme ortamları hazırlanmaktadır. Türkiye’de güzel örneklerden biri Reengen Enerji Teknolojileri A.Ş. tarafından gerçekleştirilen çözümlerdir. Benzer şekilde ICRON Teknoloji A.Ş.’nin sunduğu gibi optimizasyon ve çizelgeleme yazılımları oturtularak platform tanımlanmaktadır. Bu teknolojilerin teknolojik hazırlık seviyesi en az 4 olmak zorunda olması gerektiği düşünülmektedir. Güzel bir uluslararası örnek de İtalyan firması Holonix platformudur. (<https://www.holonix.it/en/products-service/iot-experience/>).

b) Çok Ajanlı Enerji Kullanımı ve Karbon İzleme

Üretim süreçleri arklı enerji kullanımı (az, orta, yüksek gibi) veya farklı karbon emisyonlarına neden olduğu göz önüne alınırsa; her bir tanım için bir ajan tanımlayıp, üretim süreçlerinin entegre enerji kullanımı veya karbon emisyonlarını saptamak mümkündür. Yapay zeka ve makine öğrenmesi yöntemleri ile her enerji kullanımını veya karbon emisyonunu geçmiş verilerden öğrendikten sonra gerçek zamanlı izleyen bu ajanlar sayesinde yapılan simülasyonlar; hem değişen meteorolojik şartları (rüzgar etkisi vb) , ekonomik şartları (saatlik elejtrik fiyatlarını), malzeme kalitesi (hurda içindeki demir oranı vb.) gibi faktörleri dikkate almakta, hem de süreçlerde yapılacak sıcaklık, süre gibi değişiklikleri dikkate almaktadır. Bu nedenle, gerek sürekli demir çelik üretiminde, gerekse yüksek fırınların ya da parça haddelerinin izlenmesinde Çok Ajanlı Sistemler önem kazanmaya başlamıştır[12].

Dijital İkizleme:

Çoğunlukla gerçek zamanlı verilerle simülasyon yapma olarak özetlense de, uygulamaların ardısıra tekrarlanması sayesinde basit bir simülasyondan çok karmaşık bir simülasyona doğru giden veri değerlendirme şeklidir [13]. Özellikle enerji yoğun imalat sektöründe yakın zamanda çok kullanılmaya başlayan bu yöntem; hem büyük verileri daha iyi değerlendirmeyi hem de üretimim uçtan uca maliyetlerini ekonomik, enerjetik ve karbon ayakizi olarak hesaplamayı sağlamaktadır [14].



Şekil 3. Örnek dijital İkizleme yaklaşımı [14]

6.1.b. Demir-Çelik tesislerinin enerji girdisinin ekonomik döngüsellığe uygun ve yenilenebilir kaynaklardan olmasına yönelik çalışmaların gerçekleştirilmesi

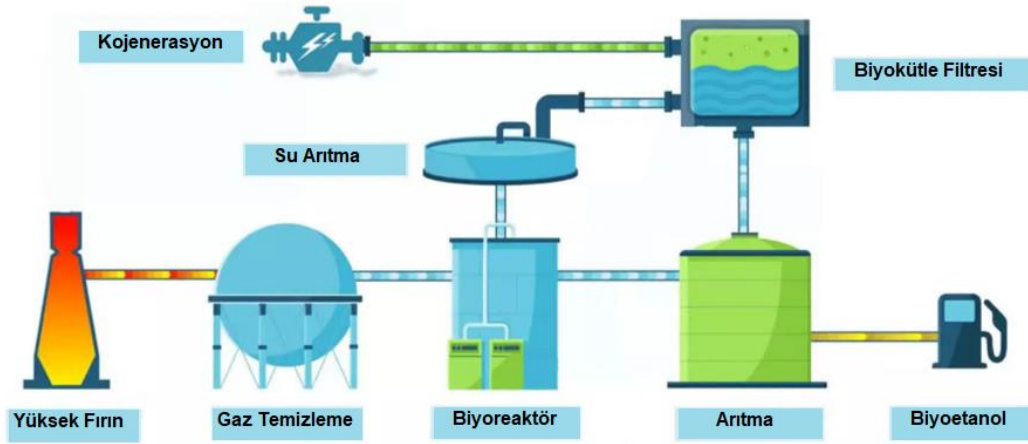
Demir-Çelik tesislerinin enerji girdisinin ekonomik döngüsellığe uygun ve yenilenebilir kaynaklardan olmasına yönelik çalışmaların gerçekleştirilmesi konusunda yapılması gereken çalışmalar aşağıda belirtilmiştir:

- Elektrik tüketiminde yenilenebilir enerji kullanımına ilişkin uygulamaların geliştirilmesi
- Yakıt tüketiminde doğal gaz yerine alternatif yakıt (Hidrojen, biyoyakıt gibi) kullanımına ilişkin uygulamalar

Proses Gazlarından Biyo-Yakıt Eldesi

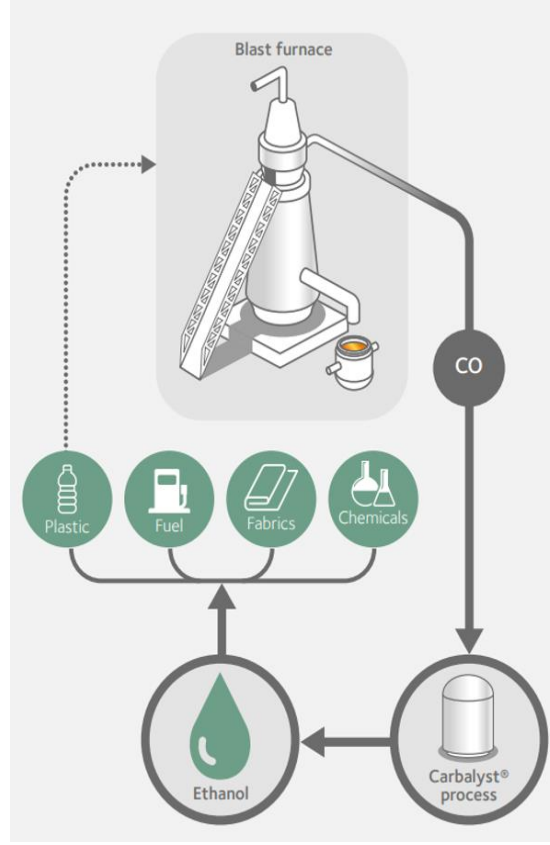
ArcelorMittal firmasının, Lanzatech ve Primetals firmaları ile işbirliği çerçevesinde Belçika'nın Gent şehrinde yer alan demir çelik fabrikasında, proses gazının (YF gazı) termal enerji ya da elektrik enerjisi için gönderilmesi yerine; önce soğutulup ön-işleme alındığı ve daha sonra içerisinde mikroorganizmaların ve sıvı ortamın bulunduğu fermentasyon reaktöründen (biyoreaktörden) geçirilerek CO, CO₂, ve H₂'yi etanol ve diğer kimyasallara, destilasyon kolonlarını da kullanarak dönüştürdüğü pilot biyo-yakıt üretim tesisinin kurulumu ile katma değerli kimyasal yakıt ürünleri üretilmektedir.

Biyo-Reaktörde kullanılan mikroorganizmaların çeşidine göre elde edilen yakıt ürünü değişebilmektedir: Etanol, Metanol, Oksimetilen vb.



Şekil. ArcelorMittal Steelanol Genel Prosesi [23]

Gaz fermantasyon teknolojisi geleneksel katalitik kimyasal sürecin aksine, CO ve hidrojeni ürünlere dönüştürmek için mikroorganizmalarla bir bio-fermantasyon prosesi kullanmaktadır. Gaz fermantasyonunda gaz basınçlandırılarak mikroorganizmalar ile birlikte su tanklarına enjekte edilmektedir [23].



Şekil. ArcelorMittal Steelanol Prosesi (Carbalyst) [23]

Mikroorganizmalar, sürekli olarak damıtılan etanol (C_2H_5OH) üretmek için doğrudan CO ve H_2 tüketirler.

Başlıca avantajı, gaz fermantasyonunun DRI ve Yüksek Fırın gazı ile uyumluluğu ve esnekliğidir:

- Mikroorganizmalar CO ve H_2 tarafından yönlendirilir. H_2 eksikliği durumunda, mikrop sudan hidrojen alarak su kaydırma reaksiyonunu kendisi gerçekleştirecektir.
- Mikroorganizmalar, tipik DRI ve Yüksek Fırın atmosferine uyarlanmıştır. Çok az veya hiçbir temizlik gerekli değildir.
- Gazların saf olmasına gerek yoktur. CO_2 ve azotun varlığı, fermantasyon sürecini bu şekilde etkilemeyecektir ve gaz akışından çıkarılmasına gerek yoktur.
- Biyo-tabanlı sistemin enerji tasarrufu çok yüksektir: Enerjinin yaklaşık %70'i etanole, diğer %30'u ise biyokütleyle dönüştürülür. Bu biyokütle, biyogaza fermente edilebilir veya hayvan yemi olarak da kullanılabilir.
- Mikroorganizmalar değiştirilerek farklı kimyasallar yapılabilir ve diğer pazarlara ulaşılabilir.



Şekil. ArcelorMittal Biyoetanol Tesis (Belçika-Gent) [23]

6.1.c. Tüm proseslerde enerji, su ve malzeme verimliliğinin artırılmasına yönelik en iyileme çalışmalarının gerçekleştirilmesi

Tüm proseslerde enerji, su ve malzeme verimliliğinin artırılmasına yönelik en iyileme çalışmalarının gerçekleştirilmesi konusunda yapılması gereken çalışmalar aşağıda belirtilmiştir:

- Refrakter ve ısı yalıtım malzemelerin geliştirilmesi
- Tüm proseslerde su tüketiminin azaltılması amacıyla etkili/kontrollü soğumanın sağlanmasına yönelik soğutma sistemlerinin geliştirilmesi
- Hurda besleme sistemlerinde daha verimli ve daha yalın olmasını sağlayacak tasarımların geliştirilmesi ve yaygınlaştırılması
- Üretim proseslerinde ısı, enerji ve sarf malzemeleri minimize edilmesine yönelik çalışmaların gerçekleştirilmesi

6.1.d. Demir-çelik tesislerinde yan ürün ve atık yönetimine ilişkin yöntemlerin ve uygulamaların geliştirilmesi

Demir-çelik tesislerinde yan ürün ve atık yönetimine ilişkin yöntemlerin ve uygulamaların geliştirilmesi konusunda yapılması gereken çalışmalar aşağıda belirtilmiştir:

- Sinter ve Pelet tesislerinin atıklarının yönetimine ilişkin yöntemlerin geliştirilmesi, pilot uygulamaların gerçekleştirilmesi
- Üretim prosesleri sonrası oluşan cürufun değerlendirilmesine yönelik çalışmaların gerçekleştirilmesi
- Haddeme, ısı işlem ve yüzey işlem fırınları prosesleri sonrası ortaya çıkan demir oksit içeren yan ürünlerin (tufal vb.) yönetimine ilişkin yöntemlerin geliştirilmesi
- Hadde yağlarının daha az kullanımına yönelik ve atıklarının değerlendirilmesine yönelik çalışmaların geliştirilmesi
- Kok atık gazı içerisindeki hidrojen oranının yükseltilerek doğrudan indirgeme prosesinde kullanımına yönelik çalışmalar
- Ömrünü tamamlamış sarf malzemelerin (Refrakter, elektrot, hadde yağı vb.) atıklarının değerlendirilmesine yönelik çalışmalar

Üretim prosesleri sonrası oluşan cürufun değerlendirilmesine yönelik çalışmaların gerçekleştirilmesi

Çelikhane cürufu miktarı ton ham çelik başına 150-200 kg arasındadır. Çelik üretim cürufları ile karbon yakalama konusunda Japon JFE firması, pratik uygulama için Japonya'da 2023'de pilot tesisin kurulmasını ve tesisin de 2024-2025 yıllarında gerçekleşmesini hedeflemektedir. Firma, pilot/endüstriyel ölçek için aşağıdaki proses şematüğini öngörmüştür.



Şekil. Çelik Üretim Cürufundan Isı Geri Kazanımı Proses Şematüğü

Proses şematüğü öngörüsüne göre, ergiyik çelik üretim cürufu önce katılaştırmaya tabi tutulacak ve daha sonra sıcak kırma/parçalama işleminden geçecektir. Bu işlemden sonra da reaktöre

geçerek karbonasyon prosesi ile yüksek hacimli CO₂ yakalama ve ısı geri kazanımı süreçleri gerçekleştirilecektir [25].

6.1.e. Atık gazların ve ısının geri kazanımına yönelik teknolojilerin ve uygulamaların geliştirilmesi ve yaygınlaştırılması

Atık gazların ve ısının geri kazanımına yönelik teknolojilerin ve uygulamaların geliştirilmesi konusunda yapılması gereken çalışmalar aşağıda belirtilmiştir:

- “Kok Gazı Amonyaklı Gaz Soğutma Isı Geri Kazanımı” ile proses buharı üretim ikamesi sağlanmasına yönelik çalışmalar
- Atık ısıdan enerji geri kazanımı ile elektrik üretimi, karbondioksit emisyonunun azalması, yüksek fırınlara daha iyi kömür sağlama ve verimlilik artışına yönelik “Kok Kuru Söndürme” prosesinin tasarlanması ve pilot uygulamaların gösterimi
- Sinter Gaz Temizleyici (Wet Scrubber) ısı geri dönüşüm proseslerinin geliştirilmesi ve entegrasyonlarına ilişkin çalışmalar
- Sürekli döküm prosesi sırasında buhar geri kazanımına veya enerji üretimine yönelik prosesler ve uygulamalar

Atık ısıdan enerji geri kazanımı ile elektrik üretimi, karbondioksit emisyonunun azalması, yüksek fırınlara daha iyi kömür sağlama ve verimlilik artışına yönelik “Kok Kuru Söndürme” prosesinin tasarlanması ve pilot uygulamaların gösterimi

Atık Isıdan Enerji Geri Kazanımı İle Elektrik Üretimi

Yüksek Fırın Cürufunun Atık Isısının Değerlendirilmesi

Yüksek fırınlarda cevherden demir üretimin bir parçası olarak, üretilen her 1 ton sıvı ham demire karşılık olarak 200-600 kg arasında cüruf açığa çıkmaktadır. Cürufun yüksek fırından çıkış sıcaklığı 1400°C'nin üstündedir. İçeriğinde çoğunlukla SiO₂, CaO, Al₂O₃ ve MgO bulunmaktadır. İstenen özellikte, amorf (camsı) bir cüruf oluşturmak için 10°C/s üzerindeki soğutma hızları gerekmektedir. 1 ton yüksek fırın cürufu 1.400°C'de 1.6 GJ enerjiye sahip sahiptir. Yüksek fırın cürufu, büyük miktarlarda su kullanılarak granülasyon tesislerinde hızlı bir şekilde söndürülerek granüle edilir. Islak granülasyon işlemi sırasında teorik olarak 1 ton cürufun granülasyonu için kullanılan suyun %15 civarı buharlaşmaktadır.

Çelikhane cürufundan ısı elde edilmesi süreci temel olarak iki farklı süreçten oluşmaktadır. Bu işlemin ilk kısmı, su soğutmalı merdanelerin yüzeyinde bir cüruf potası tarafından sağlanan erimiş cürufu katılaştırarak levha benzeri cüruflar üretmek için rulo tipi bir sürekli cüruf katılaştırma işlemidir. Bu cüruf plakaları, taşıyıcılar tarafından sürekli olarak aktarılır, çarpıştırılır ve cüruf plakalarından ısı kayıplarını en aza indirmek için bu işlemin daha sonraki bir parçası olan doğrudan cüruf ısı geri kazanım odasına yerleştirilir. Cüruf plakaları hazneye doldurulduktan sonra, ısı geri kazanımı için hava hazne tabanından iki adet üfleyici ile üflenir.

Çelik üretimi sırasında bir yan ürün olarak açığa çıkan çelikhane cürufu, eriyik haldeyken büyük miktarda ısı enerjisine sahiptir. COURSE50 projesinin bir parçası olarak, çelikhane cürufunun sahip olduğu bu büyük miktardaki termal enerjiyi kullanmak amacı ile yeni bir süreç geliştirmişlerdir. Bu işlemde, 1400°C'nin üzerinde bir sıcaklığa sahip olan eriyik haldeki cüruf, su soğutmalı merdanelerin yüzeyinde sürekli olarak geçirilerek katılaştırılır. Bu cüruf plakaları, doğrudan cüruf odasına aktarılır. Gelecekteki planlarında ise bu cüruftan geri kazanılan ısı, büyük miktarda termal enerji gerektiren CO₂ ayrıştırılmama tesisindeki CO₂ absorbanının rejenerasyonu için kullanılması planlanmaktadır [27].

B. Dünyada ve Türkiye'de Teknolojik Hazırlık Seviyeleri

6.1.a. Demir-Çelik ve Parça Döküm sektöründe üretim proseslerinin dijital ve elektronik teknolojilerle optimizasyonuna yönelik uygulamaların geliştirilmesi ve yaygınlaştırılması

Dünyada THS 4-6, Türkiye'de THS 2-4'tür.

6.1.b. Demir-Çelik tesislerinin enerji girdisinin ekonomik döngüsellğe uygun ve yenilenebilir kaynaklardan olmasına yönelik çalışmaların gerçekleştirilmesi

Dünyada THS 9, Türkiye'de THS 8-9'dur.

6.1.c. Tüm proseslerde enerji, su ve malzeme verimliliğinin arttırılmasına yönelik en iyileme çalışmalarının gerçekleştirilmesi

Dünyada THS 9, Türkiye'de THS 8-9'dur.

6.1.d. Demir-çelik tesislerinde yan ürün ve atık yönetimine ilişkin yöntemlerin ve uygulamaların geliştirilmesi

Üretim prosesleri sonrası oluşan cürufun değerlendirilmesine yönelik çalışmaların gerçekleştirilmesi, Çelikhane cürufu kullanarak karbondioksiti yakalama ve ısı geri kazanımı konusunda sistem dünyada THS 5, Türkiye’de 1-2’dir.

6.1.e. Atık gazların ve ısının geri kazanımına yönelik teknolojilerin ve uygulamaların geliştirilmesi ve yaygınlaştırılması

Dünyada THS 9, Türkiye’de THS 8-9’dur. (Şu anda teknoloji olmasına rağmen kullanımı ve yaygınlığı düşüktür.)

C. Dünyada ve Türkiye’deki Mevcut Duruma İlişkin Başarılı Örnekler

6.1.e. Atık gazların ve ısının geri kazanımına yönelik teknolojilerin ve uygulamaların geliştirilmesi

Atık ısıdan enerji geri kazanımı ile elektrik üretimi, karbon dioksit emisyonunun azalışı, yüksek fırınlara daha iyi kömür sağlama ve verimlilik artışına yönelik “Kok Kuru Söndürme” prosesinin tasarlanması ve pilot uygulamaların gösterimi

Primetals, 2015 yılında Voelstalpine Stahl (Linz/Avusturya) tesisinde 60 ton/saat maksimum kapasitede tesis pilot tesis kurmuştur. Büyük ölçekte ve ısı geri kazanımına sahip endüstriyel sistemlere geçilmesi planlanmıştır. Denemeler sonucunda 60-90 ton/saat stabil ve 500°C sıcak hava üretimi hedeflenmiştir.

D. Ar-Ge ve Yenilik Sürecinde Biraraya Gelmesi Gereken Disiplinler ve Sektörler

6.1.a. Demir-Çelik ve Parça Döküm sektöründe üretim proseslerinin dijital ve elektronik teknolojilerle optimizasyonuna yönelik uygulamaların geliştirilmesi ve yaygınlaştırılması

Bahsi geçen teknolojik ilerlemeler için demir-çelik üretim konusunda uzmanlaşmış Metalurji ve Malzeme Mühendisleri, Kimya Mühendisleri, Makine Mühendisleri, Endüstri Mühendisleri,

Elektrik ve Elektronik Mühendisleri, Kontrol Mühendisleri, Otomasyon Mühendisleri, Enerji Mühendisliği, Bilgisayar ve Yazılım Mühendislerinin bir arada çalışması gerekmektedir.

6.1.b. Demir-Çelik tesislerinin enerji girdisinin ekonomik döngüsellğe uygun ve yenilenebilir kaynaklardan olmasına yönelik çalışmaların gerçekleştirilmesi

Bahsi geçen teknolojik ilerlemeler için demir-çelik üretim konusunda uzmanlaşmış Metalurji ve Malzeme Mühendisleri, Kimya Mühendisleri, Makine Mühendisleri, Endüstri Mühendisleri, Elektrik ve Elektronik Mühendisleri, Enerji Mühendisliği, Bilgisayar ve Yazılım Mühendislerinin bir arada çalışması gerekmektedir. Bunun için TÜBİTAK Araştırma Merkez/Enstitüleri, Üniversiteler ve demir çelik üreticileri derneklerinin katkıları alınmalıdır.

Demir-Çelik Üreticileri Derneği, Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı, Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı ve benzeri paydaşların biraraya gelmesi gereklidir.

6.1.c. Tüm proseslerde enerji, su ve malzeme verimliliğinin artırılmasına yönelik en iyileme çalışmalarının gerçekleştirilmesi

Bahsi geçen teknolojik ilerlemeler için demir-çelik üretim konusunda uzmanlaşmış Metalurji ve Malzeme Mühendisleri, Kimya Mühendisleri, Temel Fen Bilimleri, Çevre Mühendisliği, Makine Mühendisleri, Endüstri Mühendisleri, Elektrik ve Elektronik Mühendisleri, Enerji Mühendisliği, Bilgisayar ve Yazılım Mühendislerinin bir arada çalışması gerekmektedir. Bunun için TÜBİTAK Araştırma Merkez/Enstitüleri, Üniversiteler ve demir çelik üreticileri derneklerinin katkıları alınmalıdır.

Demir-Çelik Üreticileri Derneği, Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı, Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı ve benzeri paydaşların biraraya gelmesi gereklidir.

6.1.d. Demir-çelik tesislerinde yan ürün ve atık yönetimine ilişkin yöntemlerin ve uygulamaların geliştirilmesi

Bahsi geçen teknolojik ilerlemeler için demir-çelik üretim konusunda uzmanlaşmış Metalurji ve Malzeme Mühendisleri, Kimya Mühendisleri, Temel Fen Bilimleri, Çevre Mühendisliği, Makine Mühendisleri, Endüstri Mühendisleri, İnşaat Mühendisliği, Bilgisayar ve Yazılım Mühendislerinin bir arada çalışması gerekmektedir. Bunun için TÜBİTAK Araştırma Merkez/Enstitüleri, Üniversiteler ve demir çelik üreticileri derneklerinin katkıları alınmalıdır.

Demir-Çelik Üreticileri Derneği, Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı, Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı ve benzeri paydaşların biraraya gelmesi gereklidir.

6.1.e. Atık gazların ve ısının geri kazanımına yönelik teknolojilerin ve uygulamaların geliştirilmesi ve yaygınlaştırılması

Bahsi geçen teknolojik ilerlemeler için demir-çelik üretim konusunda uzmanlaşmış Metalurji ve Malzeme Mühendisleri, Kimya Mühendisleri, Temel Fen Bilimleri, Çevre Mühendisliği, Makine Mühendisleri, Endüstri Mühendisleri, Enerji (Sistemleri) Mühendisliği, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği, Elektrik Mühendisliği, Bilgisayar ve Yazılım Mühendislerinin bir arada çalışması gerekmektedir. Bunun için TÜBİTAK Araştırma Merkez/Enstitüleri, Üniversiteler ve demir çelik üreticileri derneklerinin katkıları alınmalıdır.

Demir-Çelik Üreticileri Derneği, Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı, Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı ve benzeri paydaşların biraraya gelmesi gereklidir.

E. Ar-Ge, Yenilik, Demonstrasyon İşbirliği Modeli ve Destek Mekanizması

6.1.a. Demir-Çelik ve Parça Döküm sektöründe üretim proseslerinin dijital ve elektronik teknolojilerle optimizasyonuna yönelik uygulamaların geliştirilmesi ve yaygınlaştırılması

Demir-çelik üreticileri, yazılım konusunda uzmanlaşmış firmalar ve bu konuda uzmanlaşmış akademisyenlerle birlikte Büyük ölçekli Ar-Ge ve İş Birliği Projesi gerekmektedir.

6.1.b. Demir-Çelik tesislerinin enerji girdisinin ekonomik döngüselliğe uygun ve yenilenebilir kaynaklardan olmasına yönelik çalışmaların gerçekleştirilmesi

Büyük ölçekli Ar-Ge ve Yenilik Projeleri oluşturulmalıdır.

6.1.c. Tüm proseslerde enerji, su ve malzeme verimliliğinin artırılmasına yönelik en iyileme çalışmalarının gerçekleştirilmesi

Küçük/Orta ölçekli Ar-Ge ve Yenilik Projeleri oluşturulmalıdır.

6.1.d. Demir-çelik tesislerinde yan ürün ve atık yönetimine ilişkin yöntemlerin ve uygulamaların geliştirilmesi

Orta ölçekli Ar-Ge ve Yenilik Projeleri oluşturulmalıdır.

6.1.e. Atık gazların ve ısının geri kazanımına yönelik teknolojilerin ve uygulamaların geliştirilmesi ve yaygınlaştırılması

Tesis Kurulumları konusunda yatırım desteği gerekmektedir. Yaygınlaştırılması için çalışmalar gerekmektedir.

F. Zaman ve Bütçe Tahminleri

(Kısa Vade: 1-3 yıl, Orta Vade: 3-5 yıl, Uzun Vade: 5 yıldan fazla)

6.1.a. Demir-Çelik ve Parça Döküm sektöründe üretim proseslerinin dijital ve elektronik teknolojilerle optimizasyonuna yönelik uygulamaların geliştirilmesi ve yaygınlaştırılması

Orta Vade hedeflenmelidir. Avrupa Dijital Dönüşüm için 12-36 Milyon Avro (Genel çağrı, Küme 4 çağrıları içerisinde) bütçe sunmaktadır.

6.1.b. Demir-Çelik tesislerinin enerji girdisinin ekonomik döngüselliğe uygun ve yenilenebilir kaynaklardan olmasına yönelik çalışmaların gerçekleştirilmesi

Elektiriğin yenilenebilir kaynaklardan olması Kısa Vade, Hidrojen için Orta ve Uzun Vade hedeflenmelidir.

6.1.c. Tüm proseslerde enerji, su ve malzeme verimliliğinin arttırılmasına yönelik en iyileme çalışmalarının gerçekleştirilmesi

Kısa Vade hedeflenmelidir.

6.1.d. Demir-çelik tesislerinde yan ürün ve atık yönetimine ilişkin yöntemlerin ve uygulamaların geliştirilmesi

Kısa Vade hedeflenmelidir.

6.1.e. Atık gazların ve ısının geri kazanımına yönelik teknolojilerin ve uygulamaların geliştirilmesi ve yaygınlaştırılması

Kısa Vade hedeflenmelidir.

G. Teknolojik İlerlemenin Sağlanmasında Kritik Hususlar

- Karbon emisyonlarının net sifıra inmesi amacına yönelik olarak **uygun maliyetli yenilenebilir enerji üretimini** sağlamak gerekmektedir.
- Hidrojen kullanımındaki esas zorluk çelik üretim teknolojisi zorluğu değil, yenilenebilir enerji ile hidrojen üretimi (hidrojenin yeşil enerji kullanılarak makul maliyette üretimi), dağıtımı (hidrojenin dağıtımında ve depolanmasında iş güvenliği 300-400 bar basınçlara dayanıklılık ve test gereksinimi, patlayıcı özellikte olma) ve tedarikine yönelik zorluklardır.
- Maden Teknik ve Arama Müdürlüğü'nün 2017 yılında yayımlanan "Dünyada ve Türkiye'de Demir" raporunda yerli düşük tenörlü ve sorunlu demir-çelik rezervlerimiz yaklaşık 2,4 milyar ton civarındadır. Bu çalışma acilen güncellenmelidir ve sorunlu cevher yataklarımızın fizibilitesi göz önünde bulundurularak; İTÜ Maden Fakültesi, SENTEK, MATİL, TÇÜD ve benzeri kurum/kuruluşların ortaklığı ile sanayi üretimi öncesi prototip üretim/değerlendirme çalışmaları yapılmalıdır. Türkiye'nin demir cevheri potansiyeli bölgesel bazda yeniden ortaya konmalıdır. Konuya ilişkin ayrıca TÇÜD'ün, Türkiye'de DRI/HBI Üretimine Yönelik Ön Fizibilite Çalışması yararlı bir kaynak olup, AB Yeşil Mutabakatı kapsamında ele alınarak güncellenmelidir.

Kritik Ürün/Teknoloji 6.2.

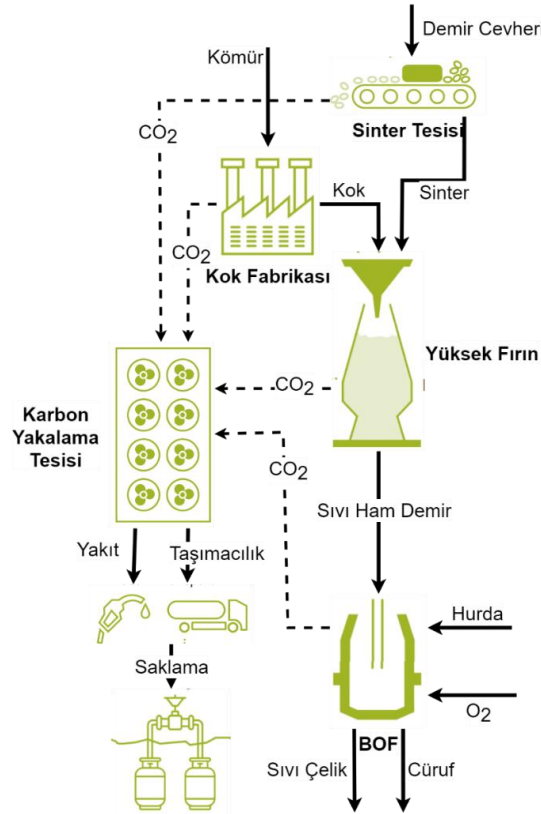
6.2. Karbon yakalama, kullanımı ve depolama (CCUS) teknolojilerinin prosese entegrasyonuna yönelik çalışmalar gerçekleştirilmesi

A. Teknik Açıklamalar, Yenilikçi Özellikler, Hedeflenen Performans ve Metrikler

ÖNCELİKLİ AR-GE VE YENİLİK KONULARI

6.2.a. Karbon yakalama, kullanımı ve depolama (CCUS) teknolojilerinin prosese entegrasyonuna yönelik çalışmalar gerçekleştirilmesi

Entegre demir çelik tesislerinde mevcut girdilerin ve prosesin değiştirilmeden, AB Yeşil Mutabakat hedefleri çerçevesinde karbon emisyonlarının azaltılmasına yönelik olarak karbon yakalama, depolama ve dönüştürme teknolojilerinin kullanılması önemli bir teknoloji olarak ön plana çıkmaktadır. Ayrıca bu tip sistemler ile yakalanan karbonun diğer katma değeri yüksek kimyasallara dönüştürülüp, satılabilir ürün haline getirilebilmesi de mümkündür.

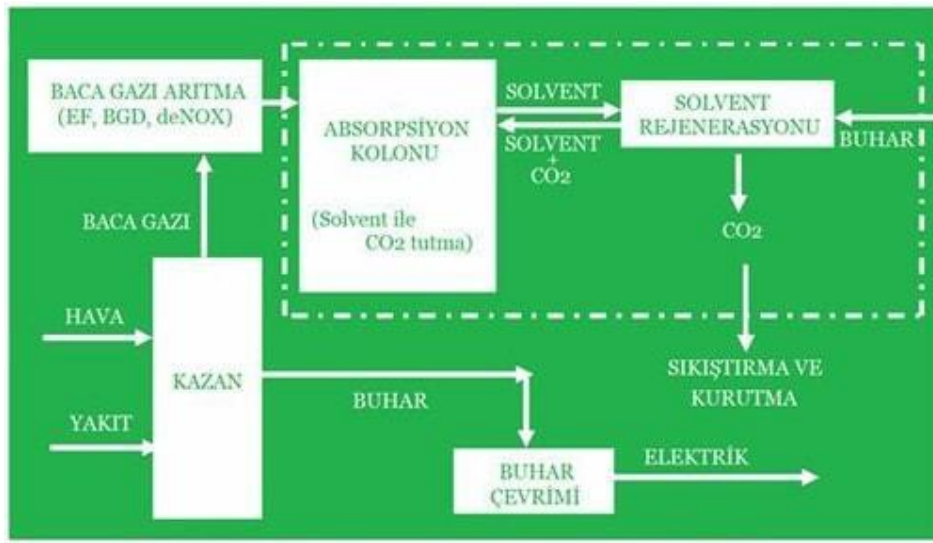


Şekil 1. Karbonun Yakalanması, Kullanılması ve Depolanması [19]

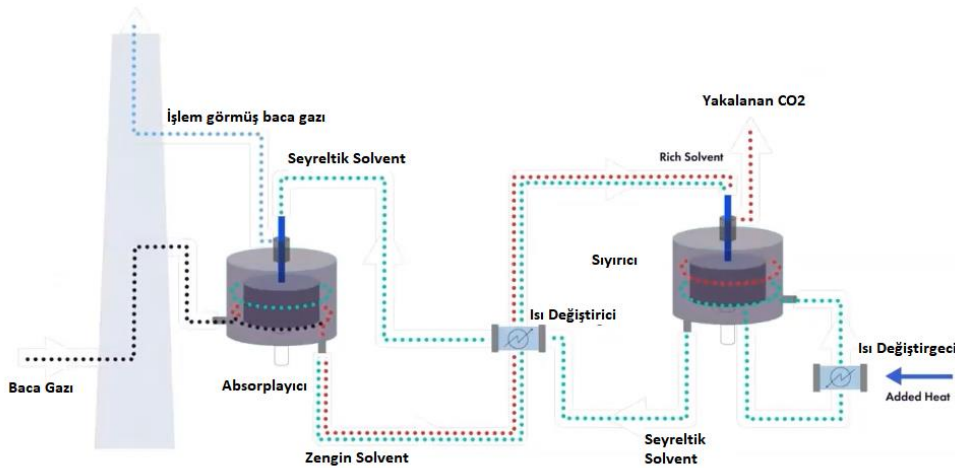
Karbon yakalama sistemleri, “Yanma Sonrası Yakalama”, “Yanma Öncesi Yakalama” ve “Oksi-Yakıt Yanma” olarak üç ana metoda ayrılmaktadır.

Yanma Sonrası CO₂ Yakalama

Yakma sonrası yakalama tekniğinde, yanma işlemi sonrası ortaya çıkan karbondioksit kimyasal çözücüler yardımı ile ayrıştırılmakta ve depolanmaktadır. Yanma sonrası CO₂ tutmak için Solvent/Sorbent/Membran ile tutma yöntemleri kullanılmaktadır. Solvent ile (özellikle monoetanol amin) tutma en az maliyetli, en az enerji kullanan ve gelişmiş, ticarileşmiş bir yöntemdir[20].



Şekil 2. Yanma Sonrası Karbon Tutma (Solvent İle) [20]



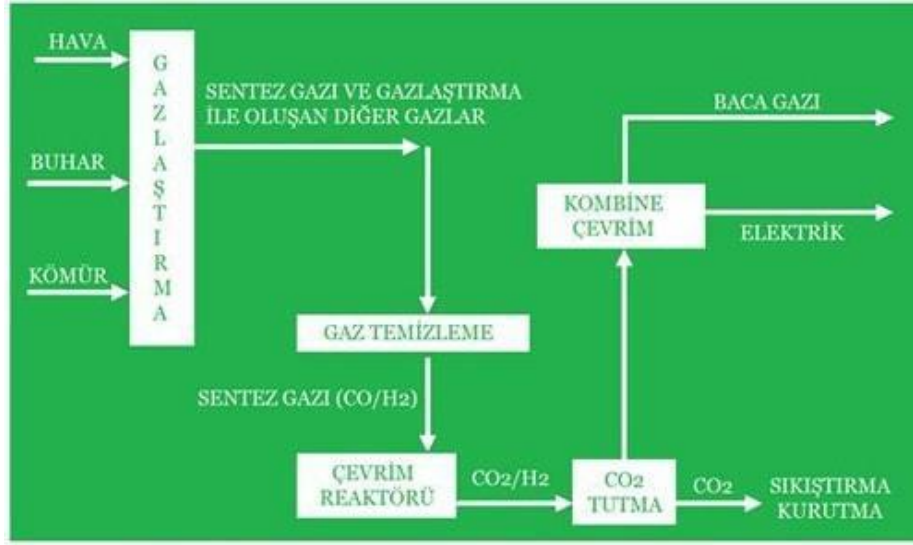
Şekil 3. CycloneCC Tesisi Blok Akış Diyagramı [21]

Entegre demir çelik tesislerinde proseslerde yan ürün olarak açığa çıkan kok, yüksek fırın, çelikhane ve konverter gazlarının kullanım sonrası artan kısmının değerlendirilerek, elektrik

enerjisi üretmek için enerji santrallerine gönderilmektedir. Bu kapsamda proses gazlarından elektrik enerjisi üretiminin gelecek dönemlerde de devam edeceği varsayılarak, CO₂'nin ayrıştırılması ve depolanması amacı ile Stepwise projesi bulunmaktadır.

Yanma Öncesi CO₂ Yakalama

Yakma öncesi yakalama tekniğinde, yanma işlemi öncesinde katı yakıt, buhar ve oksijence zengin basınçlı bir ortamda ısıtarak gaz yakıt formuna dönüştürülmektedir. Bu yakıt hidrojen ve karbonmonoksit bileşimli olup sentez gazı (syngas) olarak da adlandırılmaktadır. Bu teknikte karbon, sentez gazı yanmadan önce fiziksel veya kimyasal absorpsiyon yöntemleri ile ayrıştırılarak depolanmaktadır.

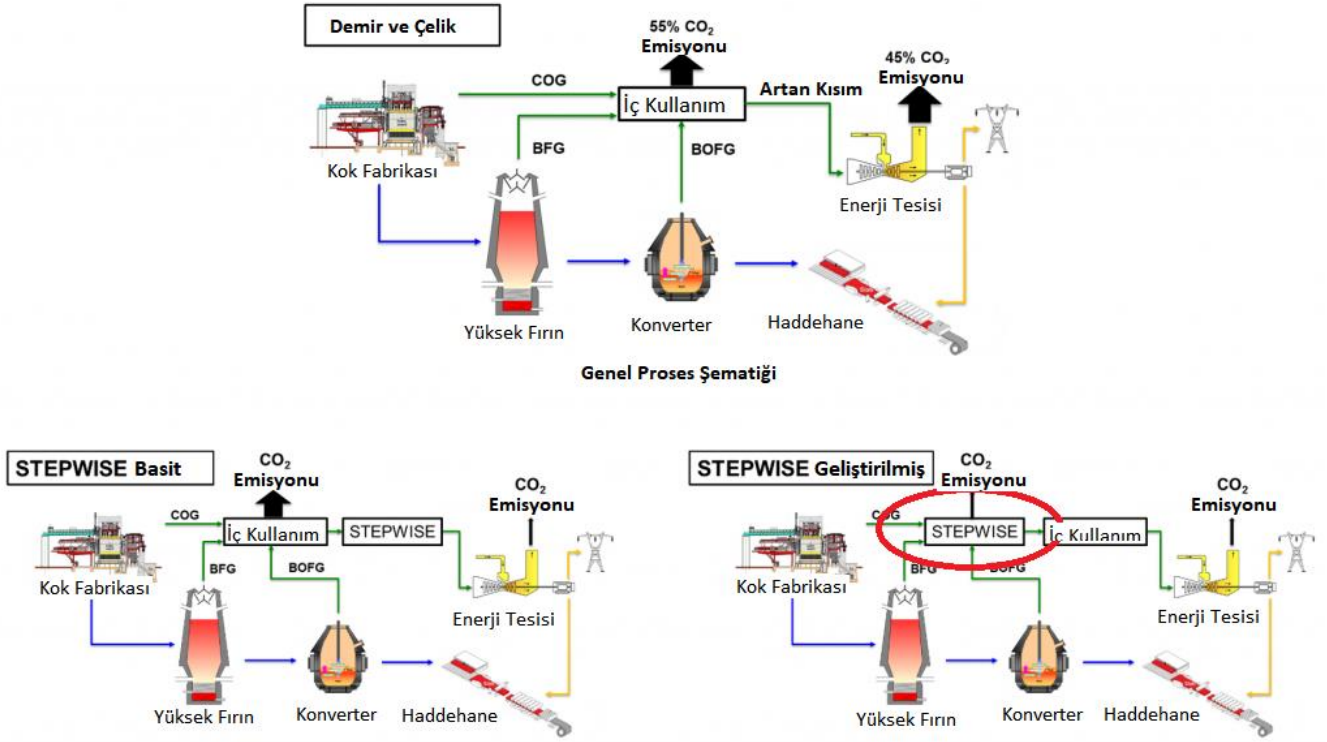


Şekil 4. Yanma Öncesi Karbon Tutma [20]

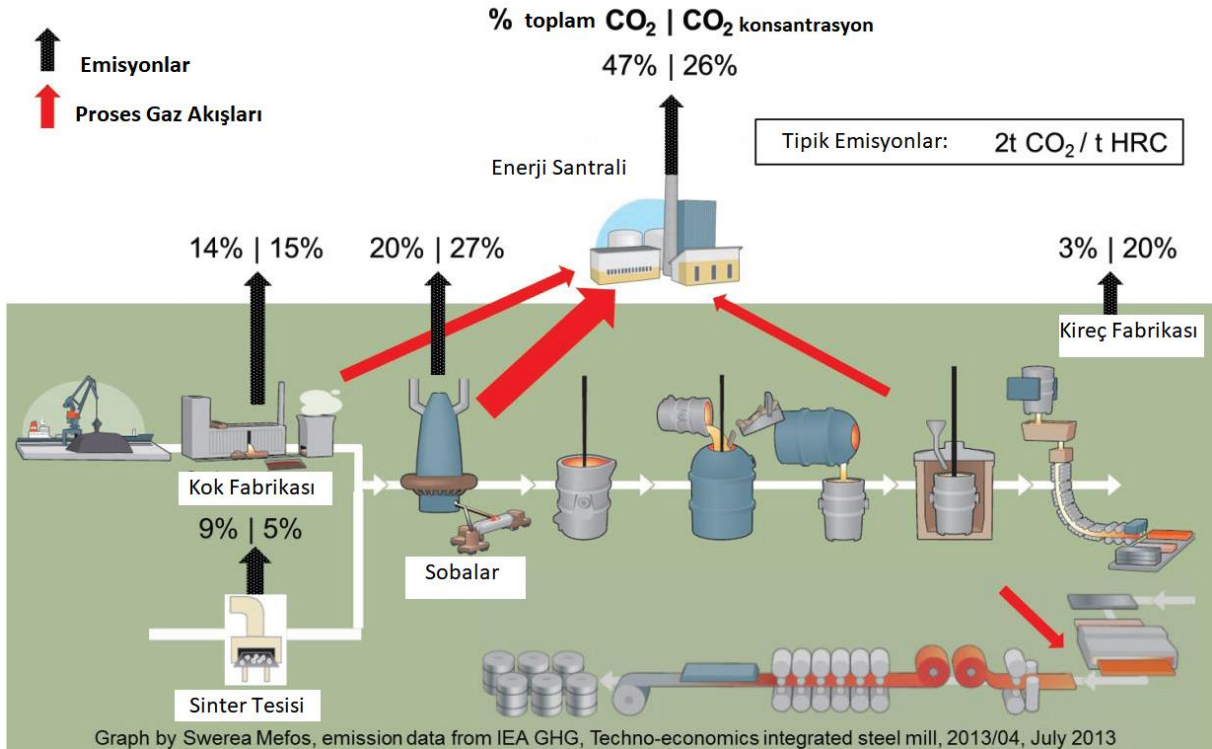
Stepwise Sistemi ve SEWGS Teknolojisi:

STEPWISE, Avrupa H2020 LCE programı kapsamında yürütülen bir projedir. Proje, çelik üretiminin CO₂ ayak izini azaltmayı amaçlayan demir çelik sektöründe çerçevesinde gelişmiş yanma öncesi CO₂ uzaklaştırma teknolojisini gösterilmesini amaçlamaktadır. Bu proseste, yüksek fırın gazının dekarbonize edilmesi ve daha sonra güç üretimi (elektrik) için gönderilmesi bir sistem olarak tasarlanmıştır.

CO₂ giderme bu proseste; rejeneratif katı adsorbanlardan yararlanan gelişmiş bir CO₂ giderme teknolojisi ile gerçekleştirilmektedir. Teknoloji, yüksek sıcaklıkta seçici bir katı adsorban üzerinde CO₂'nin adsorpsiyonu ile su-gaz değişim reaksiyonu yoluyla buharla etkileşime dahil edilerek karbonmonoksit CO₂ ve H₂'ye dönüştürülmesini kapsamaktadır. Bu, güç üretimi için uygun olan belirli basınçta H₂ açısından zengin sıcak bir akışkan üretir. Katı adsorbanın basınç salınımı yolu ile rejenerasyonu, taşıma ve depolama için uygun, CO₂ açısından zengin bir ürünle sonuçlanmaktadır [22].



Şekil 5. Stepwise Prosesi Şematığı [22]



Şekil 6. Gaz Yakıtlı Enerji Üreten (Elektrik) Entegre Demir-Çelik Fabrikası CO₂ Emisyon Oranları ve Konsantrasyonu [22]

Oksi-Yakıt Yanma Yöntemi

Oksi-yakıt yakma yönteminde, yakıtın yakılmasında hava yerine oksijen kullanılır. Bu nedenle, hava ayırıştırma ünitesi bulunmaktadır. Baca gazında su buharı sıkıştırılarak ve soğutulularak ayrılır. Baca gazındaki kirletici emisyonlar arıtılır. Geride kalan CO₂ sıkıştırılarak depolanmaya hazır hale getirilir. Hava ayırışığından ve yanma öncesinde azot ayrıldığından dolayı azot oksitler için arıtma sistemi gerektirmez.

B. Dünyada ve Türkiye’de Teknolojik Hazırlık Seviyeleri

6.2.a. Karbon yakalama, kullanımı ve depolama (CCUS) teknolojilerinin prosese entegrasyonuna yönelik çalışmalar gerçekleştirilmesi

Dünyada THS 7-9, Türkiye’de THS 3-4’tür.

	Teknolojik Hazırlık Evresi	Üretim İçin Gerekli Yıl	Gelişim Maliyeti	Yatırım İhtiyacı	İşletme Maliyeti	Kabul Edilebilirlik	Dönüştürülebilirlik
CCUS	Karbon Yakalama , Kullanım ve/veya Saklama	5-10	●	●	●	●	●
	Biyokütle ile Karbon Yakalama , Kullanım ve/veya Saklanması	5-10	●	●	●	○	●

C. Dünyada ve Türkiye’deki Mevcut Duruma İlişkin Başarılı Örnekler

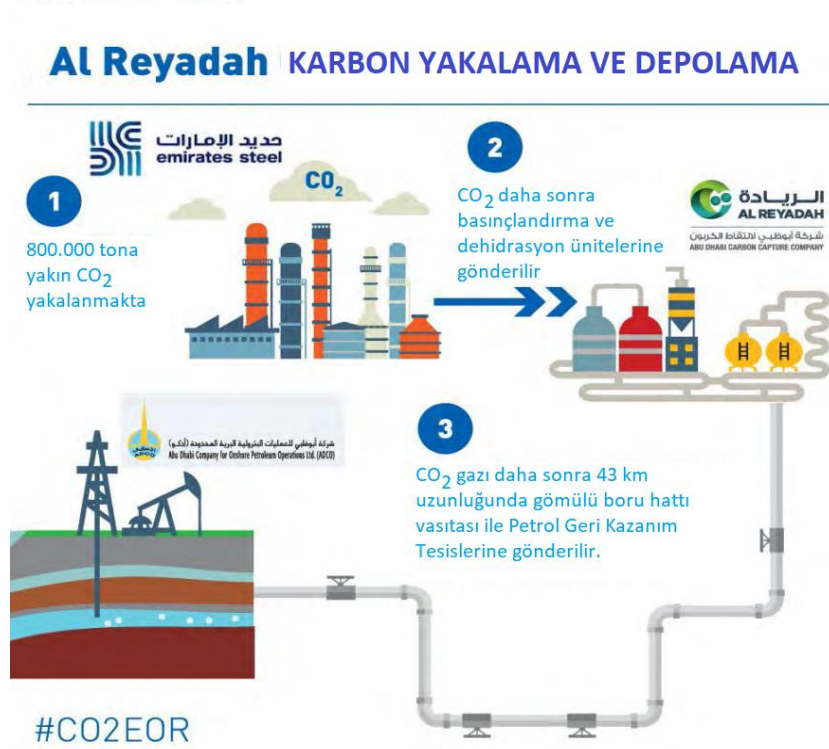
6.2.a. Karbon yakalama, kullanımı ve depolama (CCUS) teknolojilerinin prosese entegrasyonuna yönelik çalışmalar gerçekleştirilmesi

Stepwise projesi kapsamında 14 ton/gün CO₂ yakalama kapasitesine sahip pilot tesis kurulmuştur. Demir-çelik endüstrisi proses gazlarında bulunan CO-CO₂’nin yakıtı ve redükleyici gaza dönüşümü kapsamında ArcelorMittal firmasının Avrupa’da kurduğu pilot tesisler mevcuttur. Yine Thyssenkrupp’un Carbon2Chem projesi ile proses gazlarından amonyak ve diğer kimyasalların eldesi, FReSMe, MefCO₂ gibi projelerle de metanol yakıtına dönüştürülmesi işlemleri, Avrupa’da karbon yakalama ve kullanım kapsamında gerçekleştirilen çalışmalar arasındadır.

CarbonClean firması tarafından geliştirilmiş, amin solvent tabanlı ve dönerli dolgulu yatak sistemi olan CycloneCC için modüler, tak kullan çalıştır tipi; 10 ton/gün, 100 ton/gün ve üzeri yakalama kapasitelerinde üniteleri bulunmaktadır. TataSteel’de 5ton/gün kapasitesine sahip

yüksek fırın gazından CO₂ yakaladığı pilot ünitesi kurulumu CarbonClean şirketi tarafından gerçekleştirilmiştir.

Abu Dabi'de El Reyadah firması, DRI/Shaft fırınlarından CO₂ yakalanması amacıyla endüstriyel düzeyde karbon yakalama tesisi kurmuştur. 800.000 tona yakın CO₂ adsorplanarak, basınçlandırma ve dehidrasyon tesisine verilmekte, daha sonra 43 km boru hattıyla geliştirilmiş petrol geri kazanım tesisine gönderilmektedir. Proje maliyetleri yaklaşık 122 milyon \$ tutmuştur [24].



Şekil 7. El Reyadah Karbon Yakalama ve Depolama [24]

D. Ar-Ge ve Yenilik Sürecinde Biraraya Gelmesi Gereken Disiplinler ve Sektörler

6.2.a. Karbon yakalama, kullanımı ve depolama (CCUS) teknolojilerinin prosese entegrasyonuna yönelik çalışmalar gerçekleştirilmesi

Bahsi geçen teknolojik ilerlemeler için demir-çelik üretim konusunda uzmanlaşmış Metalurji ve Malzeme Mühendisleri, Kimya Mühendisleri, Makine Mühendisleri, Endüstri Mühendisleri, Elektrik ve Elektronik Mühendisleri, Enerji Mühendisliği, Bilgisayar ve Yazılım Mühendislerinin bir arada çalışması gerekmektedir. Bunun için TÜBİTAK Araştırma Merkez/Enstitüleri, Üniversiteler ve demir çelik üreticileri derneklerinin katkıları alınmalıdır.

Demir-Çelik Üreticileri Derneği, Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı, Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı ve benzeri paydaşların biraraya gelmesi gereklidir.

E. Ar-Ge, Yenilik, Demonstrasyon İşbirliği Modeli ve Destek Mekanizması

6.2.a. Karbon yakalama, kullanımı ve depolama (CCUS) teknolojilerinin prosese entegrasyonuna yönelik çalışmalar gerçekleştirilmesi

Büyük ölçekli Ar-Ge ve Yenilik Projeleri oluşturulmalıdır.

F. Zaman Boyutu

(Kısa Vade: 1-3 yıl, Orta Vade: 3-5 yıl, Uzun Vade: 5 yıldan fazla)

6.2.a. Karbon yakalama, kullanımı ve depolama (CCUS) teknolojilerinin prosese entegrasyonuna yönelik çalışmalar gerçekleştirilmesi

CCUS için Orta ve Uzun Vade hedeflenmelidir.

Referanslar

- [1] Sun, W-q., Cai, J-j, Du, T., Zhang, D-W. (2010) "Specific Energy Consumption Analysis Model and Its Application in Typical Steel Manufacturing Process", *Journal of Iron and Steel Research, International*, 2010, 17(10):33–37.
- [2] Li, S., Liu, L., Wu, Y., Wang, Y. (2018). The Algorithm Knowledge Base for Steel Production Process Optimization. In: Wang, K., Wang, Y., Strandhagen, J., Yu, T. (eds) *Advanced Manufacturing and Automation VII. IWAMA 2017. Lecture Notes in Electrical Engineering*, vol 451. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-10-5768-7_57
- [3] Li, G., Kong, J., Jiang, G., Zhang, H., Zhao, G., & Xie, L. (2011) " Optimization of production procedure in iron and steel enterprise for green manufacturing", *Key Engineering Materials*, Vol. 460-461, Pages 631 - 636 2011 doi:10.4028.
- [4] Fishedick, M., Marzinkowski, J., Winzer, P., Weigel, M. (2014) "Techno-economic evaluation of innovative steel production Technologies", *Journal of Cleaner Production*, Vol. 84, pp. 563-580, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.05.063>.
- [5] Bhaskar, A., Abhishek, R., Assadi, Ç, Somehesaraei, H.N. (2022) "Decarbonizing primary steel production : Techno-economic assessment of a hydrogen based green steel production plant in Norway", *Journal of Cleaner Production*, Vol. 350, 131339, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131339>.
- [6] Thomassen, G., Dael, M.V., Passel, S.V., You, F., (2019), "How to assess the potential of emerging green technologies? Towards a prospective environmental and techno-economic assessment framework", *Green Chemistry*, Vol 21, pp. 4868-4886. <https://doi.org/10.1039/C9GC02223F>.
- [7] Wu, I-C., Chen, T-L., Chen, Y-M., Liu, T-C., Chen, Y-A, .(2017) "Analyzing load profiles of electricity consumption by a time series data mining framework", HCIBGO 2017: HCI in Business, Government and Organizations. Supporting Business pp 443–454.
- [8] González-Marcos, A., Ordieres-Meré, J., Alba-Elías, F. Martínez-de-Pisón, F.J., & Castejón-Limas, M. (2014) "Advanced predictive system using artificial intelligence for cleaning of steel coils", *Ironmaking & Steelmaking* 41:4, 262-269, DOI: 10.1179/1743281213Y.0000000130.
- [9] Şahin, Y., Bozkurt, Y. (2022). "Multi-criteria Decision Support with SWARA and TOPSIS Methods to the Digital Transformation Process in the Iron and Steel Industry. In: Durakbasa, N.M., Gençyılmaz, M.G. (eds) *Digitizing Production Systems. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-90421-0_26
- [10] Sun, Jingchao & Na, Hongming & Yan, Tianyi & Qiu, Ziyang & Yuan, Yuxing & He, Jianfei & Li, Yingnan & Wang, Yisong & Du, Tao, (2021). "[A comprehensive assessment on material, exergy and emission networks for the integrated iron and steel industry](#)," *Energy*, Elsevier, vol. 235 C . DOI: 10.1016/j.energy.2021.121429.
- [11] Sun, Wenqiang & Wang, Qiang & Zhou, Yue & Wu, Jianzhong (2020) "Material and energy flows of the iron and steel industry: Status quo, challenges and perspectives", *Applied Energy*, Volume 268, 114946, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114946>.
- [12] Pinto, S.C., Andersson, S.B, Hendrickx, J.M., Cassandras, C.G. (2020) "Multi-Agent Infinite Horizon Persistent Monitoring of TAr-Gets with Uncertain States in Multi-Dimensional Environments", This work was supported in part by NSF under grants

ECCS-1931600, DMS-1664644, *IFAC-PapersOnLine*, Volume 53, Issue 2, Pp. 10963-10968, <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2020.12.2845>.

- [13] From simple digital twin to complex digital twin Part I: A novel modeling method for multi-scale and multi-scenario digital twin
- [14] Shuaiyin Ma, Wei Ding, Yang Liu, Shan Ren, Haidong Yang (2022), "Digital twin and big data-driven sustainable smart manufacturing based on information management systems for energy-intensive industries", *Applied Energy*, Vol. 326, 119986, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.119986>.
- [15] Alexandra Mallett, Prosanto Pal, (2022) "Green transformation in the iron and steel industry in India: Rethinking patterns of innovation", *Energy Strategy Reviews*, Volume 44, 100968, ISSN 2211-467X, <https://doi.org/10.1016/j.esr.2022.100968>.
- [16] Bruzzone, A., Massei, M., Sinelshnikov, K. (2020) "Enabling Strategic Decisions for the Industry of Tomorrow", *Procedia Manufacturing*, Vol. 42, PP. 548-553, <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.02.028>.
- [17] <https://www.eppa-eu.org/scientific-facts/lca-studies-new.html>, 18.12.2022 tarihinde erişilmiştir.
- [18] Haq, H., Valisua, P., Niemi, S. (2021) "Modelling Sustainability Industrial Symbiosis", *Energies*, Vol. 14 (4), pp. 1172, <https://doi.org/10.3390/en14041172>.
- [19] https://www.rolandberger.com/publications/publication_pdf/roland_berger_future_of_steelmaking.pdf 23.12.2022 tarihinde erişilmiştir.
- [20] <https://www.ecka.com.tr/ekler/karbon-yakalama-ve-depolama-1654758940.pdf> , 23.12.2022 tarihinde erişilmiştir.
- [21] <https://www.carbonclean.com/blog/future-of-carbon-capture> , 23.12.2022 tarihinde erişilmiştir.
- [22] <https://stepwise.eu> , 23.12.2022 tarihinde erişilmiştir.
- [23] <http://www.steelanol.eu/en>, 23.12.2022 tarihinde erişilmiştir.
- [24] <https://www.cslforum.org/cslf/sites/default/files/documents/AbuDhabi2017/AbuDhabi17-TW-Sakaria-Session2.pdf>, 23.12.2022 tarihinde erişilmiştir.
- [25] https://www.ife-steel.co.jp/en/company/pdf/carbon-neutral-strategy_220901_1.pdf, 02.12.2022 tarihinde erişilmiştir.
- [26] Z. Xiao, S. Wang, M. Li, Z. Wu, J. Zhao, ve L. Ma, "RESEARCH OVERVIEW ON RECOVERY OF WASTE HEAT FROM HIGH TEMPERATURE SLAG PARTICLES", s. 6, 2019.
- [27] Fleischanderl A., Fenzl T., ve Neuhold R., "Dry Slag Granulation – The Future Way to Granulate Blast Furnace Slag". Primetals Technologies Austria GmbH.
- [28] Nobuyuki Shigaki, Sumito Ozawa and Ikuhiro Sumi "Effect of Gas Velocity Distribution on Heat Recovery Process in Packed Bed of Plate-Shaped Slag

EK 1. Yeşil Büyüme Teknoloji Yol Haritası Demir-Çelik Sektörü Danışma Grubu Üyeleri

No	Ad-Soyad	Kurum/Kuruluş
1	Prof. Dr. Hüseyin ÇİMENOĞLU (Moderatör)	İstanbul Teknik Üniversitesi
2	Ayşegül AVİNAL	TÜBİTAK MAM
3	Dr. Burak BİROL	Yıldız Teknik Üniversitesi
4	Dr. Öğr. Üyesi Cevat Fahir ARISOY	İstanbul Teknik Üniversitesi
5	Dr. Öğr. Üyesi Engin ÇEVİK	Karabük Üniversitesi
6	Prof. Dr. Gökçen Alev ÇİFTÇİOĞLU	Marmara Üniversitesi
7	Prof. Dr. Gülgün KAYAKUTLU	İstanbul Teknik Üniversitesi
8	Prof. Dr. Hüseyin Atilla DİKBAŞ	İstanbul Medipol Üniversitesi
9	Doc. Dr. İzzet ARI	Ankara Sosyal Bilimler Üniversitesi
10	Doç. Dr. Merih Aydınalp KÖKSAL	Hacettepe Üniversitesi
11	Prof. Dr. Oktay ELKOCA	Düzce Üniversitesi
12	Dr. Öğr. Üyesi Özgür KÖYLÜOĞLU	Yeditepe Üniversitesi
13	Prof. Dr. Recep ARTIR	Marmara Üniversitesi

EK 2. Yeşil Büyüme Teknoloji Yol Haritası Demir-Çelik Sektörel Odak Grubu Üyeleri

Moderatör – Veysel YAYAN	Türkiye Çelik Üreticileri Derneği (TÇÜD)
Hasan AKBULUT	Türkiye Çelik Üreticileri Derneği (TÇÜD)
Burak ARMUTÇU	Türkiye Çelik Üreticileri Derneği (TÇÜD)

Kurum / Kuruluş	Kurum / Kuruluş
Akdaş Döküm	İstanbul Maden ve Metaller İhracatçı Birlikleri
Ardöküm A.Ş.	Kanca El Aletleri Dövme Çelik Mak. San. A.Ş.
Asil Çelik San. ve Tic. A.Ş.	Kaptan Demir Çelik Endüstrisi ve Ticaret A.Ş.
Aytekno Mühendislik	Kardemir A.Ş.
Bilecik Demir Çelik A.Ş.	Kroman Çelik Sanayii A.Ş.
Borçelik	Marzinc Marmara Geri Kazanım San. ve Tic. A.Ş.
Borusan	Matil Malzeme Test Ve İnovasyon Laboratuvarları A.Ş.
Çelik Boru İmalatçıları Derneği (ÇEBİD)	Özkan Demir Çelik Sanayi A.Ş.
Çelik Dış Ticaret Derneği	RZK ArcelorMittal A.Ş.
Çelik İhracatçıları Birliği (ÇİB)	Siddik Kardeşler Demir Çelik San. Tic. Ltd. Şti.
Çelikel Alüminyum	Soğuk Haddeme Galvanizli ve Boyalı Sac Üreticileri Derneği (SOGAD)
Çemtaş Çelik Makina Sanayi ve Ticaret A. Ş.	Soybaş Demir Çelik A.Ş.
Çolakoğlu Metalürji A.Ş.	T.C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı - Sanayi Genel Müdürlüğü - Metal Sanayi Daire Başkanlığı
Demisaş Döküm	Tatmetal Çelik Sanayi ve Ticaret A.Ş.
Diler Demir Çelik Endüstrisi ve Ticaret A.Ş.	TOBB
DORÇE Prefabrik Yapı ve İnşaat Sanayi Ticaret A.Ş.	Tosçelik Profil ve Sac End. A.Ş.
Döktaş Dökümcülük	TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi (MAM)
Ege Çelik Endüstrisi Sanayi ve Ticaret A.Ş.	Türk Yapısal Çelik Derneği (TUCSA)
Ekinciler Demir ve Çelik Sanayi A.Ş.	Türkiye Çelik Üreticileri Derneği (TÇÜD)
Erdemir A.Ş.	Türkiye Döküm Sanayicileri Derneği (TÜDÖKSAD)
Gazi Metal Mamülleri San. ve Tic. A.Ş.	Türkiye Odalar ve Borsalar Birliği (TOBB) - Demir ve Demir Dışı Metaller Meclisi

Habaş Sınai ve Tıbbi Gazlar İstihsal Endüstrisi A.Ş.	Yassı Çelik İhracat ve Sanayicileri Derneği (YİSAD)
İçdaş Çelik Enerji Tersane ve Ulaşım Sanayi A.Ş.	Yazıcı Demir Çelik Sanayi ve Tur. Ticaret A.Ş.
İskenderun Demir ve Çelik A.Ş.	Yeşilyurt Demir Çelik Endüstrisi ve Liman İşl. Ltd. Şti.
İstanbul Demir ve Demir Dışı Metaller İhracatçıları Birliği (İDDMİB)	Yıldız Demir Çelik A.Ş.

EK 3: Çalışmanın Yürütülmesinde Görevli TÜBİTAK Yetkilileri

Ad Soyad	Kurum/Kuruluş
Hande ALPASLAN	TÜBİTAK Bilim, Teknoloji ve Yenilik Politikaları Daire Başkanı
Melis KOCATÜRK	TÜBİTAK Bilim, Teknoloji ve Yenilik Politikaları Dairesi Müdür V.
Dr.Özlem DOĞAN	TÜBİTAK Bilim, Teknoloji ve Yenilik Politikaları Dairesi Bilimsel Programlar Başuzmanı-Plastik Sektörü TYH Koordinatörü
Mehmet İmran AKSU	TÜBİTAK Bilim, Teknoloji ve Yenilik Politikaları Dairesi Bilimsel Programlar Uzmanı
Büşra YILMAZ YANIK	TÜBİTAK Bilim, Teknoloji ve Yenilik Politikaları Dairesi Bilimsel Programlar Uzmanı