



**TIBBİ ATIKLARIN PLAZMA GAZLAŞTIRMA YÖNTEMİ İLE
BERTARAFI**

Altuğ Alp ERDOĞAN

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

OCAK 2023

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Altuğ Alp ERDOĞAN

11/01/2023

TIBBİ ATIKLARIN PLAZMA GAZLAŞTIRMA YÖNTEMİ İLE BERTARAFI
(Yüksek Lisans Tezi)

Altuğ Alp ERDOĞAN

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Ocak 2023

ÖZET

Bu çalışmada, tıbbi atıkların, özgün bir tasarıma sahip yukarı akışlı plazma gazlaştırıcı içerisindeki gazlaşma karakteristiği, hem deneysel, hem de nümerik olarak incelenmiş olup, eşdeğerlik oranına (ER) göre optimizasyon çalışması hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) simülasyonları ile gerçekleştirilmiştir. Çalışmada kullanılan tıbbi atık numunesi; nitril eldiven, kan torbası (flebotomi), pamuklu sargı bezi ve tıbbi atık torbasının granülize edilmiş haldeki hammaddeleri karıştırılarak hazırlanmıştır. Tasarlanan gazlaştırıcı için atık beslemesi 7,0 kg/sa olup, maksimum 2,5 kWh güç verebilen bir DC ark plazma torç ile çalıştırılmıştır. Gazlaştırıcının sıcaklık dağılımı, sentez gazı içerikleri, karbon dönüşüm oranı (KDO), soğuk gaz verimi (SGV) gibi performans parametreleri 0,1 , 0,2, 0,3 ve 0,4 olmak üzere 4 farklı eşdeğerlik oranı (ER) için ANSYS Fluent ortamında nümerik simülasyonlar ile incelenmiştir. Plazmanın kimyasal etkilerinin gözlemlenebilmesi için literatürden alınan plazma reaksiyonları nümerik modele entegre edilmiş olup, hava ile oluşturulan plazma jeti sıcak gaz olarak modellenmiştir. Gazlaştırıcının tasarım ve üretim aşamaları açıklanmış olup, deneysel çalışma esnasında ortaya çıkan tasarimsal ve deneysel hatalar detaylı olarak çözüm önerileriyle birlikte değerlendirilmiştir. ER=0,2 için gerçekleştirilen deney esnasında üretilen H₂, CO ve N₂ yüzdeleri sırasıyla %62,6 , %3,2 ve %34,2 olarak ölçülmüş, sonuçlar literatürden alınan verilerle ve gerçekleştirilen nümerik simülasyon sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak, gazlaştırıcı tasarımına eklenen boğaz konfigürasyonunun sentez gazı içeriklerine ve sıcaklık dağılımına olumlu yönde etki ettiği gözlemlenmiştir. Gazlaştırıcının en optimum çalıştığı koşullar ER=0,4 için elde edilmiş olup, bu koşulda üretilen H₂, CO ve CH₄ yüzdeleri sırasıyla %54,7 , %17,1 ve %11,8 olmuştur. KDO ve SGV değerleri ise sırasıyla %15,5 ve %27,2 olarak elde edilmiştir.

Bilim Kodu : 91440

Anahtar Kelimeler : Plazma gazlaştırma, tıbbi atık, atıktan enerji üretimi, hidrojen üretimi, sürdürülebilirlik, COVID-19

Sayfa Adedi : 116

Danışman : Doç. Dr. Mustafa Zeki YILMAZOĞLU

MEDICAL WASTE DISPOSAL VIA PLASMA GASIFICATION METHOD

(M. Sc. Thesis)

Altuğ Alp ERDOĞAN

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

January 2023

ABSTRACT

In this study, the gasification characteristics of medical wastes in an updraft plasma gasifier with a novel design are investigated both experimentally and numerically, and the optimization study respect to equivalence ratio (ER) is carried out with computational fluid dynamics (CFD) simulations. Medical waste sample used in the study is prepared by mixing the granulated raw materials of nitrile gloves, blood bags (phlebotomy), cotton bandages and medical waste bags. The waste feed for the designed gasifier is 7.0 kg/h and it is operated with a DC arc plasma torch with a maximum power of 2.5 kWh. Performance parameters such as temperature distribution inside the gasifier, syngas content, carbon conversion ratio (CCR), cold gas efficiency (CGE) are investigated via numerical simulations carried out in ANSYS Fluent environment for 4 different ER values as 0.1 , 0.2 , 0.3 and 0.4. To include the chemical effects of the plasma, the plasma reactions obtained from the literature are integrated into the numerical model, and the plasma jet formed by air is modeled as a hot gas. The design and production stages of the gasifier are explained, and the design and experimental errors that occurred during the experimental study are evaluated in detail with proposed solutions. The percentages of H₂, CO and N₂ produced during the experiment for ER=0.2 were measured as 62.6%, 3.2% and 34.2%, respectively, and the results were compared with the data from the literature and the numerical simulation results. As a result, it is observed that the throat configuration added to the gasifier design has a positive effect on the syngas content and the temperature distribution. The optimum operating conditions of the gasifier are obtained for ER=0.4, and the simulated percentages of H₂, CO and CH₄ produced in this condition are 54.7%, 17.1% and 11.8%, respectively. The CCR and CGE values are obtained as 15.5% and 27.2%, respectively.

Science Code : 91440

Key Words : Plasma gasification, medical waste, waste-to-energy, hydrogen production, sustainability, COVID-19

Page Number : 116

Supervisor : Assoc. Prof. Dr. Mustafa Zeki YILMAZOĞLU

TEŞEKKÜR

İlk olarak, hayatımın her anında beni destekleyen, eleştirel bakış açısı kazandıran, mesleğimi sevdiren, çalışmalarımız boyunca yolumu çizmemi sağlayan ve hayatıma kattığı birçok değer için hocam Sayın Doç. Dr. Mustafa Zeki YILMAZOĞLU'na teşekkür ederim. Deney sürecinde sağladıkları bilgi ve yönlendirmeleri, elde edilen numunelerin ölçümleri için sağladıkları altyapı, ayırdıkları zaman ve verdikleri tüm emekler için Gazi Üniversitesi Kimya Mühendisliği Bölümü'ne, Sayın Dr. Öğr. Üy. Duygu UYSAL hocama ve Sayın Öğr. Gör. Özgü YÖRÜK hocama teşekkür ederim.

Deneysel çalışmalarımıza “FYL-2021-7057” kodlu “Tıbbi atıkların plazma gazlaştırma yöntemi ile bertarafı” başlıklı proje kapsamında verdikleri destek için Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi'ne teşekkür ederim. Deneysel çalışmalarımı yürütmem ve nümerik simülasyon çalışmalarını gerçekleştirmemde gerekli laboratuvar ve yazılım altyapısını sağladığı için Gazi Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü'ne teşekkür ederim.

İçinde bulundukları bütün zorluklara rağmen desteklerini bir an olsun esirgemeyen, bütün sınırlı imkanlarına rağmen amaçlarımın peşinde koşmama fırsat veren ve çalışmalarım esnasında desteklerini esirgemeyen annem Serpil BİDECİ ve babam Hasan ERDOĞAN'a teşekkür ederim.

Son olarak, çalışma hayatım ile tez çalışmamı birlikte yürütmemde kolaylık sağlayan çalıştığım kurum ÜNTES'e ve hoşgörülerini için tüm çalışma arkadaşlarıma teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	x
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	xii
RESİMLERİN LİSTESİ	xiv
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xv
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR TARAMASI	5
2.1. Tıbbi Atıklar ve Sınıflandırılması	5
2.1. Tıbbi Atık Yönetimi.....	7
2.2.1. Toplama ve ayrıştırma.....	10
2.2.2. Dezenfeksiyon.....	10
2.2.3. Geçici depolama.....	11
2.2.4. Taşıma	11
2.2.5. Geri dönüşüm ve bertaraf.....	13
2.2.6. Acil durum senaryoları.....	16
2.3. Atıktan Enerji Üretimi (Waste-to-Energy).....	17
2.3.1. İnsinerasyon	18
2.3.2. Piroliz	24
2.3.3. Gazlaştırma	28
2.4. Sürdürülebilirlik	35

	Sayfa
2.5. Plazma Gazlaştırma.....	37
2.5.1. Plazmanın tanımı ve türleri	37
2.5.2. Plazma gazlaştırma ve atıktan enerji üretiminde kullanımı	43
2.5.3. Tıbbi atıkların bertarafında kullanımı	48
2.5.4. Plazma gazlaştırma sistemi tasarımında HAD simülasyonları	51
3. PLAZMA GAZLAŞTIRICI DENEY DÜZENEGİNİN TASARIMI VE ÜRETİMİ	55
3.1. Plazma Gazlaştırma Sistemi ve DC Ark Plazma Torç Tasarımı.....	55
3.2. Plazma Gazlaştırıcı Test Düzeneginin Üretimi.....	59
3.3. Deney Düzeneginin Kurulumu	64
3.4. İşletme Koşulları	66
4. NÜMERİK SİMÜLASYON	69
4.1. Matematiksel Modelleme.....	69
4.2. Prototip Plazma Gazlaştırıcı Simülasyonu.....	73
4.3. Model Validasyonu İçin Yapılan Simülasyonlar	75
4.4. Nümerik Hücre Yapılarının Oluşturulması.....	77
4.5. Gazlaştırıcı Performansının Değerlendirilmesi.....	78
5. DENEYSEL BULGULAR.....	81
5.1. Ölçüm Sonuçları.....	81
5.2. Tasarımsal ve Deneysel Hataların Değerlendirilmesi.....	82
5.3. Çözüm Alternatifleri	84
6. NÜMERİK SİMÜLASYON BULGULARI.....	87
6.1. Hücre Bağımsızlık Testleri	87
6.2. Model Validasyonu	88

	Sayfa
6.2.1. Prototip gazlaştırıcı simülasyonu	88
6.2.2. Referans çalışmadan alınan gazlaştırıcı simülasyonu	89
6.3. Simülasyon Sonuçları.....	91
6.3.1. Gazlaştırıcı içerisindeki sıcaklık dağılımı ve akış profilleri	91
6.3.2. Sentez gazı üretimi.....	94
6.3.3. Gazlaştırıcı performans parametreleri.....	97
7. SONUÇ VE ÖNERİLER	99
KAYNAKLAR	103

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Tıbbi atık türleri ve kaynakları.....	5
Çizelge 2.2. Tıbbi atıkların bertarafı esnasında açığa çıkan PCDD-PCDF emisyonları için risk değerlendirmesi.	6
Çizelge 2.3. Ülke ve kurumların COVID-19 salgını boyunca tıbbi atıklar için yayınladıkları yönergeler.....	8
Çizelge 2.4. Geçici depolamada personel, yönetim ve tasarım açısından dikkat edilmesi gereken hususlar.	12
Çizelge 2.5. Tıbbi atıklarda geri dönüşüm potansiyeli.....	14
Çizelge 2.6. Tıbbi atıkların içeriğinde yaygın olarak bulunan polimerler.	16
Çizelge 2.7. İnsinerasyon tesisi kapasitesinin yetmediği durumlar için 5 farklı acil durum senaryosu.	18
Çizelge 2.8. Farklı atık içerikleri için yavaş piroliz sistemiyle elde edilen sonuçlar	25
Çizelge 2.9. Yakma ve gazlaştırma prosesleri arasındaki farklar.	29
Çizelge 2.10. Klasik gazlaştırıcılar içerisinde gerçekleşen tipik kimyasal reaksiyonlar.	30
Çizelge 2.11. Ototermal ve allotermal gazlaştırıcılar için emisyonlar arasındaki farklar	31
Çizelge 2.12. İnsinerasyon, piroliz ve yakma prosesleri için verim, emisyon ve sentez gazı oluşum değerleri.	34
Çizelge 2.13. Ekonomik açıdan klasik insinerasyon, piroliz ve gazlaştırma yöntemlerinin karşılaştırılması.	34
Çizelge 2.14. Plazma fazının gaz fazına göre fiziksel açıdan temel farklılıkları.	38
Çizelge 2.15. Plazma gazlaştırıcılarda PCDD/PCDF bileşiklerinin toksik eşdeğerlik faktörü cinsinden oluşum miktarları.	46
Çizelge 2.16. Kentsel atıkların bertarafı için plazma gazlaştırma, insinerasyon, piroliz ve klasik gazlaştırma yöntemlerine ait performans parametreleri.	47

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.17. Plazma gazlaştırma yönteminin atık bertarafında kullanımına yönelik mevcut deneysel çalışmalar.....	49
Çizelge 2.18. Plazma gazlaştırma yönteminin atık bertarafında kullanımına yönelik mevcut HAD simülasyonu çalışmaları.....	53
Çizelge 3.1. Yukarı akışlı plazma gazlaştırıcıya ait tasarım parametreleri.	57
Çizelge 3.2. Test edilen tıbbi atık numunesi ve yakıt karakteristiği.	67
Çizelge 3.3. Diğer deney koşulları ve gazlaştırıcı tasarım parametreleri.....	67
Çizelge 3.4. H ₂ , CO ve CH ₄ gazları için standart alt ısı değerler (LHV).	68
Çizelge 4.1. Eulerian akış hacminin modellenmesinde kullanılan denklemler.....	70
Çizelge 4.2. Lagrangian katı atık parçacıklarının modellenmesinde kullanılan denklemler.....	71
Çizelge 4.3. Kimyasal bileşikler için kütle, difüzyon, reaksiyon hızı ve üretim hızlarının hesaplanmasında kullanılan denklemler.	71
Çizelge 4.4. Homojen ve heterojen kimyasal reaksiyonlar ve kinetik parametreler. ..	72
Çizelge 4.5. Prototip gazlaştırıcıya ait nümerik model için tanımlanan sınır şartları.	74
Çizelge 4.6. Validasyon geometrisi için tanımlanan sınır şartları.....	76
Çizelge 4.7. Atık numunesinin kimyasal içeriği.	76
Çizelge 4.8. Prototip ve validasyon geometrileri için hücre yapıları.	78
Çizelge 5.1. Prototip gazlaştırıcı için deneysel olarak elde edilen sentez gazı içerikleri (ER=0.2).	81
Çizelge 5.2. Elde edilen sonuçların literatür verileri ile karşılaştırılması.	82
Çizelge 6.1. Farklı hücre yapıları için elde edilen sentez gazı içerikleri ve farklılık yüzdeleri.	88
Çizelge 6.2. Prototip gazlaştırıcı için gerçekleştirilen deneysel ve nümerik sonuçların karşılaştırılması.....	89
Çizelge 6.3. Simülasyondan elde edilen sentez gazı içeriklerinin referans çalışma ile karşılaştırılması.	91

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Temel tıbbi atık yönetimi aşamaları.....	9
Şekil 2.2. Plastikler için genel geri dönüşüm türleri.	16
Şekil 2.3. Hava kontrollü insinerasyon fırını.	20
Şekil 2.4. Fazla hava beslemeli insinerasyon fırını.	20
Şekil 2.5. Döner insinerasyon fırını.	21
Şekil 2.6. Kentsel ve tehlikeli atıklar için kurulan tipik insinerasyon tesislerine ait akış diyagramları. (a) Kentsel atık insinerasyon tesisi, (b) Tehlikeli atık insinerasyon tesisi.	22
Şekil 2.7. Vakumlu piroliz reaktörü.	25
Şekil 2.8. Kabarcıklı akışkan yataklı piroliz reaktörü.	26
Şekil 2.9. Yavaş, hızlı ve ani piroliz sonucunda elde edilen yan ürünlerin yüzdeleri. (a) Piroliz yağı, (b) Biyoçar, (c) Biyogaz.....	27
Şekil 2.10. Gazlaştırma prosesinin kullanılan iş akışkanına, ısıtma yöntemine, gazlaştırıcı tasarımına ve işletme basıncına göre sınıflandırılması.....	29
Şekil 2.11. Isıtma yöntemine göre gazlaştırma prosesleri. (a) Ototermal, (b) Allotermal.	31
Şekil 2.12. Temel gazlaştırıcı tasarımları. (a) Yukarı (ters) akışlı gazlaştırıcı, (b) Aşağı (aynı yönlü) akışlı gazlaştırıcı, (c) Çapraz akışlı gazlaştırıcı, (d) Akışkan yataklı gazlaştırıcı.	32
Şekil 2.13. Termal ve termal olmayan plazmalar için elektron yoğunluğu ve elektron sıcaklığı aralıkları.....	39
Şekil 2.14. Termal olmayan plazma sistemlere ait şematik diyagramlar. (a) DBD plazma, (b) Kayan ark plazma, (c) Mikrodalga plazma, (d) Akkor deşarj plazma, (e) Korona deşarj plazma, (f) Radyo frekans deşarj plazma.	41
Şekil 2.15. Tipik DC ark plazma torç konfigürasyonları. (a) Transfersiz ark plazma torç, (b) Transferli ark plazma torç.	42
Şekil 2.16. Tipik trifaze AC ark plazma torç konfigürasyonları. (a) Paralel akışlı AC ark plazma torç, (b) Normal akışlı AC ark plazma torç.....	43

Şekil	Sayfa
Şekil 2.17. Çeşitli plazma gazlaştırıcı konfigürasyonları. (a) Yukarı akışlı transfersiz DC ark plazma gazlaştırıcı, (b) Aşağı akışlı transfersiz DC ark plazma gazlaştırıcı, (c) Hareketli yataklı transfersiz DC ark plazma gazlaştırıcı, (d) trifaze AC ark plazma gazlaştırıcı.....	44
Şekil 3.1. Reaktör çapının belirlenmesinde kullanılan diyagram.....	56
Şekil 3.2. Test edilen laboratuvar ölçekli yukarı akışlı plazma gazlaştırıcı tasarımı. (a) Katı model, (b) Teknik resim.	57
Şekil 3.3. DC ark plazma torç tasarımı. (a) Katı model, (b) Teknik resim.	59
Şekil 3.4. Deney düzeneğine ait şema.....	65
Şekil 4.1. Üretilen yukarı akışlı plazma gazlaştırıcı prototipine ait nümerik model geometrisi.....	73
Şekil 4.2. Validasyon modeline ait geometri.	75
Şekil 4.3. Oluşturulan hücre yapıları. (a) Prototip gazlaştırıcı geometrisi, (b) Validasyon geometrisi.....	77
Şekil 6.1. Farklı hücre sayıları için reaktör ekseninde yükseklik boyunca elde edilen sıcaklık profilleri.	87
Şekil 6.2. Prototip gazlaştırıcı için $ER=0,2$ koşulunda gazlaştırıcı içerisinde HAD simülasyonu ile elde edilen sıcaklık dağılımı.	89
Şekil 6.3. Doğrulama simülasyonundan elde edilen sıcaklık dağılımı.	90
Şekil 6.4. Farklı ER değerleri için gazlaştırıcı merkez çizgisi boyunca elde edilen sıcaklık profilleri.	92
Şekil 6.5. Bütün ER koşulları için gazlaştırıcı içerisindeki sıcaklık konturları ve akış profilleri.	93
Şekil 6.6. HAD simülasyonları ile prototip gazlaştırıcı içerisinde elde edilen (a) H_2 , (b) CO, (c) CH_4 ve (d) H_2S bileşiklerinin dağılımları ($ER=0,2$).....	95
Şekil 6.7. Farklı ER değerleri için elde edilen sentez gazı içerikleri. (a) H_2 yüzdesi, (b) CO yüzdesi, (c) CH_4 yüzdesi, (d) H_2S yüzdesi	96
Şekil 6.8. Farklı ER değerleri için elde edilen performans parametreleri. (a) LHV, (b) KDO, (c) SGV.....	97

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 3.1. Gazlaştırıcı gövdesinin üretiminde kullanılan standart paslanmaz parçalar ve contalar.	60
Resim 3.2. Atık beslemesinde kullanılan redüktörlü asenkron motor ve helezon konveyör.....	60
Resim 3.3. Plazma güç kaynağı.	61
Resim 3.4. Reaktör ana gövdesinin imalatı.....	61
Resim 3.5. Üretilen plazma gazlaştırıcı sistemine ait resimler. (a) Yalıtımsız haldeki gazlaştırıcı, (b) Yalıtılmış haldeki gazlaştırıcı, (c) Alüminyum folyo ile kaplanmış gazlaştırıcı.....	62
Resim 3.6. Üretilen plazma torç ve oluşan plazma jete ait resim.	63
Resim 3.7. Deneyler esnasında kullanılan (a) debimetre ve k tipi termokupl ile (b) veri toplayıcı.....	64
Resim 3.9. Deney düzeneğine ait fotoğraf.	66

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	Açıklamalar
A_r	Ön eksponansiyel faktörü (-)
$\dot{B}_{\text{gazlaştırıcı}}$	Özgül gazlaştırıcı yükü ($\text{m}^3/\text{m}^2.\text{sa}$)
C_D	Sürüklenme katsayısı (-)
$C_{j,r}$	“r” reaksiyonundaki “j” bileşiğinin molar konsantrasyonu (-)
$D_{\text{boğaz}}$	Gazlaştırıcı boğaz çapı (m)
$D_{i,m}$	Kütle difüzyon katsayısı ($\text{m}^2.\text{s}^{-1}$)
$D_{\text{reaktör}}$	Gazlaştırıcı çapı (m)
D_{Helezon}	Helezon çapı (m)
d_p	Parçacık çapı (m)
E_r	Reaksiyon aktivasyon enerjisi (J/kgmol)
$\dot{E}_{\text{gazlaştırıcı}}$	Gazlaştırıcı ısı kapasitesi, termal gücü (kW)
$\dot{E}_{\text{motor}}$	Atık besleme motoru gücü (kW)
$\dot{E}_{\text{yakıt}}$	Gazlaştırma prosesi için gerekli yakıt gücü (kW)
$(\vec{F}_s)_q$	Parçacık için kaynak kuvvet terimi (N)
$\vec{F}_s$	Kaynak kuvvet terimi (N)
F_D	Sürüklenme kuvveti (N)
$\vec{g}$	Yerçekimi ivmesi (m/s^2)
G_b	Yerçekimi nedeniyle oluşan kinetik enerji (kJ)
G_k	Hız gradyanları ile oluşan kinetik enerji (kJ)
$H_{\text{gazlaştırıcı}}$	Reaktör yüksekliği (m)
h_q	Karışım halindeki uçucu gazın entalpisi (kJ/kg)
I	Birim stres tensörü (N/m^2)
I	Radyasyon yoğunluğu (W/sr)
$\vec{J}_i$	Difüzyon akısı ($\text{mol}.\text{m}^{-2}.\text{s}^{-1}$)
k	Türbülant kinetik enerji (kJ/kg)

Simgeler	Açıklamalar
K_i	Varsayılan gri gaz için absorpsiyon katsayısı (m^{-1})
$k_{f,r}, k_{b,r}$	“r” reaksiyonunun ileri ve geri reaksiyon hız sabitleri (-)
K_r	Denge sabiti (-)
$LHV_{atık}$	Atığın alt ısı değeri (MJ/kg)
$\dot{m}_{atık}$	Atık besleme miktarı (kg/sa)
$\dot{m}_{pq}, \dot{m}_{qp}$	Hücreye giren (pq) ve çıkan (qp) kütleli debi (kg/s)
n	Kırılma endeksi (-)
n_{mil}	Helezon devir sayısı (d/dak)
p	Basınç (Pa)
ppm	Her milyondaki partikül miktarı
$Q_{Helezon}$	Helezonun atık besleme kapasitesi (kg/dak)
$\vec{Q}_{pq}$	Hücrede gerçekleşen ısı transferi (kJ)
$\vec{q}_q$	Isı transferi (kJ/kg)
R	Üniversal gaz sabiti ($J.kgmol^{-1}.K^{-1}$)
$\vec{r}$	Pozisyon vektörü (m)
R_{gaz}	Özgül gazlaşma oranı (m^3/kg)
R_i	Net bileşik oluşum hızı ($mol.s^{-1}$)
s	Yol uzunluğu (m)
$\vec{s}$	Doğrultu vektörü (-)
$\vec{s}'$	Yayınım doğrultusu vektörü (-)
Sc_t	Türbülantif Schmidt sayısı (-)
$S_{helezon}$	Helezon vida adımı (m)
S_k, S_ϵ	Kullanıcı tanımlı kaynak terimleri
S_q	Kaynak enerji terimi (kJ)
T	Sıcaklık ($^{\circ}C$)
t	Zaman (s)
$t_{işletme}$	İşletme periyodu (sa)
T_L	İntegral zaman (s)
u_p	Parçacık hızı (m/s)
$\vec{u}_q$	Karışım halindeki uçucu gazın iç enerjisi (kJ/kg)

Simgeler	Açıklamalar
$V_{\text{gazlaştırmacı}}$	Gazlaştırmacı hacmi (m^3)
$\vec{v}_{pq}, \vec{v}_{qp}$	Hücreye giren (pq) ve çıkan (qp) kütlenin hızı (m/s)
$\vec{v}_q$	Karışım halindeki uçucu gazın hızı (m/s)
wt. %	Kütlece yüzde (kg/kg)
Y_M	Sıkıştırılabilir akış için genleşmenin toplam bozunmaya oranı (kJ)
Y_i	Bileşik kütle fraksiyonu (-)
α	Absorpsiyon katsayısı (m^{-1})
$\alpha_{\epsilon,i}$	Varsayılan gri gaz için yayınım ağırlık faktörü (-)
β_r	Sıcaklık eksponenti (-)
$Y_{\text{Yığın}}$	Atığın özgül yığın ağırlığı (kg/m^3)
ϵ	Türbülans yayılma oranı (m^2/s^3)
ϵ	Yayınırılık (-)
$\eta_{\text{gazlaştırmacı}}$	Gazlaştırmacı verimi (-)
$\eta_{j,r}$	“r” reaksiyonundaki “j” bileşiğinin reaksiyon hız derecesi (-)
η_{motor}	Elektrik motoru verimi (-)
μ, μ_t	Dinamik viskozite (Pa.s)
μ_t	Türbülantif viskozite (Pa.s)
ρ	Özkütle (kg/m^3)
ρ_p	Parçacık özkütlesi (kg/m^3)
ρ_q	Karışım halindeki uçucu gazın özkütlesi (kg/m^3)
Ω'	Görüş açısı ($^\circ$)
σ	Stefan-Boltzmann sabiti ($5,669 \times 10^{-8} \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-4}$)
$\sigma_k, \sigma_\epsilon$	Prandtl sayısı (-)
σ_s	Yayınım katsayısı (m^{-1})
$\bar{\tau}_q$	Stres tensörü (N/m^2)
Φ	Faz fonksiyonu (-)
$\Psi_{\text{Yükleme}}$	Yükleme verimi (-)
∇	Vektörel diferansiyel operatörü

Kısaltmalar	Açıklamalar
ABS	Akrilonitril bütadien stiren
ASTM	Uluslararası Amerikan Test ve Materyalleri Topluluğu
CHW	Kimyasal atık
DAF	Kuru ve külsüz (Dry and ash-free)
DALY	Yeti yitimine ayarlanmış yaşam yılı
DC/AC	Doğru akım / Alternatif akım
EC	Avrupa Birliği Konseyi (European Commission)
EPA	Çevre Koruma Ajansı
ER	Eşdeğerlik oranı
eV	Elektron volt (10^4 K)
F	Kuvvet (N)
GWP	Küresel ısınma potansiyeli
h	Özgül entalpi (kJ/kg)
HAD	Hesaplamalı akışkanlar dinamiği
HHV	Üst ısı değeri (MJ/kg, MJ/m ³)
HpCDD	Heptaklorodibenzo-P-dioksin
HpCDF	Heptaklorodibenzo-P-furan
HxCDD	Heksaklorodibenzo-P-dioksin
HxCDF	Heksaklorodibenzo-P-furan
ICRC	Uluslararası Kızılhaç Komitesi
KDO	Karbon dönüşüm oranı
LCI	Yaşam döngüsü envanteri (Life cycle inventory)
LHV	Alt ısı değeri (MJ/kg, MJ/m ³)
LHV	Yakıt alt ısı değeri (MJ/kg)
MSW	Kentsel atık
MW	Tıbbi atık
NBD	Net bugünkü değer
OCDD	Oktaklorodibenzo-P-dioksin
OCDF	Oktaklorodibenzo-P-furan
PA	Poliamid
PAH	Polisiklik aromatik hidrokarbonlar
PC	Polikarbon

Kısaltmalar	Açıklamalar
PCDD	Poliklorlu dibenzodioksin
PCDF	Poliklorlu dibenzofuran
PE	Polietilen
PET	Polietilen terafitalat
PnCDD	Pentaklorodibenzo-P-dioksin
PnCDF	Pentaklorodibenzo-P-furan
PP	Polipropilen
PS	Polistiren
PU	Poliüretan
PVC	Polivinil klorür
RDF	Atıktan türetilmiş yakıt
RF	Radyofrekans deşarj
SGV	Soğuk gaz verimi
SS	Arıtma çamuru
TCDD	Tetraklorodibenzodioksin
TCDF	Tetraklorodibenzofuran
TEF	Toksik eşdeğerlik faktörü
WHO	Dünya Sağlık Örgütü (World Health Organization)
WWF	Dünya Doğayı Koruma Vakfı (World Wildlife Fund)

1. GİRİŞ

Tıbbi atıklar, konvansiyonel bertaraf yöntemleri kullanıldığında yüksek toksik kirletici emisyonların oluşumu, kesici-delici atıkların bulunması ve enfeksiyon risklerinin bulunması nedeniyle tehlikeli atıklar sınıfında değerlendirilmektedir. 2002 ve sonrasında yaşanan 3 farklı salgın dönemi ile birlikte (2002'deki SARS-CoV-1, 2012'deki MERS-CoV ve 2019'dan itibaren yaşanan COVID-19 salgınları), dünyanın her yerindeki tıbbi atık üretiminde nüfus artışından bağımsız olarak ciddi artışlar gözlenmiştir. Koronavirüs salgınının ilk 70 günü içerisinde Wuhan'daki tıbbi atık üretiminin %600 oranında artarak şehrin maksimum insinerasyon kapasitesini aşması (Klemeš, Van Fan, Tan ve Jiang, 2020), diğer Asya ülkelerindeki bazı yerleşim yerlerinde %30'a kadar artışların yaşanması (Kojima, Iwasaki, Johannes ve Edita, 2020) ve dünya çapında tıbbi atıkların bertarafı için öngörülen maliyetlerin 2026'ya kadar %5,3 seviyelerine çıkmasının beklenmesi (Singh, Ogunseitan ve Tang, 2022), tıbbi atıkların etkin bir şekilde bertarafının hem enerji, hem sürdürülebilirlik, hem de çevresel açıdan önemini göstermektedir.

Tıbbi atıklar, tıpkı kentsel atıklarda olduğu gibi, atıktan enerji üretimi (waste-to-energy) uygulamalarında yakıt olarak kullanılabilir potansiyele sahiptir (Li ve Jenq, 1993). Öte yandan klasik insinerasyon, piroliz ve gazlaştırma yöntemlerinde enerji verimliliğinin düşük olması, yüksek kurulum ve işletme maliyetlerine neden olması, yüksek miktarlarda dioksin ve furanların oluşumuna (PCDD-PCDF) sebebiyet vermesi, küllerin toprağa serilerek bertarafının gerekliliği gibi önemli dezavantajları bulunmaktadır. Öte yandan plazma gazlaştırma yöntemi, diğer atıktan enerji üretimi yöntemlerine kıyasla daha yüksek enerji verimliliği, daha düşük maliyetler ile birlikte daha kısa geri ödeme süreleri ve oldukça az miktarda PCDD-PCDF oluşumu sağlayabilmekte olup, günümüzde tıbbi atıkların bertarafı için etkili bir alternatiftir. Ancak, düşük emisyonları ve ekonomik açıdan uygulanabilir olması sayesinde tıbbi atıkların yerinde bertarafına imkan tanıyabilecek plazma gazlaştırma teknolojisi için farklı gazlaştırıcı tasarımlarına, tasarım metodolojilerine, işletme verilerine ve plazma gazlaştırma yönteminin tıbbi atıkların bertarafında sağlayabildiği sistem performansına yönelik kapsamlı araştırmaların sayısı oldukça sınırlıdır (Cai ve Du, 2021). Bu nedenle, plazma gazlaştırma sisteminin tıbbi atıkların bertarafında yaygın bir şekilde uygulanabilmesi ve tasarım zorluklarının giderilebilmesi için daha fazla araştırmaya ihtiyaç duyulmaktadır.

Bu çalışmada, tıbbi atıkların, özgün tasarıma sahip bir yukarı akışlı (updraft) plazma gazlaştırıcı içerisindeki gazlaştırma karakteristikleri deneysel ve nümerik olarak incelenmiş, oluşturulan sistemin tıbbi atık bertarafındaki çeşitli performans parametrelerinin değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Gazlaştırıcının tasarım aşamasında temel boyutlandırmaların yapılabilmesi için literatürde mevcut olan biyokütle gazlaştırıcı tasarımına yönelik olarak kullanılan pratik bağıntılar kullanılmıştır. Gazlaşma karakteristiğinin daha etkin bir şekilde incelenebilmesi için reaktör geometrisi ANSYS FLUENT yazılımı ile modellenerek hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) simülasyonları gerçekleştirilmiş, uygulanan nümerik model literatürde mevcut olan veriler ve elde edilen deneysel veriler kullanılarak doğrulanmıştır. Çalışmada incelenen atık numuneleri pamuklu sargı bezi, kan torbası, tıbbi atık torbası ve nitril eldiven gibi genel tıbbi tüketim malzemelerinin içeriğini oluşturan malzemelerin karışımının granülize edilmiş haliyle elde edilmiş olup, hazırlanan temsili tıbbi atık numunesinin gazlaşma karakteristiği $ER=0,1$, $ER=0,2$, $ER=0,3$ ve $ER=0,4$ koşulları altında incelenmiştir. Deneyler esnasında sentez gazı içeriği, enerji tüketim verileri ve işletme parametreleri incelenmiş, elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir. Laboratuvar ölçekli olarak tasarlanan prototip Gazi Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Akışkanlar Mekaniği Laboratuvarı içerisinde test edilmiştir. Yapılan çalışma Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından FYL-2021-7057 kodlu “Tıbbi atıkların plazma gazlaştırma yöntemi ile bertarafı” başlıklı proje ile desteklenmiştir.

Tez çalışması “Giriş”, “Literatür Taraması”, “Plazma Gazlaştırıcı Deney Düzeneklerinin Tasarımı ve Üretimi”, “Nümerik Simülasyon”, “Deneysel Bulgular”, “Nümerik Simülasyon Bulguları” ve “Sonuç ve Öneriler” şeklinde 7 ana bölümden oluşmaktadır. “Literatür Taraması” bölümünde tıbbi atıkların karakterizasyonu, mevcut bertaraf yöntemleri, plazma gazlaştırma yöntemi, tıbbi atıkların plazma gazlaştırma yöntemi ile bertarafı, gazlaştırıcı tasarımı ve nümerik simülasyonlarına yönelik literatürdeki mevcut çalışmaların kapsamlı bir incelemesi bulunmaktadır. “Plazma Gazlaştırıcı Deney Düzeneklerinin Tasarımı ve Üretimi” bölümünde, çalışma kapsamında kullanılan laboratuvar ölçekli plazma gazlaştırma sisteminin tasarımı, üretimi, kurulumu ve kullanılan ölçüm yöntemlerine yönelik bilgiler yer almaktadır. “Nümerik Simülasyon” bölümünde, gazlaştırıcının modelleme yaklaşımları, kullanılan matematiksel denklemler, geometrik modelleme gibi modelleme süreçleri aktarılmıştır. “Deneysel Bulgular” ve “Nümerik Simülasyon Bulguları” bölümlerinde, elde edilen deneysel bulgular, karşılaşılan tasarımsal ve deneysel hatalar ile birlikte HAD

simülasyonlarına ait sonuçlar paylaşılmıştır. “Sonuç ve Öneriler” kısmında ise çalışma ile elde edilen sonuçlar detaylı bir şekilde ele alınmış ve gelecekte yapılabilecek çalışmalar belirtilmiştir.

2. LİTERATÜR TARAMASI

2.1. Tıbbi Atıklar ve Sınıflandırılması

Tıbbi atıklar, Dünya Sağlık Örgütü (WHO), Uluslararası Kızılhaç Komitesi (ICRC), Avrupa Birliği Konseyi (EC) vb. kuruluşlar tarafından “Tehlikeli Atıklar” sınıfında değerlendirilmekte olup, genellikle içeriklerinde kesici-delici atıklar, anatomik atıklar, enfekte atıklar, farmasötik atıklar, sitotoksik atıklar, ağır metal içerikli atıklar, kimyasal atıklar, basınçlı gaz tüpleri ve radyoaktif atıklar bulunduğu belirtilmektedir (Twinch, 2011; WHO, 1998; Directive EU, 2000). Çizelge 2.1’de tıbbi atıklarda bulunan bu içeriklerin kaynakları örneklerle listelenmiştir. Literatürde bulunan araştırmalara göre ise içeriğinde fiziksel olarak %54’e kadar kağıt atıklar, %20’ye kadar tekstil atıkları, %26’ya kadar organik atıklar, %50’ye kadar plastik atıklar, %10’a kadar metal içerikli atıklar, %15’e kadar ise cam içerikli atıklar mevcut olup, yakıt karakteristiği açısından yapılan elementel analizlere göre %35’e kadar karbon (C), %15’e kadar hidrojen (H), %16’ya kadar azot (N), %26’ya kadar oksijen (O), %1’e kadar sülfür (S) ve %3’e kadar klor (Cl) bulunmaktadır. Isıl değeri 3.900 kcal/kg (16,32 MJ/kg) dolaylarındadır (Deng, Zhang ve Wang, 2008; Li ve Jenq, 1993). Özellikle patolojik atıklar gibi organik içeriği yüksek türleri ısı değeri daha fazla olmakta (36,93 MJ/kg’a kadar), nem oranı ise genellikle %62’ye kadar çıkmaktadır (Taghipour ve Mosaferi, 2009).

Çizelge 2.1. Tıbbi atık türleri ve kaynakları (WHO, 2019).

Atık Türü	Kaynakları
Enfekte atık	Laboratuvar kültürleri, izolasyon odaları, yoğun bakım üniteleri, ameliyathaneler, temizleme bezleri, enfekte hastaların vücut sıvıları vb. patojen içerikli maddeler.
Patolojik atık	Hastaların vücut sıvıları, dokuları veya organları
Kesici-delici atık	Şırıngalar, bıçaklar, kırık camlar veya kırık plastikler
Farmasötik atık	Tarihi geçmiş ilaçlar ve kullanılmış ilaçları saklamak için kullanılan şişe veya kutular
Genotoksik atık	Kanser terapisi esnasında üretilen sitostatik ilaçların kalıntıları, genotoksik kimyasallar ya da DNA’ya hasar verebilecek bileşikler içeren atıklar
Kimyasal atık	Laboratuvarda kullanılan kimyasal reaktif türler, tarihi geçmiş dezenfektanlar, çözeltiler vb. kimyasal içerikli atıklar

Çizelge 2.1. (Devamı) Tıbbi atık türleri ve kaynakları.

Ağır metal içerikli atık	Pil, batarya, kırık termometreler, kan basınçölçerleri vb. metal içerikli atıklar
Basıncılı tüpler	Gaz tüpleri, gaz kartuşları, sprey tüpleri vb. kullanılmış tüp ve konteynırlar
Radyoaktif atık	Hastalardan alınan ve radyoaktif çekirdekli cihazlar tarafından analiz edilen kültür ve vücut sıvıları gibi laboratuvar analizleri sonrasında kalan radyoaktif içerikli atıklar

Sahip oldukları yüksek yanıcı madde miktarı, son yıllarda üretiminde yaşanan artışlar ve karakteristiğindeki değişimlerle birlikte tıbbi atıklar, yakıt karakteristikleri, sürdürülebilirliği ve enerji üretim potansiyeli açısından atıktan enerji üretimi uygulamalarında kentsel atıklara yakın özelliklere sahiptir. Ancak, taşıdığı yüksek enfeksiyon risklerinin yanı sıra, yüksek plastik içeriği sebebiyle bertarafı esnasında açığa çıkan dioksin ve furanlar (PCDD-PCDF) yüksek kanser riskleri barındırmaktadır. WHO'nun yayınladığı raporda, tıbbi atıkların bertarafı esnasında açığa çıkan PCDD-PCDF emisyonlarının insan sağlığı üzerindeki riskleri, toksik eşdeğerlik faktörüne (TEF) göre değerlendirilmiş olup, her bir bileşiğin TEF değerleri Çizelge 2.2'de verilmiştir. Bu nedenle, yakıt potansiyeli taşımaya karşın, yüksek kanser ve enfeksiyon riski taşımaları nedeniyle, tıbbi atıkların kentsel atıklar ile birlikte değerlendirilmesi mümkün olmamakta, kentsel atıklara kıyasla daha zor bertaraf edilmektedir.

Çizelge 2.2. Tıbbi atıkların bertarafı esnasında açığa çıkan PCDD-PCDF emisyonları için risk değerlendirmesi (WHO, 1998).

Bileşikler	TEF Değeri	Bileşikler	TEF Değeri
Dibenzo-p-dioksinler (PCDD'ler)		Dibenzofuranlar (PCDF'ler)	
2,3,7,8-TCDD	1	2,3,7,8-TCDF	0,1
1,2,3,7,8-PnCDD	1	1,2,3,7,8-PnCDF	0,05
1,2,3,4,7,8-HxCDD	0,1	2,3,4,7,8-PnCDF	0,5
1,2,3,6,7,8-HxCDD	0,1	1,2,3,4,7,8-HxCDF	0,1
1,2,3,7,8,9-HxCDD	0,1	1,2,3,6,7,8-HxCDF	0,1
1,2,3,4,6,7,8-HpCDD	0,01	1,2,3,7,8,9-HxCDF	0,1
OCDD	0,0001	2,3,4,6,7,8-HxCDF	0,1
		1,2,3,4,6,7,8-HpCDF	0,01
		1,2,3,4,7,8,9-HpCDF	0,01
		OCDF	0,0001

2.1. Tıbbi Atık Yönetimi

Tıbbi atıklar, hastanelerde üretilen tüm atıkların genellikle %15'ini oluşturmakta olup, hastanenin atık üretim karakteristiklerine göre bu oran %35'lere kadar çıkmaktadır (Shareefdeen, 2012; Deng ve diğerleri, 2014). COVID-19 pandemisi sürecinde yapılan araştırmalara göre dünyadaki atık üretiminde minimum 210 ton/gün civarında artış gerçekleşmiştir (Kalina ve Tilley, 2020). Yalnızca yatak başına üretilen tıbbi atık miktarları ise 2000, 2009, 2011 ve 2017 yıllarında sırasıyla 0,43 , 0,63 , 2,11 ve 1,68 kg/yatak.gün olarak bulunurken (Korkut, 2018; Birpınar, Bilgili ve Erdoğan, 2009; Eker ve Bilgili, 2011); yapılan bir araştırmada yalnızca İstanbul'da üretilen tıbbi atık miktarlarının 2002-2017 yılları arasında doğrusal bir şekilde yaklaşık 20.000 ton artış gösterdiği, toplam tıbbi atık üretiminin ise 2024'ün sonuna kadar 50.000 ton civarına çıkabileceği belirtilmiştir (Ceylan, Bulkan ve Elevli, 2020). Salgın dönemlerinde enfekte atık miktarlarının artması, COVID-19 virüsü gibi üst solunum yolu virüslerinin 72 saate kadar yüzeylerde kalabilmesi (Ranjan, Tripathi ve Sharma, 2020) vb. unsurlar göz önünde bulundurulduğunda tıbbi atık emisyonlarının etkin bir şekilde kontrol edilmesinin önemi görülmektedir.

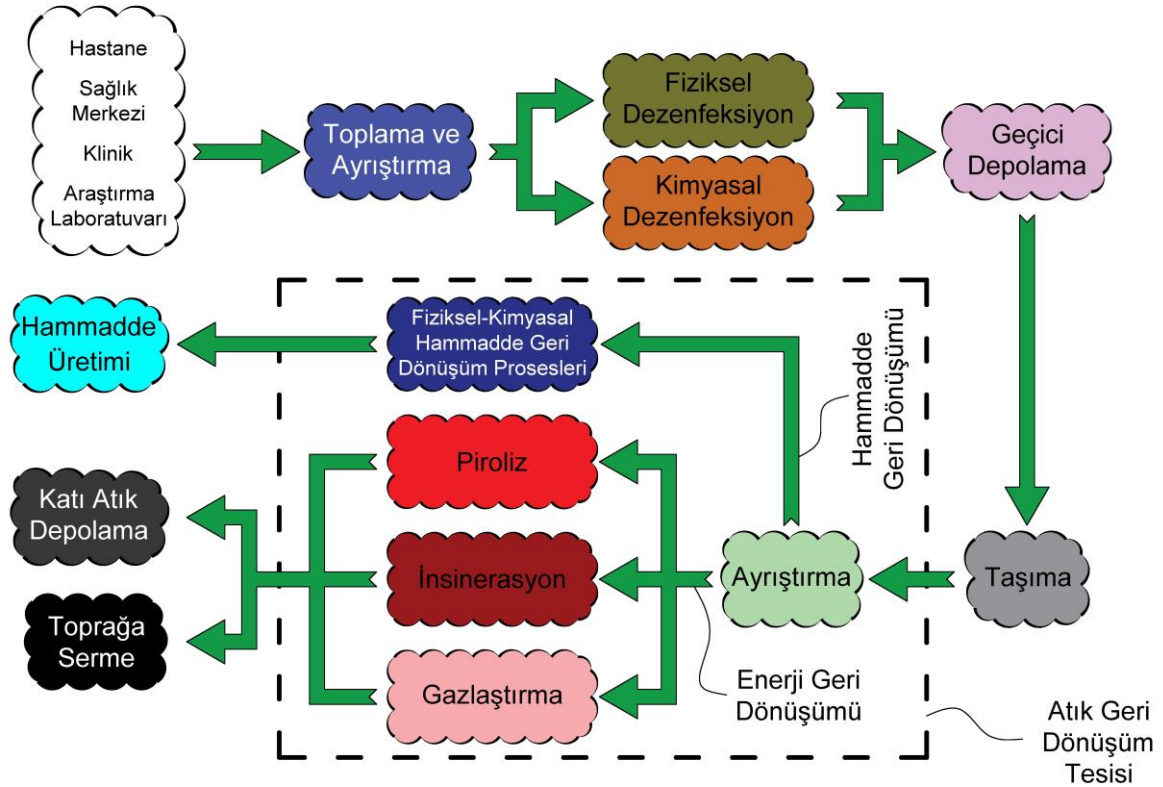
Tıbbi atık yönetiminin hem belediyelerce hem sağlık kuruluşlarınca etkili bir şekilde yapılması gerekmekte, ancak yüksek bertaraf maliyetleri, toplumsal faktörler vb. zorlukları nedeniyle her ülkede veya her kuruluş bünyesinde doğru bir şekilde yapılması mümkün olmamaktadır. WHO'nun 2005 yılında yaptığı araştırmaya göre, gelişmekte olan ülkelerdeki sağlık kuruluşlarının %18-%64'lük kısmı tıbbi atıkları doğru bir şekilde bertaraf edememekte ve ciddi tehditler oluşturmaktadır (WHO, 2005). Öte yandan, Hırvatistan'da tıbbi atıkların etkin yönetimi için her hastanede 5 yıllık atık yönetim planının mevcut olmasının kanunlar ile zorunlu hale getirilmesi önerilmiştir (Ma ve diğerleri, 2011). Birpınar ve diğerleri (2008) tarafından yapılan çalışmaya göre İstanbul'daki hastanelerin %98'i atık toplayan personel için eğitimler düzenlemekte; sağlık servislerinin yaklaşık %63'ü ayda 1, %31'i ise en az yılda 2 defa doktorları, hemşireleri ve teknik personeli için eğitimler düzenlemektedir. Bunun yanı sıra, bazı güvenilir kuruluşların ve ülkelerin özellikle salgın dönemlerinde tıbbi atık emisyonlarını kontrol altına alınabilmesi için yayınladıkları kılavuzlar ve yönergeler bulunmaktadır. Çizelge 2.3'te çeşitli kuruluşların ve ülkelerin COVID-19 salgını boyunca uyguladıkları bazı tıbbi atık yönetim stratejileri özetlenmiştir.

Çizelge 2.3. Ülke ve kurumların COVID-19 salgını boyunca tıbbi atıklar için yayınladıkları yönergeler.

International Solid Waste Association (ISWA)	• Çapraz kontaminasyonun önlenmesi için geri dönüşüm prosedürleri yenilenmelidir. • Artış yaşanan tıbbi atıklar ve hastane atıkları, daha fazla kirlilik ya da enfeksiyon riskleri barındırmadan güvenli bir şekilde arıtılmalı ve bertaraf edilmelidir. • Sosyal mesafe gözetilmelidir. • Uygun kişisel koruyucu ekipmanlar kullanılmalıdır.
WHO	• Enfekte olan veya enfeksiyon riski taşıyan hastaların izole edildiği odalardan toplanan hastane atıkları tayin edilen tıbbi atık konteyner ve torbalarında toplanmalı, ardından tercihen yerinde olmak üzere güvenli bir şekilde arıtılmalı veya bertaraf edilmelidir. • Uygun kişisel koruyucu ekipmanlar kullanılmalıdır. • COVID atıkları ancak yerinde uygun arıtma ve güvenli bertaraf işlemleri yapıldıktan sonra başka bir bölgeye taşınmalıdır. • Sosyal mesafe gözetilmelidir.
Occupational Safety and Health Administration (OSHA)(ABD)	• Halihazırda tehlikeli atık olarak değerlendirilenlerin haricinde koronavirüs ile kontamine olmuş atıklar için özel önlemlere gerek yoktur. • Atıkların doğranması gibi işlemlerden kaçınılmalıdır. • Uygun kişisel koruyucu ekipmanlar kullanılmalıdır. • Sosyal mesafe gözetilmelidir.
Environmental Protection Agency (EPA) (ABD)	• Tıbbi atık üretimi mümkün olduğunca azaltılmalıdır. • COVID-19 hastaları tarafından üretilen atıklar, evsel atıklardan ayrı bir şekilde toplanmalı ve bertaraf edilmelidir. • Geri dönüştürülebilir atıkların yeterli şekilde ayrıştırılması sağlanmalıdır. • Uygun kişisel koruyucu ekipmanlar kullanılmalıdır. • Geri dönüştürülebilir atıkların uzun süreli olarak depolanması değerlendirilmelidir.
Basel Convention	• Kontamine olmuş eldivenler, kullanılmış maskeler vb. tıbbi atık maddeleri tehlikeli atık sınıfında değerlendirilmeli ve ayrı bir şekilde bertaraf edilmelidir. • Yukarıdaki türden atıklar evsel atıklardan ayrı bir şekilde depolanmalıdır. • Atık toplama işlemi, atık yönetim personeli veya belediyeden görevlendirilen uzman personel tarafından yapılmalıdır.
EC	• Sağlık çalışanlarının ve COVID-19 hastalarının ürettiği eldiven ve koruyucu yüz maskeleri diğer atıklardan ayrı tutulmalı ve ayrıştırılmalıdır. • COVID-19 hastalarının izole edildiği odaların temizliği için kullanılan malzemelerin atıkları ayrılmamış atıklarla birlikte saklanmalıdır. • Uygun kişisel koruyucu ekipmanlar kullanılmalıdır. • Sosyal mesafe gözetilmelidir.

Çizelge 2.3. (Devamı) Ülke ve kurumların COVID-19 salgını boyunca tıbbi atıklar için yayınladıkları yönergeler.

Çin	- Arıtma ya da önleyici tedbirler sonucu üretilen tıbbi atıklar özel standartlarla birlikte tıbbi atık torbaları ve konteynırları kullanılarak gerçekleştirilmeli, uyarı işaretleriyle ayırt edilmeli ve tıbbi atık olarak değerlendirilmelidir. - Tehlikeli atıkları bertaraf eden insinerasyon tesisleri, geçerli sağlık otoritelerinin getirdiği yükümlülüklerle uygun bir şekilde işletilmelidir.
Japonya	- Enfekte olan, enfekte olmayan ve genel kullanım atıkları ayrılmalıdır. - Kesici-delici maddeler uygun bir konteyner ile diğer enfekte atıklardan ayrılmalıdır. - Kolay kullanıma sahip ve kırılması zor konteynırlar kullanılmalı ve sızdırmazlığı sağlanmalıdır.
İtalya	COVID-19 hastası olan veya risk taşıyan hastaların atıkları ayrı tutulmalı ve tıbbi atık olarak değerlendirilmeli, dolayısıyla çift katlı torbalarla toplanmalıdır.
Hindistan	- Evlerinde karantinede tutulanlar dahil, COVID-19 hastalarının kan ve vücut sıvılarını içeren atıklar sarı atık torbalarında toplanmalıdır. - Enfekte atıkların üstünde “COVID-19 Atığı” etiketi bulunmalıdır. - Taşıyıcı arabaların ve konteynerlerin iç ve dış yüzeyleri %1’lik sodyum hipoklorit (NaOCl) çözeltisi ile günlük olarak sterilize edilmelidir.



Şekil 2.1. Temel tıbbi atık yönetimi aşamaları (Olaniyi, Ogola ve Tshitangano, 2018).

Tıbbi atık yönetimi için genellikle uygulanan senaryo Şekil 2.1’de özetlenmiş olup, aşamalar aşağıda başlıklar halinde irdelenmiş, salgın dönemlerinde uygulanabilecek acil durum senaryoları örneklerle açıklanmıştır.

2.2.1. Toplama ve ayrıştırma

Kontamine olan tıbbi tüketim malzemeleri üzerinde virüslerin varlığı 7 gün boyunca kalabileceği bilinmektedir (Chin ve diğerleri, 2020). Bu nedenle, tıbbi atıkların doğru bir şekilde toplanması ve ayrıştırılması büyük önem taşımaktadır. Toplama ve ayrıştırma aşamasında hem yönetimler, sağlık çalışanları, hem de tıbbi atık personeli sorumludur. Dolayısıyla tıbbi atıkların etkin yönetimi için en başta atık üretiminin azaltımı, yeniden kullanılabilirliğin değerlendirilmesi, farklı türden atıkların ayrı kutularda toplanması (kesici-delici atıklar, cam atıklar, metal atıklar vb.), sağlık kuruluşlarındaki tüm çalışanlara atık yönetimi hakkında farkındalık kazandırılması ve tıbbi atık personelinin atık toplama-taşıma konusunda eğitilmesi gibi hususlar büyük önem arz etmektedir (ECDC, 2020). Öte yandan, atık ayrıştırma için farklı türde atıkların farklı kutularda toplanması stratejisi tam ve kesin çözüm olmamaktadır. Bu tesislerde genel olarak kros konveyör, otomatik kontrollü sistemler, ayıklayıcılar, balyalama makineleri gibi, atığın etkin ayrıştırılmasına yönelik mekanizmalar bulunmaktadır (He, Quan, Lin, Deng ve Tan, 2021). Ancak, atık ayrıştırma sistemlerine yönelik literatürde mevcut olan çalışmalar oldukça sınırlıdır.

2.2.2. Dezenfeksiyon

Atıkların toplanması ve ayrıştırılmasının ardından, atıkların geri dönüşüm tesisine götürülene kadar geçen sürede enfeksiyon risklerinin azaltımı amacıyla fiziksel veya kimyasal dezenfeksiyon prosesleri gerçekleştirilmektedir. Fiziksel dezenfeksiyon, mikrodalga ya da otoklav yöntemleriyle yapılmaktadır. Mikrodalga üniteleri 177-540°C aralığında çalışan, özellikle organik maddelerin dezenfeksiyonunda kullanılan sistemlerdir. Bu sistemlerin en büyük avantajı ısı kaybının düşük olması, düşük enerji tüketimine sahip olması, görece düşük sıcaklıklarda çalışabilmesi ve üst solunum yolu virüsleri üzerinde tam dezenfeksiyon sağlayabilmesidir (Wang ve diğerleri, 2020). Görece daha düşük ısılarda çalışan otoklavlar ise 95-180°C aralığında buharla dezenfeksiyon sağlayan sistemlerdir. Ancak, mikrodalga ünitelerine kıyasla dezenfeksiyon sağlanabilecek madde sayısı sınırlıdır (Maamari ve diğerleri, 2016). Kimyasal dezenfeksiyon yöntemleri ise klorlu ve klorsuz

olarak ikiye ayrılmaktadır. Klorlu sistemlerde sterilizatör bileşik olarak klor dioksit (ClO_2) veya sodyum hipoklorür (NaOCl) kullanılmakta olup, dezenfeksiyon prosesi esnasında dioksinlerin, virüslerin gideriminde oldukça etkili olmalarının yanı sıra klorlu aromatik karbonların ve asetik asitin oluşumuna sebep olmaktadır (Wang ve diğerleri, 2020). Öte yandan klorsuz sistemlerde ise hidrojen peroksit (H_2O_2) bileşiği kullanılırken, özellikle ultraviyole (UV) ışınlar ile birlikte kullanıldıklarında %95'e kadar giderim sağlanabilir (Iannotti ve Pisani, 2013).

2.2.3. Geçici depolama

Tıbbi atıkların hastane dışındaki atık geri dönüşüm tesislerine götürülmesine kadar geçen sürede geçici olarak depolanması gerekmektedir. Bu sebeple, genellikle hastane içerisinde tıbbi atıkların torbalanmış halde ya da konteynırlar içerisinde depolandığı alan ya da alanlar bulunmaktadır. Dolayısıyla tıbbi atık yönetim senaryoları oluşturulurken atık depolarının konumları, kapasiteleri, hava kalitesi, atıkların depolara taşınması, atıkların ayrıştırılarak depolanması, personelin yönergelere uyması vb. kıstaslar da irdelenmelidir. Tıbbi atıkların geçici depolanması aşaması için yönetim ve personel açısından yükümlülükler ile tasarımsal yükümlülükler Çizelge 2.4'de özetlenmiştir.

Öte yandan, yukarıda bahsedilen yükümlülüklerin tamamı bütün kuruluşlar tarafından sağlanamamaktadır. Yong, Gang, Guanxing, Tao ve Dawei (2009) tarafından yapılan araştırmaya göre Nankin'deki hastanelerin %93,3'ünde geçici depolama bölgeleri bulunmakta, Güney Brezilya'daki hastanelerin %85'inin tıbbi atıkları açık havada depolanmakta ve İran'da ise hastanelerin %80'inde geçici depolama alanı bulunmaktadır. Ancak, özellikle koronavirüs pandemisi ile birlikte, tıbbi atık yönetiminin her aşamasında olduğu gibi, geçici depolama aşamasında da farkındalık artmış ve ilave tedbirler alınmıştır. Geçtiğimiz pandemi dönemi ile birlikte bazı hastanelerde, tehlikeli tıbbi atıklar ile COVID-19 hastalarının ürettikleri enfekte atıkların farklı depolarda tutulması, alınan ilave tedbirlere bir örnektir (Peng ve diğerleri, 2020).

2.2.4. Taşıma

Tıbbi atıkların hastane bünyesinde ve geri dönüşüm tesislerine taşınması süreçleri, tıpkı geçici depolama süreçleri gibi, tıbbi atık yönetim stratejilerini ve tasarımsal kararları

etkileyen bir unsurdur. Hastane içerisinde tıbbi atıkların taşınması için önceden belirlenmiş ve genel kullanım alanlarından olabildiğince ayrılmış yolların kullanılması gerekmektedir. Bu amaçla, genellikle hastane içerisindeki kullanım alanlarından mümkün olduğunca ayrılmış koridorlar ve tıbbi atık asansörlerinin kullanılması gerekmektedir. Ayrıca tıbbi atıkların taşınmasından sorumlu personel, tıpkı diğer aşamalarda olduğu gibi, eğitimini almış olmalı ve koruyucu giysi ve ekipmanlar kullanmalıdır. Diğer aşamalarda olduğu gibi, tıbbi atıklar ile kentsel ya da endüstriyel atıklar birlikte taşınmamalıdır. Tıbbi atıkların toplanması ve geri dönüşüm tesisine götürülmesi için belediyeler, geri dönüşüm tesisleri ve hastane gibi atıkların taşınmasından sorumlu kuruluşlar toplama ve taşıma süreçlerini planlamalıdır. Oluşturulan planın takip edilmesi ve atıkların plana uygun bir şekilde geri dönüşüm tesislerine götürülebilmesi için çevrimiçi takip sistemleri geliştirilmiştir (Jang, Lee, Yoon ve Kim, 2006). Atıkların taşınması için belediyenin ve hastanelerin lojistik imkanlarının ve maliyetlerin de değerlendirilmesi gerekmektedir.

Çizelge 2.4. Geçici depolamada personel, yönetim ve tasarım açısından dikkat edilmesi gereken hususlar.

Yönetim ve Personel Yükümlülükleri *	Tasarım Yükümlülükleri**
• Kullanılan atık konteynırları ve atık torbaları ayırt edici renklere sahip olmalıdır. • Dolu atık torbaları depolarda bulunan sızdırmaz atık konteynırlarında saklanmalıdır. • Deponun güvenliğinden sorumlu bir personel bulunmalıdır. • Personel depolama esnasında koruyucu giysi ve ekipmanları kullanmalıdır. • Atıkların belediye araçları ile alınmasının ardından depo uygun bir şekilde temizlenmeli ve dezenfekte edilmelidir. • Standart olarak sıcak mevsimlerde 24 saat, soğuk mevsimlerde ise 48 saat olarak belirlenen maksimum geçici depolama süreleri aşılmamalıdır.	• Depolar güneş ışınlarına ve diğer dış etkenlere karşı korunaklı olmalıdır. • Bütün mevsimler boyunca ortam sıcaklığı 4°C değerini geçmemelidir. • Depo ile restoran, kafeterya, hasta odası vb. kullanım alanları birbirinden uzak olmalıdır. • Depolar kilitli tutulmalı ve ancak sorumlu personel girebilmelidir. • Zemin su geçirmez olarak tasarlanmalı ve etkili bir drenaj sistemine sahip olmalıdır. • İçeriden ve dışarıdan gelen araçların giriş-çıkışlarına izin vermelidir. • Tıbbi atıklar ve kentsel atıklar için ayrı depolar bulunmalıdır. • Deponun tasarımı temizliğin kolay yapılabilceği şekilde olmalıdır. • Etkin bir aydınlatma sistemi ve havalandırma sistemi bulunmalıdır. • Böcek, kuş vb. canlıların türemesini veya yuva yapmasını önleyecek şekilde tasarlanmalıdır. • Çevresinde en az 1 adet lavabo bulunmalıdır. • Atıkların insinerasyon prosesi ile bertaraf edildiği durumlarda deponun konumu ilgili tesise veya çöp yakma fırınına yakın olmalıdır.
* (Yong ve diğerleri, 2009; Yu, Sun, Solvang ve Zhao, 2020) ** (Balo ve Polat, 2021; Williams ve McLaren, 1990)	

2.2.5. Geri dönüşüm ve bertaraf

Sağlık tesisleri tarafından üretilen tıbbi atıkların %75 ila %90'lık kısmı tehlikesiz atık sınıfında olduğu (Liang ve diğerleri, 2021) ve tehlikeli atık sınıfında olan kısmında ise ağır metal, plastik vb. içerikli tüketim malzemeleri bulunduğu için, bertaraf seçeneğinin yanında geri dönüşüm ve yeniden kullanım alternatifleri de değerlendirilmelidir. Dünya Doğayı Koruma Vakfı'nın (WWF) yayınladığı raporda, salgın döneminde üretilen kullanılmış koruyucu yüz maskesi atıklarının yalnızca %1'inin doğaya yanlış bir şekilde salınması halinde, doğanın aylık 10 milyon maske atığıyla kirletileceği ve doğayı ciddi ölçüde tehdit edebileceğini belirtmiştir (WWF, 2020). Ancak, içeriğindeki enfekte atık türleri ve birçok farklı madde ile karıştığı için tıbbi atıkların içeriğindeki geri dönüştürülebilir maddelerin geri dönüşüm potansiyeli oldukça az olup, geri dönüşüm işçileri için ciddi enfeksiyon riskleri barındırmaktadır (Tenenbaum, 2020; Sharma ve diğerleri, 2020). Benzer şekilde, salgın dönemi ile birlikte sağlık örgütleri ve otoriteleri, enfeksiyon risklerinin önlenmesi ve toplum sağlığının riske atılmaması için bu tür atıkları enfekte atıklar olarak değerlendirmişler ve raporlarında yeniden kullanımının sakıncalı olduğunu belirtmişlerdir (WHO, 2020). Bu nedenle, günümüzde tıbbi atıklar çoğunlukla doğrudan bertaraf edilmekte olup enerji geri dönüşümü hedeflenmekte, oldukça sınırlı ölçüde hammadde geri dönüşümü sağlanmakta ve yeniden kullanım tercih edilmemektedir.

Tüm atık geri dönüşüm prosesleri için öncelikli olarak atıkların geri dönüşüm potansiyeli, geri dönüşüm maliyeti ve sağlanabilecek kazançların değerlendirilmesi gerekmektedir. Tıbbi atıklarda ise geri dönüşüm potansiyeli oldukça sınırlı olup, maliyetler genellikle yüksek olmakta, elde edilen kazanç ise düşük olmaktadır. Çizelge 2.5'te tıbbi atıklar için geri dönüşüm potansiyeli, geri dönüştürülebilir içerikler, geri dönüşüm maliyetleri ve kazanç potansiyelleri, tıbbi atık üreten departmanlara göre değerlendirilmiştir (Lee, Ellenbecker ve Moure-Eraso, 2002). Buna göre, tıbbi atık içeriğinde yalnızca kağıt, cam ve metal bulunan atıklar için geri dönüşüm potansiyeli bulunmakta olup, geri kalan içeriklerin geri dönüştürülmesi mümkün olmamaktadır. Bu tür atıkların geri dönüşümü için enfeksiyon risklerinin tamamıyla yok edilmesi gereklidir. Ayrıca uygulanacak geri dönüşüm prosesleri genellikle oldukça maliyetli ve zahmetlidir. Dolayısıyla, genellikle tıbbi atıklarda geri dönüşümün sağlanabilmesi için detaylı ekonomik ve çevresel analizlerin yapılması gerekmektedir.

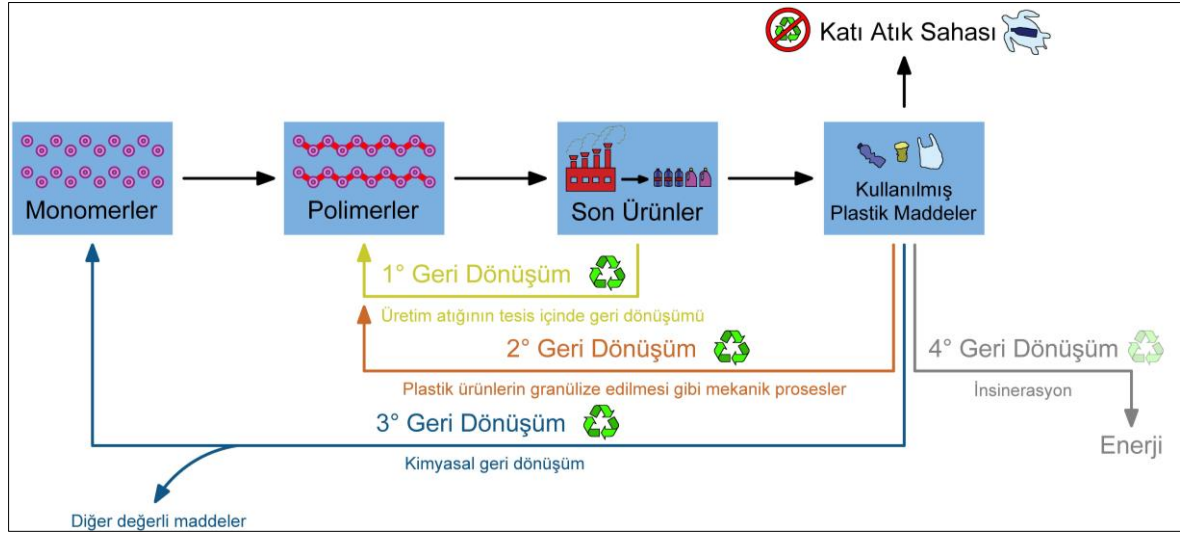
Çizelge 2.5. Tıbbi atıklarda geri dönüşüm potansiyeli (Lee ve diğerleri, 2002).

Atık Türlerine Göre Geri Dönüşüm Değerlendirmesi							
Atık İçeriği	Kağıt	Cam	Metal	Organik	Tekstil	Medikal	Kesici / Delici
Geri Dönüşüm Potansiyeli	Biraz	Biraz	Biraz	Yok	Yok	Yok	Yok
Departmanlara Göre Geri Dönüşüm Değerlendirmesi							
Departman	Geri Dönüşüm Potansiyeli		Geri Dönüşüm Maliyeti		Potansiyel Kazanç		
Ameliyathane	Yüksek		Yüksek		Orta		
Yoğun Bakım	Düşük		Yüksek		Düşük		
Acil Servis	Düşük		Yüksek		Düşük		
Laboratuvarlar	Orta		Orta		Düşük		
Hasta Odaları	Düşük		Yüksek		Düşük		

Metal geri dönüşümü için ayrıştırma işleminin ardından metalürjik prosesler ile atıkların içeriğinde bulunan metal hammaddelerin yüksek ısılara maruz bırakılarak metal fazında (sıvı ya da katı halde), cürufu (oksit bileşikler halinde) veya gaz fazında (buharlaşmış halde) toplanması sağlanmaktadır. Gerçekleştirilen prosesler ile metal içerikli atıklar saf metal halinde toplanabilmekte, alaşım elementi olarak değerlendirilebilmekte veya deoksidasyon proseslerinde kullanılabilir (Reck ve Graedel, 2012). Metalin tıbbi atıklarda geri kazanımı ise genellikle insinerasyon tesislerinde kırıcılar yardımı ile parçalanmasının ardından gerçekleştirilir. Atıkların yakılması esnasında açığa çıkan cürufun metalürjik proseslere tabi tutulması yoluyla ayrıştırılması ya da gaz temizleme prosesleri sonrasında kimyasal yöntemlerle tutulması, metallerin tıbbi atıklarda dönüşümü için uygulanabilmektedir. Bunun yanı sıra, kullanılamaz durumda olan elektrikli ekipmanların içeriğinde bulunan metallerin geri dönüşümü için asit liçi, siyanür liçi ve elektroliz gibi kimyasal prosesler de mevcuttur (Risco, Sucunza ve González-Egido, 2021). Bahsedildiği gibi, tıbbi atıkların yeniden kullanımı önerilmemesine karşın, doğru bir şekilde ayrıştırılmış ve etkili sterilizasyon veya dezenfeksiyon yöntemleri kullanılarak enfeksiyon vb. riskler giderildiğinde kullanılabilir durumda olan elektronik ekipman, konteyner vb. atıkların yeniden kullanımı değerlendirilebilmektedir.

Medikal uygulamalarda kullanılan plastikler ve kullanım alanları Çizelge 2.6’da verilmiş, geri dönüşüm aşamaları ise Şekil 2.2’de gösterilmiştir. Tıbbi atıkların içeriğindeki plastik atıklar çoğunlukla polietilen (PE), polivinil klorür (PVC), polistiren (PS), polipropilen (PP), polikarbon (PC), polietilen tereftalat (PET), poliamid (PA), poliüretan (PU) ve akrilonitril bütadien stiren (ABS) polimerlerinden oluşmaktadır. Plastik tıbbi atıkların geri

dönüştürülebilmesi için polimer türüne, rengine, şekline vb. göre etkili bir şekilde ayrıştırma işleminin yapılabilmesi gerekmektedir. Ayrıştırma işlemi için en etkili yöntem yakın kızılötesi sistemler (NIR) ve X-ray sistemleri olup, surfaktanlar, elektrostatik ayrıştırma, havayla ayrıştırma vb. yöntemlerle çalışan yoğunluğa göre ayrıştırma veya köpüklü yüzdürme gibi teknikler de kullanılabilir (Ruj, Pandey, Jash ve Srivastava, 2015). Plastik atıkların etkili bir şekilde toplanmasının ardından, geri dönüşümü için genellikle Şekil 2.2’de verilen 4 farklı geri dönüşüm türü uygulanmaktadır. Bunlardan birinci derece geri dönüşüm (1°), parçalanmış plastik atıkların orijinal tüketim malzeme ve ekipmanlarının üretiminde kullanılması anlamına gelmektedir (Örn; PET atığın polimerize edilerek yeniden pet şişe üretiminde kullanılması) (Al-Sabagh ve diğerleri, 2016). Mekanik geri dönüşüm olarak da bilinen ikinci derece geri dönüşüm (2°), ayrıştırma, dekontaminasyon, parçalama ve üretim işlemlerinden oluşmakta olup; parçalanmış plastik atık vidalı ekstrüzyon, enjeksiyonla döküm, savurmalı döküm vb. proseslerle işlenerek parça üretiminde kullanılabilir ve atığın kirletici oranına bağlı olarak mekanik özellikleri yeniden kazandırılmış olmaktadır (Örn; zemin karolarının parçalanmış poliolefin atıklarından üretilmesi) (Ragaert, Delva ve Van Geem, 2017). Üçüncü derece geri dönüşümde ise (3°) kimyasal geri dönüşüm söz konusudur. Kimyasal geri dönüşüm ile amaçlanan ilk alternatif, genellikle polimerler içerisinde bulunan petrokimyasal maddelerin yüksek sıcaklıklarda geri dönüşümünü sağlamak ve böylece hidrokarbon içerikli çeşitli sıvı ve gaz yakıtlar (sentez gazı) elde etmektir. Diğer bir alternatif ise plastik atığın monomerlerine ayrıştırılarak (depolimerizasyon) polimerlerin üretiminde yeniden kullanılmasıdır. Bu nedenle, 3° plastik geri dönüşüm prosesleri, hem geri dönüşüm prosesi, hem de bertaraf prosesi olarak tanımlanabilmektedir. Piroliz ve gazlaştırma prosesleri, plastik atıkların geri dönüşümünde kullanıldığında hem atıkların bertaraf edildiği hem enerji geri dönüşümü sağlanan, hem de faydalı yan ürünler veren 3° plastik geri dönüşüm yöntemleri olarak sınıflandırılabilir (Rubio, 2021). Son olarak dördüncü derece geri dönüşüm (4°) ise plastik atıkların kontaminasyonunun yüksek olduğu ve geri dönüşümün mümkün olmadığı durumlarda yakılarak bertaraf edilmesi (insinerasyon) işlemidir. Atıkların yakılması ile enerji geri dönüşümü sağlanabilmesine karşın enerji verimliliği düşük olmakta, çevre ve insan sağlığına zararlı birçok kirletici emisyon açığa çıkmakta ve yüksek işletme maliyetleri söz konusu olmaktadır. Dolayısıyla insinerasyon prosesinde verimli enerji geri dönüşümü sağlamaktan çok, katı atık hacmini minimum maliyetlerle maksimum oranda azaltımı amaçlanmaktadır (Kumar, 2021).



Şekil 2.2. Plastikler için genel geri dönüşüm türleri (Joseph, James, Kalarikkal ve Thomas, 2021).

Çizelge 2.6. Tıbbi atıkların içeriğinde yaygın olarak bulunan polimerler (Joseph ve diğerleri, 2021).

Özellik	Temel Ürünlerde Kullanılan Plastikler	Mühendislik Termoplastikleri	Diğer Polimerler
Tıbbi malzeme üretimindeki kullanım oranı	%70	%20	%10
Polimer türleri	PE, PP, PS, PVC	PA, PES, PC, PU, Akrilik, Asetal	PI, PSU, Biyopolimerler, ...
Üretilen tıbbi malzemeler	Tübaj, ambalaj, film, konnektör, laboratuvar ekipmanları, yüz maskesi, membran, dikiş ipliği, sonda, serum, flebotomi	Ameliyat malzemeleri, balon, kan alma setleri, kan oksijenatörü, şırınga, hareketli parça ve bileşenleri, sonda	Ameliyat malzemeleri, ameliyat tepsisi, şırınga, diş ve kemik implantları, elektronik ekipmanlar, biyoemici iplikler

2.2.6. Acil durum senaryoları

Tıbbi atık bertarafı için, genellikle Şekil 2.2’de verilen genel senaryonun uygulanmasına karşın, özellikle salgın şartlarında tesislerin atık bertaraf kapasitelerinin aşılması, lojistik altyapının yetersizliği vb. durumlarda acil durum tıbbi atık senaryolarının değerlendirilmesi gerekmektedir. Pelesaraei, Mohammadkashi, Naderloo, Abbasi ve Chau (2022), bertaraf

tesislerinin kapasitelerinin yetmediği durumlar için çözüm olarak Çizelge 2.7’de verilen 5 farklı acil durum bertaraf senaryosunu yaşam döngüsü envanteri (LCI) analizi, çevresel hasarları ve insan sağlığına verebileceği hasarlar ile birlikte değerlendirmişler, insan sağlığına verebileceği hasar “Yeti Yitimine Ayarlanmış Yaşam Yılı (DALY) (Paksoy Erbaydar, 2009)” birimiyle hesaplanmış, kaynaklarda yaşanan kayıplar ise USD2013 birimi (Huijbregts ve diğerleri, 2017) ile hesaplanmıştır. Buna göre, yalnızca beşinci senaryo (S-5) için net enerji üretimi yapılabilmekte olup; hava emisyonları açısından dioksin, azot oksit (NO_x), sülfür dioksit (SO_2) vb. oluşumu ve oluşacak atık su bertarafı yönünden bakıldığında 41,54 g’a kadar kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ) söz konusudur. İnsan sağlığına verilen hasar açısından karşılaştırıldığında ise tıbbi atıkların tehlikeli atıklar ya da kentsel atıklarla birlikte yakıldığında insan sağlığı açısından daha riskli olduğu ve bütün yöntemlerin en az 4×10^{-3} DALY seviyesinde tehdit oluşturduğu, kaynaklar açısından ise bütün senaryoların yaklaşık 1.260 USD değerinde mineral ve fosil kaynakların kaybına neden olduğu görülmektedir. Ancak, bütün bunların yanında, en azından atıklarla baş edilemeyen acil durumlar için Çizelge 2.7’de verilen atık miktarlarının bertarafı gerçekleştirilebilmekte ve merkezi insinerasyon tesislerinin yükü azaltılabilmektedir. Öte yandan, atık geri dönüşüm tesislerine olan mesafelerden dolayı lojistik altyapının yetersizliği söz konusu olabilmektedir. He ve diğerlerinin (2016) yaptığı araştırmada, Çin’de salgın döneminde oluşan ve ileride oluşabilecek lojistik altyapı yetersizliği sorununun çözümü için çeşitli senaryolar önerilmiştir. Çalışmada atıkların daha etkili bir şekilde taşınması amacıyla ara toplama istasyonları kurulması veya görece küçük ölçekli hastanelerin ürettiği atıkların büyük ve merkezi hastanelere nakledildikten sonra daha merkezi konumlardan toplanması gibi seçenekler değerlendirilmiştir (He ve diğerleri, 2016).

2.3. Atıktan Enerji Üretimi (Waste-to-Energy)

Tıbbi atıklarda geri dönüşüm çoğunlukla enerji geri dönüşümü olarak sağlanabilmektedir. Bu nedenle, tıbbi atık emisyonlarının etkili bir şekilde kontrol edilebilmesi ve kaynakların minimum kaybı için atıktan enerji üretimi alternatiflerinin değerlendirilmesi gerekmektedir.

Atıktan enerji üretimi için, Şekil 2.1’de gösterilen insinerasyon (yakma), piroliz ve gazlaştırma seçeneklerinin yanı sıra, plazma gazlaştırma gibi yenilikçi teknolojiler de mevcuttur. Ancak, klasik yöntemlerin anlaşılması, sahip oldukları avantaj ve dezavantajların değerlendirilmesi, yenilikçi sistemlerin geliştirilmesinde önemli bir rol oynamaktadır.

Dolayısıyla, bu bölümde klasik insinerasyon, piroliz ve gazlaştırma sistemleri ile birlikte tıbbi atık bertarafında kullanımları hakkında detaylı bilgiler ve yapılan araştırmalar paylaşılacaktır.

Çizelge 2.7. İnsinerasyon tesisi kapasitesinin yetmediği durumlar için 5 farklı acil durum senaryosu (Pelesaraei ve diğerleri, 2022).

Senaryo	Bertaraf Senaryosu	Bertaraf Kapasitesi	İşlem Sıcaklığı ve Süresi	Çevresel Hasar		
				İnsan Sağlığı (DALY)	Ekosistem (Bileşik/yıl)	Kaynaklar (USD2013)
S-1	Mobil insinerasyon araçları	5,1 ton/gün tıbbi atık	610-820°C’de çalışan insineratör ve 1.100-1.200°C’de çalışan ikincil yanma odası	$4,89 \times 10^{-3}$	$5,52 \times 10^{-5}$	1255,81
S-2	Buharlı sterilizasyon kabini	3,8 ton/gün tıbbi atık	124°C’de 65 dk	$4,61 \times 10^{-3}$	$4,61 \times 10^{-5}$	1254,33
S-3	Mobil mikrodalga sterilizasyon ekipmanı	10,5 ton/gün tıbbi atık	85°C üzerinde 47 dk	$4,05 \times 10^{-3}$	$4,56 \times 10^{-5}$	1245,70
S-4	Tehlikeli atıklarla birlikte yakma	10,5 ton/gün tıbbi atık ve 39 ton/gün yanıcı tehlikeli atık	950-1.100°C’de çalışan döner fırın içerisinde 1-2 saat	$5,09 \times 10^{-3}$	$5,73 \times 10^{-5}$	1267,59
S-5	Kentsel atıklarla birlikte yakma	140,4 ton/gün tıbbi atık ve 2707,5 ton/gün kentsel atık	960°C üzerinde 1,5-2 saat	$5,46 \times 10^{-3}$	$5,89 \times 10^{-5}$	1275,49

2.3.1. İnsinerasyon

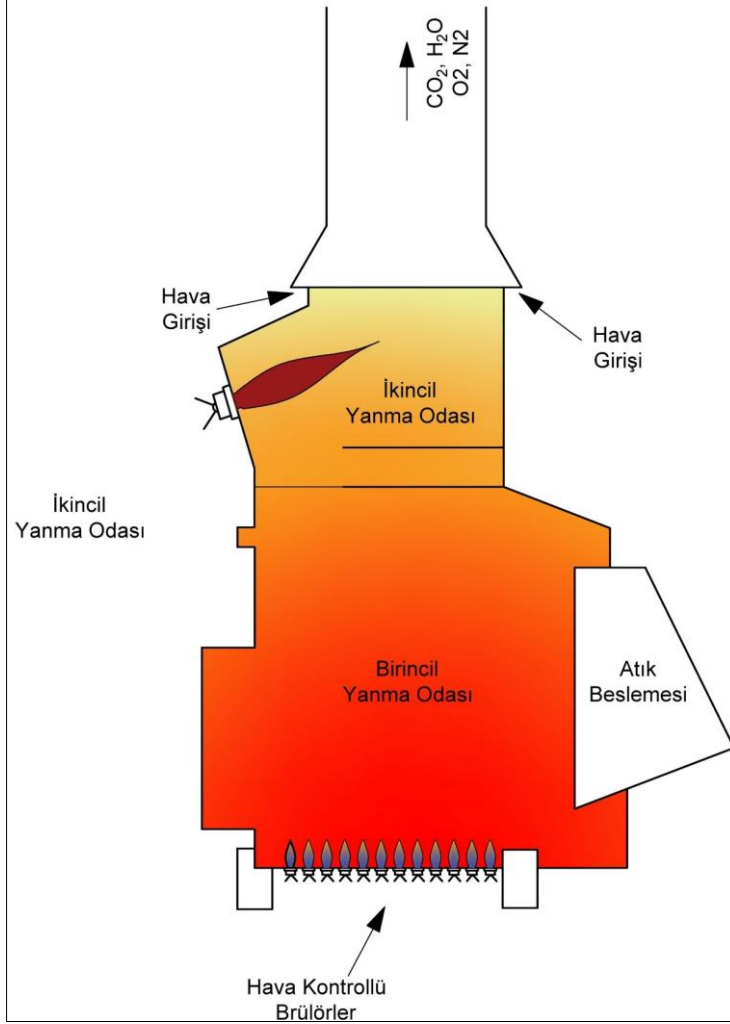
İnsinerasyon, atık yönetiminde uygulanan en eski ve en yaygın teknolojidir. Atıkların doğrudan çöp sahalarda depolanması veya toprağa gömülmesi (vahşi depolama) yerine insinerasyon tesislerinde yakılarak kalıntı kül ve cürufun gömülmesi, katı atık hacminin %85-90, kütlesinin %60-90 ve organik madde içeriğinin %100’e kadar azalmasını sağlamaktadır (Zhang ve diğerleri, 2021). Dolayısıyla en eski atık bertaraf teknolojisi olması

ve sağladığı avantajları nedeniyle insinerasyon, günümüzde vahşi depolamadan sonra en sıklıkla tercih edilen yöntem olup, ürettiği emisyonların giderilmesi için araştırmalar devam etmektedir.

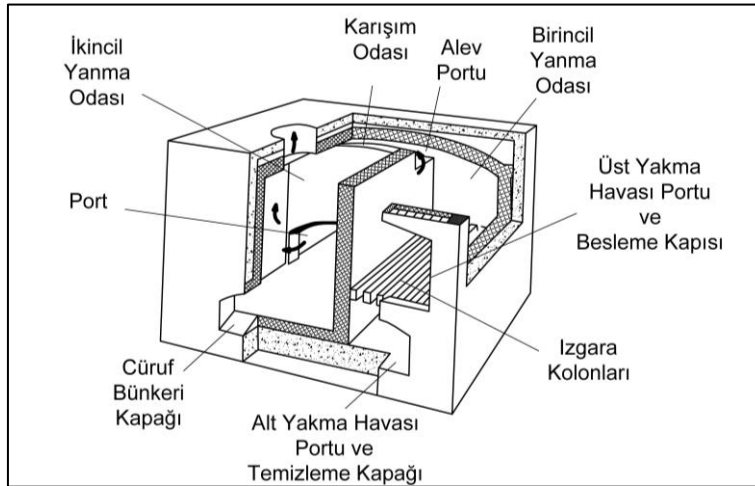
Tıbbi atıkların bertarafında en yaygın şekilde kullanılan insinerasyon fırınları; hava kontrollü fırınlar, fazla hava beslemeli fırınlar ve döner fırınlar olarak sıralanabilir. Şekil 2.3'te klasik bir hava kontrollü fırına ait şema verilmiştir. Modüler fırınlar olarak da bilinen hava kontrollü fırınlarda atıkların yakılması iki kademedede gerçekleşmektedir. İlk kademedede atıklar birincil yanma odasında daha düşük stokiyometrik hava ile yakılmakta olup, birincil yakma havası insinerasyon fırınının boğaz kısmının altından beslenmektedir. Birincil yanma odası içerisinde düşük hava-yakıt oranı ile gerçekleşen yanma prosesi sonucunda beslenen atıkların uçucu hale getirilmesi sağlanmakta ve kül içerisinde kalan karbonun büyük bir kısmı yanarak yok edilmektedir. İlk kademedede genelde 760-980°C civarındaki düşük sıcaklıklarda proses gerçekleşmektedir. İkinci kademedede ise birinci kademedede uçucu hale getirilen uçucu maddeler fazla hava ile 980-1.095°C sıcaklıklarda tamamen yakılmaktadır. İkinci kademedede gerçekleşen yakma prosesinin yetersiz kaldığı durumlarda ise, ikinci kademenin çıkışına ilave yakıcılar yerleştirilmektedir (EPA, 1993).

Klasik bir fazla hava beslemeli fırına ait şematik diyagram Şekil 2.4'te gösterilmiştir. Bu fırınlar genellikle küçük ve modüler üniteler olup, tipik olarak iç yanma odaları ve deflektörlerden oluşan kompakt bir küp şeklindedir. Sürekli işletme koşullarına uygun olmasına karşın, pratikte genellikle partiler halinde işletme modunda kullanılmaktadır. Bu fırınlarda atık beslemesi yanma odasına manuel olarak beslenmekte olup, beslemenin yapılmasının ardından besleme kapağı kapatılmakta ve ikincil yanma odası 870-980°C sıcaklıklara çıkarılmakta, akabinde birincil yanma odası ateşlenmektedir. Birincil yanma odasındaki ısı artışı ile birlikte yakılan atıklar kurutulmakta, içeriğindeki nem ve uçucu maddeler buharlaştırılmakta ve fırın içerisindeki geçiş kanalları ile deflektörler vasıtasıyla ikincil yanma odasına aktarılmaktadır. Besleme karakteristiği nedeniyle fazla hava beslemeli fırınlar genellikle kesintili atık beslemesi durumları için kullanılmakta olup, belirli saatler aralığında kesintili olarak atık bertarafı sağlanmaktadır. Tıbbi atıkların bertarafı söz konusu olduğunda fazla hava beslemeli fırınlar %300'e kadar fazla hava beslemesi ile işletilmekte olup, patolojik atıkların yakılması durumunda fazla hava yüzdesi tipik olarak %100 civarında olmaktadır. Yüksek nem içerikli atıkların yakılmasında daha düşük fazla hava

oranı ile işletme yapılması, sıcaklıkların yüksek mertebede tutulmasını sağlamaktadır (EPA, 1993).

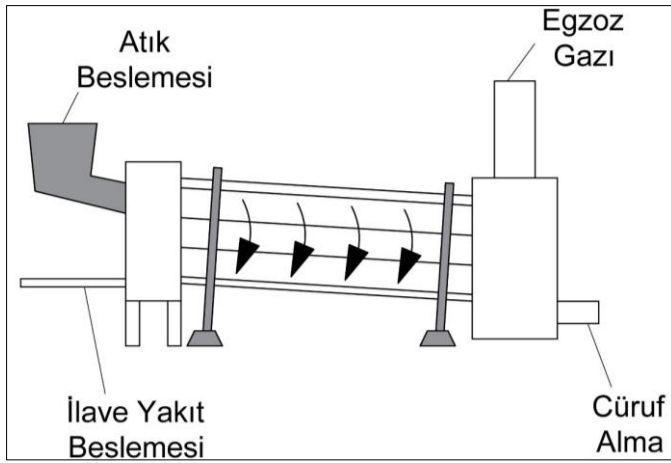


Şekil 2.3. Hava kontrollü insinerasyon fırını (EPA, 1993).



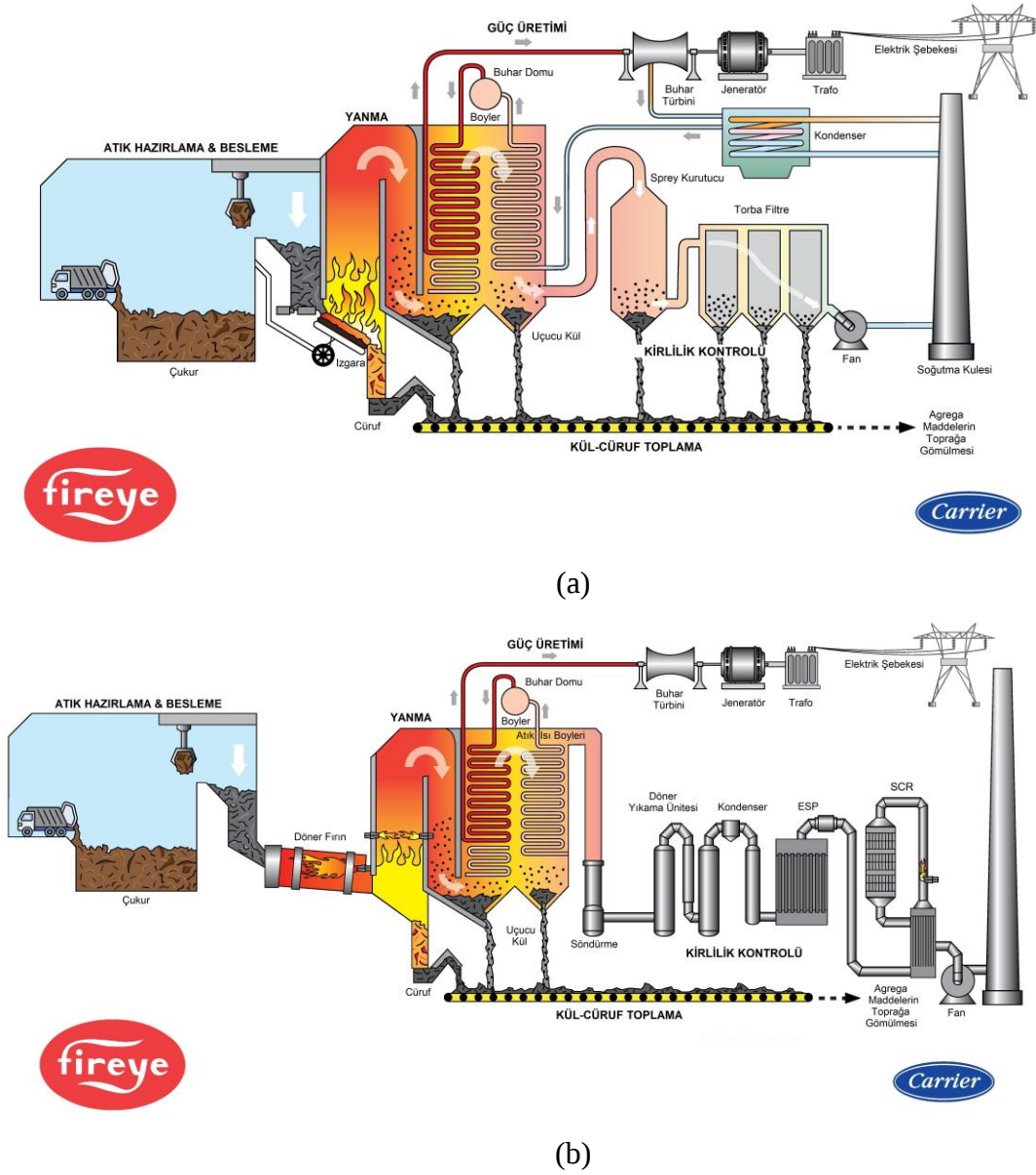
Şekil 2.4. Fazla hava beslemeli insinerasyon fırını (EPA, 1993).

Döner insinerasyon fırınına ait şematik diyagram Şekil 2.5'te gösterilmiştir. Diğer tip insinerasyon fırınlarında olduğu gibi, döner fırınlar da atığın ısıtıldığı ve uçucu hale getirildiği birincil yanma odası ile uçucu bileşiklerin tamamen yakıldığı ikincil yanma odası olacak şekilde tasarlanmaktadır. Bu fırınlarda yanma odası eğimli bir eksen etrafında 2-5 dev/dak hızlarla dönmekte olup (Ma ve diğerleri, 2011), beslenen atıklar eğim boyunca yakılmakta, fırının en alt noktasından ise kül toplanmaktadır. Birincil ve ikincil yanma odalarının her ikisinin de çeperleri aside karşı dayanıklı refrakter tuğlalardan yapılmaktadır (EPA, 1993). Döner fırınlarda 1.600-1.800°C civarındaki sıcaklıklar elde edilmekte, 0,5-3 ton/saat kapasitede atık bertaraf edilebilmektedir (Dharmaj ve diğerleri, 2021).



Şekil 2.5. Döner insinerasyon fırını (EPA, 1993).

Özellikle 2000'li yılların başına kadar tıbbi atıkların bertarafında kullanılan en yaygın sistemin hava kontrollü fırınlar olmasına karşın (EPA, 1993), son yıllarda açığa çıkardığı kirlетici emisyonlar nedeniyle tercih edilmemekte olup, yerini zaman içerisinde sağladığı yüksek insinerasyon kapasitesi, yüksek sıcaklıklar, güvenilirlik ve uzun işletme süresi nedeniyle döner fırınlar almıştır (Jiang, Li ve Yan, 2019). Yaygın olmayan diğer insinerasyon fırınları arasında çok boğazlı fırınlar, akışkan yataklı fırınlar ve bunların kombinasyonlarını içeren yaygın olmayan başka tür fırınlar da bulunmaktadır. Genellikle düşük maliyetlere ve işletme kolaylıklarına sahip olması nedeniyle hava kontrollü fırınlar veya döner fırınlar dünya çapında daha yaygın olarak kullanılmakta olmasına karşın (Klenowicz ve Darowicki, 2001); özellikle Avrupa ülkelerinde akışkan yataklı insinerasyon tesislerinin oranının %4,5 iken Çin'de bu rakamın %28,9 olması (Khan ve diğerleri, 2022); insinerasyon tesis türünün daha çok atık üretim karakteristiği, bölgesel işletme koşulları vb. parametrelere göre belirlenmesi gerektiğini göstermektedir.



Şekil 2.6. Kentsel ve tehlikeli atıklar için kurulan tipik insinerasyon tesislerine ait akış diyagramları (Carrier®, 2021). (a) Kentsel atık insinerasyon tesisi, (b) Tehlikeli atık insinerasyon tesisi.

Şekil 2.6’da kentsel ve tehlikeli atıklar için tipik insinerasyon proseslerine ait diyagramlar verilmiştir. Buna göre bir insinerasyon tesisinin ana bileşenleri atık hazırlama sistemi, atık besleme sistemi, yakma fırını, gaz yıkama sistemi, filtrasyon sistemi ve kül-cüruf toplama sistemlerinden oluşmaktadır. Atık hazırlama aşamasında atıklar, bunkerler içerisinde ayrıştırılıp kurutulduktan sonra, içeriğinde bulunan iri maddeler kırıcılar yardımı ile parçalanmakta ve yanıcı olmayan maddeler uzaklaştırılmakta, daha sonra konveyör ve vinçlerden oluşan atık taşıma sistemleri ile fırın içerisine taşınmaktadır. Yanma esnasında açığa çıkan ısı boiler aracılığıyla buhar üretiminde kullanılmakta, üretilen buhar türbinde

kullanılarak elektrik üretimi sağlanmaktadır. Yanma esnasında fırında üretilen uçucu kül ve tabanından alınan cüruf “birincil kirleticiler” olarak tanımlanırken, filtrasyon sisteminde toplanan ve periyodik olarak temizlenmesi gereken uçucu kül ise “ikincil kirleticiler” olarak tanımlanmaktadır. Kentsel atıkların bertarafında oluşan emisyonların kontrolünde genellikle sprey kurutucu ve torba filtre kullanılmasına karşın, özellikle tehlikeli atıkların açığa çıkardığı emisyonların kontrolü için elektrostatik filtre, seçici katalitik çöktürücü, kondenser, döner yıkama ünitesi vb. kompleks arıtma sistemlerine ihtiyaç duyulmaktadır.

Günümüzde insinerasyon teknolojisinin açığa çıkardığı baca gazı emisyonları, çeşitli baca gazı arıtma teknikleriyle kontrol altına alınabilmektedir. Ayrıca, atık hacminin büyük oranda azaltılabilmesi söz konusudur. Öte yandan, özellikle tıbbi atıkların bertarafı söz konusu olduğunda, insinerasyon tesislerinin yetersiz kaldığı hususlar bulunmaktadır. Bu hususlardan başlıcaları aşağıda listelenmiştir.

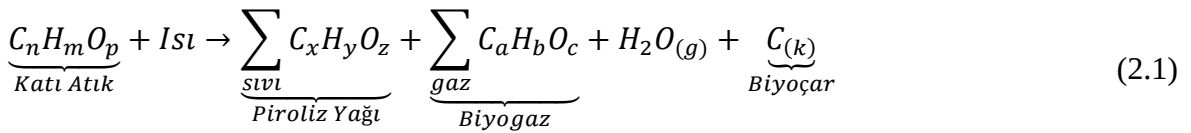
- Düşük Elektriksel Verim: Atık insinerasyon tesislerinde, gerek teknik, gerekse ekonomik kısıtlılıklar nedeniyle elektriksel verim genellikle düşük olup, %14-28 civarında elde edilmektedir (Singh ve Hachem-Vermette, 2019).

- Tehlikeli Madde İçerikleri: İnsinerasyon tesislerinde açığa çıkan birincil kirletici içeriğinde genellikle metal içerikler (Ar, Be, Cr, Pb, Hg, Co vb.), mineraller (Asbest, SiO₂ vb.), dioksinler (PCDD), furanlar (PCDF) ve polisiklik aromatik hidrokarbonlar (Antrasen, naftalin vb.) bulunmakta olup, modern tesislerin filtreleme sistemleri ile arıtılabilmesine rağmen bu sistemlerde toplanan ikincil kirleticiler tehlikeli atık sınıfında olduğu için yüksek arıtma maliyetlerine neden olmaktadır (Xue ve Liu, 2021). Özellikle filtrasyon sistemleri ile arıtılamayan, çevre ve insan sağlığı açısından yüksek risk teşkil eden PCDD/PCDF emisyonlarının oluşumu insinerasyon tesislerinde genellikle baca gazında 77-894 ng/Nm³, uçucu kül içeriğinde ise 69-4.915 µg/m³ olmaktadır (Das, Hazra ve Banerjee, 2020; Alvim Ferraz ve Afonso, 2003).

- Tıbbi Atıklar İçin Proses Zorluğu: Her ne kadar tıbbi atıklar için en yaygın olarak kullanılan yöntem insinerasyon olsa da, vücut sıvılarını içeren torbalar, organlar veya radyoaktif tüketim malzemeleri gibi bazı tıbbi atık türlerinin insinerasyon tesislerinde bertarafı oldukça zor olmakta ve prosesin her aşaması özel dikkat gerektirmektedir (Paulino, Essiptchouk, Costa ve Silveira, 2022).

2.3.2. Piroliz

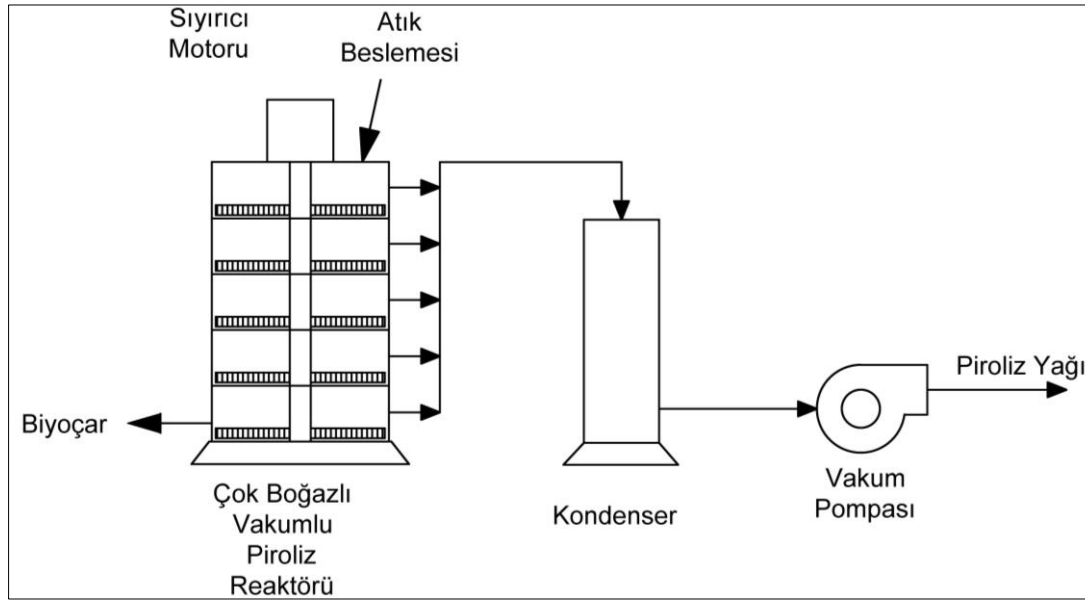
Kimyasal bir geri dönüşüm yöntemi olmasının yanı sıra, etkili enerji geri kazanım yöntemlerinden birisi olan piroliz yöntemi, yakıt karakteristiği taşıyan birçok türdeki atık maddeden enerji geri kazanımı sağlayan bir yöntemdir. İşlem sırasında, anaerobik (oksijensiz) ortamda bulunan karbon içerikli maddeye yüksek ısı verilmekte, maddenin kimyasal bağları kopartılarak termal yıkımı sağlanmakta ve proses sonucunda piroliz yağı, biyogaz, biyoçar vb. katı, sıvı ve/veya gaz halde yakıtlar elde edilebilmektedir (Sharifzadeh ve diğerleri, 2019). Buna göre, katı atıkların pirolizi esnasında gerçekleşen genel termokimyasal reaksiyon denklemi aşağıdaki gibi yazılabilir.



Yüksek katma değerli yakıtların ve çeşitli kimyasal maddelerin üretiminin sağlanabildiği bir yöntem olan piroliz, pratik bir şekilde uygulanabilirliği, yüksek geri dönüşüm verimleri, çevreciliği ve ucuzluğu nedeniyle insinerasyon sistemlerine güçlü bir alternatiftir.

Termal piroliz sistemleri proses hızına göre yavaş, hızlı ve ani piroliz sistemleri olarak üçe ayrılmaktadır. Yavaş piroliz yöntemlerinden en yaygın olanı vakumlu piroliz yöntemidir. Vakumlu piroliz sistemine ait proses diyagramı Şekil 2.7’de verilmiştir (Zhang ve diğerleri, 2019). Vakumlu piroliz reaktörlerinde beslenen atık, mekanik karıştırıcı yardımıyla karıştırıldıktan sonra metal bantlı konveyör vasıtasıyla yüksek sıcaklık ve 5 kPa basınç altındaki vakumlu oda içerisine taşınmakta olup, oda içerisindeki ısı brülörler vasıtasıyla dışarıdan yavaş ve genellikle kademeli bir şekilde ısıtılmakta ve atık beslemesi indüktif ısıtma ile eriyik tuzlar kullanılarak eritilmektedir. Bu sayede daha büyük partikül boyutlarında beslenen atıkların işlenmesi mümkün olmakta, ancak sızdırmazlığın sağlanabilmesi için prosese özel olarak tasarlanmış boşaltma ekipmanlarına uygun şekilde katı beslemesi yapılması gerekmektedir. Vakumlu piroliz sistemi ile elde edilebilen biyoyakıt oranı kütlege %30-50 civarında olup, biyoyakıt üretimi diğer sistemlere kıyasla daha azdır. Uçucu organik bileşik oluşumunun az olması ve düşük proses sıcaklıkları ile atıkların bertaraf edilebilmesi nedeniyle avantajlı olan vakumlu piroliz yöntemi, tasarımının oldukça karmaşık olması nedeniyle genellikle tercih edilmemektedir (Dharmaraj ve

diğerleri, 2021). Ek olarak, yavaş piroliz sistemi ile çeşitli atıklar üzerinde yapılan araştırmalarda elde edilen sonuçlar Çizelge 2.8’de gösterilmiştir (Lu, Chang, Poon ve Lee, 2020). Buna göre, yavaş piroliz sisteminin düşük sıcaklıklarda çalışabildiği ve faydalı yan ürün oluşumunun oldukça fazla olduğu görülmektedir. Öte yandan, atık karakteristiğine göre elde edilen çıktılar oldukça değişkenlik göstermekte, dolayısıyla atık içeriğine göre tasarım zorlaşmaktadır.

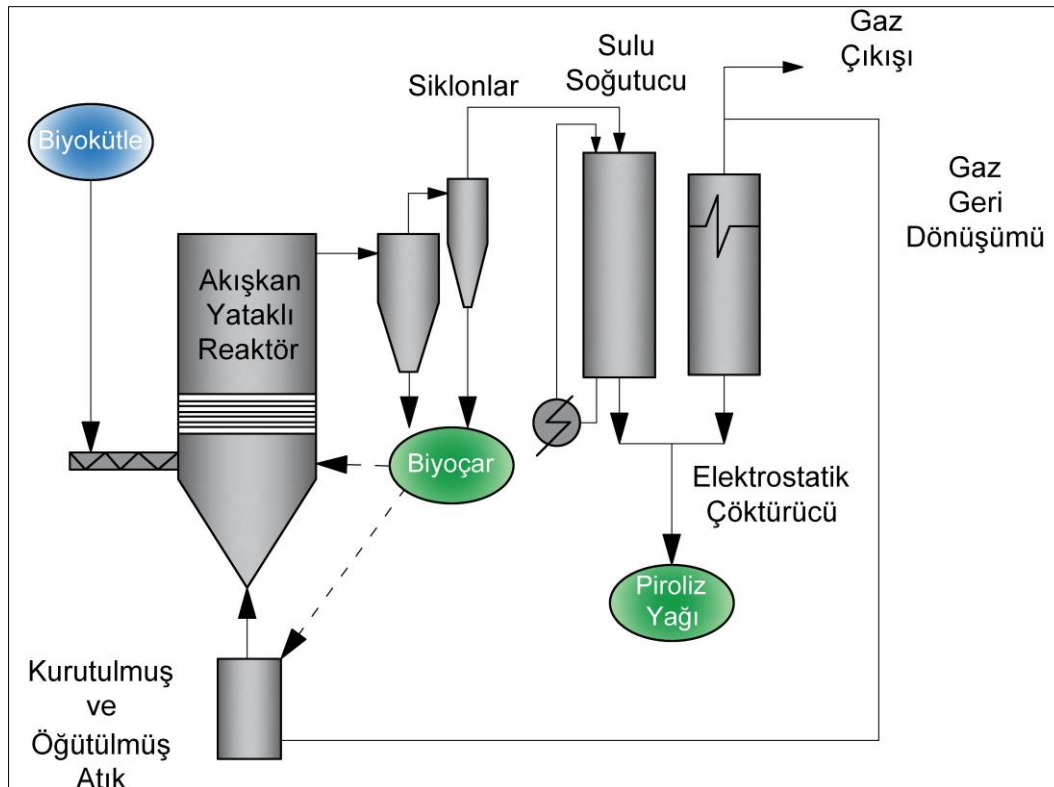


Şekil 2.7. Vakumlu piroliz reaktörü (Zhang ve diğerleri, 2019).

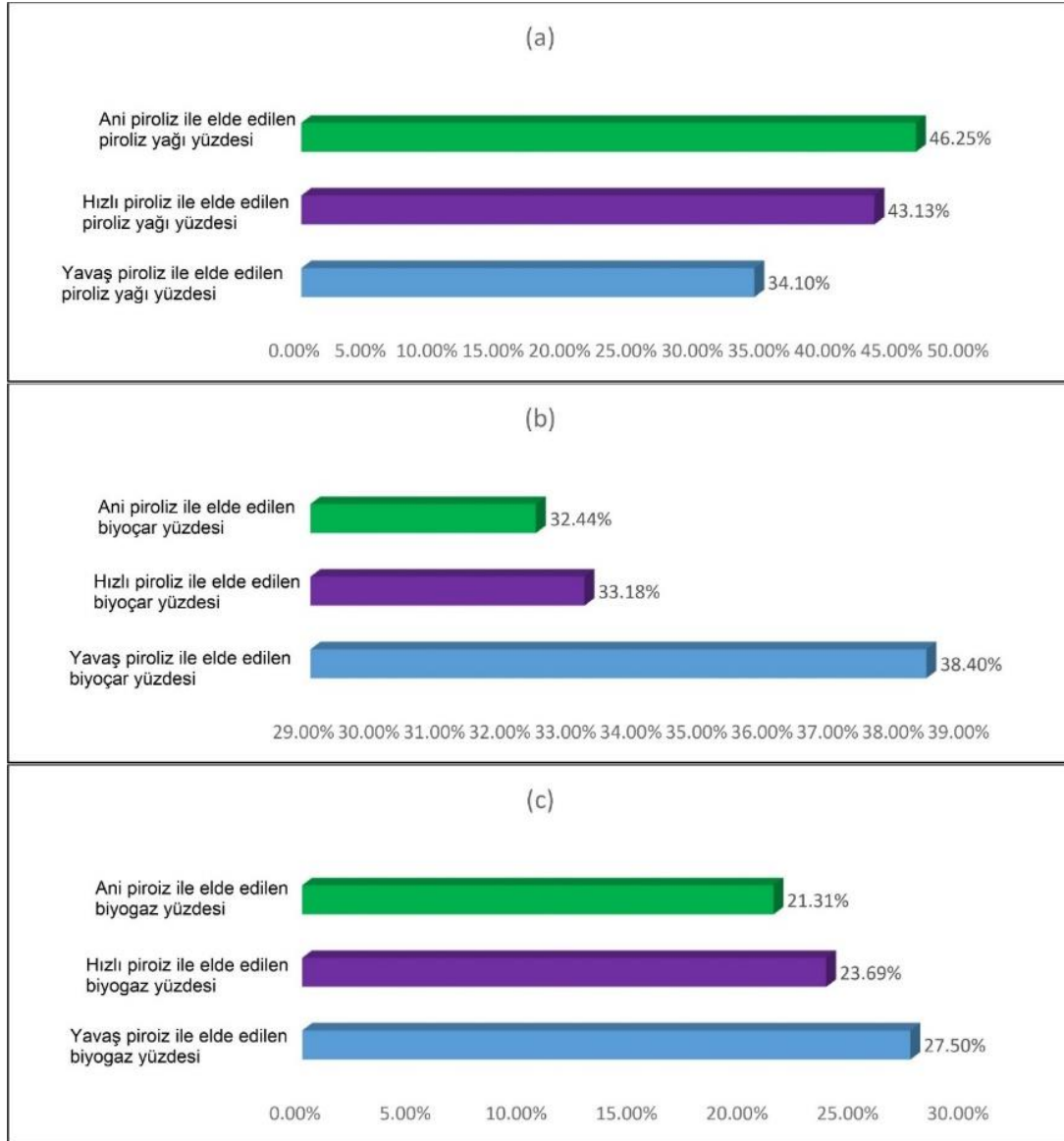
Çizelge 2.8. Farklı atık içerikleri için yavaş piroliz sistemiyle elde edilen sonuçlar (Lu ve diğerleri, 2020).

Atık	Açığa Çıkan İçerikler	Elde Edilen Yan Ürünler
Kentsel Atık	900°C Sıcaklıkta: - %48-50 Biyoçar - %38-44 Sentez Gazı - %7-13 Katran	Sentez Gazı Biyoçar (Katı Yakıt)
Plastik Atık (PE, PP, PS,PET)	500°C Sıcaklıkta: - %8-22 Sentez Gazı - %68-86 Piroliz Yağı - %3-5 Biyoçar 600°C Sıcaklıkta: - %28-52 Sentez Gazı - %44-67 Piroliz Yağı - %3-5 Biyoçar	Sentez Gazı Piroliz Yağı
Selüloz Tozu	500°C Tek Kademe Sıcaklıkta - %2-3 Sentez Gazı - %60 Piroliz Yağı - %11 Katran 300/500°C İki Kademe Sıcaklıkta - %3-4 Sentez Gazı - %53 Piroliz Yağı - %17 Katran	Piroliz Yağı

Hızlı ve ani piroliz sistemlerinde beslenen atık daha hızlı biçimde kimyasal olarak parçalanmakta ve çoğunlukla buhar ve aerosoller oluşmakla birlikte bir miktar biyoçar ve gaz oluşumu görülmektedir. Hızlı piroliz prensibi ile çalışmakta olan sistemler, reaktör tasarımına bağlı olarak çok çeşitlilik göstermekte olup, prosesin belirleyici unsuru ortamın anaerobik olması ve proses sürelerinin daha kısa olmasıdır. Hızlı piroliz sistemlerinde genellikle kullanılan reaktör çeşitleri kabarcıklı akışkan yataklı reaktörler, sirkülasyonlu akışkan yataklı reaktörler, döner konik reaktörler, ergitmeli (ablatif) reaktörler, sürüklenmiş akışlı reaktörler, sabit yataklı reaktörler, mikrodalga piroliz reaktörleri ve hidropiroliz reaktörleri olarak sıralanabilir (Bridgwater, 2012). Örnek bir kabarcıklı akışkan yataklı hızlı piroliz sistemine ait diyagram Şekil 2.8’de verilmiştir. Bu tür akışkan yataklı piroliz reaktörleri ile elde edilen sıvı yakıt oranları %70-75 civarında, biyoçar oranı ise %15 civarında olmaktadır. Ancak, bu tür sistemlerin tasarımında yatağa aktarılan ısı transferi dikkatli bir şekilde tasarlanmalı ve yapılan atık beslemesi 2-3 mm granüller halinde beslenmelidir.



Şekil 2.8. Kabarcıklı akışkan yataklı piroliz reaktörü (A.V. Bridgwater, 2012).



Şekil 2.9. Yavaş, hızlı ve ani piroliz sonucunda elde edilen yan ürünlerin yüzdeleri.
(a) Piroliz yağı, (b) Biyoçar, (c) Biyogaz.

Adelawon, Latinwo, Eboibi, Agbede ve Agarry'nin (2021) yavaş, hızlı ve ani piroliz sistemleri ile mısır koçanının geri dönüşümü üzerine yaptıkları çalışmada elde edilen biyoçar, piroliz yağı ve biyogaz yüzdeleri karşılaştırmalı olarak Şekil 2.9'da verilmiştir. Elde edilen sonuçlar, yavaş piroliz ile daha çok biyoçar ve biyogaz elde edilebildiğini, öte yandan hızlı ve ani pirolizin daha çok piroliz yağı üretimi sağladığını göstermektedir.

Yüksek geri dönüşüm sağlanmasına karşın, piroliz sistemlerinin açığa çıkardığı kirletici emisyonların kontrol edilmesi gerekmektedir. Tıbbi atıkların pirolizinde açığa çıkan başlıca emisyonlar polisiklik aromatik hidrokarbonlar (PAH'lar), HCl, SO₂ ve NO_x olarak sıralanabilir. PAH'ların oluşumundaki en önemli etmenler partikül boyutları, reaksiyon

sıcaklığı, maruziyet süresi ve katalizör kullanımı olup; tıbbi atıkların pirolizi için yapılan bir araştırmada PAH konsantrasyonunun piroliz yağı içerisinde 121-29.440 mg/L, biyoçar içerisinde ise 223-1.610 mg/kg olduğu görülmüştür (Mohseni-Bandpei ve diğerleri, 2019). Piroliz esnasında HCl emisyonu baca gazında kütlece %1,5-2,5 civarında bulunurken (Lin ve diğerleri, 2010), çoğunlukla 350°C reaksiyon sıcaklığının üzerinde gerçekleşmektedir (Dudkina, Gerasimov ve Khaskhachikh, 2019). Yapılan bir yaşam döngüsü analizine göre tıbbi atık piroliz sisteminin yarattığı toplam maliyet \$293,43/ton ve toplam kar \$189,96/ton olurken; bu maliyetlerin %24,8'ini sodyum hidroksit (NaOH) kullanımı, %10,4'ünü elektrik kullanımı, %8,1'ini ise aktif karbon kullanımı oluşturmaktadır (Hong, Zhan, Yu, Hong ve Qi, 2018). Dolayısıyla piroliz sistemlerinin tıbbi atıkların geri dönüşümünde kullanılabilmesi için emisyon kontrolü ve maliyetlerin düşürülmesine yönelik daha fazla araştırmaya ihtiyaç duyulmaktadır.

2.3.3. Gazlaştırma

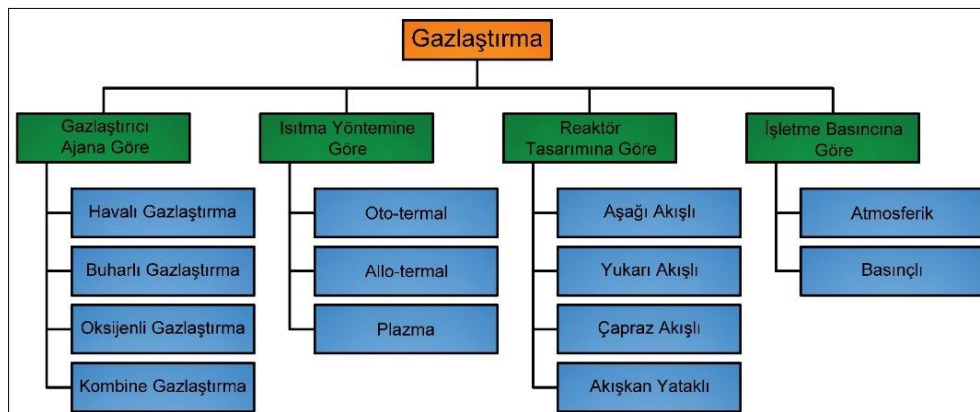
“İndirekt yanma” olarak da bilinen gazlaştırma prosesi, katı atıkların kimyasal reaksiyonlar sonucu yüksek CO ve H₂ içerikli sentez gazına dönüşmesini ve üretilen bu gazın yakıt olarak kullanılmasını sağlayan bir atıktan enerji üretimi yöntemidir. Yakma ve gazlaştırma prosesleri arasındaki temel farklar Arena (2012) tarafından Çizelge 2.9’da verildiği şekilde özetlenmiştir. Buna göre, gazlaştırma prosesinin yakma prosesinden farklarından birisi, gazlaştırıcı içerisine stokiyometrik olarak gereken oksijenden daha az oksijen beslenmesi ve böylece kısmi oksidasyon gerçekleşmesi, diğeri ise gazlaşma esnasında oluşan gazın yakıt değeri taşınması ve farklı enerji üretim proseslerinde kullanılabilir olmasıdır.

Gazlaştırma prosesi esnasında gerçekleşen reaksiyonlar, klasik yanma ve piroliz proseslerine göre daha karmaşıktır. Genel olarak gazlaştırıcı içerisinde kurutma, piroliz, kısmi oksidasyon ve gazlaşma olmak üzere 4 farklı reaksiyon bölgesi bulunmakta olup, bu bölgelerin gazlaştırıcı içerisindeki konumları tasarıma göre değişiklik göstermektedir. Çizelge 2.10’da bu bölgeler içerisinde gerçekleşen tipik gazlaşma reaksiyonları ve sıcaklık dağılımları özet halinde verilmiştir (Chalermssinsuwan, Li ve Manatura, 2023). Kurutma bölgesinde yalnızca atığın içerisindeki nem su buharına dönüşürken, piroliz bölgesinde kurutulan atık daha fazla ısınarak biyoçar ve uçucu gazlara dönüşmekte olup, bu bölgelerde gerçekleşen reaksiyonlar için gerekli ısı enerjisi atık içeriğine göre değişkenlik göstermektedir. Kısmi oksidasyon bölgesinde, diğer bölgelerde oluşan biyoçar (C_(k)), CO ve

H₂ içeriklerinin bir kısmı oksijen ile ekzotermik oksidasyon tepkimesine girerek sırasıyla CO, CO₂ ve H₂O oluşturmaktadır. Gazlaşma bölgesinde ise, diğer bölgelerde oluşan biyoçar heterojen gazlaşma reaksiyonları ile, bütün tepkimeler ile açığa çıkan CO ve CH₄ bileşikleri ise homojen gazlaşma reaksiyonları ile CO, H₂, CO₂ ve CH₄ sentez gazı oluşumunu tetiklemektedir. Tipik bir gazlaştırıcı içerisinde bölgelere göre sıcaklık dağılımı genellikle kurutma bölgesi için 100-150°C, piroliz bölgesinde 150-700°C, kısmi oksidasyon bölgesi için 700-1.500°C ve gazlaşma bölgesi için 800-1.100°C aralığında olmaktadır (D. Baruah ve D.C. Baruah, 2014).

Çizelge 2.9. Yakma ve gazlaştırma prosesleri arasındaki farklar.

	Yakma	Gazlaştırma
Prosesin Amacı	Katı atığın CO ₂ ve H ₂ O içerikli baca gazına dönüştürülerek hacminin azaltılması ve enerji üretimi	Katı atığın CO, H ₂ ve CH ₄ içerikli yanma ısısı yüksek sentez gazına dönüştürülerek hacminin azaltılması ve enerji üretimi
İşletme Koşulları		
Reaksiyon Ortamı	Oksidatif (Ortamdaki oksijen miktarı sitokiyometrik yanma için gerekli oksijen miktarından fazla)	Redüktif (Ortamdaki oksijen miktarı sitokiyometrik yanma için gerekli oksijen miktarından az)
Sıcaklık	850-1.200°C	Oto-termal gazlaşma için 550-900°C Allo-termal gazlaşma için 1.000-1.600°C
Basınç	Atmosferik	Atmosferik
Proses Çıktıları		
Üretilen gaz	CO ₂ ve H ₂ O içerikli baca gazı	CO, H ₂ , CO ₂ , H ₂ O ve CH ₄ içerikli sentez gazı
Kirletici Emisyonlar	SO ₂ , NO _x , HCl, PCDD/F, partikül	H ₂ S, HCl, COS, NH ₃ , HCN, katran, alkali, partikül
Kül	Cürufun işlenmesi ile demir içerikli (demir, çelik) ve demir içermeyen (alüminyum, bakır, çinko vb.) metaller geri dönüştürülebilir. Hava kirleticiler endüstriyel atık olarak bertaraf edilmektedir.	Yakma prosesine benzer şekilde, geri dönüştürülebilir maddeler oluşan camsı cürufu toplanabilmekte, oluşan camsı cüruf yapı yapı sektöründe kullanılabilir.
Oluşan Gazın Temizlenmesi	Hava kirlilik kontrolü sistemleri ile emisyon limitlerinin altına düşürüldükten sonra bacadan atmosfere salınır.	Üretilen sentez gazı standartlara veya kullanılacağı enerji üretim ekipmanının gerekliliklerine uygun hale getirilir.



Şekil 2.10. Gazlaştırma prosesinin kullanılan iş akışkanına, ısıtma yöntemine, gazlaştırıcı tasarımına ve işletme basıncına göre sınıflandırılması (Sajid ve diğerleri, 2022).

Çizelge 2.10. Klasik gazlaştırıcılar içerisinde gerçekleşen tipik kimyasal reaksiyonlar (Chalermssinsuwan ve diğerleri, 2023).

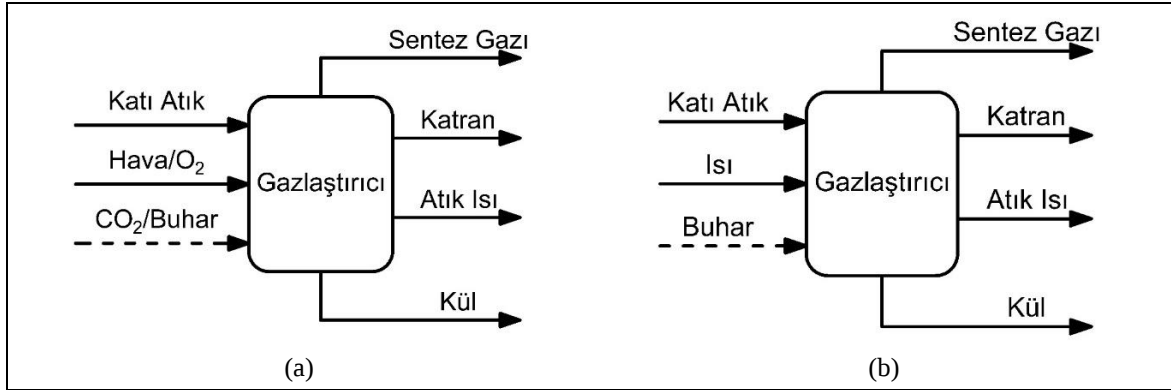
Reaksiyon Bölgesi/Adı	Reaksiyon	Enerji (kJ/mol)
Kurutma	$(C_nH_mO_p)_{nemli} + Isı \rightarrow (C_nH_mO_p)_{kuru} + H_2O$ Katı Atık	-
Piroliz Bölgesi	$C_nH_mO_p + Isı \rightarrow \underbrace{C_{(k)}}_{Biyoçar} + Uçucu$	-
Kısmi Oksidasyon Bölgesi	$C_{(k)} + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow CO$	-111
	$CO + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow CO_2$	-283
	$H_2 + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow H_2O$	-242
Gazlaşma Bölgesi		
Boudouard	$C_{(k)} + CO_2 \leftrightarrow 2CO$	+172
Su-Gaz	$C_{(k)} + H_2O \leftrightarrow CO + H_2$	+131
Su-Gaz Değişimi	$CO + H_2O \leftrightarrow CO_2 + H_2$	-41
Metanlaşma	$C_{(k)} + 2H_2 \leftrightarrow CH_4$	-75
Buharlı metan reforming	$CH_4 + H_2O \leftrightarrow CO + 3H_2$	+206

Gazlaştırma proses türlerini Şekil 2.10’da gösterildiği gibi 4 farklı şekilde sınıflandırmak mümkündür (Sajid ve diğerleri, 2022). Ancak, pratikte gazlaştırma prosesi daha çok ısıtma yöntemine ve reaktör tasarımlarına göre sınıflandırılmaktadır.

Isıtma yöntemine göre gazlaştırma prosesleri

Isıtma yöntemine göre gazlaştırıcılar ototermal (içten ısıtmalı) ve allotermal (dıştan ısıtmalı) olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Şekil 2.11, ototermal ve allotermal gazlaştırma yöntemleri için basitleştirilmiş proses diyagramlarını göstermektedir. Ototermal gazlaştırma yönteminde gerekli ısı, gazlaştırıcı içerisine beslenen atığın bir kısmının yanması ile elde edilmekte, bu yanmanın gerçekleşebilmesi için reaktör içerisine ilave olarak oksijen beslemesi yapılmaktadır. Gazlaştırıcı içerisindeki sıcaklık dağılımı 800-1.800°C aralığında, işletme basıncı ise 1-60 bar aralığında değişmektedir (Canel, 1986). Gazlaştırıcı içerisinde yüksek sıcaklıklara erişilebilmesi için genellikle gazlaştırıcı ajan olarak hava ya da oksijen kullanılmaktadır. Daha düşük sıcaklıkların uygulanabilir olduğu durumlar için son yıllarda CO₂ ve partikül emisyonlarının azaltılması amacıyla gazlaştırıcı ajanına bir miktar CO₂ karıştırılabilmekte, proses verimini arttırmak amacıyla ilave buhar beslemesi yapılabilmektedir (Shen, Li, Yao, Cui ve Wang, 2019). Allotermal gazlaştırma yönteminde ise gerekli ısı gazlaştırıcı dışında başka bir kaynaktan ilave yakıt kullanılarak üretilmektedir. Allotermal reaktörler içerisindeki sıcaklık dağılımı 300-900°C aralığında, işletme basıncı ise

1-40 bar aralığında değişmektedir (Milhé ve diğerleri, 2013). Genellikle gazlaştırıcı için gerekli ısı, gazlaştırıcı içerisine beslenen yüksek sıcaklıklı buhar tarafından sağlanmakta olup, bazı durumlarda farklı ısı kaynaklarının da kullanımı mümkündür. Dolayısıyla bir tesisin ürettiği atık ısının ya da atık buharın değerlendirilmesi amacıyla sıklıkla kullanılmaktadır.



Şekil 2.11. Isıtma yöntemine göre gazlaştırma prosesleri. (a) Ototermal, (b) Allotermal.

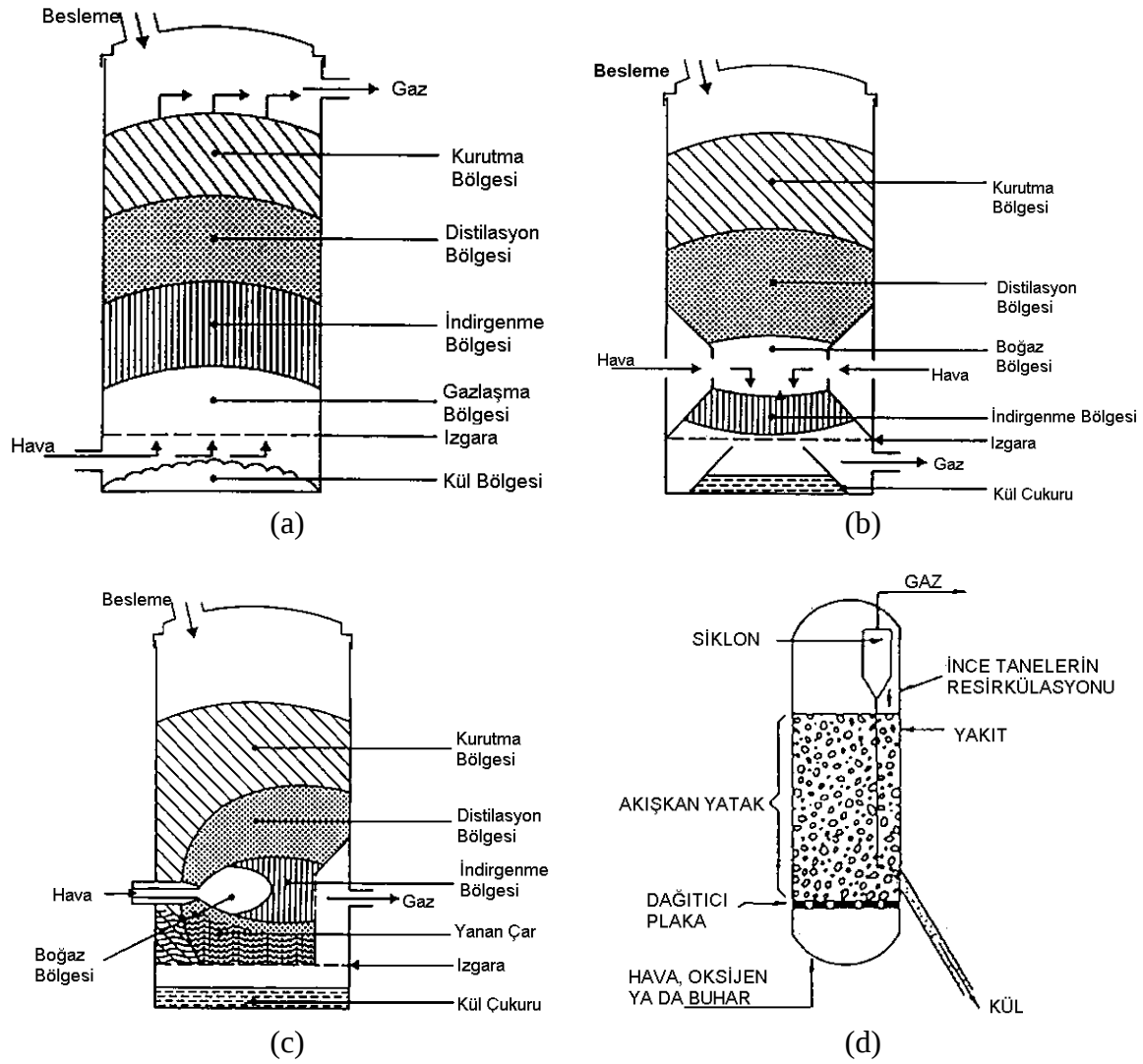
Emisyonları açısından bakıldığında, ototermal gazlaştırma prosesi, allotermal gazlaştırma prosesine göre daha düşük kirletici emisyon açığa çıkarmaktadır. Çizelge 2.11’de sabit yataklı bir gazlaştırıcı için ototermal ve allotermal gazlaştırma prosesleri için yapılan karşılaştırmalı bir çalışmadan alınan emisyon değerlerine bakıldığında, allotermal gazlaştırma prosesinin ototermal prosese kıyasla daha fazla kirletici ürettiği görülmektedir.

Çizelge 2.11. Ototermal ve allotermal gazlaştırıcılar için emisyonlar arasındaki farklar (Milhé ve diğerleri, 2013)

Kimyasal Bileşik	Emisyon Değerleri (Kütlece %)	
	Allotermal Gazlaştırma (475°C)	Ototermal Gazlaştırma (675°C)
Asitler	33,11	11,53
Furanlar	3,39	3,09
PAH’lar	0,4	0,81

Reaktör tasarımına göre gazlaştırma prosesleri

Reaktör tasarımları en genel haliyle yukarı (ters) akışlı, aşağı (aynı yönlü) akışlı, çapraz akışlı ve akışkan yataklı gazlaştırıcılar olmak üzere 4 ana grupta incelenmektedir. İlgili tasarımlara ait şematik diyagramlar Şekil 2.12’de gösterilmiştir.



Şekil 2.12. Temel gazlaştırıcı tasarımları. (a) Yukarı (ters) akışlı gazlaştırıcı, (b) Aşağı (aynı yönlü) akışlı gazlaştırıcı, (c) Çapraz akışlı gazlaştırıcı, (d) Akışkan yataklı gazlaştırıcı (FAO, 1986).

Yukarı akışlı gazlaştırma yöntemi, bilinen en eski ve en basit gazlaştırma türüdür. Bu tür gazlaştırıcılarda oksitleyici gaz beslemesi reaktörün alt kısmından yapılırken, sentez gazı çıkışı ise reaktörün üst noktasındadır. %25'e kadar kül, %60'a kadar nem ve uçucu oranı az olan atıkların gazlaştırılması için uygun olmasına karşın, 30-150 g/Nm³ aralığında katran oluşumu gerçekleştiği için yüksek uçucu içeriğine sahip atıkların gazlaştırılması için uygun değildir (Basu, 2010). Basit tasarımları, yüksek kapasiteleri, yüksek soğuk gaz verimleri ve düşük çıkış gazı sıcaklıkları, yukarı akışlı gazlaştırıcıların en temel avantajlarıdır. Ancak, gazlaştırıcı içerisinde oksijen patlamalarına sebep olabilecek "kanallaşma (channelling)" riskinin bulunması, otomatik hareketli ızgaralara ihtiyaç duyulması ve sentez gazı çıkışında yüksek katran oluşumu başlıca dezavantajlarıdır (FAO, 1986).

Sentez gazı çıkışındaki katran oluşumunun önemli ölçüde azaltılmasını sağlayan bir gazlaştırıcı tasarımı olan aşağı akışlı gazlaştırıcılarda ise hava kısmi oksidasyon bölgesinin üzerinden beslenirken, gaz çıkışı reaktörün alt noktasından gerçekleşmektedir. Yanma bölgesinde sıcaklıklar 1.200-1.400°C civarında olup, katran oluşumu 0,015-3 g/Nm³ aralığındadır. Aşağı akışlı gazlaştırıcılar için boğazlı ve boğazsız tasarımlar mevcut olup, genel olarak yüksek miktarlarda cüruf oluşumuna sebep olmakta ve soğuk gaz verimleri düşük olmaktadır (Choudhury, Chakma ve Moholkar, 2015).

Özellikle yüksek sıcaklıklar gerektiren gazlaştırma proseslerinde uygulamayı kolaylaştıran çapraz akışlı gazlaştırıcılar, 1.500°C ve üzeri işletme sıcaklıklarında çalışabilmektedir. 10 kW kapasiteden daha küçük kapasitelerde uygulanabilen bu sistemlerde katran oluşumu 0,01-0,1 g/Nm³ civarında olurken, devreye alma süreleri de oldukça kısadır. Çapraz akışlı gazlaştırıcılar yüksek kül ve katran içerikli atıkların gazlaştırılması için uygulanabilir olmamakta, ancak üst kısmının açık olduğu durumlarda yüksek nem içerikli atıkların gazlaştırılmasında kullanılabilmektedir (Nwakaire ve Ugwuishiwu, 2015).

Yüksek karışım oranları ve reaktör içerisinde sağladığı üniform sıcaklık dağılımı ile bilinen akışkan yataklı gazlaştırıcılar, atığın ve gazlaştırıcı ajanın beslendiği bir reaktör ve içerisinde granüller halinde bulunan yatak malzemesinden oluşmaktadır. Katı-gaz karışımının oldukça iyi bir biçimde sağlanması ve yatağın ısıl ataletinin yüksek olması, akışkan yataklı gazlaştırıcıların yakıt kalitesinden bağımsız bir şekilde yüksek performans ile çalışabilmesini sağlamaktadır. Akışkan yataklı gazlaştırıcılar için katran oluşumu 1-50 g/Nm³ civarında bulunmaktadır (Basu, 2010).

İnsinerasyon, piroliz ve gazlaştırma için elde edilen proses çıktıları karşılaştırmalı şekilde Çizelge 2.12’de verilmiştir (Dong ve diğerleri, 2018). Buna göre, piroliz ve gazlaştırma yönteminde kimyasal geri dönüşüm yapılmasına karşın elde edilen elektriksel verim değerleri insinerasyon ile birbirine oldukça yakın olmakta, ancak gazlaştırma prosesi için elektriksel verim değeri daha yüksek olmaktadır. Öte yandan, piroliz ve gazlaştırma yöntemleri ile açığa çıkan NO_x ve SO₂ emisyonlarının, klasik insinerasyon yöntemine göre oldukça yüksek olduğu, dioksin ve furan oluşumunun ise daha az olduğu görülmektedir. Ek olarak, piroliz yöntemi ile hidrojen üretimi daha fazla yapılabilmesine karşın, gazlaştırma yöntemi ile elde edilen soğuk ve sıcak gaz verimleri daha fazla olmaktadır.

Çizelge 2.12. İnsinerasyon, piroliz ve yakma prosesleri için verim, emisyon ve sentez gazı oluşum değerleri (Dong ve diğerleri, 2018).

	İnsinerasyon	Piroliz	Gazlaştırma
Elektriksel Verim	%24,2	%22	%27,4
Isıl Verim	%5,5	-	%61,4
Soğuk Gaz Verimi	-	%50	%70
Sıcak Gaz Verimi	-	%85	%90
Cüruf Oluşumu	-	0,3 kg/kg_kentsel atık	0,1 kg/kg_kentsel atık
Oluşan Katı Atık	Tamamı toprağa gömülür	Cüruf toprağa gömülür, metal geri dönüştürülür	Cürufun %88'i geri dönüştürülebilir, %12'lik kısmı toprağa gömülür, metal geri dönüştürülür
Baca Gazı Emisyonları (mg/Nm ³)			
CO	5,5	10,0	2,0
SO ₂	0,4	8,0	7,0
NO _x	41,4	166,9	161,0
HCl	1,9	5,1	1,0
PM	0,1	1,4	2,0
PCDD/PCDF (ng-TEF/m ³)	0,005	0,001	0,002
Hg	0,002	0,011	0,0001
Cd	0,001	0,006	-
Üretilen Sentez Gazı (%mol)			
CO	-	20,0	9,7
CO ₂	-	39,0	18,2
N ₂	-	0,0	49,9
H ₂	-	15,0	9,5
CH ₄	-	12,0	7,2

Çizelge 2.13. Ekonomik açıdan klasik insinerasyon, piroliz ve gazlaştırma yöntemlerinin karşılaştırılması (Munir, Mardon, Al-Zuhair, Shawabkeh ve Saqib, 2019).

	İnsinerasyon	Piroliz	Gazlaştırma
İlk Yatırım Maliyeti (US\$M)	116	87	80
Bakım/İşletme Maliyeti (US\$M/yıl)	8,2	7,2	6,8
Yıllık Getiri (US\$M/yıl)	-3,3	+0,5	+3,1

Benzer şekilde, Çizelge 2.13'te insinerasyon, piroliz ve gazlaştırma proseslerinin kentsel atıkların bertarafında kullanımının ekonomik açıdan karşılaştırılması verilmiştir (Munir ve diğerleri, 2019). Buna göre, ilk yatırım maliyeti açısından bakıldığında piroliz ve gazlaştırma tesislerinin kurulum ve işletme maliyetleri insinerasyon prosesine kıyasla daha az olmakta,

ayrıca insinerasyonda zarar edilirken piroliz ve gazlaştırmada kâr elde edilmektedir. Ancak, gazlaştırma prosesinin ekonomik açıdan piroliz yöntemine göre daha avantajlı olduğu görülmektedir. Sonuç olarak, diğer klasik yöntemlere kıyasla, gazlaştırma yönteminin atık bertarafında daha etkili bir yöntem olduğu söylenebilir.

2.4. Sürdürülebilirlik

Tıbbi atık yönetiminde sürdürülebilirlik en önemli hususlardan birisidir. Sürdürülebilirliğin değerlendirilebilmesi için çeşitli yöntemler geliştirilmesine karşın, birçok ülkede tıbbi atık yönetiminde sürdürülebilirlik için standart haline getirilmiş değerlendirme çerçeveleri bulunmamakta, dolayısıyla tıbbi atık yönetiminin mevcut durumuna yönelik değerlendirmeler sınırlı olmaktadır. WHO gibi uluslararası sağlık kuruluşlarının, tıbbi atıkların gelişmekte olan ülkelerde güvenli bir şekilde bertarafına yönelik yayınladıkları çeşitli kılavuzlar mevcuttur (Chartier ve diğerleri, 2014). Ancak bu kılavuzlar tek başına yeterli olmamaktadır. Dolayısıyla durumun ülkeler için pratikteki mevcut halini anlamak ve sürdürülebilirlik analizlerini mevcut duruma göre değerlendirmek önemlidir.

Tıbbi atık yönetiminde sürdürülebilirliğin değerlendirilebilmesi için çok kriterli karar analizlerine (MCDA) dahil olan analitik hiyerarşi prosesi (AHP) ve belirsiz analitik hiyerarşi prosesi (FAHP) gibi yöntemler mevcuttur. Bu yöntemler ile, tıbbi atık yönetiminin sürdürülebilirliğine etki edebilecek faktörlerin öncelik sıralaması analitik yöntemlerle yapılmakta ve her bir faktörün ağırlıkça etkileri sağlık kuruluşlarında gerçekleştirilen anketlerin sonuçlarına göre hesaplanmaktadır. Analizler genişletilebilmekte olup, genellikle aşağıdaki kriterler değerlendirilmektedir (Etim, Academe, Emenike ve Omole, 2021).

- Atık Ayırıştırma: Atıkların etkili bir şekilde ayrıştırılıp ayrıştırılmadığı, personelin ayrıştırma prosedürlerini doğru uygulayıp uygulamadığı vb. değerlendirilerek atık ayrıştırma verimi belirlenir.
- Bütçe / İşletme Maliyetleri: Sağlık kuruluşunun tıbbi atık yönetimi için ayırdığı yıllık bütçe ve işletme maliyetleri değerlendirilir.
- Atık Arıtımı: Sağlık kuruluşunda arıtılabilecek tıbbi atık miktarı ve türleri değerlendirilerek farklı arıtma sistemlerine sahip olup olmadığı sorgulanır.

- Atık Taşınması: Sağlık kuruluşunun atıkların arıtma ve geri dönüşüm tesislerine taşınması için planının olup olmadığı, ilgili personelin tıbbi atıklarla ilgisi bilgisinin olup olmadığı vb. hususlar değerlendirilir.
- Atık Bertarafı: Sağlık kuruluşunun bertaraf veya geri dönüşüm tesisine olan uzaklığı, kullanılan bertaraf yöntemi, ne kadar atık bertaraf edildiği vb. hususlar değerlendirilir.
- Çevresel ve Toplumsal Güvenlik: Bertarafı esnasında açığa çıkan toksik emisyonlar, alınan güvenlik tedbirleri, personelin potansiyel enfeksiyon risklerine karşı aşılınıp aşılanmadığı vb. hususlar değerlendirilir.
- Farkındalık / Kabiliyet Geliştirme: Sağlık çalışanlarının tıbbi atık yönetimi hakkında eğitim alıp almadıkları, ne sıklıkla eğitildikleri, enfeksiyon risklerini nasıl önledikleri vb. hususlar değerlendirilir.
- Yönetim Planı: Tıbbi atıkların yönetimi için uygulanan bir planın olup olmadığı, gerçekleştirilen tıbbi atık yönetiminin ulusal ve/veya uluslararası standartlara uygun bir şekilde gerçekleştirilip gerçekleştirilmediği, ne tür politikalar izlendiği, her bölümde uygulanıp uygulanmadığı gibi hususlar değerlendirilir.

Ancak, salgın dönemi ile birlikte, özellikle işletme maliyetleri, arıtma ve bertaraf yöntemlerinin verimlilik ve performansları ile birlikte kirletici emisyonların kontrolü ve iyileştirilmesi hususları oldukça önemli hale gelmiştir. Tıbbi atıkların konvansiyonel yakma prosesleri ile işlenmesiyle açığa çıkan PCDD/PCDF emisyonları egzoz gazı içeriğinde 77-894 ng/Nm³, uçucu kül içeriğinde 69-4.915 µg/m³ civarında olmakta, dolayısıyla insan sağlığı ve çevre açısından yüksek risk teşkil etmektedir (Das, Hazra ve Banerjee, 2020; Alvim Ferraz ve Afonso, 2003). Bu nedenle, kirlilik kontrolü sistemleri için yüksek kurulum ve işletme maliyetleri, yakma prosesi esnasında oluşan yan ürünlerin oldukça korozif yapıda olması nedeniyle klasik döner fırınlarda ortaya çıkan yüksek bakım-onarım maliyetleri, bazı durumlarda yeniden kurulum maliyetleri ile birlikte yüksek enerji tüketimleri söz konusu olmaktadır (Chen ve Yang, 2016). Öte yandan, ülkemizdeki tıbbi atık yönetimi için harcanan maliyetler, 2017 yılı verilerine göre en genel haliyle küçük ölçekli hastaneler için 26,75 \$/gün, orta ölçekli hastaneler için 112,03 \$/gün, büyük ölçekli hastaneler için ise 319,12 \$/gün olarak hesaplanmıştır. Maliyetlerin yüksek olmasının nedeni nüfus artışı ve depolanan

atıkların insinerasyon tesislerine taşınması için 206 km'ye kadar mesafelerin bulunmasıdır (Çakmak Barsbay, 2021).

Bütün bu hususlar göz önünde bulundurulduğunda, klasik bertaraf yöntemlerinin tıbbi atık yönetiminde sürdürülebilir bir çözüm olmadığı görülmektedir. Bu nedenle, sürdürülebilir bir tıbbi atık yönetimi için PCDD/PCDF emisyonları ve enfeksiyon riskleri düşük, kurulum ve işletme maliyetleri düşük, kaynağına yakın ve daha yüksek verimli alternatif atık bertaraf yöntemlerine ihtiyaç duyulmaktadır.

2.5. Plazma Gazlaştırma

Bu bölümde plazmanın tanımı ve türleri, plazma gazlaştırma sistemi, atıktan enerji üretiminde kullanımı ve plazma gazlaştırıcı tasarımı için hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) simülasyonlarının kullanımı detaylı bir şekilde ele alınmıştır.

2.5.1. Plazmanın tanımı ve türleri

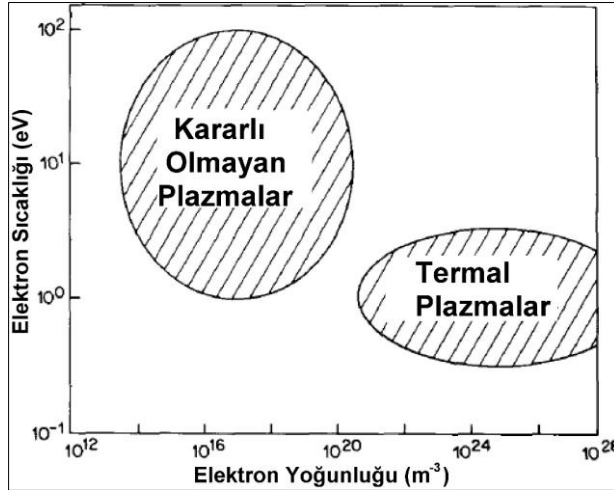
En genel haliyle plazma, maddenin katı, sıvı ve gaz halinden sonra gelen dördüncü hali olup, gaz halindeki maddenin daha fazla enerji alarak kısmi veya tamamen iyonlaşması sonucu oluşmaktadır. Plazma haldeki madde genellikle elektriksel olarak yarı-nötr bir ortam oluşturmakta, içerisinde serbest iyonlar, radikaller, fotonlar, elektronlar vb. yüklü parçacıklar bulunmaktadır. Ortam içerisinde sağlanan denge nedeniyle ortamın toplam yükünün nötr olmasına karşın, plazma halindeki bir madde elektriği oldukça iyi bir seviyede iletmektedir. Yüksek enerji verildiğinde iyonlaşan her gaz madde plazma halinde sayılmamakla birlikte, plazmayı iyonlaşmış gazdan ayıran belli özellikleri mevcuttur. Bu özellikler Çizelge 2.14'te özetlenmiştir (Hazeltine ve Waelbroeck, 2018). Yıldızların, nebula kümelerinin ve yıldızlararası hidrojenin plazma formunda olduğu kabul edilerek evrenin %99'unu plazmanın oluşturduğu bilinmesine karşın, yüksek enerji seviyeleri gerektirdiği için güneş sistemi içerisinde doğal halde bulunan plazma türleri oldukça azdır (Chen, 1984). Şimşekler, kutup ışıkları ve güneş, doğada plazma halinde mevcut olan maddelere örnekler (Fridman, 2008). Ancak, özellikle endüstrinin ve elektronik sektörünün gelişmesiyle birlikte elektriksel deşarjların kullanıldığı çoğu teknolojide yaygın olarak bulunmakta ve uygulanmaktadır. Floresan lambalar, çip üretiminde kullanılan plazma aşındırıcılar (Kanarik, 2020), plazma kesme ve kaynak torçları (A. Lazarević, Čojbašić ve D. Lazarević,

2020), plazma televizyonlar, ozon jeneratörleri (Andreev, Kravchenko ve Pichugin, 2020), aerodinamik uygulamalarda kullanılan plazma aktüatörler (Akbıyık ve Yavuz, 2021), karbon yakalama sistemlerinde kullanılan katalitik termal olmayan plazma sistemleri (Ashford, Y. Wang, L. Wang ve Tu, 2019) ya da dışılıkte kullanılan soğuk atmosferik plazma uygulamaları (Balcı, Kutlu, Temel ve Güleç, 2021) yapay plazmanın günümüzde bulunduğu teknolojilere örnekler olup, karmaşık ve nonlineer yapısı nedeniyle hala güncel araştırmaların konusu olmaktadır.

Çizelge 2.14. Plazma fazının gaz fazına göre fiziksel açıdan temel farklılıkları (Hazeltine ve Waelbroeck, 2018).

Özellikler	Gaz	Plazma
Etkileşimler	Kısa mesafede moleküllerin çarpışması söz konusudur.	İyon, elektron vb. daha küçük boyuttaki atomik parçacıkların çarpışması ve/veya toplu hareketi söz konusudur
Elektriksel İletkenlik	Çok düşük	Çok yüksek
Parçacık Hareketleri	Bütün gaz molekülleri yerçekimi vb. çeşitli kuvvetlerin etkisinde benzer şekilde hareket etmektedir	Farklı yük ve kütlelerdeki iyon ve elektronlar bulunduğu için kararsızlık ve dalgalanmalara neden olan birbirlerinden bağımsız parçacık hareketleri söz konusudur.

Plazma fazı içerisindeki elektronlar 10.000-100.000 K (1-10 eV) aralığında sıcaklıklara sahip olabilmesine karşın oluşan plazma hacminin sıcaklığı oda sıcaklığının altında dahi olabilmektedir (Liu, Xu ve Wang, 1999). Şekil 2.13'te görüldüğü gibi, plazma deşarjları fiziksel açıdan elektron yoğunlukları ve elektron sıcaklıklarına göre kararlı (equilibrium) ve kararsız (non-equilibrium) plazma olarak ikiye ayrılmasına karşın (Ekezie, Sun ve Cheng, 2017), pratik uygulamalarda plazma deşarjları genellikle sıcaklıklarına göre sınıflandırılarak termal ve termal olmayan plazma olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır (Liu ve diğerleri, 1999). 2.500°C'ye kadar sıcaklıklardaki plazma türleri termal olmayan plazma olarak değerlendirilmekte olup; uygulanan elektriksel deşarjın oluşturulma biçimine ve deşarj parametrelerine göre dielektrik bariyer deşarj (DBD), kayan ark (gliding arc) deşarj, mikrodalga deşarj, akkor deşarj (glow discharge), korona deşarj veya radyo frekanslı deşarj formunda oluşturulabilmektedir (George ve diğerleri, 2021).



Şekil 2.13. Termal ve termal olmayan plazmalar için elektron yoğunluğu ve elektron sıcaklığı aralıkları (Samal, 2017).

Şekil 2.14, termal olmayan plazma türlerine ait şematik diyagramları göstermektedir. Bunlardan DBD plazma, özellikle akış kontrolü (aktüatör), kirlilik kontrolü, CO₂ yakalama, yüzey modifikasyonu, ozon üretimi ve çeşitli yakıt veya kimyasalların üretimi amaçlarıyla kullanılmaktadır. AC elektrik beslemesi ve 1-10 eV aralığında ortalama elektron enerjisi ile çalışan DBD plazma sistemleri tipik olarak asimetrik yerleştirilen iki elektrot ve elektrotlar arasındaki bir dielektrik malzemeden oluşmakta, dolayısıyla oldukça basit bir tasarıma ve düşük üretim maliyetlerine sahiptir (Kogelschatz, 2003). Termal ve termal olmayan plazma türlerinin her ikisinin de sıcaklık aralığında oluşturulabilen kayan ark deşarj plazma, elde edilen sıcaklık nedeniyle “ılık (warm)” plazma olarak da anılmaktadır. 1-2 eV aralığında ortalama elektron enerjisi ile çalışan bu sistemler, karakteristiği nedeniyle hem termal hem de termal olmayan plazma sistemlerinin sağladığı avantajlara sahiptir (Mei ve diğerleri, 2019).

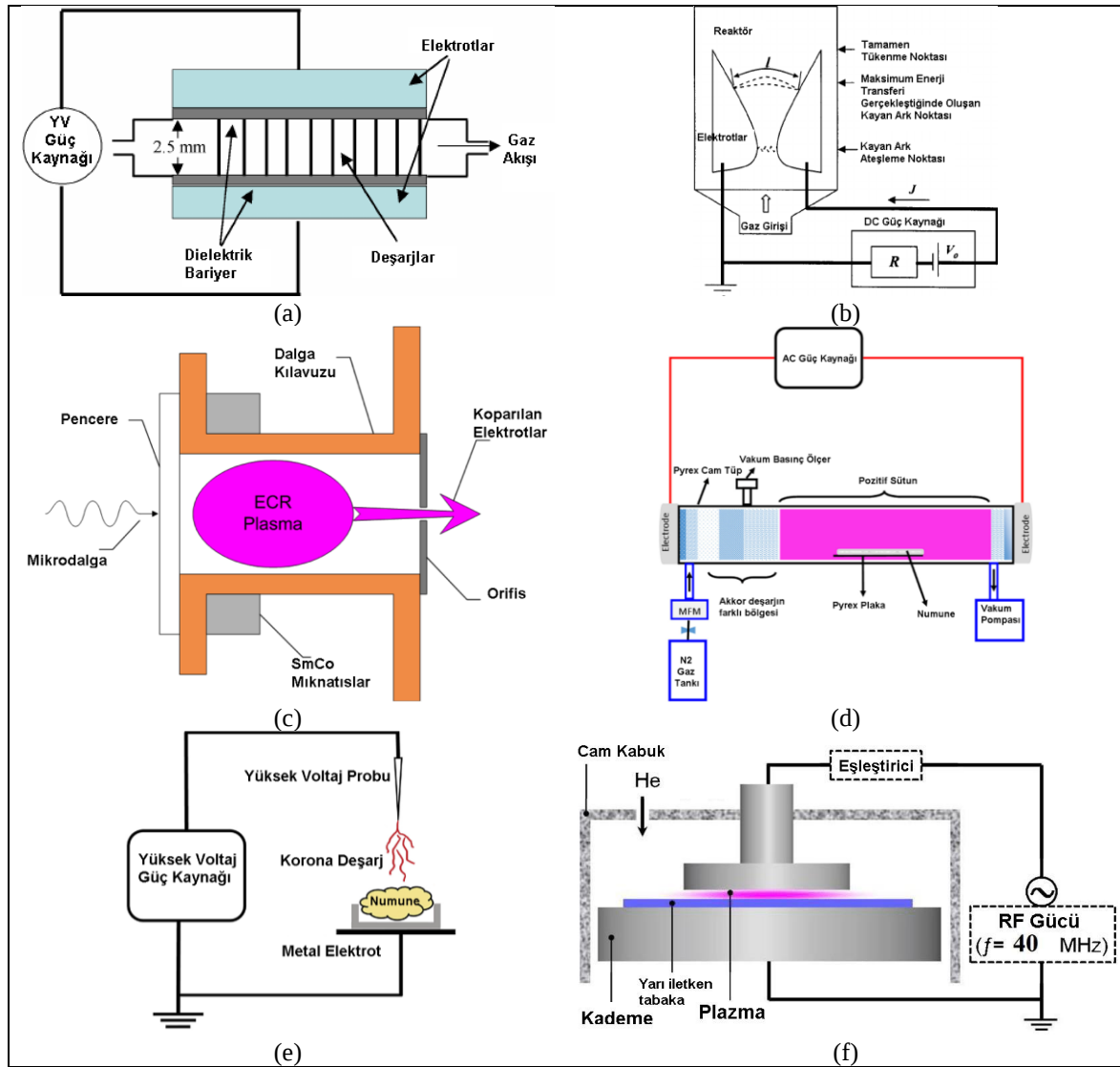
Tıpkı kayan ark plazma sistemleri gibi mikrodalga plazma sistemleri de ılık plazma sınıfında olup, 300 MHz-10 GHz aralığında elektromanyetik dalgalar ile oluşturulmaktadır. 1 eV civarında elektron enerjisine sahip olan mikrodalga deşarj plazma sistemleri, tipik olarak bir dalga kılavuzu ve deşarj tüpünden oluşmakta, dolayısıyla sistemde elektrot bulunmamaktadır (Chen ve diğerleri, 2017). Özellikle son yıllarda CO₂ yakalama sistemlerde kullanımı üzerine yapılan araştırmaların sayısı gittikçe artmaktadır (Pietanza, Colonna ve Capitelli, 2020). Akkor deşarj plazma, diğer sistemlere kıyasla 0,1-10 mbar gibi oldukça düşük basınçlarda ve 0,5-2 eV gibi düşük elektron enerjisi seviyelerinde oluşturulmaktadır. Genellikle aydınlatma sistemlerinde kullanılmaktadır (Eliasson ve

Kogelschatz, 1991). DBD plazma sisteminden farklı olarak elektrotlar arasında herhangi bir dielektrik malzeme bulundurmeyen, bu sayede geniş deşarj bölgelerine imkan tanıyan korona deşarj plazma, kirleticilere karşı dayanıklı oluşu, yüksek iyonlaştırma verimi ve kolay kurulumludur. 3,5-6 eV elektron enerjisi ile oluşturulabilmektedir (Wen ve Jiang, 2001). Son olarak, radyo frekans deşarj plazma sistemleri, tipik olarak 1-100 MHz frekans aralıkları ve 1-103 Pa basınç altında oluşturulmaktadır. Öte yandan, oluşturduğu 3 metreye kadar dalga boyları ile plazma reaktörlerinin tipik uygulama limitlerini aştığı için diğer termal olmayan plazma sistemlerine kıyasla kullanımı daha nadirdir (Devid ve diğerleri, 2020).

Genellikle 10 kPa ve daha üzeri basınçlarda ve 2.000-20.000 K sıcaklık aralığında olan plazma deşarjları termal plazma olarak adlandırılmaktadır. Termal plazma tipik olarak ark deşarjı, radyo frekans (RF) deşarjı ya da mikrodalga deşarj (MW) ile oluşturulabilmektedir (Gomez ve diğerleri, 2009). RF ve MW plazmalar için yapı Şekil 2.14'te gösterildiği gibi olmasına karşın, termal plazma oluşturmak için uygulanması gereken deşarj parametreleri değişkenlik göstermektedir. Öte yandan, termal plazma uygulamalarında en sık olarak görülen deşarj türü ark plazma deşarjlarıdır. Ark plazmalar, elektrik akımına göre DC veya AC elektrik ile elde edilebilmekte olup, transferli ve transfersiz olmak üzere iki farklı ark deşarjı oluşturulabilmektedir.

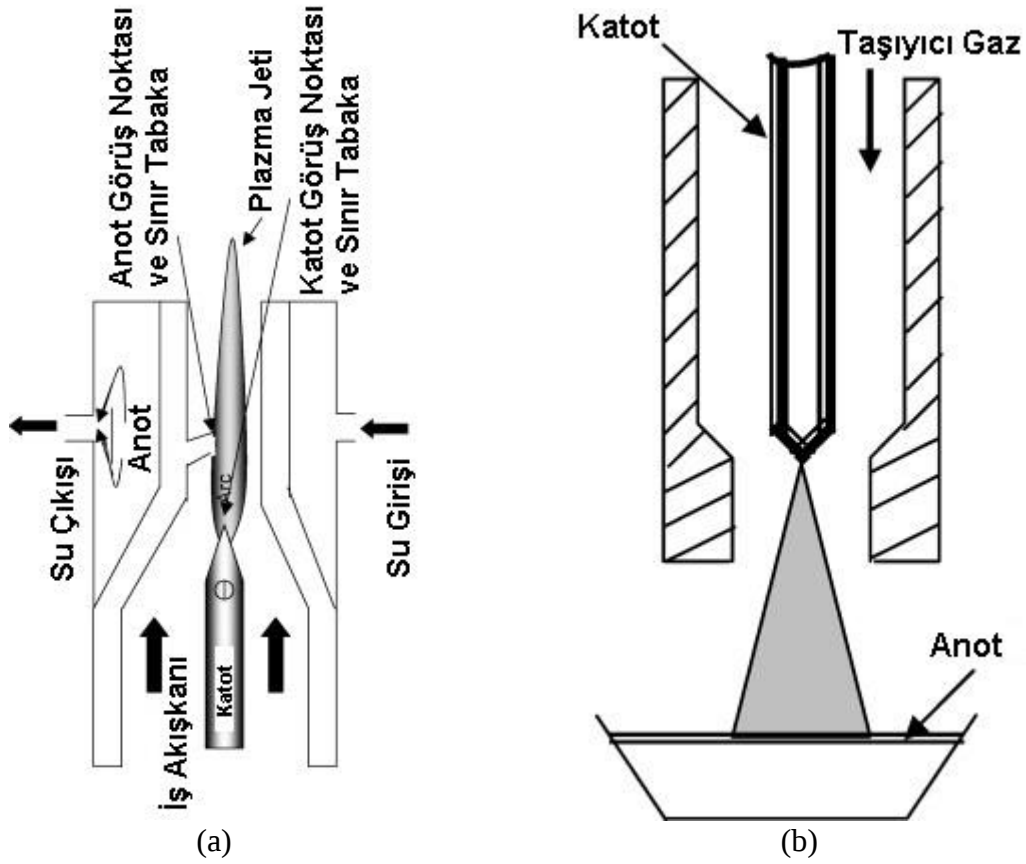
DC ark plazma torçlarına ait tipik konfigürasyonlar Şekil 2.15'te şematik olarak verilmiştir. Transfersiz DC ark plazma sistemleri, endüstriyel uygulamalarda en yaygın olarak görülen plazma sistemleridir. Bu sistemlerde elektrik deşarjı torç içerisindeki iki elektrot arasında gerçekleşmekte, dolayısıyla uygulama yapılan madde/yüzey ile elektrot akımı oluşmamakta ve oluşan yüksek sıcaklıklı iyonlaşmış gaz dışarı atılmaktadır. Transfersiz DC ark plazma torçları da elektrot sıcaklıklarına göre sıcak ve soğuk elektrotlu plazma torçları olarak ikiye ayrılmaktadır. 100 kW veya daha düşük güç seviyelerinde kullanılan sıcak elektrotlu sistemler, torç içerisinde silindirik çubuk şeklinde bulunan toryumlu tungsten katot elektrot ve dairesel nozul şeklindeki bakır anot elektrot kullanılarak oluşturulmaktadır. Bu tür transfersiz ark plazma torçlarında, tungsten elektrodun oksitlenmemesi için oksijen içerikli gazlar yerine Ar, He, N₂ veya H₂ gibi gazlar iş akışkanı olarak kullanılmakta olup, gaz debileri genelde 100 L/dak değerinin altında kalırken, oluşan plazma jeti 6.000-15.000 K civarında olmakta ve sıcak gazın sahip olduğu enerji yoğunlukları 145 MJ/m³ değerine kadar çıkabilmektedir. Soğuk elektrotlu ark plazma torçları ise 100 kW – 6 MW aralığındaki güç

seviyelerinde ve 5.000 L/dak gibi yüksek gaz debilerinde de kullanılabilir. Bu sistemlerde oksitleyici gaz kullanılabilir olup, elde edilen sıcaklıklar 8.000 K değerinin altındadır. Her iki sistem de sağladıkları yüksek sıcaklıklar nedeniyle eritme, kesme vb. işlemler gerektiren ekstraktif metalurji proseslerinde (ultra-ince toz üretimi), yakma-gazlaştırma proseslerinde veya yüksek sıcaklıklı yüzey kaplama proseslerinde kullanılmaktadır (Gomez ve diğerleri, 2009).



Şekil 2.14. Termal olmayan plazma sistemlere ait şematik diyagramlar. (a) DBD plazma (Godoy-Cabrera ve diğerleri, 2004), (b) Kayan ark plazma (Kuznetsova ve diğerleri, 2002), (c) Mikrodalga plazma (Weatherford ve Foster, 2009), (d) Akkor deşarj plazma (Momeni ve diğerleri, 2018), (e) Korona deşarj plazma (Wu ve diğerleri, 2018), (f) Radyo frekans deşarj plazma (Hakki ve diğerleri, 2016).

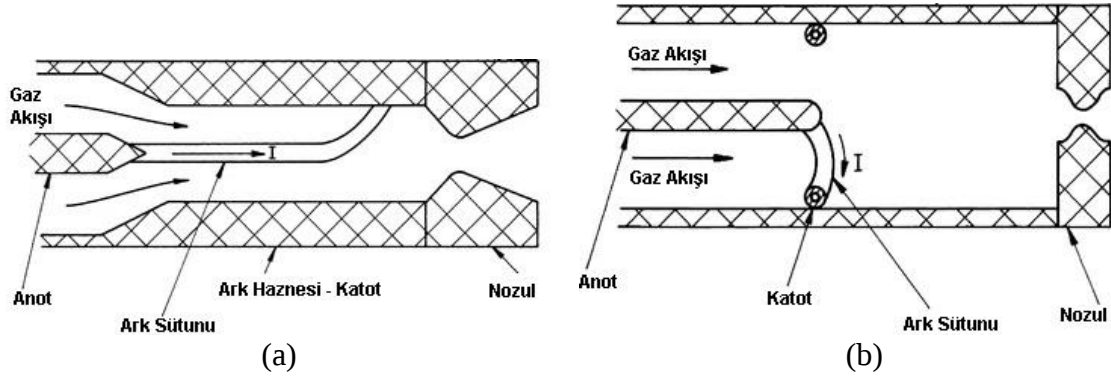
Transferli DC ark plazma torçlarında ise anot elektrot uygulama yüzeyi olmakta, dolayısıyla oluşan elektriksel akım uygulama yapılan yüzeye aktarılmakta ve deşarj bu yüzey ile torç içerisindeki elektrot arasında oluşmaktadır. Bu nedenle, transfersiz DC ark plazma torçlarında radyatif ısı transferi kayıpları, bu sistemlerde görülmemektedir. Plazma oluşumu için gerekli gaz debisi minimum 200 L/dak olurken, gazın enerji yoğunluğu 2.800 MJ/m^3 değerine kadar çıkabilmektedir. Sağladığı yüksek sıcaklıklar nedeniyle, özellikle yüksek saflıkta metal ergitme gerektiren proseslerde tercih edilmektedir (Gomez ve diğerleri, 2009). Ancak, özellikle kesme ve bazı ergitme prosesleri haricinde, daha düşük kurulum maliyetleri nedeniyle daha çok laboratuvar ölçekli uygulamalarda kullanılmaktadır.



Şekil 2.15. Tipik DC ark plazma torç konfigürasyonları. (a) Transfersiz ark plazma torç, (b) Transferli ark plazma torç (Gomez ve diğerleri, 2009).

DC ark plazma torçlarındaki en büyük problem, kullanılan elektrotların korozyona uğraması ve servis ömürlerinin kısa olmasıdır. Sistemdeki bu sorun, hassas ve yüksek maliyetli güç elektroniği tasarımları nedeniyle ilk yatırım ve işletme maliyetlerinin yaklaşık %30'unu oluşturmaktadır. Bu problemin önüne geçmek için trifaze (üç fazlı) AC ark plazma torçlar geliştirilmiştir. Şekil 2.16, tipik AC ark plazma torç konfigürasyonlarını göstermektedir.

Paralel akışlı AC ark plazma torç içerisinde ark sütunu, akış yönüne paralel şekilde oluşmaktadır. Öte yandan normal akışlı AC ark plazma torç içinde ise ark sütunu akış yönüne dik olacak şekilde gerçekleşmektedir (Fulcheri, Fabry, Takali ve Rohani, 2015).



Şekil 2.16. Tipik trifaze AC ark plazma torç konfigürasyonları. (a) Paralel akışlı AC ark plazma torç, (b) Normal akışlı AC ark plazma torç (Fulcheri ve diğerleri, 2015).

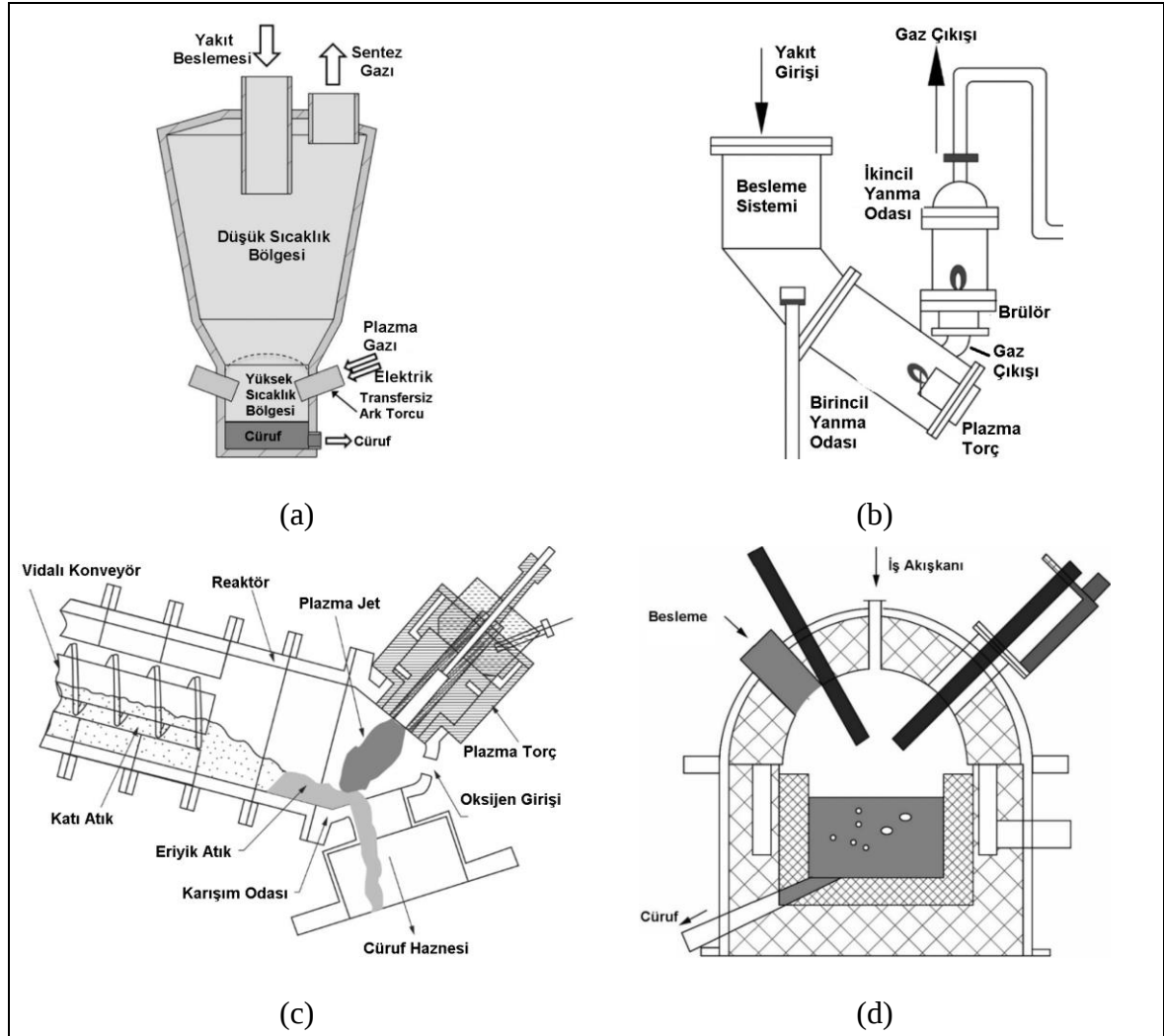
Sağladığı sıcaklıklar ve performans açısından DC ark plazma sistemleri ile benzerlik gösteren AC ark plazma sistemleri, endüstride daha çok yüksek sıcaklık ve uzun servis ömürleri gerektiren proseslerde kullanılmaktadır. Cam eritme prosesi, elektrikli ark fırınları, tehlikeli ve toksik atıkların gazlaştırılması, karbon nanomalzemelerin üretimi, dekarbonizasyon ve 7-8 Mach sayılarının üzerindeki hipersonik uçuşlar gerçekleştiren balistik füze uygulamaları, AC ark plazma torç sisteminin örnek uygulama alanlarıdır (Fulcheri ve diğerleri, 2015).

Literatürde termal plazmanın atık bertarafı amacıyla kullanıldığı birçok araştırma bulunmasına karşın, bu sistemlerin tasarımı veya modellenmesi üzerine yapılan araştırmalar sınırlıdır. Özellikle atıkların bertarafı için endüstriyel ölçekte kurulan sistemler genellikle belirli araştırma gruplarından yardım alınarak yapılmış olup, elde edilen verilerin paylaşılması çoğunlukla tercih edilmemektedir. Bu nedenle, özellikle termal plazma teknolojilerinin tasarımı ve üretimine yönelik yeni araştırmalara ihtiyaç duyulmaktadır (National Research Council, 1995).

2.5.2. Plazma gazlaştırma ve atıktan enerji üretiminde kullanımı

Termal plazma teknolojileri kapsamındaki plazma gazlaştırma sistemleri, sağladıkları yüksek sıcaklıklar sayesinde tehlikeli atıkların yüksek verim ve düşük kirletici oluşumu ile bertaraf edilebildiği ve yüksek enerji geri dönüşümünün sağlanabildiği, umut vaat eden

alternatiflerden biridir. Allotermal gazlaştırma yöntemlerinden birisi olan plazma gazlaştırıcılarda klasik gazlaştırıcılardan farklı olarak brülörler yerine 5.000-10.000 K aralığındaki jet sıcaklıklarına sahip plazma torçlar kullanılmaktadır (Huang ve Tang, 2007). Bu nedenle ilave fosil yakıt ve oksitleyici ajanlar (Hava, O_2) yerine, yüksek sıcaklıklı plazma jetinin oluşabilmesi için elektrik beslemesi ve farklı türdeki gazların beslenmesine (Ar, He, O_2 , CO_2 , hava, buhar vs.) ihtiyaç duyulmaktadır. Ayrıca klasik gazlaştırıcılardaki reaksiyon kinetiğine ek olarak plazma gazlaştırıcılar içerisinde yüksek enerji seviyeleri nedeniyle iyonlaşma gerçekleşmekte, çeşitli yüklü parçacıklar (iyonlar, radikaller, serbest elektronlar vb.) oluşmaktadır.



Şekil 2.17. Çeşitli plazma gazlaştırıcı konfigürasyonları (Cai ve Du, 2021). (a) Yukarı akışlı transfersiz DC ark plazma gazlaştırıcı, (b) Aşağı akışlı transfersiz DC ark plazma gazlaştırıcı, (c) Hareketli yataklı transfersiz DC ark plazma gazlaştırıcı, (d) trifaze AC ark plazma gazlaştırıcı.

Plazma gazlaştırıcılar, klasik gazlaştırıcılarla benzer şekilde reaktör tasarımına ve akış yöntemine göre sınıflandırılmaktadır (Tang, Huang, Hao ve Zhao, 2013). Gazlaştırma sisteminde kullanılan plazma torçlar ise genellikle mikrodalga deşarj (magnetron, klistron vb.), transfersiz-transferli DC ark deşarj ve trifaze AC ark deşarj prensipleri ile çalışmaktadır (Snoeckx ve Bogaerts, 2017). şekil 2.17, literatürde uygulanan bazı plazma gazlaştırıcı konfigürasyonlarını göstermektedir. Plazma gazlaştırma proseslerinde iş akışkanı olarak genellikle kolay erişilebilir oldukları için hava, buhar, N₂, O₂, CO₂ ve karışımları kullanılmakta olup (Agon ve diğerleri, 2016), özellikle son yıllarda karbon yakalama amacına uygun olarak CO₂ beslemeli plazma gazlaştırma uygulamalarına yönelik güncel uygulamalar mevcuttur (Sikarwar ve diğerleri, 2022; Wang ve diğerleri, 2019). Kentsel atıkların plazma gazlaştırma prosesine tabi tutulması ile elde edilen sentez gazı içeriğinde genellikle CO ve H₂ başta olmak üzere kalorifik değerleri yüksek gazlar bulunmakta (hava plazma için maks. 3.410 kcal/kg ve sentez gazında %82,4 yanıcı gaz içeriği; buhar plazma için maks. 4.640 kcal/kg ve sentez gazında %94,5 yanıcı gaz içeriği), ulaşılan maksimum elektriksel, termal ve soğuk gaz verimleri ise sırasıyla %32, %80 ve %95 olarak hesaplanmakta olup, bu değere nem yüzdesi, plazma torç sıcaklığı, plazma iş akışkanı besleme hızı vb. parametreler nonlinear bir biçimde etki etmektedir (Vecten ve diğerleri, 2018; Messerle, Mosse ve Ustimenko, 2016; Hartati, Widiputri ve Dimyati, 2018). Elektriksel ve termal verimi etkileyen en önemli parametre, üretilen sentez gazının ısı enerjisinden daha fazla olarak dışarıya atılan ısı kayıplardır (van der Walt, Jansen ve Crouse, 2017).

Bununla birlikte, plazma gazlaştırıcıların klasik insinerasyon, piroliz ve gazlaştırma yöntemlerinden en büyük farkı, açığa çıkardığı kirletici emisyonların ve PCDD/PCDF oluşumunun klasik yöntemlerde açığa çıkan miktarların oldukça altında kalmasıdır. Çizelge 2.15, plazma atık gazlaştırma reaktörlerindeki PCDD/PCDF oluşum miktarlarını göstermektedir. Buna göre plazma gazlaştırma sistemleri için toplam PCDD/PCDF emisyonu %0,01 değerinin altındadır (Byun ve diğerleri, 2010). Düşük kanserojen PCDD/PCDF oluşumunun yanı sıra, plazma gazlaştırma sistemlerinin açığa çıkardığı diğer kirletici emisyonlar da oldukça düşüktür. Kentsel atıkların plazma gazlaştırma yöntemi ile bertarafı sonrası 30 pg/m³ PCDD, 18 ppm NO_x, 6 ppm SO_x, 5 ppm CO, 0,38 ppm HCl, 0,43 mg/m³ toz emisyonları açığa çıkmakta olup (Kaur, 2016), bu değerler Avrupa Standartları limitlerinin (100 pg/m³ PCDD, 159 ppm NO_x, 19 ppm SO_x, 10 mg/m³ CO, 7 ppm HCl ve 10 mg/m³ toz) oldukça altında kalmaktadır (EU 89/429/EEC, 1989). Ramos, Texeira ve

Rouboa (2019) tarafından yayınlanan raporda kentsel atıkların konvansiyonel yakma sistemleri ve çift kademeli plazma gazlaştırma sistemleri ile bertarafının çevresel etkileri karşılaştırılmış, yakma sistemlerinin Küresel Isınma Potansiyeli (GWP) açısından -400 kg CO₂ eşdeğer (eş.) etkiye neden olurken çift kademeli plazma gazlaştırma sistemlerinin ise -31 kg CO₂ eş. etkiye neden olduğu görülmüştür. Ayrıca plazma gazlaştırma sistemleri için Ozon Tükenme Potansiyeli (ODP) açısından diklortetraflorometan (R114) emisyonlarının -2,13 x 10⁻⁸ kg R114 eş. etkiye neden olduğu ve Abiyotik Fosil Yakıt Tükenme Potansiyeli (ADP) açısından ise her bir ton kentsel atığın plazma gazlaştırma yöntemi ile bertarafının 380 MJ enerji kazanımına neden olduğu belirtilmiştir.

Çizelge 2.15. Plazma gazlaştırıcılarda PCDD/PCDF bileşiklerinin toksik eşdeğerlik faktörü cinsinden oluşum miktarları (Byun ve diğerleri, 2010).

No	Bileşik	Sonuçlar (ng.TEF)
1	1, 2, 3, 4, 6, 7, 8-HpCDD	<0,00024
2	1, 2, 3, 4, 7, 8-HxCDD	<0,0024
3	1, 2, 3, 7, 8, 9-HxCDD	<0,0024
4	1, 2, 3, 7, 8-PnCDD	<0,024
5	2, 3, 7, 8-TCDD	<0,005
6	1, 2, 3, 6, 7, 8-HxCDD	<0,0024
7	OCDD	<0,000015
8	2, 3, 4, 7, 8-PnCDF	<0,0072
9	1, 2, 3, 4, 6, 7, 8-HpCDF	<0,00024
10	1, 2, 3, 4, 7, 8, 9-HpCDF	<0,00024
11	1, 2, 3, 4, 7, 8-HxCDF	<0,0024
12	1, 2, 3, 6, 7, 8-HxCDF	<0,0024
13	1, 2, 3, 7, 8, 9-HxCDF	<0,0024
14	1, 2, 3, 7, 8-PnCDF	<0,00072
15	2, 3, 4, 6, 7, 8-HxCDF	<0,0024
16	2, 3, 7, 8-TCDF	<0,0005
17	OCDF	<0,000015
Toplam Dioksin ve Furan		<0,01

Olumlu çevresel etkilerinin yanında, işletme açısından bakıldığında plazma gazlaştırma tesisleri ile yüksek enerji verimliliği, düşük geri ödeme süreleri ve yüksek kârlılık sağlamak mümkündür. Kanada’da bulunan Halton Yerel Belediyesi’nde 500 ton/gün kentsel atık kapasitesi için kurulan plazma gazlaştırma tesisinin, klasik insinerasyon, piroliz ve gazlaştırma tesislerine kıyasla performans parametreleri karşılaştırmalı olarak Çizelge 2.16’da verilmiştir. Buna göre, ilgili plazma gazlaştırma tesisi için ilk yatırım maliyetlerinin klasik insinerasyon tesislerine oranla %12,9 daha az, net enerji üretimi potansiyelinin ise diğer sistemlere göre %33 daha fazla olduğu görülmektedir. En yüksek işletme maliyetlerine

sahip olmasına karşın, plazma gazlaştırma sisteminin yıllık net kârlılık potansiyeli, klasik insinerasyon ve pirolize kıyasla daha yüksek olmaktadır. Proses açısından bakıldığında servis ömrünün kabul edilebilir düzeyde, üretilen yakıttaki nem içeriğinin ise minimum olduğu, ancak gerekli otomasyon düzeyinin diğer yöntemlere kıyasla daha yüksek olduğu görülmektedir. (Munir ve diğerleri, 2019). Ayrıca, yapılan başka bir araştırmada kentsel atıkların bertarafı için kurulan ve net bugünkü değeri (NBD) 45.239,90 k\$ olan bir plazma gazlaştırma tesisine ait dinamik geri ödeme süresinin, yüksek işletme maliyetlerine rağmen 3,75 yıl olabileceği belirtilmiştir (Chen ve diğerleri, 2022).

Çizelge 2.16. Kentsel atıkların bertarafı için plazma gazlaştırma, insinerasyon, piroliz ve klasik gazlaştırma yöntemlerine ait performans parametreleri (Munir ve diğerleri, 2019).

Performans Parametresi	Plazma Gazlaştırma	İnsinerasyon	Piroliz	Gazlaştırma
Maliyet-Kârlılık (500 ton/gün kentsel atık kapasitesi için)				
İlk Yatırım Maliyeti (USD)	101.583.800	115.997.700	86.936.900	80.337.800
Yıllık İşletme ve Bakım Maliyetleri (USD/yıl)	7.483.400	8.216.600	7.193.700	6.871.800
Net Yıllık Kâr Potansiyeli (USD/yıl)	+3.200.000	-3.300.000	+500.000	+3.100.000
Servis Ömrü ve Proses Kabiliyetleri				
Servis Ömrü (yıl)	20	30	20	30
Üretilen Yakıttaki Max. Nem(%)	10	50	10	50
Otomasyon Düzeyi	Yüksek	Orta	Orta	Orta
Atık Ayrıştırma İhtiyacı	Var	Var	Var	Var
Enerji Üretimi				
Güç Üretim Kapasitesi (MW/ton)	5	5	5,5	5,5
Net Enerji Üretim Potansiyeli (kWh/ton) (Vergi Üretim Öncesi)	816	544	571	685
Çevresel Etkiler				
Katı Atık Hacmindeki Azalma (wt. %)	90	75	84	82
Kalıntı (ton/tonatık)	0,18 (Camsı Cüruf)	0,22 (Kül)	0,21 (Kül)	0,2 (Kül)
Kül Bertarafı ve Camsı Cüruf Oluşumu	Var	Yok	Yok	Yok
Partikül (µg/m ³)	12,5	20	5,7	14,1
SO _x (µg/m ³)	26	40	35	19
NO _x (µg/m ³)	150	40-100	77-139	40-70
HCl (µg/m ³)	1-8	-	10-50	3-26
Hg (µg/m ³ × 10 ⁻⁴)	<2	-	-	<70
PCDD/PCDF (µg/m ³ × 10 ⁻³)	<9,25	<98,3	-	-
* İlgili veriler ekonomik analizler ve literatür verileri kullanılarak elde edilmiş olup; analizler yapılırken atık boşaltma vergisinden kazanç 35,0 \$/ton, yeşil sertifika (green tags) teşviği 2,0 ¢/kWh, elektrik fiyatı 6,5 ¢/kWh ve camsı cüruf satış bedeli 15,0 \$/ton olarak alınmıştır.				

Plazma gazlaştırma prosesinin yukarıda belirtilen düşük emisyon değerleri, ekonomik açıdan uygulanabilirliği, yüksek hidrojen üretim potansiyeli, kabul edilebilir ölçüdeki elektriksel verimi, maddi değere sahip cüruf üretimi vb. avantajları sebebiyle plazma gazlaştırma sistemleri oldukça cazip hale gelmiştir. Klasik gazlaştırıcılarla benzer tasarımlara sahip olmasına karşın, plazma torçları içerisindeki elektrot tasarımının zorluğu, uygun güç kaynağı tasarımının karmaşık olması, plazma jetlerinin konumlarının reaktör içerisinde yarattığı üniform olmayan sıcaklık dağılımları ve plazma fazının prosese göre oldukça kararsız bir yapıda seyretmesi sebebiyle tasarım açısından büyük farklılıklara ve optimizasyon zorluklarına sahiptir. Bu nedenle, plazma gazlaştırma teknolojisi halen güncel araştırmaların konusu olmaktadır. Günümüzde Rusya, Japonya, Kanada, ABD gibi ülkelerde kentsel atıkların gazlaştırılması üzerine deneysel ve teorik çalışmalar devam etmektedir. Ayrıca Plazarium, AlterNRG, Westinghouse vb. şirketler tarafından çeşitli ticari ölçekli tesisler inşa edilmiş olup, laboratuvar ve pilot ölçekli tesisler (<30 kW) ise deneysel aşamada bulunmaktadır (Byun ve diğerleri, 2012).

2.5.3. Tıbbi atıkların bertarafında kullanımı

Literatürde atıkların plazma gazlaştırma yöntemi ile bertarafı üzerine yapılan deneysel çalışmaların sayısı yetersiz olup; mevcut çalışmalarda deney düzeneğine ait veriler, deneysel parametreler, ölçüm sonuçları, elde edilen sentez gazı içerikleri vb. durumlar genellikle net bir şekilde raporlanmamıştır. Bu nedenle, tıbbi atıklar için yapılan çalışmaların yanı sıra, diğer türden atıkların plazma gazlaştırma yöntemi ile bertarafı üzerine yapılan deneysel çalışmalar ve elde edilen sonuçların incelenmesi gerekmektedir. Bu noktadan hareketle, literatürde raporlanan çalışmalar Çizelge 2.17’de özetlenmiştir. Bu çalışmalarda tıbbi atığın (MW) gazlaşma karakteristiklerinin yanı sıra, arıtma çamuru (SS), kentsel atık (MSW), kimyasal atık (CHW) vb. diğer atık türlerinin plazma gazlaştırma sistemi içerisindeki proses karakteristikleri de ele alınmıştır. Görüldüğü gibi, doğada mevcut olmaları ve kolay erişilebilir olmaları nedeniyle plazma iş akışkanı olarak genellikle hava, buhar, oksijen veya azot kullanılmıştır. Kullanılan gazlaştırıcı türü açısından değerlendirildiğinde, tıbbi atıklar üzerinde yapılan çalışmalarda yaygın olarak aşağı ve yukarı akışlı plazma gazlaştırıcıların kullanıldığı görülmektedir. Tıbbi atıklar için yapılan çalışmalar ele alındığında sentez gazı içeriklerinin oldukça değişken olduğu; bunun kullanılan iş akışkanı, atık içeriği, oksitleyici ajan miktarının atık miktarına oranı, reaktör sıcaklığı, reaktör türü vb. parametrelere bağlı olduğu, ancak sentez gazı içeriğinin ana belirleyicisinin atık içeriği olduğu görülmektedir.

Çizelge 2.17. Plazma gazlaştırma yönteminin atık bertarafında kullanımına yönelik mevcut deneysel çalışmalar.

Ref. Çalışma	Atık Özellikleri		Plazma Parametreleri					Gazlaştırıcı Reaktör Parametreleri				Elde Edilen Sonuçlar		
	Atık Türü	Fiziksel İçeriği	Torç Türü	Torç Kapasitesi	İş Akışkanı	Akışkan Debisi	Reaktör Türü	Atık Kapasitesi	Reaktör Boyutları	Sentez Gazı İçeriği	Soğuk Gaz Verimi	Emisyonlar		
Nema ve Ganeshpras ad (2002)	MW	2/3 Pamuk 1/3 Plastik	Transfersiz DC Ark	50 kW	N ₂	-	Aşağı Akışlı	<600 kg	-	%22,6 H ₂ %26,7 CO %1,5 CH ₄ %4,2 CO ₂ %45 N ₂	-	85 ppm CO 25 ppm NO _x 20 ppm SO ₂ 95 ppm PAH		
Fiedler ve diğerleri (2004)	MW	%80 Na ₂ CO ₃ %20 PE	Transfersiz DC Ark	15-18 kW	Hava	5,7-12,6 m ³ /sa	Aşağı Akışlı	10-14,2 kg	900 cm ³	-	-	-		
Messerle ve diğerleri (2018)	MW	Kemik Doku	Transfersiz DC Ark	70 kW	Hava Buhar	12 kg/sa	Sabit Yataklı Fırın	16 kg	W:0,3m D:0,2m H:0,2m	%63,4 CO %6,2 H ₂ %29,6 N ₂ %0,2 S	%86,5	-		
Cao ve diğerleri (2021)	MW	PE	-	120 kW	Hava	15 g/s	Yukarı Akışlı	0,2 kg/dk	D=Ø0,3m H=0,5m	%22,3 CO %0,53 H ₂ %0,55 CH ₄ %2,9 CO ₂	-	-		
Mashayak (2009)	MW	Selüloz	Transferli DC Ark	100 kW	Hava	-	Yukarı Akışlı	60 kg/sa	D=Ø0,7m H=1,5m	%35,7 CO %39 H ₂ %22,3 N ₂ %0,06 H ₂ S	>%80	-		

Çizelge 2.17. (Devamı) Plazma gazlaştırma yönteminin atık bertarafında kullanımına yönelik mevcut deneysel çalışmalar.

Ref. Çalışma	Atık Özellikleri		Plazma Parametreleri				Gazlaştırıcı Reaktör Parametreleri			Elde Edilen Sonuçlar		
	Atık Türü	Fiziksel İçeriği	Torç Türü	Torç Kapasitesi	İş Akışkanı	Akışkan Debisi	Reaktör Türü	Atık Kapasitesi	Reaktör Boyutları	Sentez Gazı İçeriği	Soğuk Gaz Verimi	Emisyonlar
Zhovtyansky ve diğerleri (2013)	MW	%60 Seliüloz %30 PE %10 H ₂ O	Transfersiz DC Ark	160 kW	-	-	Yukarı Akışlı	50 kg/sa	20 L	%49,9 H ₂ %2,2 CH ₄ %35,3 CO %3,4 C ₂ H ₄ %3,9 C ₂ H ₂	-	-
Siriugas ve diğerleri (2017)	SS	-	Transfersiz DC Ark	52 kW	Hava	7 g/s (ER=0,58)	Kombine Yatay Akışlı	19 kg/sa	1-1,5 m Uzunluk	%13,5 H ₂ %23,4 CO %1,2 CH ₄ %8,7 CO ₂ %52,8 N ₂	%65	0,09 g/m ³ Karan 1,89 mg/m ³ HCl 270 mg/m ³ Partikül
Yayalılık ve diğerleri (2020)	MSW	%10,3 Kağıt %2,2 Plastik %3,7 Tekstil %17,8 Torba %52,9 Organik	Transferli DC Ark	45 kW	O ₂	20 L/sa	Yukarı Akışlı	10 kg/sa	1200 mL	%17 CH ₄ %5 C ₂ H ₆ %1 O ₂ %70 CO	%70-90	%2 CO ₂
Zhang ve diğerleri (2012)	MSW	%50 Kağıt %14 Odun %5,5 Tekstil %10 Plastik %3,5 Kauçuk	Ark	240 kW	Hava	60 kg/sa	Yukarı Akışlı	300 kg/sa	-	%20 H ₂ %13 CO %60 CO ₂	%50-60	-
Li ve diğerleri (2009)	CHW	%85 Bifenil %15 PCB	Trifaze AC Ark	30 kW	Hava	-	Yukarı Akışlı	-	-	%28 H ₂ %1,5 HCl	-	-

Tıbbi atıklar için yapılan deneysel çalışmalarda atık beslemesini modellemek için genellikle pamuk ve plastik içerikler kullanılmıştır. Selüloz içeriğinin baskın olduğu tıbbi atık içerikleri için CO ve H₂ oluşumunun farklı reaktörler için birbirine yakın oranlarda elde edilmesi buna bir örnektir. Çalışmalarda pratik kullanımı ve diğer türlere göre kolay tasarımı nedeniyle genellikle transfersiz DC ark plazma torçların kullanıldığı görülmektedir. Emisyon verilerine her çalışmada ulaşamamasına karşın, kentsel atıklar için yapılan bir çalışmada oluşan gaz içeriğinde %60'a varan CO₂ oluşumu görülmektedir. Bunun nedeni, hava beslemesinin etkin olarak kontrol edilememesi ve kısmi oksidasyon reaksiyonlarının yerini stokiyometrik hava koşullarında yanma reaksiyonlarının almasıdır. Yapılan çalışmalarda, tasarlanan reaktörler ile ilgili hacim bilgileri verilmesine karşın, boyutlarının net olarak paylaşılmadığı görülmektedir.

Sonuç olarak, çeşitli ülkelerde büyük kapasitelerde plazma gazlaştırma tesisleri kurulmuş olmasına karşın, literatürdeki veri yetersizliği nedeniyle tıbbi atıkların bertarafı için plazma gazlaştırma sistemleri üzerine yeni araştırmalara ihtiyaç duyulmaktadır.

2.5.4. Plazma gazlaştırma sistemi tasarımında HAD simülasyonları

Plazma gazlaştırma prosesi için gerçek koşullara yakın bir şekilde HAD analizlerinin yapılması, gazlaştırıcı içerisindeki homojenlik, maruziyet süresi, plazma jetinin konumu vb. parametrelerin optimizasyonu açısından önem arz etmekte (Rojas-Pérez, Castillo-Benavides, Richmond-Navarro ve Zamora, 2018), optimizasyonu yapılmadığı takdirde sistem performansını önemli ölçüde etkilemektedir. Literatürde diğer atık çeşitlerinin plazma gazlaştırma yöntemi ile bertarafını HAD simülasyonları ile inceleyen araştırmalar mevcuttur. Ancak, tıbbi atıkların plazma gazlaştırma yöntemi ile bertarafının HAD simülasyonları ile detaylı olarak ele alındığı araştırma sayısı oldukça sınırlıdır. Literatürde bulunan akış modellemeye yönelik çalışmalarda yaygın olarak Eulerian ve Lagrangian modelleme yaklaşımları kullanılmaktadır. Eulerian modelleme yaklaşımında *akışkan hızı; konum ve zamanın bir fonksiyonu olarak modellenmekte olup* ($\vec{u}(x, t)$), akış hacmi içerisinde *sabit noktalardaki hızlar hesaplanmakta, böylece akış hareketleri sabit konumlar üzerinden gözlemlenebilmektedir*. Öte yandan Lagrangian modelleme yaklaşımında ise *akışkan parçacıklarının konumu; belirli bir zamandaki vektörel konumu (zamandan bağımsız) ve zamanın bir fonksiyonu olarak modellenirken* ($\vec{X}(\vec{x}_0, t)$) *akışkan parçacıklar vektör alanı* ($\vec{x}_0$) *ile tanımlanmakta, böylece akışkan parçacıkların hareketleri hareketli*

parçacıklar üzerinden gözlemlenebilmektedir. Her iki model de akışkan parçacıkların konumunun tayininde kullanıldığından birbiri ile Eş. 2.2’de verildiği gibi ilişkilendirilebilmektedir.

$$\vec{u}(X(\vec{x}_0, t), t) = \frac{\delta X}{\delta t}(\vec{x}_0, t) \quad (2.2)$$

Bu nedenle, sıvı ve gaz akışkanların modellenmesi için genellikle Eulerian yaklaşımı kullanılarak sabit noktalardaki akış hızları hesaplanmaktadır. Öte yandan, akışkan hacim içerisinde hareket eden katı parçacıkların modellenmesi için her iki yaklaşım da kullanılabilir olup, akışkan hacim içerisinde izledikleri yörüngelerin tayin edilebilmesi için Lagrangian modelleme yaklaşımının kullanımı daha yaygındır. Dolayısıyla, akış hacmi içerisinde katı parçacıkların hareketlerinin incelendiği durumlarda iki yaklaşımın birlikte kullanılma durumu söz konusu olup, Eulerian (akışkan faz)-Eulerian (parçacık fazı) ya da Eulerian (akışkan faz)-Lagrangian (parçacık fazı) modelleme yaklaşımları entegre olarak kullanılmaktadır.

Çizelge 2.18, atıkların plazma gazlaştırma yöntemi ile bertarafının HAD simülasyonları ile incelendiği çalışmaları özetlemektedir. Yapılan çalışmalar çoğunlukla kentsel atıklar ve diğer atık türleri üzerine yoğunlaşmış olup, tıbbi atıklar üzerine yapılan HAD simülasyon çalışmaları daha azdır. Gazlaştırıcı içerisindeki akış hacmi ve yakıt girdisi modellenirken genellikle Eulerian-Eulerian yaklaşımı kullanılırken, bazı çalışmalarda Eulerian-Lagrangian yaklaşımı da kullanılmıştır. Gazlaştırıcı içerisindeki akışın modellenmesi için genel korunum denklemlerinin yanı sıra, türbülans etkilerinin gözlemlenebilmesi için genellikle $k-\varepsilon$ modellerinin tercih edildiği görülmektedir. Gazlaştırıcı içerisinde gerçekleşen ısı transferlerinin büyük bir kısmını oluşturmalarına rağmen, bazı çalışmalarda radyasyonun ve ışıma ile ısı transferinin modellenmediği görülmekte, modellenen çalışmalarda ise farklı yaklaşımlar kullanılmaktadır. Bileşiklerin gazlaştırıcı içerisindeki hareketinin modellenmesi için kullanılan difüzyon modeli sıklıkla Species Transport modeli olmuştur. Plazma jetin modellenirken en doğru yaklaşım “Lokal Termodinamik Dengeli Isı Kaynağı ve Magnetohidrodinamik” yaklaşımı olmasına karşın, karmaşık modelleme prosedürlerine sahip olması nedeniyle pratik bir yaklaşım olarak yalnızca sıcaklığının etkilerinin dahil edildiği “Sıcak Gaz” modellemesi daha yaygındır. Kimyasal etkilerin plazma gazlaştırıcının

Çizelge 2.18. Plazma gazlaştırma yönteminin atık bertarafında kullanımına yönelik mevcut HAD simülasyonu çalışmaları.

Referans	Yakıt Türü	Türbülans Modeli	Akışkan Faz - Yakıt Fazı Modeli	Radyasyon Modeli	Bileşik Difüzyonu	Plazma Jet Giriş Sınır Şartı	Plazma-Kimyasal Reaksiyonlar
Mashayak (2009)	MW	Standard k-ε	Eulerian - Eulerian	P-1 + WSGGM	Species Transport	Rat ve Coudert (2006)	Yok
Sakhrabi ve diğerleri (2022)	MSW	Standard k-ε	Eulerian - Lagrangian	İhmal edilmiş	Species Transport	Dirichlet Sınır Şartı	Yok
Marias ve diğerleri (2015)	RDF	Realizable k-ε	-	DO	Magnussen-Hertjager	Sıcak Gaz	Var
Sharma ve diğerleri (2020)	-	Standard k-ε	Eulerian	Monte Carlo	-	Lokal Termodinamik Dengeli Isı Kaynağı	Yok
Erdoğan ve Yılmazoğlu (2022)	MW	Standard k-ε	Eulerian - Lagrangian	DO	Species Transport	Sıcak Gaz	Var
Rojas-Perez ve diğerleri (2018)	MSW	Standard k-ε	Eulerian - Eulerian	-	Species Transport	Rat ve Coudert (2006)	Yok
İsmail ve diğerleri (2019)	Odun	Standard k-ε	Eulerian - Eulerian	S. Rosseland (1936)	Species Transport	Sıcak Gaz	Yok

içerisindeki proses karakteristiğine etkilerinin incelenebilmesi için genellikle Çizelge 2.10’da verilen klasik gazlaşma reaksiyonları kullanılmakta olup (Ismail, Monteiro, Ramos, Abd El-Salam ve Rouboa, 2019; Munir ve diğerleri, 2019), plazmanın proses üzerindeki etkileri, jetin oluşturduğu yüksek sıcaklıklar ile modellenmektedir. Öte yandan, gazlaştırıcı içerisinde atom seviyesinde gerçekleşen reaksiyonların (iyonlaşma vb.) mekanizmaya dahil edildiği yaklaşımlar da mevcuttur (Gorokhovski ve diğerleri, 2005; Messerle, Mosse ve Ustimenko, 2018; Marias, Demarthon, Bloas, Robert-Arnouil ve Nebbad, 2015; İbrahimoglu ve Yilmazoglu, 2020).

3. PLAZMA GAZLAŞTIRICI DENEY DÜZENEĞİNİN TASARIMI VE ÜRETİMİ

Bu bölümde deney düzeneğinde kullanılan plazma gazlaştırıcının ve plazma torçun tasarımında kullanılan yaklaşımlar ve kabuller açıklanmış olup, yapılan tasarımın 2 boyutlu teknik resimleri ve 3 boyutlu modelleri paylaşılmıştır. Sonraki kısımda, testlerde kullanılacak olan plazma gazlaştırıcı ile plazma torcunun imalatında kullanılan malzemeler ve teknik özellikleri, kullanılan mekanik ekipmanlar ve gazlaştırıcı ile torçun üretim safhaları detaylı olarak açıklanmıştır. Ardından deney düzeneğinin kurulumu hakkında bilgiler verilmiş, kullanılan ölçüm ekipmanları, yardımcı malzemeler, çalışma aralıkları ve deney düzeneğine ait şema kapsamlı bir şekilde irdelenmiştir. Son olarak gazlaştırıcının işletme koşulları açıklanmış ve deneyler esnasında yapılan kabuller paylaşılmıştır.

3.1. Plazma Gazlaştırma Sistemi ve DC Ark Plazma Torç Tasarımı

Öngörülen plazma gazlaştırıcının boyutlandırılması için, klasik biyokütle gazlaştırıcıların boyutlandırılmasında kullanılan pratik bağıntılardan yararlanılmış olup, kullanılan bağıntılar Eş. 3.1-3.7’de verilmiştir. Gazlaştırıcının pratik olarak boyutlandırılabilmesi için motor verimi 0,28 , gazlaştırıcının verimi ise 0,7 olarak kabul edilmiştir. Özgül gazlaştırıcı yükü pratikte 0,3 ila 1 aralığında kabul edilmekte olup, çalışma kapsamında yapılacak boyutlandırmada bu değer 0,3 olarak belirlenmiştir. Özgül gazlaşma oranı belirlenirken, biyokütle için genellikle 1 kg atıktan 2,5 m³ gaz üretildiği kabul edilmektedir. Bu nedenle özgül gazlaşma oranı 2,5 m³/kg.sa olarak kabul edilmiş olup, boğaz çapı Eş. (4) kullanılarak hesaplanmıştır. Reaktör çapı belirlenirken Ojolo ve Orisaleye’nin (2010) yapmış olduğu çalışmada klasik biyokütle gazlaştırıcı tasarımında kullanılmak üzere oluşturulan diyagramdan yararlanılmış olup, ilgili diyagram Şekil 3.1’de gösterilmiştir. Reaktör çapı belirlenirken, beslenen atık numunelerinin 4-25 mm büyüklükteki kaba granüller halinde olduğu kabul edilmiş olup, reaktör çapının boğaz çapına oranı Şekil 3.1’de kırmızı ile işaretlenen eğri üzerinden hesaplanmıştır. Gazlaştırıcının boğaz kısmının daralma açısının genellikle 45°-60° aralığında olduğu görülmektedir (Ojolo ve Orisaleye, 2010). Bu noktadan hareketle, standart redüksiyon parçalar ile üretimin sağlanabilmesi için reaktör boğazının daralma açısı 60° olarak belirlenmiştir. Çalışma kapsamında deneysel ölçekli bir reaktör geliştirilmek istendiğinden, bertaraf edilmesi gereken atık kapasitesinin 1 saat içerisinde

bertaraf edileceği kabul edilmiş olup, buna göre reaktör yüksekliği Eş. 3.6 ve Eş. 3.7 üzerinden hesaplanmıştır. Atık beslemesinde kullanılacak helezonun minimum çapı ve minimum hatvesi Eş. 3.5 kullanılarak hesaplanmış olup, taşıma kapasitesi reaktöre beslenecek atık miktarı ile belirlenmiştir. Yapılan hesaplamalar ile, gazlaştırıcıya ait öngörülen boyutlandırma ve kapasite parametreleri Çizelge 3.1’de özetlenmiştir.

$$\dot{E}_{gazlaştırıcı} = \frac{\dot{E}_{motor}}{\eta_{motor}} \quad (3.1)$$

$$\dot{E}_{yakıt} = \frac{\dot{E}_{gazlaştırıcı}}{\eta_{gazlaştırıcı}} \quad (3.2)$$

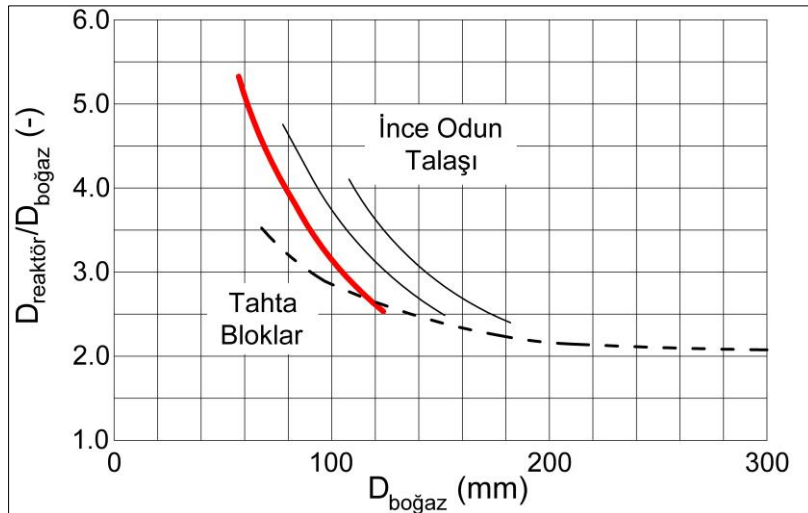
$$\dot{m}_{atık} = \frac{\dot{E}_{yakıt}}{LHV_{atık}} \quad (3.3)$$

$$\dot{B}_{gazlaştırıcı} = R_{gaz} \times \frac{4\dot{m}_{atık}}{\pi D_{boğaz}^2} \quad (3.4)$$

$$Q_{Helezon} = \frac{\pi D_{Helezon}^2}{4} \times S_{Helezon} \times n_{mil} \times \psi_{Yükleme} \times \gamma_{atık} \quad (3.5)$$

$$V_{gazlaştırıcı} = \frac{\dot{m}_{atık}}{\gamma_{atık}} \times t_{işletme} \quad (3.6)$$

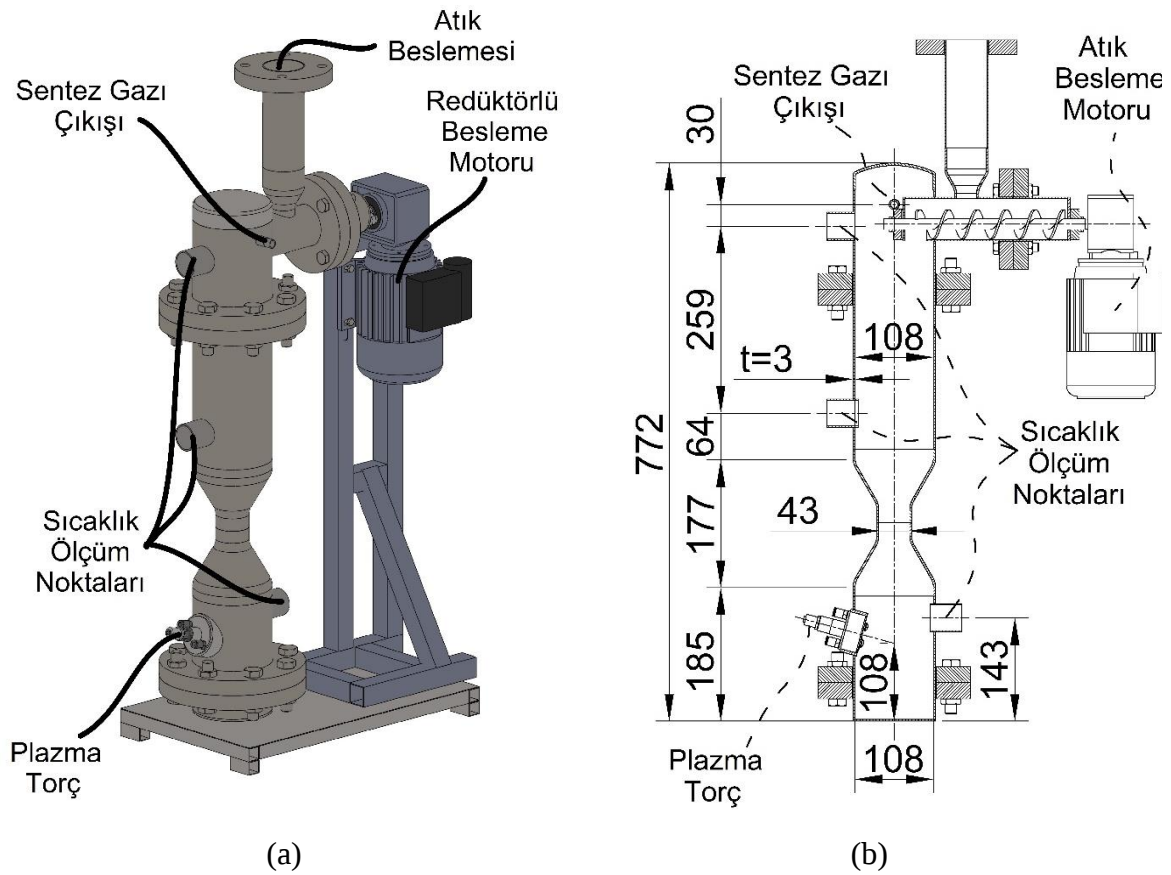
$$H_{gazlaştırıcı} = \frac{V_{gazlaştırıcı}}{D_{reaktör}} \quad (3.7)$$



Şekil 3.1. Reaktör çapının belirlenmesinde kullanılan diyagram (Ojolo ve Orisaleye, 2010).

Çizelge 3.1. Yukarı akışlı plazma gazlaştırıcıya ait tasarım parametreleri.

Enerji Üretim Kapasitesi ($\dot{E}_{gazlaştırıcı}$)	4 kW
Maksimum Atık Besleme Kapasitesi ($\dot{m}_{Atık}$)	7,4 kg/sa
Boğaz Çapı ($D_{Boğaz}$)	46 mm
Reaktör Çapı ($D_{Reaktör}$)	135 mm
Reaktör Yüksekliği ($H_{gazlaştırıcı}$)	710 mm
Torç Montaj Yüksekliği	85 mm
Torcun Zeminle Yaptığı Açı	10°-20°
Tıbbi Atık Yığın Yoğunluğu ($\gamma_{Yığın}$)	1.237 kg/m ³
Kabul Edilen Atık Alt Isıl Değeri (LHV)	29,1 MJ/kg

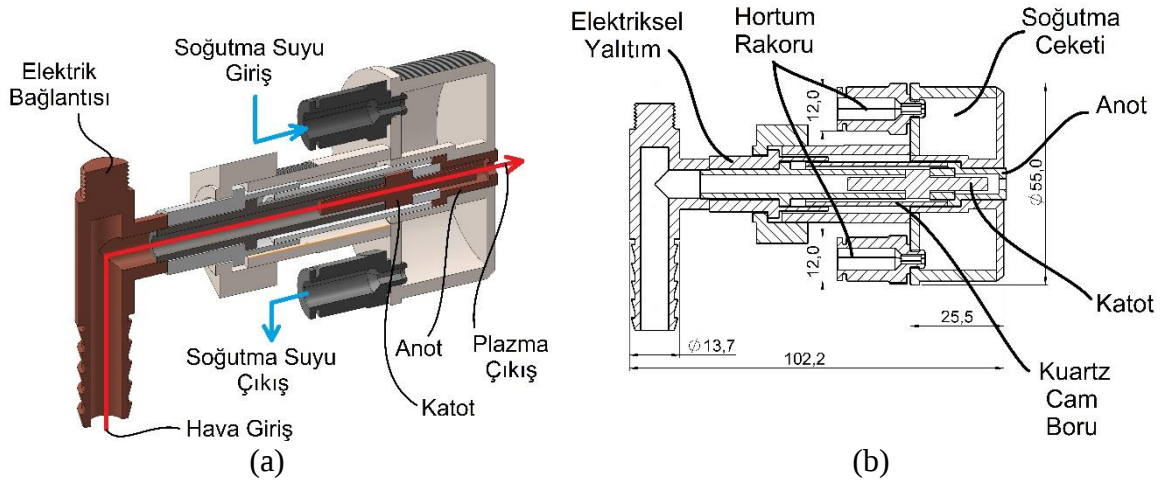


Şekil 3.2. Test edilen laboratuvar ölçekli yukarı akışlı plazma gazlaştırıcı tasarımı. (a) Katı model, (b) Teknik resim.

Öte yandan, belirlenen bu ölçülerin birebir sağlanması imal edilebilirlik açısından oldukça zor olup, yüksek maliyetler söz konusu olacaktır. Bu nedenle, çalışma kapsamında kullanılacak gazlaştırıcının üretimi için standart parçalar kullanılarak imalatın yapılmasına karar verilmiştir. Belirlenen standart parça ölçülerine göre gazlaştırıcı sistemin boyutlandırılması Şekil 3.2’de gösterildiği gibi yapılmıştır. Atık besleme kapasitesinin sağlanabilmesi için 1.500 devir/dk çıkış dönme hızına sahip 0,18 kW gücünde monofaze

asenكرون elektrik motoru kullanılmış olup, 20:1 çevrim oranına sahip redüktör ile mil dönme hızı 75 devir/dk hızına düşürülmüştür. Reaktör içerisindeki sıcaklık dağılımının deneyler esnasında ölçülebilmesi için reaktör üzerine 3 adet termokupl bağlantı noktası belirlenmiştir. Plazma torcun ucundan çıkan plazma jetin, beslenerek reaktörün alt kısmına düştüğü anda atığa yakın noktada olabilmesi için, reaktörün alt kısmından yükseklik oluşmasını sağlayan ateş tuğlanın yerleştirilmesi planlanmıştır. Klasik bir gazlaştırma prosesinde nozulun zemin ile yaptığı açısı 15° olarak alınabilmektedir (Ojolo ve Orisaleye, 2010). Bu nedenle, tasarımı plazma torçun zemin ile yaptığı açısı benzer şekilde 15° olarak belirlenmiştir.

Tasarlanan plazma gazlaştırıcıda kullanılmak üzere yeni bir torç tasarımına ihtiyaç duyulmuş olup, ilgili tasarım şekil 3.3'te gösterildiği gibi modellenmiştir. Kullanılan plazma torç, imalatının kolay olması ve maliyetin düşürülmesi amaçlarıyla mevcut plazma kesme torçlarından uyarlanarak tasarlanmış olup, plazma kesme torçlarından farklı olarak bir soğutma sistemi barındırmaktadır. Çalışma kapsamında plazma güç kaynağı olarak maksimum 50 A çıkış akımı ve 5,5 kW çıkış gücü verebilen VELT CUT50 plazma inverter kullanılmıştır. Tasarlanan gazlaştırıcının prototip olması, dolayısıyla servis ömrünün kritik bir önem taşımaması nedeniyle, üretim maliyetinin azaltılması ve torcun kullanılan plazma inverter ile uyumlu bir şekilde çalışabilmesi için RIVERWELD® CUT50D (Extended) nikel kaplı bakır elektrotlar ve elektrotlar arasındaki mesafeyi korumak için pratikte kullanılan Ø8 mm seramik basınç segmanı tercih edilmiştir. İçeride kalan elektrotla temas halinde olan hava iletim kanalı ve uçta bulunan nozul şeklindeki elektrodun temas ettiği soğutma ceket, yüksek elektriksel iletkenliği nedeniyle bakır malzemeden tasarlanmıştır. Bakır malzemenin kullanılmasının bir diğer sebebi, torç yüzeylerinde istenmeyen elektriksel ark deşarjlarının oluşumunun engellenmek istenmesidir. Elektrik akımının daha kısa mesafelerden kısa devre oluşturmaması için, iki hattın en yakın olduğu bölgeye elektriksel yalıtım malzemesi ve kuartz cam boru yerleştirilmiştir. Soğutma ceketine giriş-çıkış yapan su hatlarının kolay bir şekilde bağlanabilmesi için vidalı hortum rekorları kullanılmıştır. Plazma deşarjının geniş bir bölgede oluşabilmesi için, torcun ucundaki nozulun delik çapı 3,5 mm olacak şekilde genişletilmiştir.



Şekil 3.3. DC ark plazma torç tasarımı. (a) Katı model, (b) Teknik resim.

3.2. Plazma Gazlaştırıcı Test Düzenekinin Üretimi

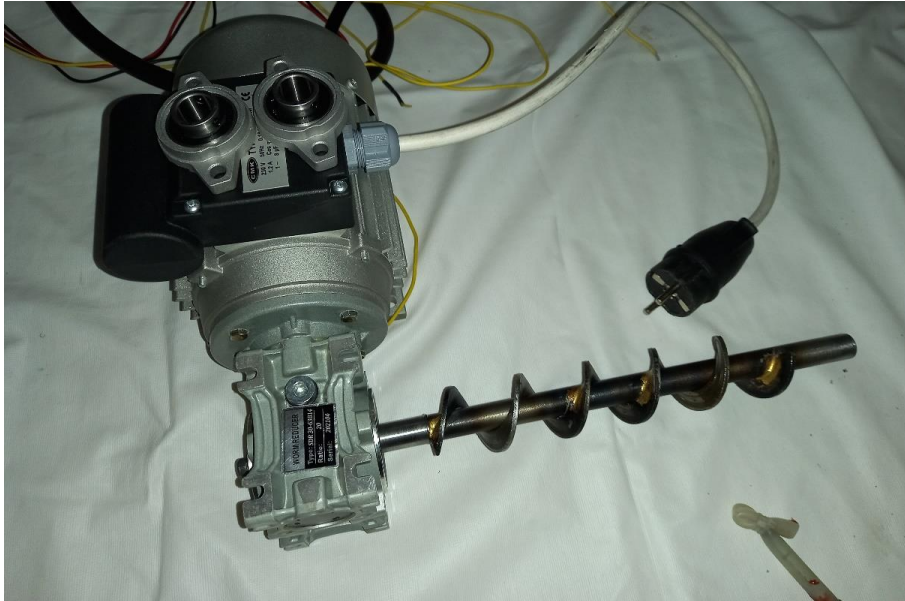
Plazma gazlaştırıcının reaktör kısmının üretiminde kullanılan tüm malzemeler Resim 3.1’de gösterilmiştir. Kullanılan plazma torçun mevcut plazma kesicilerden uyarlanarak üretilmesi nedeniyle, reaktör iç basıncının 2-3 bar civarında olması gerekmektedir. Reaktör iç basıncının nispeten düşük olması nedeniyle, bu basınç aralığında yüksek sıcaklığa dayanıklı olacağı bilinen 310s paslanmaz çelik malzeme kullanılmış olup, kullanılan boru ve redüksiyon geometrileri 310s paslanmaz çelikten üretilmiştir. 310s paslanmaz çelik ASTM A240 çeliği olarak da bilinmekte olup, düşük seviyedeki basınçlarda ince cidar kalınlığı olsa bile 1.200°C sıcaklıklarda oldukça dayanıklıdır. Bu nedenle, reaktörün bütün kısımları ASTM A240 paslanmaz çelik parçalardan üretilmiştir. Reaktörün içerisinde oluşabilecek olası tıkanıklıklar, katmanlaşmalar vb. iç kısma müdahale gerektirecek durumlar için reaktör 3 parça halinde üretilmiş olup, parçaların birbirine montajı için standart paslanmaz flanşlar ve altı köşe cıvatalar kullanılmıştır. Bağlantı noktalarında sızdırmazlığın etkili bir şekilde sağlanabilmesi için asbestsiz klingirit flanş contaları kullanılmıştır. Termokupl bağlantılarının kolay bir şekilde yapılabilmesi için ise 304 kalite paslanmaz çelik manşonlar kullanılmıştır.

Atık beslemesini sağlayan motor, redüktör ve helezon konveyör sistemi Resim 3.2’de gösterilmiştir. Atık beslemesinin sağlanabilmesi için ÇMK-63-4A-M model monofaze asenkron motor (230 V, 0,18 kW, 1.500 devir/dk) kullanılmış olup, besleme noktasında beklenen sıcaklıkların düşük olması nedeniyle krom çelikten imal edilmiş helezon konveyör

tasarlanmıştır. Helezon konveyörün yataklanması ve yataklama noktalarında sızdırma probleminin çözülebilmesi için yataklı sızdırmaz rulmanlar kullanılmıştır. İstenen atık besleme hızlarına erişebilmek için 20:1 çevrim oranına sahip SDR 30-63B14 model sonsuz vidalı redüktör kullanılmıştır.

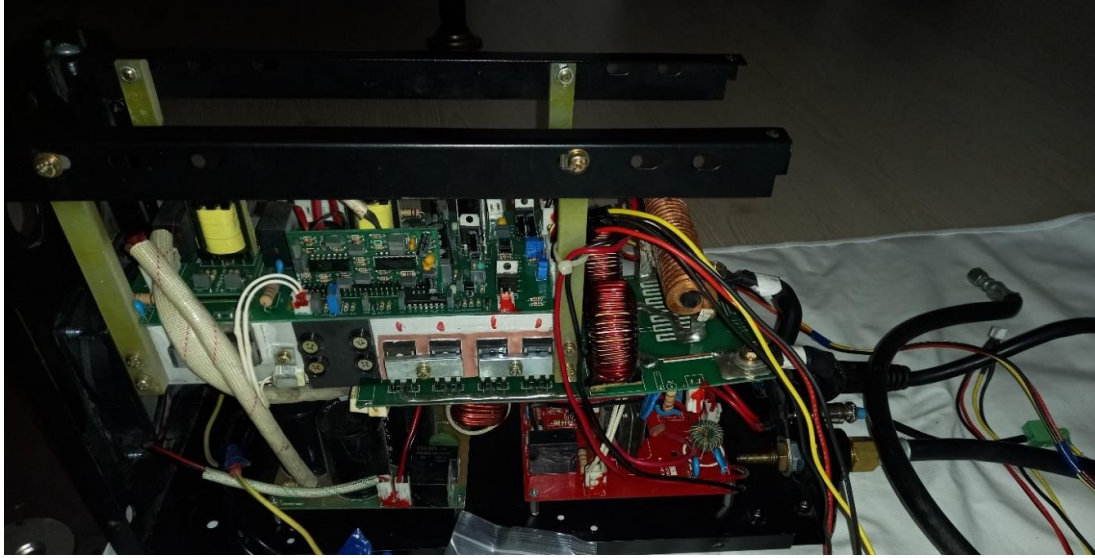


Resim 3.1. Gazlaştırıcı gövdesinin üretiminde kullanılan standart paslanmaz parçalar ve contalar.



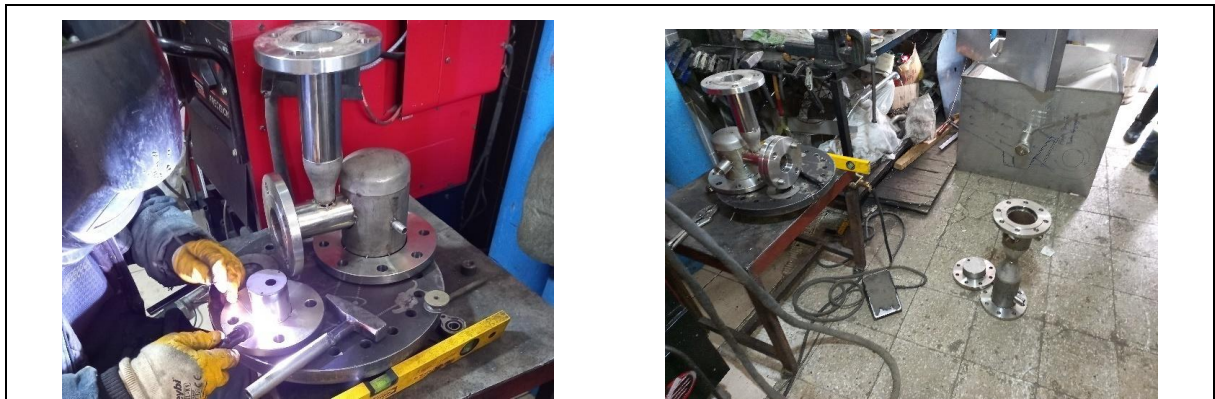
Resim 3.2. Atık beslemesinde kullanılan redüktörlü asenkron motor ve helezon konveyör.

Tasarlanan plazma torçun çalıştırılması için kullanılan plazma güç kaynağı Resim 3.3'te gösterilmiştir. Güç kaynağı VELT CUT-50 DC ark plazma kesici inverteri olup, 10-50 A çıkış akımı ve maksimum 5,5 kW çıkış gücü verebilmektedir. Elektriğin elektrotlara emniyetli bir şekilde iletilebilmesi ve iletim esnasında kabloların ısınarak yıpranmaması için cihaza bağlı 2 adet kalın elektrik iletim kablosu bulunmaktadır.



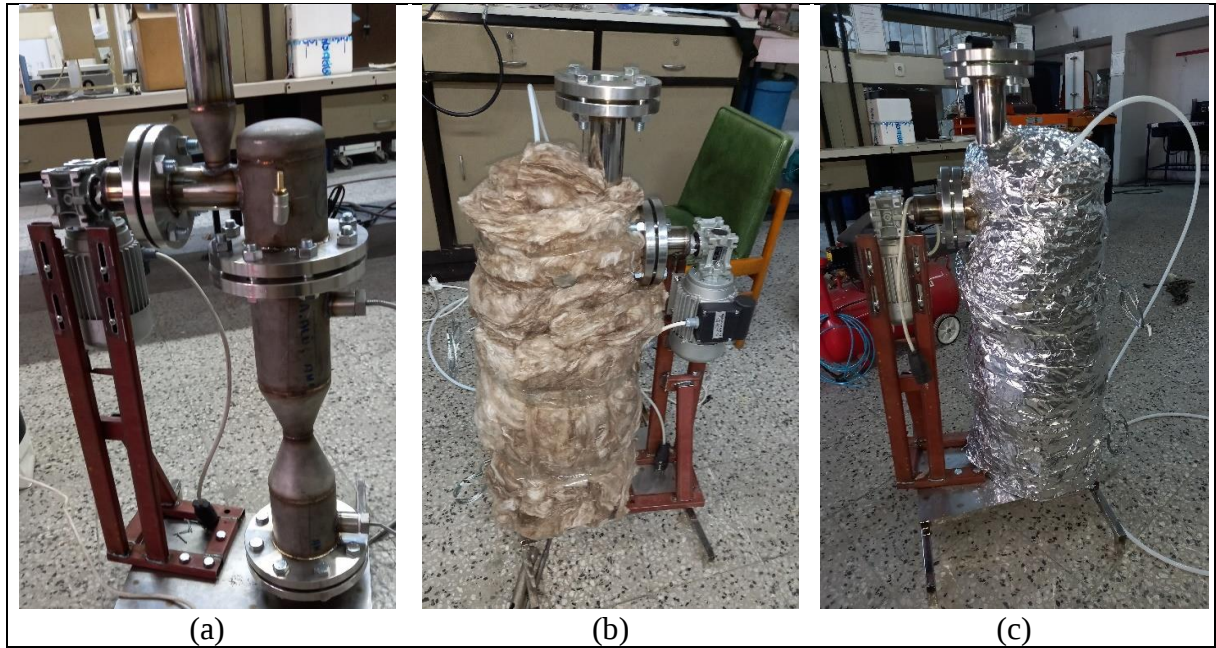
Resim 3.3. Plazma güç kaynağı.

Gazlaştırıcı gövdesinin oluşturulabilmesi için, belirlenen paslanmaz parçalar TIG kaynağı ile birleştirilmiş ve olası temizleme ihtiyacı vb. durumunda gazlaştırıcı içerisine kolay müdahale edilebilmesi için Resim 3-4'te görüldüğü gibi 3 parça halinde üretilmiştir. Kullanılacak plazma torcun ve termokuplların gazlaştırıcı üzerine kolay bir şekilde monte edilebilmesi için paslanmaz manşonlar kullanılmış olup, reaktörün ilgili noktalarından kaynak yöntemi ile birleştirilmiştir.



Resim 3.4. Reaktör ana gövdesinin imalatı.

Gerçekleştirilen imalat prosedürleri sonucunda gazlaştırıcının son hali Resim 3.5 (a)'da görüldüğü gibi elde edilmiştir. Reaktörün parçalarının montajı esnasında klingrit contalar bağlantı yüzeylerine yerleştirilmiş olup, ilave olarak yüksek sıcaklıklara dayanıklı silikon ile sızdırmazlığın artırılması sağlanmıştır. Öte yandan, kullanılan malzemenin metal olması nedeniyle ısı kayıplarının önüne geçilmesi gerekmektedir. Bu nedenle reaktörün oluşan ısıyı kaybetmemesi amacıyla ısı yalıtım yapılmasına ihtiyaç duyulmaktadır. Isı yalıtımı uygulaması yüksek sıcaklık uygulamalarında genellikle ateş tuğla ile yapılmasına karşın, geliştirilen sistemin laboratuvar ölçekli olması ve çalışma süresinin 1 saati aşmayacak şekilde belirlenmesi nedeniyle, maliyetin azaltılması ve montaj kolaylığı açısından yalıtım taş yünü ile yapılmıştır. Bunun için Knauf Earthwool 044 taş yünü kullanılmış olup, ısı iletkenlik değeri 0,044 W/mK, kalınlığı ise 100 mm olarak belirlenmiştir. Resim 3.5 (b), reaktörün taş yünü ile kaplanmış halini göstermektedir. Yalıtım için reaktör çevresine sarılan taş yünü ile birlikte, reaktör dışında sağlanan ısı yalıtım kalınlığı yaklaşık 200 mm olarak ölçülmüştür. Son olarak, taş yününün oluşturduğu tozların uçucu olması, bu tozların insan sağlığına zararlı olması ve olası bir sızıntı durumunda sızıntının ortama salınmaması istendiği için, sarılan yalıtımın üstü alüminyum folyo bant ile kaplanarak Resim 3.5 (c)'deki gibi kapatılmıştır. Gaz çıkışının yönlendirilebilmesi için 200-250°C sıcaklıklara kadar dayanıklı teflon hortumlar kullanılmıştır.



Resim 3.5. Üretilen plazma gazlaştırıcı sistemine ait resimler. (a) Yalıtımsız haldeki gazlaştırıcı, (b) Yalıtılmış haldeki gazlaştırıcı, (c) Alüminyum folyo ile kaplanmış gazlaştırıcı.

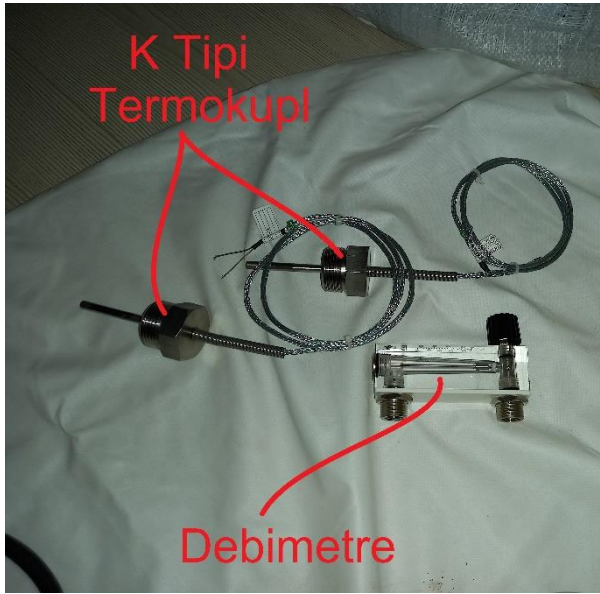
Üretilen plazma torç Resim 3.6'da gösterilmiştir. Torç başlığına ve çevreleyen soğutma ceketine ait parçalar universal torna tezgahında işlenerek bakır malzemeden üretilmiş olup, kaynaklı imalat yöntemi kullanarak parçalar birleştirilmiştir. Torç gövdesine ait bakır parçaların imalatının ardından kaynak noktalarının sızdırmazlığı kontrol edilmiş olup, torcun reaktöre montajının sağlanabilmesi için gövdenin üzerine torna tezgahında dış açılmıştır. Ardından, torcun içerisine CUT50 elektrotlar ve seramik basınç segmanı yerleştirilerek, elektriksel yalıtımın sağlanabilmesi için kuartz cam boru yerleştirilmiştir. Kullanılan kuartz cam boru, yüksek saflıkta silis kumundan (%99,9S) imal edilen ve pratikte rezistans üretiminde kullanılan Ø12 x 1 mm kuartz borudan kesilmiştir. Montaj noktasının yalıtımı için kullanılan elektriksel yalıtım parçası polietil etil keton (PEEK) polimer malzemeden universal torna tezgahında üretilmiştir. Hava beslemesi silikon hortumla sağlanmış, nozula elektrik iletiminin yapılabilmesi için güç kaynağı kablolarından birisi doğrudan torcun soğutma ceketini üzerine, diğeri ise içerideki elektrot ile temas halinde olan bakır nozul üzerine monte edilmiştir. Bu şekilde termal plazma torç Resim 3.6'da görüldüğü gibi oluşturulmuş ve fonksiyonel testlerinin yapılmasının ardından gazlaştırıcı üzerine monte edilmiştir.



Resim 3.6. Üretilen plazma torç ve oluşan plazma jete ait resim.

3.3. Deney Düzenekinin Kurulumu

Tasarlanan gazlaştıracının reaktör içerisinde oluşturacağı sıcaklık dağılımları, hava besleme miktarı, eşdeğerlik oranı, gaz çıkış debisi, elektrik tüketim verileri vb. parametrelerin ölçülebilmesi için Resim 3.7 ve Resim 3.8’de gösterilen ölçüm ekipmanları kullanılmıştır. Hava debisinin ölçümü için akrilik panel tipi debimetre (LZM-6T, $10-100 \pm 5$ L/dak) kullanılmıştır. Sıcaklıkların ölçümü için $0-1.260 \pm 1^\circ\text{C}$ sıcaklıklar arasında makul ölçüm sonuçları verebilen, INCONEL-600 DIN paslanmaz kılıflı ve 6 mm çapında K tipi termokupllar kullanılmıştır. Sentez gazının çıkış sıcaklığının ölçülebilmesi için kullanılan termokupllara ilave olarak $400^\circ\text{C} \pm 3^\circ\text{C}$ sıcaklıklara kadar ölçüm yapabilen 1 adet J tipi termokupl kullanılmıştır. Sıcaklık değişimlerinin etkili bir şekilde okunabilmesi için ise ORDEL UDL100-5 model 5 kanallı USB veri toplayıcı (datalogger) kullanılmış olup, okunan değerler bilgisayara aktarılmıştır.



(a)

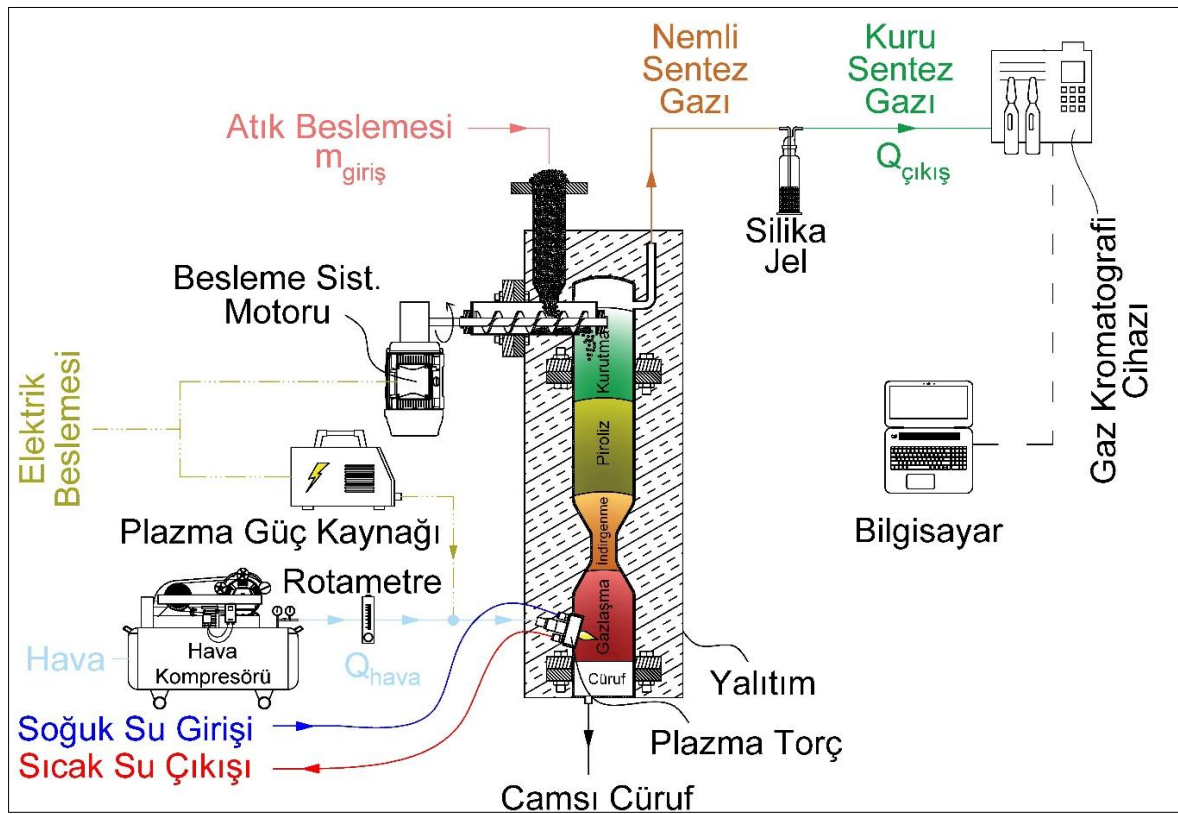


(b)

Resim 3.7. Deneyler esnasında kullanılan (a) debimetre ve k tipi termokupl ile (b) veri toplayıcı.

Deney düzeneğine ait şema Şekil 3.4’te verilmiştir. Reaktör içerisinde oluşması beklenen gazlaşma, indirgeme, piroliz ve kurutma bölgeleri Şekil 3.4’te bulunan reaktör geometrisi üzerinde belirtilmiştir. Plazma torç için gerekli hava beslemesi şemada gösterilen hava kompresörü tarafından yapılmakta olup, hava miktarının belirlenebilmesi için şamandıralı debimetre kullanılmaktadır. Deney esnasında oluşacak cürufun kolay bir şekilde toplanabilmesi için tasarlanan reaktörün alt kısmında cüruf toplama hattı bulunmaktadır.

Yüksek maliyetler nedeniyle atık parçalama sistemi kullanılamamış, bu nedenle atıklar el ile granüle edildikten sonra reaktöre besleme yapılmıştır. Yukarıda da bahsedildiği gibi, termokupllarda ölçülen sıcaklıkların datalogger tarafından toplanarak bilgisayara aktarılması, böylece reaktör içerisindeki sıcaklık değişiminin belirli bir zaman aralığında görülebilmesi planlanmıştır. Sentez gazı içeriği, Gazi Üniversitesi Kimya Mühendisliği Laboratuvarı'nda bulunan termal iletkenlik dedektörlü (TCD) SRI-310C model gaz kromatografi cihazı kullanılarak ölçülmüş olup, ölçümler esnasında argon taşıyıcı gaz kullanılmıştır. Gazlaştırıcıdan alınan sentez gazı, gaz numune torbası kullanılarak toplanıp, gaz kromatografi cihazında ölçüm için enjektör ile beslenmiştir. Açığa çıkan sentez gazı içerisindeki nemin cihazı bozmaması için gazın neminin alınması gerekmektedir. Bu nedenle, sentez gazının reaktörden çıktığı noktada, nemi hapsedebilmesi için içerisinde silika jel bulunan 1.000 mL'lik gaz yıkama şişesi kullanılmış, ardından sentez gazı miktarının ölçülmesi için gaz sayacı yerleştirilmiştir.



Şekil 3.4. Deney düzeneğine ait şema.

Oluşturulan şemaya uygun olarak Resim 3.9'da görüldüğü gibi Gazi Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Akışkanlar Mekaniği Laboratuvarı'nda deney düzeneğinin kurulumu gerçekleştirilmiştir. Deney maliyetinin azaltılması adına torçun soğutma işlemi için ilave bir

soğutucu ekipman kullanılmamış olup, soğuk su ihtiyacı doğrudan şebeke suyu ile karşılanmış, dolayısıyla soğutma için gerekli enerji tüketimi hesaplanamamıştır. Nem alma işleminin gerçekleştirilebilmesi için 1.000 mL hacimli gaz yıkama şişesi kullanılmış olup, içerisine 700 mL'ye kadar silika jel doldurulmuştur.



Resim 3.9. Deney düzeneğine ait fotoğraf.

3.4. İşletme Koşulları

Deneylerde gazlaşma karakteristiği incelenen tıbbi atık numunesi Çizelge 3.2’de gösterildiği gibi hazırlanmıştır. Proje kapsamında temin edilen tıbbi tüketim malzemelerinin el ile parçalanıp granüle edilmesiyle toplamda 14,3 kg numune elde edilmiştir. Atık granüllerinin büyüklükleri yaklaşık olarak 4-25 mm aralığında elde edilmiş olup, sipariş edilen tüketim malzemelerinin yetersiz olması ve atıkların el ile granüle edilmesinin uzun sürmesi nedeniyle, proje kapsamında yalnızca Çizelge 3.2’de verilen atık karışım oranına sahip tıbbi atık numunesinin gazlaşma karakteristiği incelenmiş ve deneyler $ER=0,2$ için yalnızca iki defa tekrar edilebilmiştir. Tıbbi atık numunesinin hazırlanması için nitril eldiven, pamuk, kan torbası (flebotomi), sargı bezi, tıbbi atık çöp poşeti ve koruyucu yüz

maskesi temin edilerek el ile küçük parçalara ayrılmıştır. Atıkların plastik yüzdesini flebotomi, tıbbi atık çöp poşeti ve meltblown koruyucu yüz maskesi oluştururken; kauçuk yüzdesini nitril eldiven, tekstil yüzdesini ise pamuk ve sargı bezi oluşturmaktadır. Numunenin kısmi ve elementel analiz değerleri, her bir hammaddenin literatürde mevcut olan kısmı ve elementel analiz değerleri kullanılarak (Zhou, Long, Meng ve Zhang, 2015; Brillard ve diğerleri, 2021; Mishra, Iyer ve Mohanty, 2019) ve karışımın homojen olduğu kabul edilerek türetilmiştir. Test edilen deney koşulları ise Çizelge 3.3'te özet halinde verilmiştir. Beslenen atık numunesinin sıcaklığının ortam sıcaklığı ile eşit olduğu kabul edilmiştir.

Çizelge 3.2. Test edilen tıbbi atık numunesi ve yakıt karakteristiği.

Kullanılan Tüketim Malzemeleri (Kütlece Yüzde)			
Tıbbi Atık Torbası	Nitril Eldiven	Kan Torbası	Sargı Bezi
%24,5	%13,6	%44,3	%17,6
Fiziksel İçerik (Kütlece Yüzde)			
Plastik	Kauçuk	Tekstil	
%68,8	%13,6	%15	
Kısmi Analiz		Elementel Analiz (DAF)	
Uçucu Madde	%93,97	C	%66,88
Sabit Karbon	%3,10	H	%10,45
Nem	%2,09	O	%21,69
Kül	%0,84	N	%0,98
Yığın Yoğunluğu	1.237 kg/m ³	Alt ve Üst Isıl Değerler	
		LHV	28,90 MJ/kg
		HHV	29,05 MJ/kg

Çizelge 3.3. Diğer deney koşulları ve gazlaştırmacı tasarım parametreleri.

Test Koşulları	
Hava Besleme Miktarı	55 L/dk
Atık Besleme Miktarı	≈7,0 kg/sa
Eşdeğerlik Oranı (ER)	≈0,2
Besleme Havası Sıcaklığı	20°C
Atık Numunesi Sıcaklığı	≈24°C
Ortam Sıcaklığı	24°C
Yaklaşık Yalıtım Kalınlığı	200 mm
Yalıtım Isıl İletkenliği	0,044 W/mK
Reaktör Cıdarı Ortalama Et Kalınlığı	3,5 mm
Reaktör Cıdarı Isıl İletkenliği	16,2 W/mK
Reaktör Basıncı	2 bar

Sentez gazının alt ısıl değerinin hesabı için, açığa çıkan içeriklerin soğuk olduğu ve açığa çıkan yanıcı gaz karışımının ideal gaz olduğu kabul edilerek Eş. (3.8) kullanılarak

hesaplanmıştır. H₂, CO ve CH₄ gazları için standart alt ısı değerler ise Çizelge 3.4'te verilmiştir.

$$LHV_{gaz} = v_{H_2}LHV_{H_2} + v_{CO}LHV_{CO} + v_{CH_4}LHV_{CH_4} \quad (3.8)$$

Çizelge 3.4. H₂, CO ve CH₄ gazları için standart alt ısı değerler (LHV).

Bileşik	LHV (MJ/kg)	LHV (MJ/m ³)
*CO	10,2	12,6
*H ₂	120,1	10,8
*CH ₄	49,9	35,9
* Waldheim ve Nilsson, 2001		

Yapılan deneylerin doğruluğunun değerlendirilmesi için, literatürde bulunan mevcut deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar karşılaştırılıp yorumlanmıştır. Ayrıca, ortaya çıkan deneysel hatalar olası sebepleriyle birlikte ele alınmış olup, gelecekte yapılabilecek olası çalışmalar için önerilerde bulunulmuştur.

4. NÜMERİK SİMÜLASYON

Bu bölümde tıbbi atık numunesinin gazlaştırma karakteristiğini nümerik olarak incelemek için uygulanan metodoloji hakkında bilgiler verilmiştir. İlk kısımda üretilen yukarı akışlı plazma gazlaştırıcı içerisindeki akışı modellemek için kullanılan nümerik model geometrisi ve tanımlanan sınır şartları açıklanmıştır. İkinci kısımda, literatürden alınan deneysel verilerin simülasyon ile doğrulanabilmesi adına literatürden alınan bir plazma gazlaştırıcı için oluşturulan nümerik model ve ilgili sınır şartları verilmiştir. Üçüncü kısım, elde edilen nümerik model geometrilerinin ayırıklaştırılması ve elde edilen hücre yapıları hakkında bilgileri içermektedir. Dördüncü kısımda, nümerik simülasyonda kullanılan matematiksel modeller ve simülasyonlar esnasında yapılan kabuller hakkında bilgiler verilmiştir. Beşinci kısımda, kıyaslama yapabilmek için karşılaştırılacak parametreler ve değerlendirme yapılabilmesi için kullanılan performans metrikleri açıklanmıştır.

4.1. Matematiksel Modelleme

Gazlaştırıcı içerisindeki akış hacmi ve beslenen katı atık parçacıklarının aralarındaki etkileşimin simüle edilebilmesi için, akış hacmi sürekli Eulerian fazı olarak, atık parçacıkları ise süreksiz (ayrık) Lagrangian fazı olarak tanımlanmıştır. Çizelge 4.1’de, sürekli Eulerian fazının modellenmesinde kullanılan denklemler verilmiştir. Gazlaştırıcı içerisindeki akışın kararlı hal koşullarında olduğu kabul edilerek, modellemede Eş. 4.1-4.3’te verilen, yanma sonrası oluşan uçucu bileşikler için modifiye edilmiş Navier-Stokes denklemleri kullanılmıştır. Türbülanslı akışın proses karakteristiğine etkilerinin incelenebilmesi için akışın tamamen türbülanslı olduğu kabul edilerek standart k-ε modeli kullanılmış olup, Eş. 4.4-4.6’da verilen denklemler çözülmüştür. Gazlaşma reaksiyonları esnasında radyatif etkilerin sonuçlara dahil edilmesi için ayrık ordinatlar (DO) radyasyon modeli kullanılmış, gerçekleşen ışıma ile ısı transferi Eş. 4.7’de verilen denklem ile çözülmüştür. Gerçekleşen reaksiyonlar esnasında akış hacmi içerisindeki ışıma ile ısı transfer için tanımlanan absorpsiyon katsayısı “ağırlıklı-toplam-gri-gazlar (weighted-sum-of-gray-gases, WSGGM)” modeli kullanarak Eş. 4.8 üzerinden hesaplanmıştır.

Çizelge 4.1. Eulerian akış hacminin modellenmesinde kullanılan denklemler.

Genel Korunum Denklemleri		
Süreklilik	$\nabla \cdot (\rho_q \vec{v}_q) = \sum_{p=1}^n (\dot{m}_{pq} - \dot{m}_{qp})$	(4.1)
Momentum	$\nabla \cdot (\rho_q \vec{v}_q \vec{v}_q) = -\nabla p + \nabla \cdot \bar{\tau}_q + \rho_q \vec{g} + \sum_{p=1}^n \left((\vec{R}_i)_{pq} + \dot{m}_{pq} \vec{v}_{pq} - \dot{m}_{qp} \vec{v}_{qp} \right) (\vec{F}_s)_q$	(4.2)
Enerji	$\nabla \cdot (\rho_q \vec{v}_q h_q) = \bar{\tau}_q : \nabla \vec{u}_q - \nabla \cdot \vec{q}_q + S_q + \sum_{p=1}^n (\vec{Q}_{pq} + \dot{m}_{pq} h_{qp} - \dot{m}_{qp} h_{qp})$	(4.3)
Stres Tensörü	$\bar{\tau}_q = \eta \left[\nabla \vec{v}_q + \nabla \vec{v}_q^T - \frac{2}{3} \nabla \vec{v}_q I \right]$	(4.4)
Türbülans Modeli		
Türbülantif kinetik enerji (k)	$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho k v_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k$	(4.5)
Türbülans yayılma oranı (ε)	$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \varepsilon v_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon$	(4.6)
Katsayılar	$C_{1\varepsilon} = 1.44, C_{2\varepsilon} = 1.92, C_{3\varepsilon} = 0.09, \sigma_k = 1, \sigma_\varepsilon = 1.3$	(4.7)
Radyasyon Modeli		
Işıma Isı Transferi	$\nabla \cdot (I(\vec{r}, \vec{s}) \vec{s}) + (\alpha + \sigma_s) I(\vec{r}, \vec{s}) = \alpha n^2 \frac{\alpha T^4}{\pi} + \frac{\sigma_s}{4\pi} \int_0^{4\pi} I(\vec{r}, \vec{s}') \phi(\vec{s}, \vec{s}') d\Omega'$	(4.8)
WSGGM	$\epsilon = \sum_{i=0}^I \alpha_{\epsilon,i}(T) (1 - e^{-K_i p^s})$	(4.9)

Gazlaştırıcı içerisine beslenen atık numunelerinin granül çapları bilinmediği için, süreksiz (ayrık) Lagrangian fazı olarak modellenen katı atık parçacıklarının gazlaştırıcı içerisine eşit çaplardaki granüller halinde beslendiği kabul edilmiş olup, simülasyonda kullanılan denklemler Çizelge 4.2’te verilmiştir. Partiküllerin yörüngelerinin tahmin edilebilmesi için hareket ve momentum denklemlerinin simülasyona entegre edilmesi gerekmektedir. Bunun için, partikül yörüngeleri üzerine yalnızca sürüklenme ve yerçekimi kuvvetlerinin etki ettiği kabul edilerek momentum korunum denklemi Eş. 4.9’te verildiği şekilde çözülmüş, akışın oluşturduğu sürüklenme kuvveti Eş. 4.10 ve Eş. 4.11 kullanılarak hesaplanmıştır. Türbülanslı akış esnasında oluşan girdapların partikül yörüngeleri üzerindeki etkilerinin incelenebilmesi için süreksiz rastgele hareket (discrete random walk, DRW) modeli kullanılmıştır. Her bir girdap, problemin izotropik olduğu kabulü ile, Gauss dağılımına sahip rastgele hız dalgalanmaları ve zaman skalası ile tanımlanarak Eş. 4.12-4.14 denklemleri kullanılarak hesaplanmıştır.

Çizelge 4.2. Lagrangian katı atık parçacıklarının modellenmesinde kullanılan denklemler.

Hareket Denklemleri		
Yörünge Denklemi	$F_D(\vec{u} - \vec{u}_p) = \frac{\vec{g}(\rho - \rho_p)}{\rho_p}$	(4.9)
Sürüklenme Kuvveti :	$F_D = \frac{18}{\rho_p d_p^2} \frac{C_D Re}{24}$	(4.10)
Göreceli Reynolds Sayısı :	$Re = \frac{\rho d_p u_p - u }{\mu}$	(4.11)
Stokastik Yörünge Denklemleri		
Parçacık Hızı :	$u = \bar{u} + u'$	(4.12)
İntegral Zaman :	$T_L = 0.3 \frac{k}{\varepsilon}$	(4.13)
Rastgele Hız Değişimi :	$u' = \zeta \sqrt{u'^2}$	(4.14)

Çizelge 4.3. Kimyasal bileşikler için kütle, difüzyon, reaksiyon hızı ve üretim hızlarının hesaplanmasında kullanılan denklemler.

Konveksiyon-difüzyon denklemi	$\nabla \cdot (\rho \vec{v} Y_i) = -\nabla \cdot \vec{J}_i + R_i + S_i$	(4.15)
Bileşiklerin difüzyonu	$\vec{J}_i = \left(\rho D_{i,m} + \frac{\mu_t}{Sc_t} \right) \nabla Y_i$	(4.16)
Reaksiyon hızı	$\hat{R}_{i,r} = \Gamma(v''_{i,r} - v'_{i,r}) \left(k_{f,r} \prod_{j=1}^N [C_{j,r}]^{\eta'_{j,r}} - k_{b,r} \prod_{j=1}^N [C_{j,r}]^{v''_{j,r}} \right)$	(4.17)
Hız sabitleri :	$k_{f,r} = A_r T^{\beta_r} e^{-E_r/RT}$	(4.18)
	$k_{b,r} = \frac{k_{f,r}}{K_r}$	(4.19)
Net üretim hızı	$(R_{i,r})_1 = v'_{i,r} M_{w,i} A \rho \frac{\varepsilon}{k} \min \left(\frac{Y_R}{v'_{R,r} M_{w,R}} \right)$	(4.20)
	$(R_{i,r})_2 = v'_{i,r} M_{w,i} A B \rho \frac{\varepsilon}{k} \frac{\sum_p Y_p}{\sum_j^N v'_{j,r} M_{w,j}}$	(4.21)
	$R_i = \min \left((R_{i,r})_1, (R_{i,r})_2 \right)$	(4.22)

Gazlaştırmacı içerisinde gerçekleşen kimyasal reaksiyonlar sonucu açığa çıkan kimyasal bileşiklere ait kütle fraksiyonları, akış hacmi içerisindeki difüzyonları, reaksiyon hızları ve bileşiklerin net üretim hızları Çizelge 4.3'te verilen denklemler yardımıyla hesaplanmıştır. Bileşiklerin kütle fraksiyonları Eş. 4.15'te verilen konveksiyon-difüzyon denklemi kullanılarak hesaplanmıştır. Bileşiklerin akış hacmi içerisindeki difüzyonu Eş. 4.16 kullanılarak simüle edilmiştir. Türbülans ile kimyasal reaksiyonların etkileşimi, türbülanslı karışım işleminin reaksiyon hızını kısıtladığı kabulü ile Eş. 4.17-4.19'de verilen denklemler

kullanılarak modellenmiştir. Ardından bileşiklerin net üretim hızları ise Eş. 4.20 ve Eş. 4.21 kullanılarak hesaplanmıştır.

Çizelge 4.4. Homojen ve heterojen kimyasal reaksiyonlar ve kinetik parametreler (Messerle ve diğerleri, 2016).

No	Kimyasal Reaksiyon	Kinetik Parametreler			
		A_r	E_r (J/kgmol)	a	b
1	$U\dot{c}ucu \rightarrow 1.13CO+0.02H_2S+0.24CH_4+0.13H_2O+0.02N_2$	10^{30}	100	-	0,2
2	$C_{(s)} + H_2O \rightarrow CO + H_2$	$4,18 \times 10^4$	$1,751 \times 10^8$	-	1
3	$C_{(s)} + CO_2 \rightarrow 2CO$	$6,27 \times 10^5$	$2,83 \times 10^8$	-	1
4	$C_{(s)} + O_2 \rightarrow CO_2$	$1,2333 \times 10^4$	$1,59 \times 10^8$	-	1
5	$C_{(s)} + 0.5O_2 \rightarrow CO$	$8,71 \times 10^4$	$1,494 \times 10^8$	-	0,5
6	$C_{(s)} + H_2S \rightarrow CS + H_2$	$1,0966 \times 10^3$	$1,34 \times 10^8$	-	-
7	$C_{(s)} + H_2 \rightarrow CH_4$	1,2	$1,49 \times 10^8$	-	2
8	$CH_4 + H \rightarrow CH_3 + H_2$	$6,6171 \times 10^4$	$4,97 \times 10^7$	-	-
9	$CH_4 + OH \rightarrow CH_3 + H_2O$	1,72	$8,36 \times 10^6$	-	-
10	$CH_4 + O \rightarrow CH_3 + OH$	$2,6903 \times 10^4$	$3,85 \times 10^7$	-	-
11	$CH_3 + H_2O \rightarrow CH_4 + OH$	$1,877 \times 10^4$	$1,04 \times 10^8$	-	-
12	$CH_3 + H_2 \rightarrow CH_4 + H$	$1,56 \times 10^4$	$4,77 \times 10^7$	-	-
13	$CH_3 + O_2 \rightarrow CH_3O + O$	$4,35 \times 10^4$	$1,21 \times 10^8$	-	-
14	$CH_3 + OH \rightarrow CH_2O + H_2$	$1,48 \times 10^4$	0	-	-
15	$CH_3 + O \rightarrow CH_2O + H$	$6,68 \times 10^4$	$8,36 \times 10^6$	-	-
16	$H + O_2 \rightarrow O + OH$	$7,843 \times 10^4$	7,02	-	-
17	$H + H_2O \rightarrow H_2 + OH$	$5,8689 \times 10^4$	$8,49 \times 10^7$	-	-
18	$H_2 + O \rightarrow H + OH$	$1,42 \times 10^3$	$3,72 \times 10^7$	-	-
19	$H_2O + O \rightarrow OH + OH$	$3,74 \times 10^4$	$7,65 \times 10^7$	-	-
20	$CO + OH \rightarrow CO_2 + H$	60,95	$3,22 \times 10^6$	-	-
21	$CO + O_2 \rightarrow CO_2 + O$	$9,87 \times 10^4$	$1,57 \times 10^8$	-	-
22	$CO_2 + H \rightarrow CO + OH$	468,72	$9,03 \times 10^7$	-	-
23	$C_2H_2 + H \rightarrow C_2H + H_2$	$8,08 \times 10^4$	$7,94 \times 10^7$	-	-
24	$C_2H_2 + OH \rightarrow CH_3 + CO$	$8,96 \times 10^3$	$2,09 \times 10^6$	-	-
25	$OH + OH \rightarrow H_2O + O$	$1,34 \times 10^4$	$4,6 \times 10^6$	-	-
26	$H + OH \rightarrow H_2 + O$	$1,877 \times 10^4$	$2,94 \times 10^7$	-	-
27	$H_2 + OH \rightarrow H_2O + H$	$8,93 \times 10^4$	$4,18 \times 10^7$	-	-
28	$CO + H_2O \rightarrow CO_2 + H_2$	$2,34 \times 10^{10}$	$2,883 \times 10^8$	0,5	1
29	$CO + 0.5O_2 \rightarrow CO_2$	$2,239 \times 10^{12}$	$1,674 \times 10^8$	1	0,25
30	$H_2 + 0.5O_2 \rightarrow H_2O$	$9,87 \times 10^8$	$3,1 \times 10^7$	0,25	1,5
31	$CO_2 + H_2 \rightarrow CO + H_2O$	22	$1,9 \times 10^8$	1	0,5
32	$CH_4 + 2O_2 \rightarrow CO_2 + 2H_2O$	$2,119 \times 10^{11}$	$2,0525 \times 10^8$	0,2	1,3
33	$CH_4 + H_2O \rightarrow CO + 3H_2$	8×10^7	$2,51 \times 10^8$	0,5	1
34	$H_2O \rightarrow H_2 + 0.5O_2$	$2,5 \times 10^{10}$	$3,5 \times 10^8$	1	0
35	$H_2 + CO_2 \rightarrow CO + H_2O$	$2,2 \times 10^7$	$1,9 \times 10^8$	0,5	1
36	$CH_4 + 0.5O_2 \rightarrow CO + 2H_2$	$4,4 \times 10^{11}$	$1,25 \times 10^8$	0,5	1,25
37	$CO + 3H_2 \rightarrow CH_4 + H_2O$	$5,12 \times 10^{-14}$	$2,73 \times 10^4$	1	1

Plazma girişi, literatürde yapılan yaklaşımla benzer şekilde “sıcak hava” olarak tanımlanmış olup (Mashayak, 2009; Fiedler ve diğerleri, 2004), plazmanın etkileri plazma-kimyasal reaksiyonlar ile modele entegre edilmiştir. Kullanılan homojen ve heterojen plazma-kimyasal reaksiyonlar ile ilgili kinetik parametreler Çizelge 4.4’te verildiği şekilde

soğutma ceketini olarak gösterilen açık mavi bölge ise plazma torcunun sulu soğutma haznesinin gazlaştırıcıya bakan yüzeylerini göstermektedir. Plazma jet giriş çapı Ø3.5 mm olarak belirlenmiş, giriş noktası dairesel yüzey olarak tanımlanmıştır.

Çizelge 4.5. Prototip gazlaştırıcıya ait nümerik model için tanımlanan sınır şartları.

No	Yüzey	Ebatlar (mm)	Sınır Şartı	İçerik (Kütlece %)	Besleme Miktarı (kg/s)	Sıcaklık (°C)	Et Kalınlığı (mm)	Isı İletim Katsayısı (W/mK)
1	Plazma Girişi	Ø3,5	Kütleli Debi	%23,3 O ₂ %76,7 N ₂	$0,441 \times 10^{-3}$	2.000	-	-
2	Atık Beslemesi	≈55x32	Partikül Enjeksiyonu	Çizelge 3.2,	$1,955 \times 10^{-3}$	20	-	-
3	Sentez Gazı Çıkışı	Ø10	Basınç Çıkışı	-	-	-	-	-
4	Soğutma Ceketini	-	Duvar	-	-	15	3	388
5	Yalıtımlı Yüzey	-	Duvar	-	-	20	200 (T. Yünü) 3 (P. Çelik)	0.044 (T. Yünü) 16 (P. Çelik)
6	Yalıtımsız Yüzey	-	Duvar	-	-	20	4	16

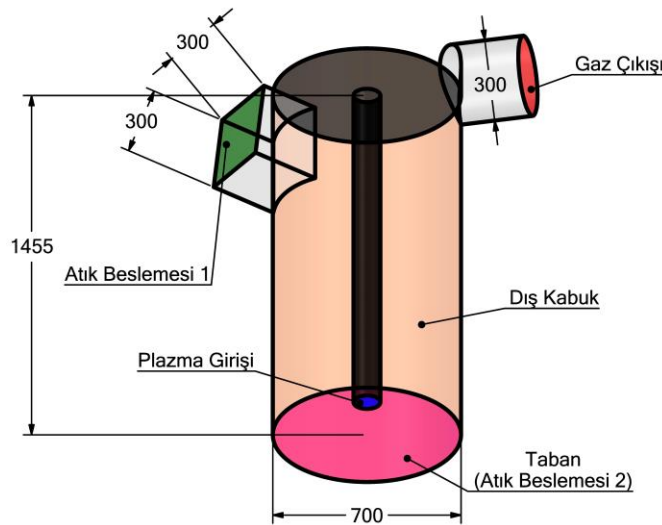
Geometride gösterilen bütün yüzeyler için tanımlanan sınır şartları Çizelge 4.5’de özetlenmiştir. Atık numunelerinin 3 mm çapındaki partiküller halinde beslendiği kabul edilmiş, kimyasal içeriği ve yakıt özellikleri deney koşullarına uygun olacak şekilde Çizelge 3.2’de verildiği gibi tanımlanmıştır. Soğutma ceketini sınır şartı için sıcaklık değeri, şebeke suyu sıcaklığı baz alınarak 15°C olarak belirlenmiştir. Testler oda sıcaklığında yapıldığı için, yalıtımlı ve yalıtımsız yüzeylerdeki sıcaklıklar 20°C olarak belirlenmiş olup, taş yünü yalıtım ve paslanmaz çidar ilave katmanlar olarak tanımlanmıştır. Plazma girişi debisi, havanın 24°C sıcaklıkta sisteme giriş yaptığı kabul edilerek hesaplanmış olup, hacimsel debi değeri, deneyler esnasında ölçülen değer olan 55 L/dak olarak alınmıştır. Öte yandan atık besleme miktarı helezon kapasitesine göre hesaplanmış olup, saniyede beslenen atık miktarı ölçülememiştir.

Prototip gazlaştırıcı için yapılan simülasyonlara ait sonuçların değerlendirilmesi için, deney esnasında alınan sentez gazı sonuçları ile simülasyonlardan elde edilen sonuçlar karşılaştırılıp yorumlanmıştır.

4.3. Model Validasyonu İçin Yapılan Simülasyonlar

Yapılan deneyler esnasında termokuplların arızalanması, atık beslemesinin etkin bir şekilde sağlanamaması vb. deneysel ve tasarımsal hatalar nedeniyle simülasyon çalışmasına yönelik deneysel sonuçlar etkin bir şekilde elde edilememiştir. Öte yandan, literatürde bulunan mevcut deneysel çalışmaların bir çoğunda gazlaştırıcı tasarım parametreleri, deney koşulları veya sentez gazı ölçüm sonuçları net bir şekilde açıklanmamış olup, atığın granülize edilerek beslendiği çalışma sayısı oldukça azdır. Bu nedenle, modelin doğrulanabilmesi için, hem gerekli parametrelerin diğer çalışmalara kıyasla daha açık bir şekilde paylaşılması, hem de bu çalışmanın konusu olan sürekli atık beslemesi koşuluna uygun olması açısından mevcut deneysel çalışmaya ek olarak Mashayak'ın (2009) yapmış olduğu deneysel çalışmadaki PDTR100 modeli plazma gazlaştırıcı modellenerek simüle edilmiş ve model doğrulaması yapılmıştır. Doğrulama yapılırken gazlaştırıcı içerisindeki sıcaklık dağılımı ve elde edilen sentez gazı içeriği ilgili referans çalışma ile karşılaştırılmıştır.

İlgili çalışmaya ait gazlaştırıcı geometrisi Şekil 4.2'de verilmiştir. Gazlaştırıcı 700 mm çapında 1.455 mm yüksekliğinde silindirik bir geometriye sahipken, atık besleme kanalı yatay eksene göre 7° açıda konumlandırılmış $300 \times 300 \text{ mm}^2$ kesit alanına sahip bir kanal ile beslenmektedir. Mevcut prototipten farklı olarak, PDTR100 gazlaştırıcısında 1 adet transferli ark plazma torç bulunmakta olup, plazma oluşumu gazlaştırıcının alt yüzeyine yerleştirilen elektrot ile ortada bulunan 100 mm çapındaki silindirik elektrot arasında gerçekleşmektedir.



Şekil 4.2. Validasyon modeline ait geometri (Mashayak, 2009).

Geometri üzerinde işaretlenen bütün yüzeyler için tanımlanan sınır şartları ise Çizelge 4.6’da özetlenmiştir. Referans çalışmada beslenen atık parçacıklarının boyutları hakkında herhangi bir bilgi verilmediği için, prototip geometrisi için yapılan yaklaşımla benzer şekilde, atıkların 3 mm çapındaki granüller halinde beslendiği kabul edilmiştir. Çalışmada test edilen gazlaştırıcının hava beslemesi bulunmaması nedeniyle atık parçacıklarının yaklaşık %90’lık kısmının gazlaştırıcı tabanında biriktiği, dolayısıyla gazlaştırıcı tabanında sürekli olarak atık numunesinin bulunduğu belirtilmiştir. Bu nedenle, çalışmada yapılan yaklaşımla benzer şekilde, atık beslemesinin %10’luk kısmının atık besleme kanalından yapıldığı, %90’lık kısmının ise gazlaştırıcı tabanından yapıldığı kabul edilmiştir. Çalışmada gazlaştırıcı tabanındaki sıcaklığın genellikle 1.800 K civarında olduğu belirtildiği için, simülasyonda benzer şekilde taban sıcaklığı 1.800 K olarak belirlenmiş, elektrot yüzeyi ile gazlaştırıcı tabanının aynı olduğu kabul edilmiştir. Gazlaştırıcının çıkış koşulları “dışarı akış (outflow)” olarak tanımlanmıştır. Tıbbi atık numunesini temsilen pamuk kullanılmış olup, doğrulama için yapılan simülasyonda inorganik ve metal içerikler ihmal edilerek kısmi ve elementer analiz sonuçları Çizelge 4.7’de verildiği şekilde hesaplanmıştır.

Çizelge 4.6. Validasyon geometrisi için tanımlanan sınır şartları (Mashayak, 2009).

No	Yüzey	Ebatlar (mm)	Sınır Şartı	İçerik (Kütlece %)	Besleme Miktarı (kg/sa)	Sıcaklık (K)	Et Kalınlığı (mm)	Isı İletim Katsayısı (W/m ² K)
1	Atık Beslemesi 1	300x300	Partikül Enjeksiyonu	Çizelge 4.7.	6	300	-	-
2	Plazma Girişi	Ø100	Kütleli Debi	%23,3 O ₂ %76,7 N ₂	0,37	2.000	-	-
3	Gaz Çıkışı	Ø300	Basınç Çıkışı	-	-	-	-	-
4	Dış Kabuk	-	Duvar	-	-	300	-	-
5	Taban	Ø700	Duvar	-	-	1.800	-	-
6	Alt Elektrot Yüzeyi	Ø700	Partikül Enjeksiyonu	Çizelge 4.7.	54	1.000	-	-

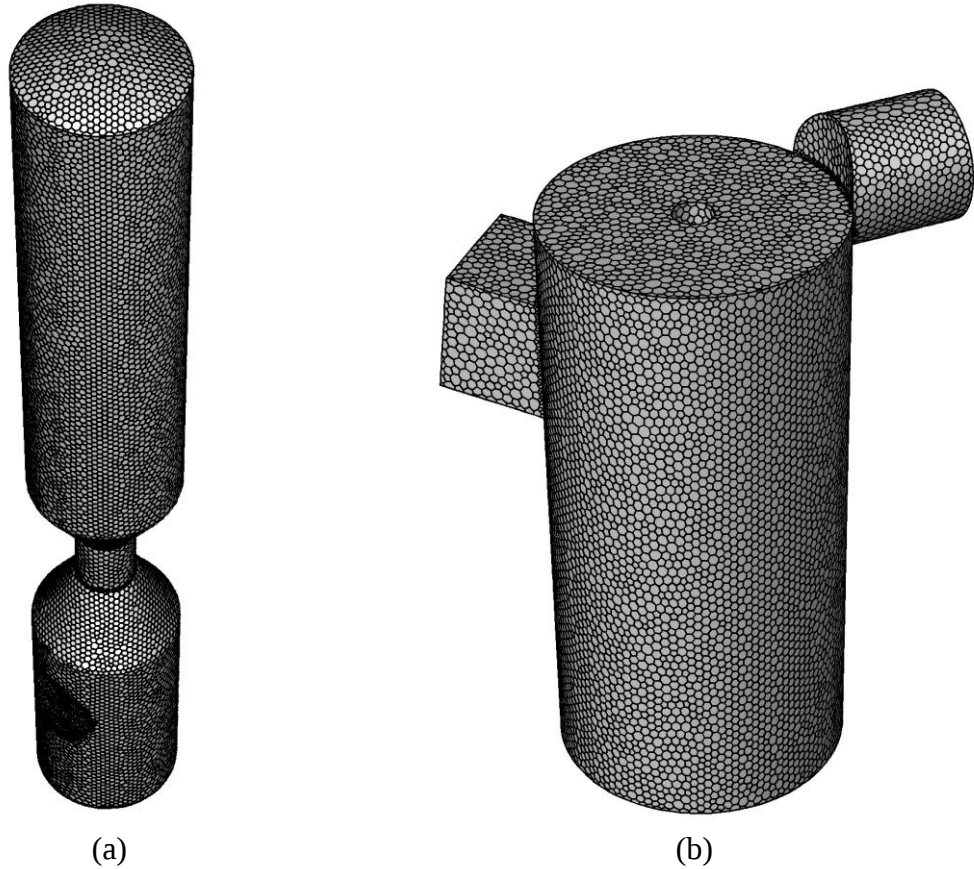
Çizelge 4.7. Atık numunesinin kimyasal içeriği (Mashayak, 2009).

Kısmi Analiz		Elementer Analiz (DAF)	
Uçucu Madde	%86,9	C	%57,8
Sabit Karbon	%3,6	H	%9,3
Nem	%8,4	O	%32,2
Kül	%1,1	N	%0,7

Alt ve Üst Isıl Değerler	
LHV	42,0 MJ/kg
HHV	43,1 MJ/kg

4.4. Nümerik Hücre Yapılarının Oluşturulması

Simülasyonlarda kullanılacak model geometrileri için hücre yapıları ICEM CFD yazılımı kullanılarak oluşturulmuştur. Validasyon geometrisi için referans çalışmada uygulanan ayarlar kullanılarak çözüm ağı oluşturulmuş olup, üretilen prototipe ait model geometrisi için farklı konfigürasyonlarda hücre yapıları elde edilerek hücre sayısından bağımsızlaştırma testleri gerçekleştirilmiş ve testlerde 3 farklı konfigürasyon test edilmiştir. Hücre yapıları yapılandırılmamış (unstructured) hücre algoritması ve yüzeyden bağımsız (patch-independent) çözüm ağı oluşturma yöntemi ile oluşturulmuştur. Hesaplama sürelerinin kısaltılabilmesi için ICEM CFD üzerinde dört yüzlü (tetrahedral) hücre yapısı oluşturulup, ardından ANSYS Fluent ortamında çok yüzlü (polyhedral) hücre yapısına dönüştürülmüştür. Sonuç olarak, oluşturulan hücre yapıları Şekil 4.3'teki gibi hazırlanmış, oluşturulan her bir konfigürasyon için hücre kalitesi değerleri Çizelge 4.8'de verildiği gibi elde edilmiştir. Geometrik düzgünlük açısından elde edilen hücre yapıları; ortogonal kalite, asimetriklik (skewness) ve en/boy oranı (aspect ratio) metriklerine göre değerlendirilmiştir.



Şekil 4.3. Oluşturulan hücre yapıları. (a) Prototip gazlaştırıcı geometrisi, (b) Validasyon geometrisi.

Çizelge 4.8. Prototip ve validasyon geometrileri için hücre yapıları.

Geometri	Konfigürasyon	Dört Yüzlü Hücre Sayısı (ICEM CFD)	Çok Yüzlü Hücre Sayısı (FLUENT)	Hücre Kalite Metriği	Ortalama Kalite	En Düşük Kalite ve Yüzdesi
Prototip Gazlaştırıcı (PG)	1	215.901	43.117	En/Boy Oranı	3,83	11,62 (%0,001)
				Ortogonal	0,84	0,3 (%0,001)
				Asimetriklik	0,16	0,95 (%0,002)
	2	336.684	64.000	En/Boy Oranı	3,69	10,13 (%0,001)
				Ortogonal	0,86	0,35 (%0,006)
				Asimetriklik	0,14	0,75 (%0,004)
	3	477.481	89.546	En/Boy Oranı	3,63	9,38 (%0,018)
				Ortogonal	0,87	0,35 (%0,004)
				Asimetriklik	0,13	0,60 (%0,005)
	4	735.207	133.597	En/Boy Oranı	3,55	9,37 (%0,009)
				Ortogonal	0,88	0,40 (%0,784)
				Asimetriklik	0,12	0,60 (%0,784)
	5	1.077.425	172.822	En/Boy Oranı	3,48	9,35 (%0,012)
				Ortogonal	0,89	0,35 (%0,003)
				Asimetriklik	0,11	0,60 (%0,050)
Validasyon Reaktörü (VR)		394.160	120.850	En/Boy Oranı	3,43	8,57 (%0,042)
				Ortogonal	0,87	0,4 (%0,645)
				Asimetriklik	0,13	0,55 (%0,698)

4.5. Gazlaştırıcı Performansının Değerlendirilmesi

Tasarlanan prototip gazlaştırıcının performansının değerlendirilebilmesi için deney ve simülasyonlar ile elde edilen sonuçlar; üretilen sentez gazının alt ısı değeri (LHV), karbon

dönüşüm oranı (KDO) ve soğuk gaz verimi (SGV) açısından karşılaştırılmıştır. Sentez gazının alt ısı değeri tayini Bölüm 3.4'te açıklandığı şekilde yapılmıştır. Karbon dönüşüm oranının hesabı, sentez gazı içeriğindeki karbon miktarının beslenen atık içeriğindeki karbon miktarına oranı ile Eş. 4.22'deki gibi hesaplanmıştır.

$$KDO = \left[\dot{m}_{\text{çıkış}} \sum_i f_i \left(\frac{M_c}{M_i} \right) \right] / [\dot{m}_{\text{giriş}}(f_c) + \text{geri kazanılan}] \quad (4.22)$$

Öte yandan soğuk gaz verimi, yakıt içeriklerinin kuru ve külsüz olduğu kabulü ile, elde edilen sentez gazının alt ısı değeri beslenen yakıtın alt ısı değerine oranı ile hesaplanmış olup, harcanan yakıt enerjisiyle ne kadar yakıt enerjisi elde edildiği değerlendirilmiştir. Soğuk gaz verimi değeri Eş. 4.23'te verildiği gibi hesaplanmıştır.

$$SGV = \left[\dot{m}_{\text{çıkış}} \sum_i f_i (LHV_{DAF})_i \right] / [\dot{m}_{\text{giriş}} (LHV_{DAF})_{\text{atık}}] \quad (4.23)$$

5. DENEYSEL BULGULAR

Deneyler esnasında etkin ölçümler yapılamaması ve atık besleme sisteminin stabil bir şekilde çalıştırılamaması nedeniyle etkin bir sıcaklık kontrolü ve atık beslemesi gerçekleştirilememiş, yalnızca açığa çıkan sentez gazının içerikleri ölçülebilmektedir. Bu nedenle, ilk kısımda deneysel olarak elde edilen sentez gazı ölçüm sonuçları literatür verileri ile karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiş, gerçekleşen sapmaların değerlendirilebilmesi için tespit edilen tasarımsal ve deneysel hatalar açıklanmıştır. Sonraki bölümde ise ileride yapılabilecek olası çalışmalar için önerilerde bulunulmuştur.

5.1. Ölçüm Sonuçları

Deneyler sonucunda elde edilen sentez gazı içerikleri Çizelge 5.1’de özetlenmiştir. Gazlaştırıcının stabil bir şekilde çalıştırılamaması nedeniyle gaz numunesinin alındığı anda gazlaştırıcı içerisindeki sıcaklıklar 3 farklı termokupl noktasından 200-500°C civarında ölçülmüş, beklenen yüksek sıcaklıklara çıkılamamıştır. Öte yandan, atık beslemesinin sürekli bir biçimde sağlanamaması nedeniyle gazlaştırıcı içerisine beslenen havanın bir kısmı kimyasal reaksiyonlara girmeden gazlaştırıcıdan çıkış yapmıştır. Testlerin ardından gazlaştırıcının iç yüzeyleri kontrol edildiğinde, gazlaştırıcı içerisinde yoğun miktarda nem bulunduğu görülmüştür. Dolayısıyla, gazlaştırıcı içerisinde nem yüzdesinin beklenenden fazla olması nedeniyle H₂ yüzdesinin fazla olduğu, fazla hava beslemesi nedeniyle N₂ yüzdesinin fazla olduğu ve yanma reaksiyonlarının stabil bir şekilde gerçekleşmemesi nedeniyle CO oluşumunun çok düşük olduğu tespit edilmiştir.

Çizelge 5.1. Prototip gazlaştırıcı için deneysel olarak elde edilen sentez gazı içerikleri (ER=0.2).

Ölçüm No	Sentez Gazı İçeriği		
	H ₂	CO	N ₂
1	%56,9	%2,9	%40,3
2	%66,5	%3,4	%30,2
3	%64,3	%3,4	%32,3
Ortalama	%62,6	%3,2	%34,2

Deneyin başarılı bir şekilde gerçekleştirilememesine karşın, elde edilen sentez gazı içerikleri literatür verileri ile karşılaştırılmıştır. İlgili veriler karşılaştırmalı olarak Çizelge 5.2’de

gösterilmiştir. Buna göre, testler ile elde edilen sonuçlar, literatürdeki deneysel sonuçlarla paralellik göstermektedir. Sonuçlar kıyaslandığında H₂ oranının diğer çalışmalarda da daha yüksek olduğu, CO oranının ise daha düşük olduğu görülmektedir. Literatürdeki çalışmalarda da benzer atık içeriği için sentez gazı içeriğinde yüksek oranda N₂ bulunurken, bu çalışma kapsamında elde edilen N₂ düzeyinin daha yüksek düzeyde olduğu görülmektedir. Dolayısıyla, test edilen atık içeriğinden elde edilen H₂ ve CO yüzdeleri arasındaki farkın tutarlı olduğu söylenebilir. Ancak, H₂ oluşumunun beklenenden fazla olması, CO oluşumunun çok düşük olması ve açığa çıkan N₂ oranının ise yüksek olması, belirgin deneysel ve tasarımsal hataların gerçekleştiğine işaret etmektedir.

Çizelge 5.2. Elde edilen sonuçların literatür verileri ile karşılaştırılması.

Bileşik	Mevcut Çalışma	Referans Çalışmalar		
		Messerle ve diğerleri (2018)	Paulino ve diğerleri (2022)	Singh ve Türkiye (2022)
H ₂	%62,6	%44,6	%44,7	%43,0
CO	%3,2	%26,5	%37,0	%16,0
N ₂	%34,2	%28,9	-	%21,0

5.2. Tasarımsal ve Deneysel Hataların Değerlendirilmesi

Testler esnasında prototip gazlaştırıcı sistemin tasarımında karşılaşılan hatalar aşağıda listelenmiştir.

- Atık Beslemesi: Tasarlanan helezon konveyör sistemi ile atık etkin bir şekilde beslenememekte, yatay yönde besleme esnasında tıkanmalar ve duraksamalar gerçekleşmiştir. Atığın beslendiği besleme kanalının 1-2° eğimli olarak üretilmesine rağmen, kapasitenin düşük olması nedeniyle yatay yönde besleme etkin bir biçimde sağlanamamıştır. Üretilen helezonun oluşan yüksek sıcaklıklara dayanmasına karşın, gazlaştırıcı içerisinde öngörülemeyen nem oluşumu sebebiyle paslanmıştır. Sistemde atık öğütme sisteminin bulunmaması nedeniyle granül halde el ile hazırlanan atık numunesi sürekli ve düzenli olarak beslenememiş, bu nedenle ilgili kimyasal reaksiyonlar sürekli olarak gerçekleşememiş ve CO oluşumu oldukça az, N₂ oluşumu ise oldukça fazla bulunmuştur.

- Gazlaştırıcı Reaktör: Reaktör için öngörülen boğaz çapı yetersiz kalmış, bu nedenle beslenen atığın gazlaşma bölgesine giriş yapamadığı tespit edilmiştir. Reaktör gövdesinde 310s paslanmaz çelik malzemeden üretilen bölgelerde herhangi bir korozyon görülmemesine karşın, özellikle düşük maliyeti nedeniyle tercih edilen 304 paslanmaz çelik malzemeden imal edilmiş termokupl bağlantı rakorlarında korozyon meydana gelmiştir. Gazlaştırıcı içerisinde yanma reaksiyonları stabil bir şekilde gerçekleştirilememiş ve yalıtım kalınlığı yetersiz kalmış, bu nedenlerle öngörülen yüksek proses sıcaklıklarına erişilememiştir.

- Plazma Torç: Kullanılan soğutma yöntemi nedeniyle nozul şeklindeki anot elektrot üzerinde yıpranma görülmemesine karşın, 20°C ortam havası ile temas eden içerideki katot elektrodun kısa bir süre sonra eridiği görülmüştür. Isıl ve elektriksel iletkenlik değerlerinin yüksek olması nedeniyle bakır malzemeden imal edilen torç gövdesi fonksiyonel testler sırasında oluşan yüksek deşarj sıcaklıkları nedeniyle anot elektrot ile temas eden yüzeyin delinmesine sebep olmuştur. Daha sonra, ısıl dayanımının daha yüksek olması nedeniyle paslanmaz torç gövdesi imal edilmiş, ancak bu sefer de oluşan ark deşarjının soğutma ceketini gövdesine sıçrama yaptığı görülmüştür. En son olarak anot elektrodu çevreleyen yüzeyin ve diğer dış yüzeylerin et kalınlıkları artırılarak bakır malzemeden yeni bir torç gövdesi imal edilmiş, ancak bu tasarımda da gövdenin delindiği ve çalışma ömrünün kısa olduğu görülmüştür. Bu nedenle, yapılan deney esnasında plazma torç stabil olarak çalıştırılamamış ve ilgili reaksiyonlar sürekli olarak gerçekleşmemiş, dolayısıyla CO oluşumu oldukça az, N₂ oluşumu ise oldukça fazla bulunmuştur.

- Soğutma Ceket: Maliyetlerin azaltılması için torç soğutma ceketinin doğrudan şebeke suyu ile beslenmesi, ceket haznesi içerisindeki basıncın ve sıcaklığın kontrolünü zorlaştırmış ve soğutma ceketini delinmiştir. Bu durum, yapılan deney esnasında reaktör haznesine su sızıntısı olmasına neden olmuş, dolayısıyla H₂ yüzdesi beklenenden yüksek bulunmuştur. Özellikle soğutma ceketinin delinmesinde yüksek deşarj sıcaklığının yanı sıra öngörülemeyen basınç artışları da etken olmuştur.

- İşletme Süresi: Kullanılan plazma torcun dayanım süresinin beklenenden kısa olması ve atık besleme sisteminin stabil bir şekilde çalışmaması nedeniyle gazlaşma prosesi için öngörülen 1 saatlik işletme süresine ulaşılamamış, sentez gazı ölçümü 15 dakikalık bir işletme süresinin ardından GC torbasında toplanan numune üzerinden yapılmıştır.

Uygulanan deneysel yöntemde gerçekleşen hatalar ise aşağıdaki sıralanmıştır.

- Termokupl Kullanımı: Maliyetin düşürülmesi için gazlaşma bölgesinde B tipi termokupl yerine K tipi termokupl kullanılmış ve termokuplların hepsi datalogger cihazına bağlanmıştır. Ancak, oluşan sıcaklık dalgalanmaları nedeniyle ölçümler esnasında datalogger cihazı arızalanmış, bu nedenle yalnızca ortalama bir gazlaştırıcı sıcaklığı verisi alınabilmektedir.
- Gaz Kromatografi Cihazı: Kullanılan cihazda yalnızca TCD dedektör bulunmakta olup, yalnızca H₂, CO ve N₂ bileşiklerinin ölçümü yapılabilmiş, oluşan diğer gazların içerikleri ölçülememiştir. Deney düzeneği ile gaz kromatografi cihazı arasında mesafe bulunduğundan, gaz numune torbasında toplanan sentez gazı hızlı bir şekilde ölçülememiş, dolayısıyla olası kararsız bileşiklerin ölçümü sağlanamamıştır.

5.3. Çözüm Alternatifleri

Tasarım ve deneysel yöntem açısından ileride uygulanabilecek çözüm önerileri aşağıda listelenmiştir.

- Atık Beslemesi: Granülide edilen atığın sürekli ve kontrollü bir şekilde beslenebilmesi için; helezon konveyör ile besleme durumunda en az 20-30° açı yapacak şekilde besleme yapılması ya da pulverize edildikten sonra hava ile püskürtülerek beslenmesi gerekmektedir. Bu çalışmada bütçenin kısıtlı olması nedeniyle uygulanamamasına karşın, kontrollü besleme için mutlaka atık öğütme sistemi bulunmalıdır. Tıbbi atıkların gerçek koşullarda kesintili olarak besleneceği göz önünde bulundurulduğunda, termodinamik verimin düşmemesi için atık beslemesi esnasında hava girişlerinin önlenmesi, bunun için de ters akış önleyici damper kullanılması gerekmektedir. Atık hava ile pulverize olarak beslenmek istenirse verimin düşmemesi adına ön ısıtma yapılması ve plazma torca beslenen hava miktarının azaltılması gerekmektedir. Yüksek nem içerikli atıkların bertarafı için besleme sisteminde kullanılan bileşenler korozyona dayanıklı malzemelerden üretilmelidir.
- Gazlaştırıcı Reaktör: Atığın reaktör boğazında oluşturabileceği yığın göz önünde bulundurularak reaktör boğaz çapının kesiti arttırılmalıdır. Yüksek sıcaklıklara erişilebilmesi için gazlaştırıcının yalıtım kalınlığı arttırılmalıdır. Reaktörün iç noktasından

ölçüm alınması için torca yakın termokupl bağlantı noktaları sıcaklığa dayanıklı malzemeden üretilmeli, ya da reaktörün dış yüzeyinden ölçüm alınmalıdır.

- Plazma Torç ve Soğutma Sistemi: Elektrotların soğutulması için kullanılacak soğutulmuş ısı transfer akışkanının elektrotlara açılan kanallar içerisinden geçirilmesi, böylece ısı transfer sıvısının doğrudan elektroda temas ettirilmesi uygun bir çözümdür. Öte yandan, sıcaklık dayanımının artırılması için elektrotlar tungsten malzemeden üretilebilir, ancak elektriksel iletkenliğin azalacağı mutlaka dikkate alınmalı ve güç kaynağı buna göre ayarlanmalıdır. Elektrotlar üzerindeki oksitlenme riskinin önlenmesi için alüminyum oksit (Al_2O_3) kaplama yapılmalıdır. Torcun soğutulmasına karşın, ark deşarjının olduğu bölgede lokal sıcaklıklar çok yüksek olmaktadır. Bu nedenle, soğutma ceketini tasarlanırken iç basınç yalnızca soğutucu giriş-çıkış sıcaklığına göre değil, aynı zamanda oluşabilecek lokal sıcaklıklara göre tasarlanmalıdır.

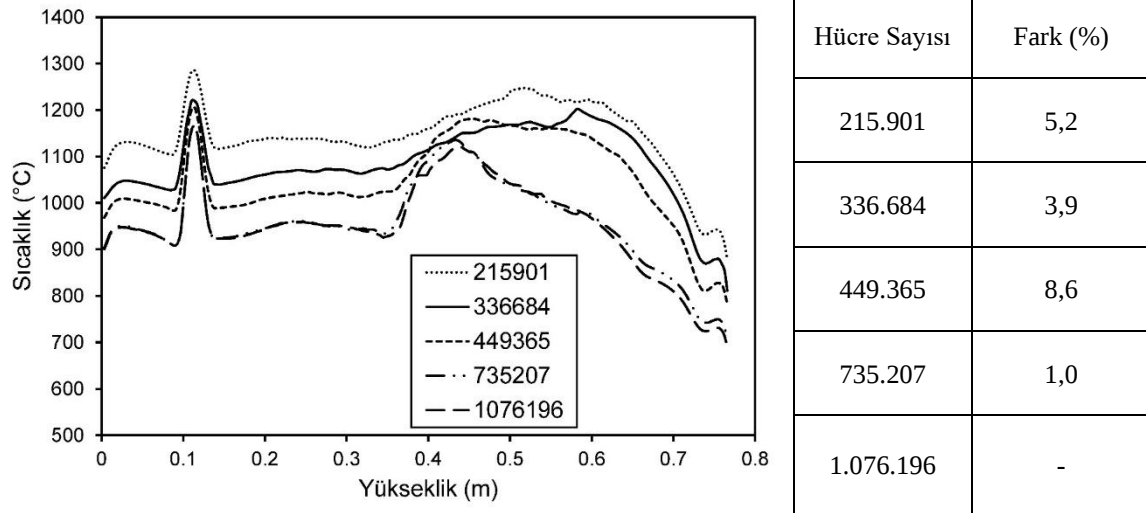
- Sıcaklık Ölçümü: Termokupllar ile ölçüm yapılabilmesi için torç bölgesinde B tipi termokupl kullanılmalıdır. Ancak, yüksek maliyetlerine karşın, daha doğru ölçümlerin yapılabilmesi için termokupl kullanımı yerine fotometre veya radyometre gibi daha yüksek sıcaklıkların okunabildiği ve yıpranma gerçekleşmeyen ölçüm yöntemlerinin kullanımı uygun olacaktır.

- Sentez Gazı Ölçümü: Yalnızca sentez gazı ölçümü yapılacaksa gaz kromatografisi cihazı yerine sentez gazı analizörü kullanılması daha uygun olacaktır. Gaz kromatografisi yöntemi için ise ilave ölçüm kolonları gerekmektedir. Sentez gazı numunesinin alındığı nokta ile ölçüm cihazı arasındaki mesafe olabildiğinde kısaltılmalı ve daha anlık ölçümler yapılmalıdır.

6. NÜMERİK SİMÜLASYON BULGULARI

6.1. Hücre Bağımsızlık Testleri

Prototip gazlaştırıcının simülasyonuna yönelik oluşturulan hücre yapıları için reaktör yüksekliği boyunca elde edilen sıcaklık profilleri ve ortalama farklılık yüzdeleri karşılaştırmalı olarak Şekil 6.1’de verilmiştir. Sıcaklık profilleri, gazlaştırıcının merkez çizgisi boyunca konumlandırılan 300 nokta üzerinden okunmuş olup, her bir nokta üzerinde gerçekleşen sapma yüzdeleri hesaplanmış, ardından her hücre yapısının ortalama sapma miktarı, ilgili hücre yapısı için bütün bu sapmaların ortalama değeri alınarak hesaplanmıştır. Buna göre, 735.207 hücreli konfigürasyondan elde edilen sonuçların, 1.076.196 hücreli konfigürasyondan elde edilen sonuçlar ile ortalama %1,0 farklılık gösterdiği görülmekte olup, daha az hücre sayısına sahip hücre konfigürasyonları için sapma miktarları yüksek olmuştur. Dolayısıyla, hesaplama süresinin kısaltılabilmesi için 735.207 hücreli konfigürasyonun simülasyonlarda kullanılabilir olduğu söylenebilir.



Şekil 6.1. Farklı hücre sayıları için reaktör ekseninde yükseklik boyunca elde edilen sıcaklık profilleri.

Karşılaştırmanın daha doğru olabilmesi için, aynı hücre sayılarından elde edilen sentez gazı içerikleri Çizelge 6.1’de karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, sıcaklık profilleri için yapılan karşılaştırma ile paralellik göstermektedir. 735.207 hücreli konfigürasyon ile 1.076.196 hücreli konfigürasyon arasında %2,5 ortalama farklılık olduğu görülürken, bu değer daha az hücre sayısına sahip konfigürasyonlar için %5,0 değerinin üzerindedir. Bu nedenle,

735.207 hücreli konfigürasyonun prototip gazlaştırmacı için yapılacak simülasyonlarda kullanımı uygundur.

Çizelge 6.1. Farklı hücre yapıları için elde edilen sentez gazı içerikleri ve farklılık yüzdeleri.

Bileşik	Hücre Konfigürasyonları									
	215.901		336.684		449.365		735.207		1.076.196	
	İçerik (%)	Fark (%)	İçerik (%)	Fark (%)	İçerik (%)	Fark (%)	İçerik (%)	Fark (%)	İçerik (%)	Fark (%)
H ₂	42,8	4,4	44,7	3,9	46,4	6,9	49,6	1,6	50,4	-
CO	28,6	5,0	27,2	5,0	25,8	13,1	22,4	2,9	21,8	-
CH ₄	10,3	4,6	10,8	2,3	11,1	7,8	11,9	3,1	11,6	-
N ₂	5,4	17,3	4,5	15,4	3,8	17,9	3,1	3,2	3,2	-
H ₂ O	8,2	1,8	8,3	1,2	8,4	6,2	8,9	1,4	8,8	-
H ₂ S	1,9	5,8	2,0	5,0	2,1	3,3	2,2	4,2	2,3	-
Ort. Fark	%6,3		%5,3		%9,1		%2,5		-	

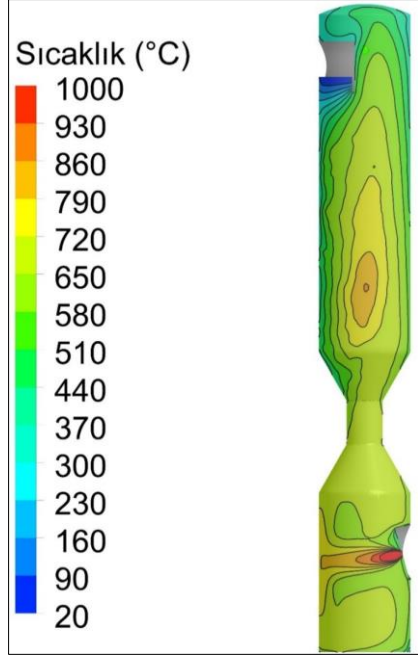
6.2. Model Validasyonu

Kullanılan nümerik modelin uygulanabilirliğinin tayini için hem bu çalışmada deneysel olarak test edilen prototip gazlaştırmacı geometrisi için simülasyon gerçekleştirilerek sentez gazı içerikleri karşılaştırılmış, hem de ilave olarak Mashayak'ın (2009) yapmış olduğu çalışmada kullanılan gazlaştırmacı simüle edilerek sonuçlar referans çalışmada deneysel olarak elde edilen sıcaklık dağılımı ve sentez gazı içeriği sonuçları karşılaştırılmıştır.

6.2.1. Prototip gazlaştırmacı simülasyonu

Tasarlanan prototip gazlaştırmacının nümerik simülasyonundan elde edilen sıcaklık dağılımı Şekil 6.2'de verilmiştir. Bununla birlikte, deneysel olarak gaz kromatografisinden alınan sonuçlar yalnızca H₂, CO ve N₂ gazlarını içerdiği için, nümerik olarak elde edilen sentez gazı içerikleri, hem diğer gaz içerikleriyle birlikte simüle edilen yüzdeleri ile, hem de normalize edilmiş halde Çizelge 6.2'de deneysel veriler ile karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Elde edilen sonuçlara bakıldığında, deneysel sonuçlarla paralel bir şekilde, elde edilen H₂ oranının CO oranından belirgin bir şekilde daha fazla olduğu görülmektedir. Ek olarak, gazlaştırmacı içerisindeki sıcaklığın ortalama 200-500°C aralığında olduğu gözlemlenmiş olup, simülasyon ile gazlaştırmacının termokupl noktalarına yakın bölgelerinde elde edilen sıcaklık dağılımının 500-650°C aralığında olduğu görülmektedir. Gerçekleşen sapmaların

nedeni, çalışma kapsamında gerçekleştirilen deneyler esnasında oluşan deneysel hatalardan kaynaklanmakta olup, karşılaşılan deneysel hatalar ve sorunlar “5. DENEYSEL BULGULAR” bölümünde detaylı olarak açıklanmıştır. Sonuç olarak, kullanılan nümerik modelin gerçeğe yakın sonuçlar verdiği söylenebilmektedir.



Şekil 6.2. Prototip gazlaştırıcı için ER=0,2 koşulunda gazlaştırıcı içerisinde HAD simülasyonu ile elde edilen sıcaklık dağılımı.

Çizelge 6.2. Prototip gazlaştırıcı için gerçekleştirilen deneysel ve nümerik sonuçların karşılaştırılması.

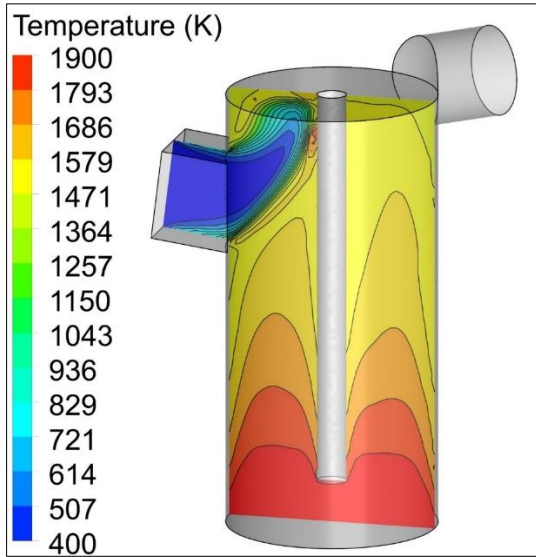
İçerikler	Elde Edilen Sentez Gazı İçerikleri (%)		
	Deneysel (Ort.)	Nümerik	Nümerik (Normalize Edilmiş)
H ₂	62,6	49,6	66,0
CO	3,2	22,4	29,8
N ₂	34,2	3,1	4,1
Diğer Gazlar	-	24,9	-
Toplam	100	100	100

6.2.2. Referans çalışmadan alınan gazlaştırıcı simülasyonu

Mashayak'ın (2009) elde ettiği deneysel veriler kullanılarak yapılan doğrulama simülasyonundan elde edilen sıcaklık dağılımı Şekil 6.3'de verilmiştir. Yapılan deneysel

çalışmada sıcaklık ölçüm verileri net bir şekilde belirtilmemiş olup; yığın sıcaklığı (bulk temperature) değerlerinin gazlaştırıcının alt kısımlarında 1.300 K, atık beslemesi yapılan bölgede ise 1.000 K civarında olduğu belirtilmiştir. Öte yandan, simülasyon ile elde edilen sıcaklık dağılımına bakıldığında ise bu durumun gazlaştırıcının alt kısımlarında ortalama 1.700 K, atık beslemesi yapılan bölgede ise 1.500 K civarında olduğu görülmektedir. Buna göre, sıcaklık dağılımının referans çalışma ile paralellik gösterdiği söylenebilir. Sıcaklık dağılımındaki bu sapmanın nedenleri;

- Deneysel çalışmada yalıtım kalınlığı, atık besleme koşulları, beslenen atığın granül çapı, yakıt-hava oranı vb. gazlaştırıcı parametrelerinin belirtilmemiş olması ve simülasyonda bu parametrelerin kabuller ile belirlenmesi, ve
- Işıma ile ısı transferi modellemesinde emisivite değerlerinin bütün yüzeylerde geçirgenlik katsayısının (diffuse fraction) 1 olarak tanımlanması ve diğer radyatif etkilerin ihmal edilmesi olarak sıralanabilir.



Şekil 6.3. Doğrulama simülasyonundan elde edilen sıcaklık dağılımı.

Simülasyon ile çıkış noktasından elde edilen sentez gazı içeriğindeki H_2 , CO ve N_2 yüzdeleri, referans çalışmada (Mashayak, 2009) verilen deneysel sonuçlar ile Çizelge 6.3'te karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Simülasyondan elde edilen H_2 ve CO yüzdelерinin deneysel veri ile örtüştüğü görülürken, N_2 yüzdesinde sapmanın olduğu görülmektedir. Gerçekleşen bu sapmanın, deneylerde kullanılan atık numunesinin içeriğindeki klor (Cl),

flor (F), iyot (I) ve sülfür (S) içeriklerinin simülasyonda ihmal edilmiş olması; ışıma ile ısı transferi modelindeki kabuller nedeniyle elde edilen sıcaklık dağılımındaki sapmalar; ve referans çalışmada belirtilmeyen reaktör parametrelerinin kabul edilmesi nedeniyle gerçekleştiği söylenebilir. Buna göre, yapılan simülasyon ile sentez gazı içerikleri için elde edilen ortalama hata yüzdesi %8,6 olup, kullanılan nümerik modelin kullanılabilir olduğu görülmektedir.

Çizelge 6.3. Simülasyondan elde edilen sentez gazı içeriklerinin referans çalışma ile karşılaştırılması.

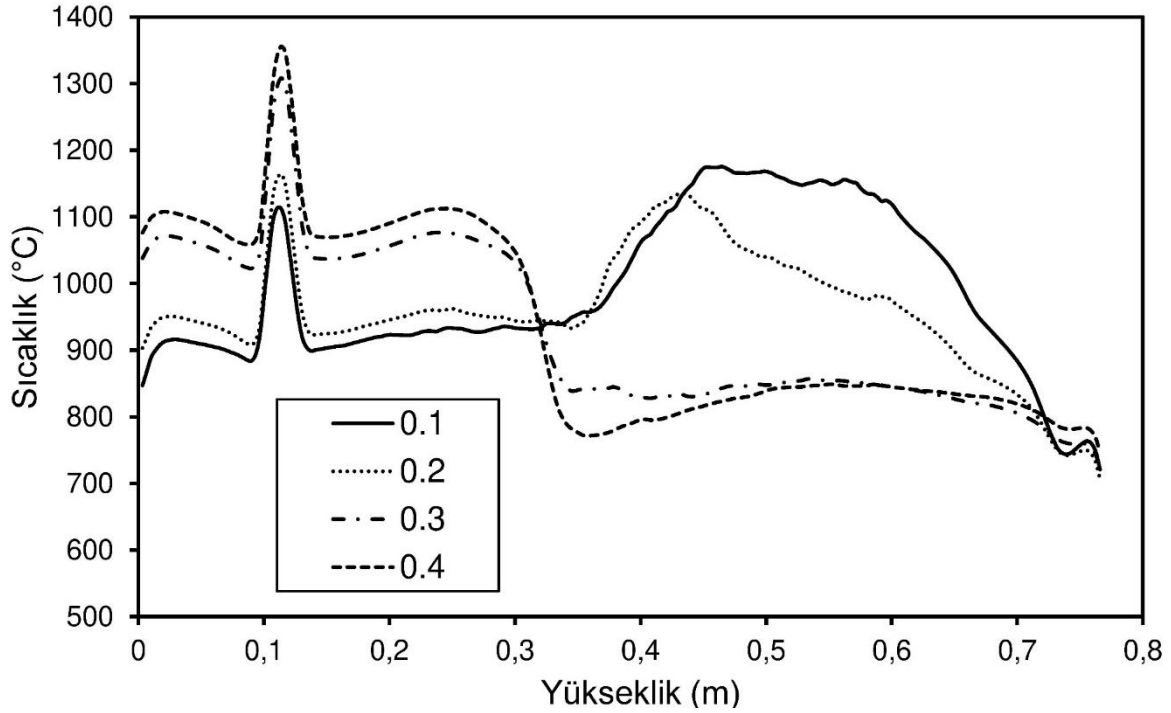
Bileşik	Sentez Gazı İçerikleri (%)		
	Mevcut Çalışma	Mashayak (2009)	Sapma
H ₂	37,3	35,7	4,3
CO	34,6	39,0	3,0
N ₂	18,2	22,3	18,4
Ortalama Hata			%8,6

Sonuç olarak, prototip gazlaştırıcı ve referans çalışmadan alınan gazlaştırıcı için yapılan doğrulama simülasyonlarının sonuçlarına bakıldığında, çalışma kapsamında kullanılan nümerik modelin plazma gazlaştırıcı simülasyonunda kullanılabilir olduğu görülmüş olup, gazlaştırıcının hava-yakıt oranının optimizasyonunda kullanılması uygun bulunmuştur.

6.3. Simülasyon Sonuçları

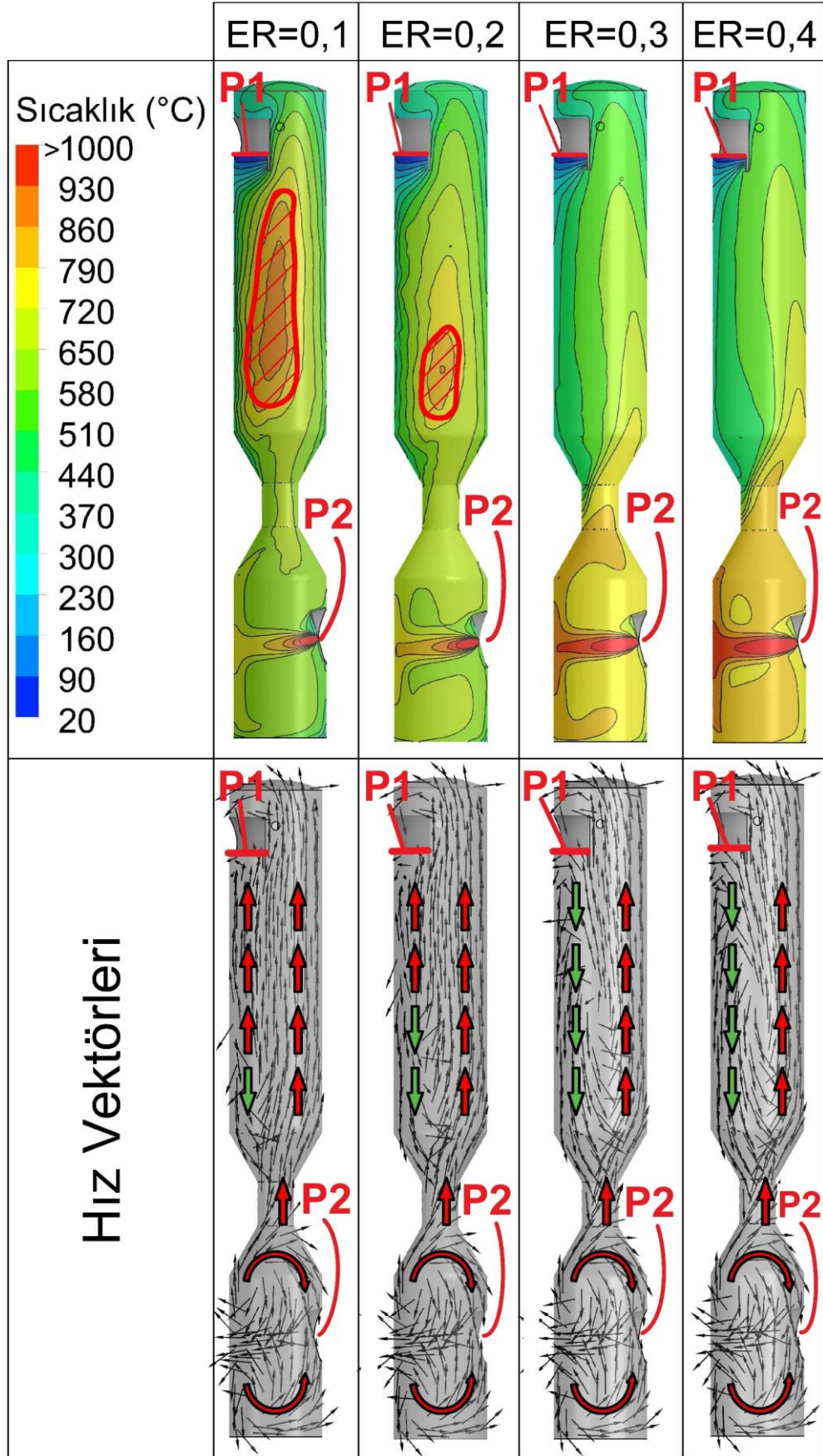
6.3.1. Gazlaştırıcı içerisindeki sıcaklık dağılımı ve akış profilleri

Farklı eşdeğerlik oranları (ER) için, gazlaştırıcının merkez çizgisi üzerinde, taban ($h=0$ m) ve üst nokta ($h=0,8$ m) arasında HAD simülasyonları ile elde edilen sıcaklık profilleri Şekil 6.4'te verilmiştir. Buna göre, gazlaştırıcı boğazının alt kısmındaki gazlaşma bölgesinde elde edilen sıcaklık profilleri ile üst bölümündeki kurutma ve piroliz bölgelerinde elde edilen sıcaklık profilleri farklı karakterde eğilim göstermektedir. Boğazın alt kısmında ER değeri arttıkça sıcaklıkların artma eğiliminde olduğu, üst kısımlarında ise ER değeri arttıkça sıcaklıkların azalma eğiliminde olduğu görülmektedir. Özellikle $ER=0,2$ ile $ER=0,3$ arasındaki bir ER değerinden sonra sıcaklık profilinin karakteristiği tamamen değişmiştir.



Şekil 6.4. Farklı ER değerleri için gazlaştırmacı merkez çizgisi boyunca elde edilen sıcaklık profilleri.

Sıcaklık dağılımı karakteristiğindeki değişimin daha doğru bir şekilde anlaşılabilmesi için, gazlaştırmacının orta düzleminden alınan sıcaklık konturları ve aynı düzlem üzerinde oluşan hız vektörleri Şekil 6.5 üzerinde karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir. Buna göre, sıcaklık profillerinin karakteristiğini değiştiren en önemli etmenin, gazlaştırmacı boğazının üst kısmındaki akış profilleri olduğu söylenebilir. Durumun daha net anlaşılabilmesi için, Şekil 6.5'te gazlaştırmacının üst kısmında oluşan hakim akış yönleri kırmızı ve yeşil oklar ile işaretlenmiştir. Görüldüğü gibi, atık besleme konumu (P1) ile plazma torç konumunun (P2) birbirine zıt olması ve boğaz konfigürasyonu nedeni ile; $ER=0,1$ ve $ER=0,2$ koşulları için elde edilen akış karakteristiği, $ER=0,3$ ve $ER=0,4$ koşullarında elde edilen akış karakteristiğinden tamamen farklıdır. $ER=0,1$ ve $ER=0,2$ koşulları için boğazın üst kısmı ile atık besleme noktası arasındaki gaz akışının atık besleme yönüne ters biçimde yukarı doğru olduğu ve tek yönlü akışın hakim olduğu görülmektedir. Bununla birlikte, gazlaştırmacı içerisindeki maksimum sıcaklıkların boğazın üst kısmında kırmızı renkle taranan bölgelerde olduğu görülmektedir.



Şekil 6.5. Bütün ER koşulları için gazlaştırıcı içerisindeki sıcaklık konturları ve akış profilleri.

Bu durum;

- Beslenen atık granüllerinin gazlaşma bölgesine giriş süresinin artması,
- Plazma jeti ile beslenen yüksek sıcaklıklı havanın gazlaşma bölgesindeki sirkülasyonunun azalması,
- Gazlaşma reaksiyonlarının bir kısmının gazlaştırıcı alt kısmındaki yüksek sıcaklık bölgesinde değil, üst kısmındaki düşük sıcaklık bölgesinde, piroliz reaksiyonları ile karışık bir biçimde gerçekleşmesi, ve
- Gazlaşma bölgesinde oluşması beklenen yüksek sıcaklıkların piroliz bölgesinde oluşması ile sonuçlanmaktadır.

Öte yandan, $ER=0,3$ ve $ER=0,4$ durumları için gazlaştırıcının atık besleme noktası tarafındaki akışın atık besleme yönü ile aynı yönde olduğu, gazlaştırıcının plazma torç tarafındaki akışın yukarı yönlü olduğu ve boğazın üst kısmında çift yönlü akışın hakim olduğu görülmektedir. Bununla birlikte, sıcaklık konturlarına bakıldığında yüksek sıcaklıkların gazlaştırıcı boğazının alt kısmında sınırlandığı görülmektedir. Böylece;

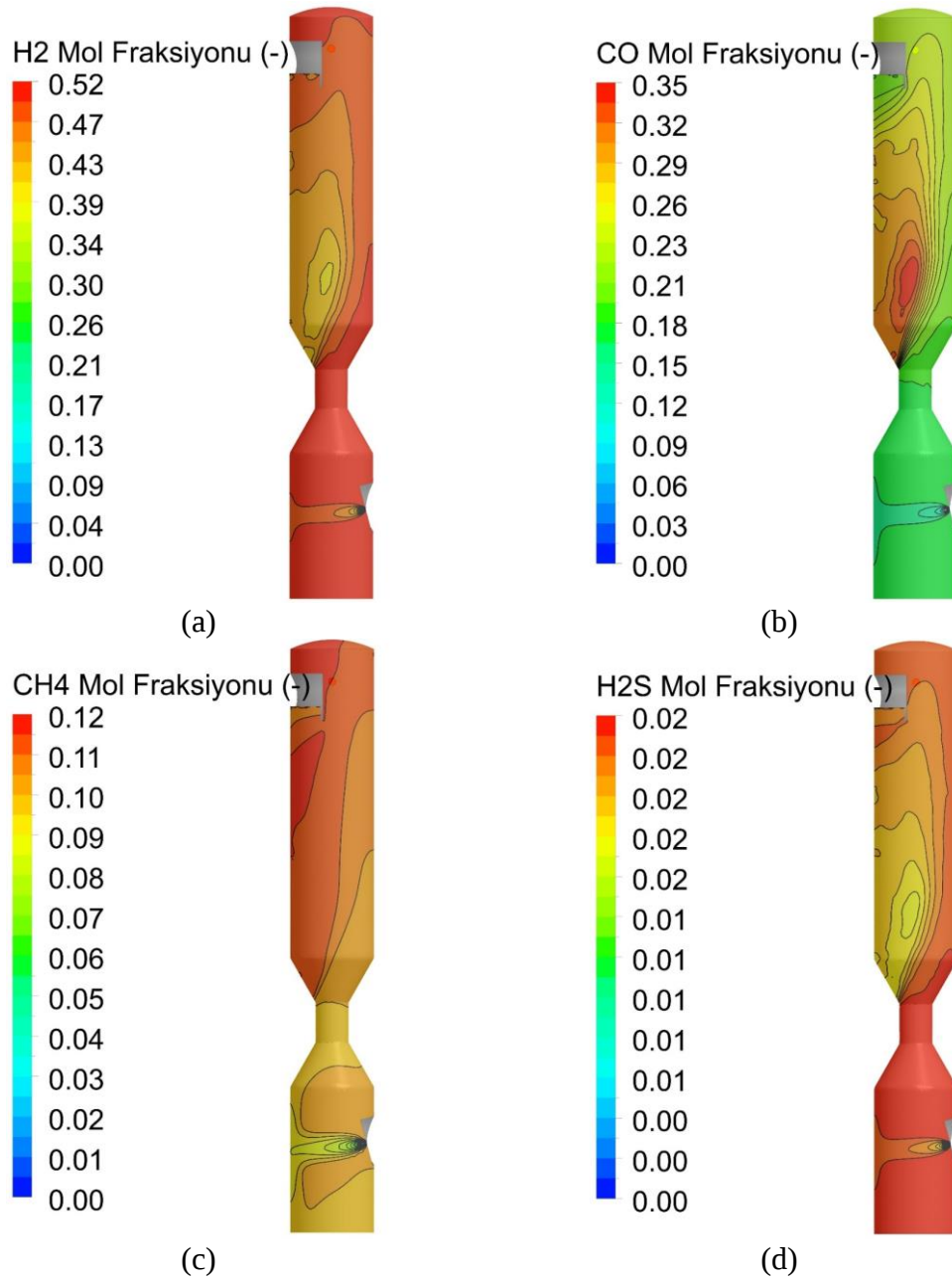
- Beslenen atık granülleri gazlaşma bölgesine daha hızlı bir şekilde giriş yapmış,
- Plazma jeti ile beslenen yüksek sıcaklıklı havanın gazlaşma bölgesindeki sirkülasyonu artmış,
- Gazlaşma reaksiyonlarının tamamı, olması gerektiği gibi, gazlaşma bölgesinde gerçekleşmiş, ve
- Maksimum sıcaklıklar beklendiği gibi gazlaştırıcının alt kısmında oluşmuştur.

Dolayısıyla, yalnızca gazlaştırıcı içerisindeki akış profilleri değiştirilerek gazlaştırıcı içerisindeki sıcaklık dağılımının optimize edilebileceği sonucuna varılabilir.

6.3.2. Sentez gazı üretimi

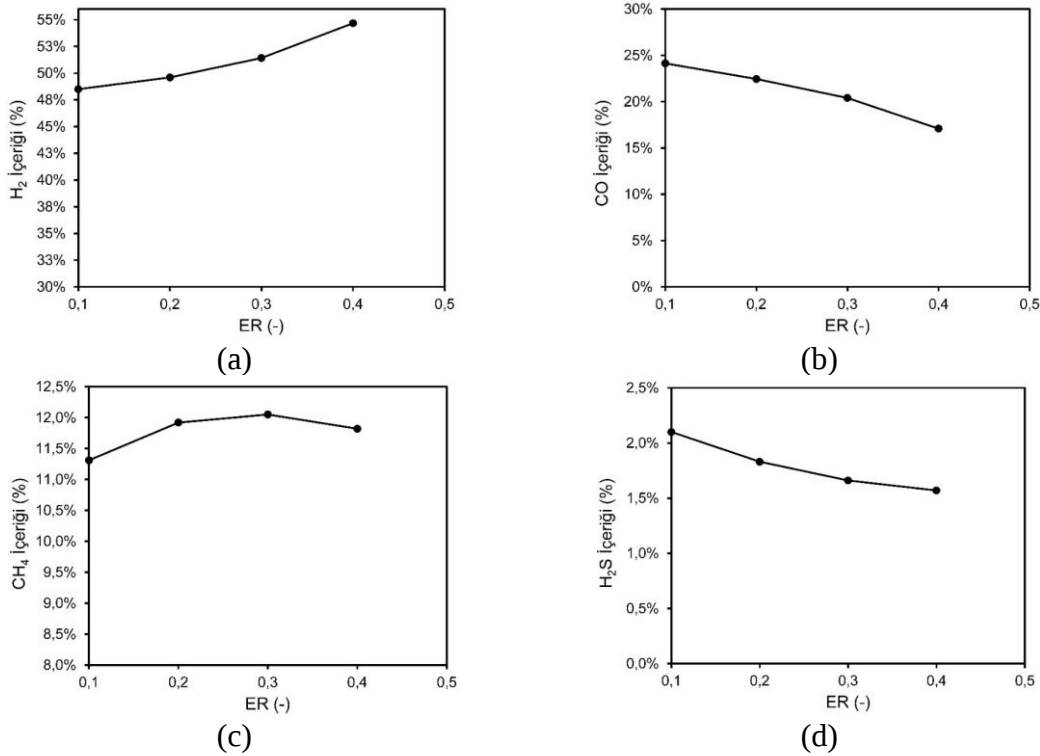
Gazlaştırıcı içerisinde H_2 , CO , CH_4 ve H_2S bileşiklerinin oluşum bölgelerinin görülebilmesi için, $ER=0,2$ koşulunda gazlaştırıcı içerisinde oluşan bileşiklerin mol kesirlerinin dağılımları Şekil 6.6'daki gibi elde edilmiştir. Buna göre, tasarlanan yukarı akışlı gazlaştırıcıya eklenen boğaz konfigürasyonu ile oluşan sıcaklık profillerinin, sentez gazı oluşum karakteristiğini de doğrudan etkilediği görülmektedir. Gazlaşma bölgesinden kurutma bölgesine gidildikçe

H₂ ve H₂S yüzdeleri azalma eğilimindeyken, CO ve CH₄ yüzdelерinin azalma eğiliminde olduğu görölmektedir. Maksimum CO yüzdesi piroliz bölgesinde görölrken, diğer bölgelerde ise oluşumun azaldığı görölmektedir. Bu durum, gazlaşma bölgesindeki sıcaklık artışlarının H₂ üretimini arttırdığını, öte yandan indirgenme ve piroliz bölgelerindeki sıcaklık artışlarının daha çok CO ve CH₄ üretimini arttırdığını göstermektedir. Gazlaştırıcı içerisinde elde edilen maksimum H₂, CO, CH₄ ve H₂S yüzdeleri sırasıyla %52, %35, %12 ve %2,3 olarak bulunmuştur.



Şekil 6.6. HAD simölasyonları ile prototip gazlaştırıcı içerisinde elde edilen (a) H₂, (b) CO, (c) CH₄ ve (d) H₂S bileşiklerinin dağılımları (ER=0,2).

Açığa çıkan sentez gazı içeriklerinin kıyaslanabilmesi için, farklı ER değerleri için sentez gazı içeriğinde elde edilen bileşik yüzdeleri Şekil 6.7’de grafikler halinde verilmiştir. Sonuçlar, sentez gazı içeriğinde elde edilen H_2 yüzdesinin ER değeri arttırıldığında artış gösterdiğini, CO ve H_2S yüzdesinin ise azalma eğiliminde olduğunu, CH_4 yüzdesinin ise ER=0,3 değerine kadar artış eğiliminde ve sonrasında azalma eğiliminde olduğunu göstermektedir. Benzer şekilde Şekil 6.4’e bakıldığında, ER değerinin arttırılmasıyla birlikte gazlaşma bölgesindeki sıcaklıkların arttığı, boğazın üst kısmındaki bölgelerde ise (indirgeme, piroliz ve kurutma) azaldığı görülmektedir. Dolayısıyla, ER değerindeki artışın gazlaşma bölgesinde sağladığı sıcaklık artışları ile H_2 içeriğinin yükseldiği; üst bölgelerde ise ER değeri arttıkça gerçekleşen sıcaklık düşüşü nedeniyle oluşan H_2 içeriğinin bozulmadan çıkış yaptığı görülmektedir. ER değerindeki artış ile birlikte CO oluşumunun maksimum seviyede görüldüğü piroliz bölgesindeki sıcaklıkların azalması sayesinde CO oluşumu azalmış, böylece daha fazla H_2 içerikli sentez gazı üretimi gerçekleşmiştir. Öte yandan, daha önce yapmış olduğumuz çalışmada (Erdoğan ve Yılmazoğlu, 2021) incelenen yukarı akışlı gazlaştırıcı tasarımında boğaz kısmı bulunmamakta olup, alınan sonuçlara bakıldığında ER değerinin artmasıyla H_2 yüzdesi azalmış, CO yüzdesi artmıştır. Bu durum,

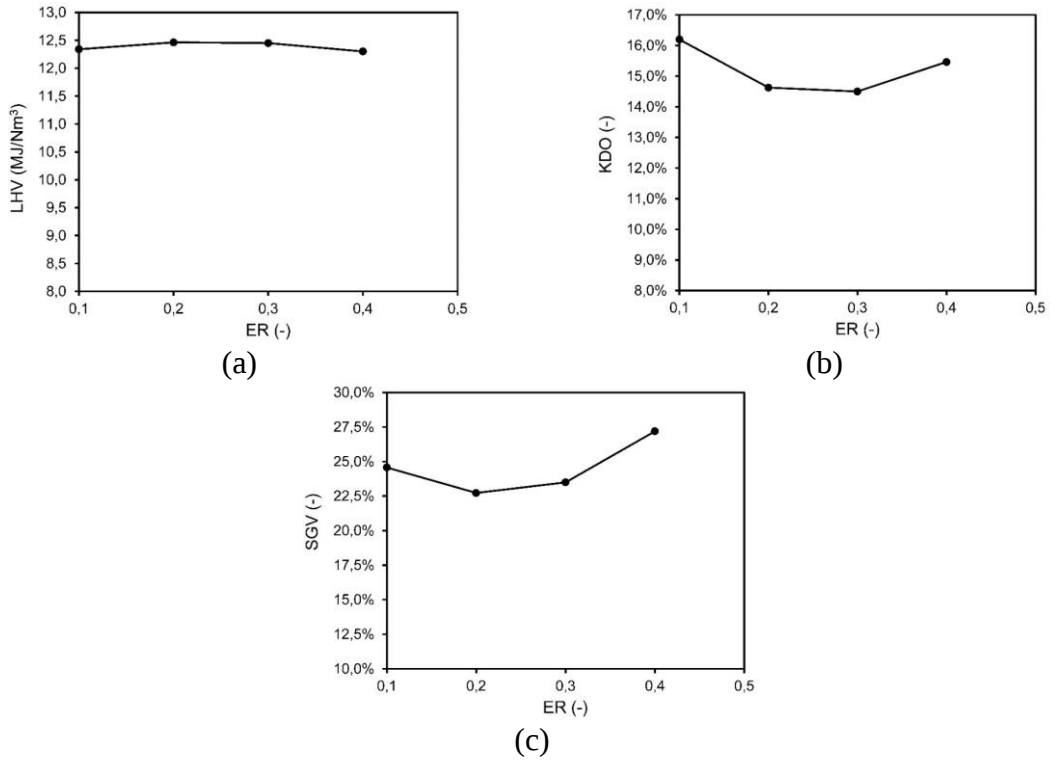


Şekil 6.7. Farklı ER değerleri için elde edilen sentez gazı içerikleri. (a) H_2 yüzdesi, (b) CO yüzdesi, (c) CH_4 yüzdesi, (d) H_2S yüzdesi

çalışma kapsamında üretilen yukarı akışlı prototip gazlaştırmacıda boğaz kısmının eklenmesinin ve plazma torç ile atık beslemesinin birbirine zıt yönde konumlandırılmasının sentez gazı üretimini olumlu yönde etkilediğini göstermektedir.

6.3.3. Gazlaştırmacı performans parametreleri

Gazlaştırmacının performans parametrelerinin incelenebilmesi için, farklı ER değerlerinde gazlaştırmacı içerisinde elde edilen LHV, KDO ve SGV değerleri Şekil 6.8'deki gibi elde edilmiştir. Elde edilen performans parametrelerinde en belirgin fark soğuk gaz veriminde (SGV) gerçekleşmekte olup, LHV değerindeki dalgalanmanın %0,3'ün altında, KDO değerindeki dalgalanmanın ise %1,8'in altında olduğu görülmektedir. İlave olarak, beslenen 7,0 kg/sa atıktan elde edilen sentez gazı debileri ER=0,1, ER=0,2, ER=0,3 ve ER=0,4 için sırasıyla 18,7 Nm³/sa, 17,0 Nm³/sa, 18,5 Nm³/sa ve 23,8 Nm³/sa olarak bulunmuş olup, en fazla sentez gazı oluşumunun ER=0,4 için elde edildiği görülmüştür. Sonuçlar sentez gazı içerikleri, sentez gazı oluşum miktarı ile birlikte KDO ve SGV parametreleri açısından değerlendirildiğinde, en optimum sonuçların ER=0,4 için elde edildiği görülmektedir.



Şekil 6.8. Farklı ER değerleri için elde edilen performans parametreleri. (a) LHV, (b) KDO, (c) SGV.

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

COVID-19 pandemisi sürecinde ve sonrasında, tıbbi atık üretiminin dünya çapında tüm sağlık kuruluşlarında ciddi boyutlara ulaşması, etkili tıbbi atık yönetiminin önemini arttırmıştır. Tıbbi atık emisyonlarının oluşturduğu kirliliğin doğrudan doğaya salınmaması ve harcanan maliyetlerin kontrol altına alınabilmesi için daha etkili önlemlerin alınması ihtiyacı gün geçtikçe artmaktadır. Tıbbi atıkların 1° ve 2° geri dönüşümü (maddesel geri dönüşüm) sağlanamamakta olup, yalnızca 4° geri dönüşümü (enerji geri dönüşümü) sağlanabilmektedir. Açığa çıkardıkları kanserojen PCDD/PCDF emisyonları gibi tehlikeli emisyonlar, yüksek enerji tüketim oranları ve değerli maddelerin sürekli olarak kaybedilmesi gibi tipik özellikleri nedeniyle klasik yakma, piroliz ve gazlaştırma yöntemleri etkili bir biçimde uygulanamamakta olup alternatif bertaraf ve geri dönüşüm yöntemlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Diğer yöntemlere kıyasla plazma gazlaştırma yöntemi, sağladığı düşük kirletici emisyonları, yüksek H₂ üretim potansiyelleri ve yüksek işletme maliyetlerine rağmen sağladıkları düşük geri ödeme süreleri nedeniyle tıbbi atıkların geri dönüşümü için güçlü bir alternatiftir.

Bu çalışmada, tıbbi atıkların, literatürden farklı bir tasarıma sahip yukarı akışlı plazma gazlaştırıcı içerisindeki gazlaşma karakteristikleri deneysel ve HAD simülasyonları ile incelenmiştir. İncelenen plazma gazlaştırıcının boyutlandırılmasında, literatürden farklı olarak, klasik gazlaştırıcılarda kullanılan pratik bağıntılar kullanılmıştır. Tasarlanan gazlaştırıcının üretim aşamaları ve uygulanan deneysel metodoloji detaylı bir şekilde ele alınmıştır. HAD simülasyonları ANSYS Fluent ortamında gerçekleştirilmiş olup, tasarlanan prototip gazlaştırıcının içerisindeki sıcaklık dağılımları, sentez gazı içerikleri, karbon dönüşüm oranları ve soğuk gaz verimleri ER=0,1 , ER=0,2 , ER=0,3 ve ER=0,4 koşulları için incelenmiştir. 7 kg/sa atık beslemesi ile ER=0,2 için gerçekleştirilen deneysel çalışma esnasında karşılaşılan tasarımsal ve deneysel hatalar detaylı bir şekilde açıklanmış olup, gelecekte yapılabilecek çalışmalar için “5.3. Çözüm Alternatifleri” bölümünde gerçekleşen hatalara yönelik çözüm önerilerinde bulunulmuştur. HAD simülasyonlarında kullanılan nümerik model, deneysel ve tasarımsal hatalar nedeniyle, hem bu çalışma kapsamında üretilen gazlaştırıcıdan elde edilen deneysel veriler kullanılarak, hem de Mashayak’ın (2009) yapmış olduğu çalışmadan alınan deneysel veriler kullanılarak doğrulanmıştır. Tasarlanan prototip gazlaştırıcı için optimum değerler ER=0.4 için sağlanmış olup; sentez gazı

içeriğinde %54,7 H₂, %17,1 CO, %11,8 CH₄ ve %2,5 H₂S elde edilmiş, KDO ve SGV değerleri ise sırasıyla %15,5 ve %27,2 olarak hesaplanmış, 7 kg/sa atık beslemesi için 23,8 Nm³/sa sentez gazı üretimi gerçekleştirilmiş ve açığa çıkan sentez gazının LHV değeri 12,30 MJ/Nm³ olarak hesaplanmıştır. Gerçekleştirilen çalışma kapsamında deneysel ve nümerik olarak incelenen plazma gazlaştırma ile aşağıdaki sonuçlara varılmıştır:

- Kullanılan nümerik model ile birlikte referans çalışmadan (Messerle vd., 2016) alınan plazma-kimyasal reaksiyonlar uyumlu bir şekilde çalışmakta olup, plazma gazlaştırıcı tasarımı ve optimizasyonu için kullanılabilir.

- Yukarı akışlı plazma gazlaştırıcılar için gazlaşma ile indirgenme bölgelerinin arasına boğaz konfigürasyonunun eklenmesi, sentez gazı içeriğindeki H₂ üretimini ve soğuk gaz verimini artırırken, yüksek sıcaklıklara ulaştığında CO oluşumunu tetikleyen indirgenme ve piroliz bölgelerindeki sıcaklıkları azaltmakta, sonuç olarak gazlaştırma prosesinin verimi artmaktadır.

- Literatürdeki diğer mevcut tasarımlardan farklı olarak, bu çalışma kapsamında gazlaştırıcı boğazı eklenerek tasarlanan yukarı akışlı plazma gazlaştırıcı için ER değerini artırarak H₂ üretimini ve gazlaştırıcı performansını arttırmak, CO oluşumunu ise azaltmak mümkündür.

- Gazlaştırıcı içerisindeki akış profillerini iyileştirerek gazlaştırıcı performansını arttırmak mümkündür.

Tasarımın daha uygun koşullarda test edilebilmesi için, sonraki çalışmalarda gazlaştırıcıda gerçekleşen tasarımsal hataların giderilmesi ve deneysel olarak gazlaştırıcı içersindeki sıcaklık dağılımının daha etkin bir şekilde incelenmesi gerekmektedir. Öte yandan, gazlaştırıcı tasarımının performansının daha net bir şekilde tayin edilebilmesi için;

- Çalışmada incelenen gazlaştırıcı tasarımının optimizasyonu (boğaz çapı ve/veya yüksekliği, atık beslemesi ve plazma jetinin konumları, farklı besleme sistemi konfigürasyonları, farklı plazma torç tasarımı vb.),

- Gazlaştırıcı içerisindeki sıcaklık dağılımının ve akış profillerinin optimizasyonu,

- Atık granül boyutlarının gazlaştırıcı performansına etkilerinin değerlendirilmesi,
- Farklı atık içeriklerindeki performans parametrelerin değerlendirilmesi,
- Kullanılan plazma torç tasarımına yönelik parametrelerin tayini (Harcanan elektriksel güç, plazma jet sıcaklığı, soğutma sistemi tasarımı, malzeme seçimi vb.),
- Önerilen gazlaştırıcının açığa çıkardığı NO_x, SO₂ vb. kirletici emisyonların oluşumunun incelenmesi, ve
- Açığa çıkan cüruf içeriğinin incelenmesi,

hususlarında daha fazla araştırmanın yapılması gerekmektedir.

KAYNAKLAR

- Adelawon, B. O., Latinwo, G. K., Eboibi, B. E., Agbede, O. O., and Agarry, S. E. (2022). Comparison of the slow, fast, and flash pyrolysis of recycled maize-cob biomass waste, box-benhen process optimization and characterization studies for the thermal fast pyrolysis production of bio-energy. *Chemical Engineering Communications*, 209(9), 1246-1276.
- Agon, N., Hrabovský, M., Chumak, O., Hlína, M., Kopecký, V., Masláni, A., Bosmans, A., Helsen, L., Skoblja, S., Van Oost, G., and Vierendeels, J. (2016). Plasma gasification of refuse derived fuel in a single-stage system using different gasifying agents. *Waste Management*, 47, 246-255.
- Akbiyık, H., and Yavuz, H. (2021). Artificial neural network application for aerodynamics of an airfoil equipped with plasma actuators. *Journal of Applied Fluid Mechanics*, 14(4), 1165-1181.
- Al-Sabagh, A. M., Yehia, F. Z., Eshaq, G., Rabie, A. M., and ElMetwally, A. E. (2016). Greener routes for recycling of polyethylene terephthalate. *Egyptian Journal of Petroleum*, 25(1), 53-64.
- Alvim Ferraz, M. C. M., and Afonso, S. A. V. (2003). Dioxin emission factors for the incineration of different medical waste types. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 44(4), 0460-0466.
- Andreev, V. V., Kravchenko, G. A., and Pichugin, Y. P. (2020). Investigation of corona-resistant coatings for the dielectric surface in a plasma-chemical ozone generator on the base of dielectric barrier discharge. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 862(6), 062086.
- Arena, U. (2012). Process and technological aspects of municipal solid waste gasification. A review. *Waste Management*, 32(4), 625-639.
- Ashford, B., Wang, Y., Wang, L., and Tu, X. (2019). Plasma-Catalytic Conversion of Carbon Dioxide. In Tu, X., Whitehead, J. C., and Nozaki, T. (Eds.). *Plasma Catalysis*. Berlin: Springer, 271-307.
- Balcı, S. K., Kutlu, S. N., Temel, U. B., and Güleç, A. Atmosferik Basınç Soğuk Plazmanın Dış Hekimliğindeki Uygulamaları. *Research Journal of Biomedical and Biotechnology*, 2(1), 1-9.
- Balo, F., and Polat, H. (2021). Energy Productivity with an Effective Design: Case of Medical Waste Storage. In Jacqueline A. Stagner and David S-K. Ting (Eds.), *Engineering for Sustainable Development and Living: Preserving a Future for the Next Generation to Cherish* (First Edition), Irvine: BrownWalker Press, 181-214.
- Baruah, D., and Baruah, D. C. (2014). Modeling of biomass gasification: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 39, 806-815.

- Basu, P. (2010). Design of biomass gasifiers. *Biomass Gasification and Pyrolysis* (First Edition), Cambridge: Academic Press, 167-228.
- Birpınar, M. E., Bilgili, M. S., and Erdoğan, T. (2009). Medical waste management in Turkey: A case study of Istanbul. *Waste Management*, 29(1), 445-448.
- Bogaerts, A., and Neyts, E. C. (2018). Plasma technology: an emerging technology for energy storage. *ACS Energy Letters*, 3(4), 1013-1027.
- Bridgwater, A. V. (2012). Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading. *Biomass and Bioenergy*, 38, 68-94.
- Brillard, A., Kehrli, D., Douguet, O., Gautier, K., Tschamber, V., Bueno, M. A., and Brillhac, J. F. (2021). Pyrolysis and combustion of community masks: Thermogravimetric analyses, characterizations, gaseous emissions, and kinetic modeling. *Fuel*, 306, 121644.
- Byun, Y., Cho, M., Hwang, S.-M., and Chung, J. (2012). Thermal Plasma Gasification of Municipal Solid Waste (MSW). In Y. Yun (Ed.), *Gasification for Practical Applications*. InTechOpen, 183-210.
- Byun, Y., Namkung, W., Cho, M., Chung, J. W., Kim, Y. S., Lee, J. H., Lee, C. R., and Hwang, S. M. (2010). Demonstration of thermal plasma gasification/vitrification for municipal solid waste treatment. *Environmental Science and Technology*, 44(17), 6680-6684.
- Cai, X., and Du, C. (2021). Thermal plasma treatment of medical waste. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, 41(1), 1-46.
- Canel, M. (1986). Kömürlerin Gazlaştırılması. *Bilimsel Madencilik Dergisi*, 25(2), 35-42.
- Cao, Y., Li, B., Han, X., Tan, C., Zhang, Z., Zhang, X., and Wei, J. (2021). Study of double-chamber air arc plasma torch and the application in solid-waste disposal. *Plasma Science and Technology*, 23(6), 064006.
- Ceylan, Z., Bulkan, S., and Elevation, S. (2020). Prediction of medical waste generation using SVR, GM (1, 1) and ARIMA models: a case study for megacity Istanbul. *Journal of Environmental Health Science and Engineering*, 18(2), 687-697.
- Chalermssinsuwan, B., Li, Y. H., and Manatura, K. (2023). Optimization of gasification process parameters for COVID-19 medical masks using response surface methodology. *Alexandria Engineering Journal*, 62, 335-347.
- Chartier, T., Emmanuel, J., Pieper, U., Pruss, A., Rushbrook, P., Stringer, R., Townend, W., Wilbum, S., and Zghondi, R.. (2014). *Safe Management of Wastes from Healthcare Activities* (Second Edition). Geneva:World Health Organization, 250-329.
- Chen, F. F. (1984). *Introduction to plasma physics and controlled fusion* (Third Edition). New York: Springer Cham, 19-51.

- Chen, G., Godfroid, T., Britun, N., Georgieva, V., Delplancke-Ogletree, M. P., and Snyders, R. (2017). Plasma-catalytic conversion of CO₂ and CO₂/H₂O in a surface-wave sustained microwave discharge. *Applied Catalysis B: Environmental*, 214, 114-125.
- Chen, H., Li, J., Li, T., Xu, G., Jin, X., Wang, M., and Liu, T. (2022). Performance assessment of a novel medical-waste-to-energy design based on plasma gasification and integrated with a municipal solid waste incineration plant. *Energy*, 245, 123156.
- Chen, M., and Yang, H. (2016). Current status of medical wastes disinfection and disposal technologies. *Chinese Journal of Disinfection*, 33, 171-174.
- Chin, A. W., Chu, J. T., Perera, M. R., Hui, K. P., Yen, H. L., Chan, M. C., Peiris, M., and Poon, L. L. (2020). Stability of SARS-CoV-2 in different environmental conditions. *The Lancet Microbe*, 1(1), e10.
- Choudhury, H. A., Chakma, S., and Moholkar, V. S. (2015). Biomass gasification integrated Fischer-Tropsch synthesis: perspectives, opportunities and challenges. In A. Pandey, T. Bhaskar, M. Stöcker and R. Sukumaran (Eds.), *Recent advances in thermo-chemical conversion of biomass*. Amsterdam: Elsevier, 383-435.
- Çakmak Barsbay, M. (2021). A data-driven approach to improving hospital waste management. *International Journal of Healthcare Management*, 14(4), 1410-1421.
- Das, S., Hazra, A., and Banerjee, P. (2020). PCDD/PCDFs: a burden from hospital waste disposal plant; plasma arc gasification is the ultimate solution for its mitigation. In S. Ghosh (Ed.), *Energy Recovery Processes from Wastes*. Singapore: Springer, 9-21.
- Deng, N., Cui, W. Q., Wang, W. W., Zhang, Q., Zhang, Y. F., and Ma, H. T. (2014). Experimental study on co-pyrolysis characteristics of typical medical waste compositions. *Journal of Central South University*, 21(12), 4613-4622.
- Deng, N., Zhang, Y. F., and Wang, Y. (2008). Thermogravimetric analysis and kinetic study on pyrolysis of representative medical waste composition. *Waste Management*, 28(9), 1572-1580.
- Devid, E., Zhang, D., Wang, D., Ronda-Lloret, M., Huang, Q., Rothenberg, G., Shiju, N. R., and Kleyn, A. W. (2020). Dry reforming of methane under mild conditions using radio frequency plasma. *Energy Technology*, 8(5), 1900886.
- Dharmaraj, S., Ashokkumar, V., Pandiyan, R., Munawaroh, H. S. H., Chew, K. W., Chen, W. H., and Ngamcharussrivichai, C. (2021). Pyrolysis: An effective technique for degradation of COVID-19 medical wastes. *Chemosphere*, 275, 130092.
- Directive, European Union (EU). (2000). Directive 2000/76/EC of the European Parliament and of the Council of 4 December 2000 on the incineration of waste. *Official Journal of the European Communities L*, 332, 91-111.
- Dong, J., Tang, Y., Nzihou, A., Chi, Y., Weiss-Hortala, E., and Ni, M. (2018). Life cycle assessment of pyrolysis, gasification and incineration waste-to-energy technologies: Theoretical analysis and case study of commercial plants. *Science of the Total Environment*, 626, 744-753.

- Dudkina, L. M., Gerasimov, G. Y., and Khaskhachikh, V. V. (2019). Thermogravimetric and kinetic study of pyrolysis of chlorine-containing medical waste. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 272(2), 022117.
- E. U. Directive (1989). Directive on the Reduction of Air Pollution from Existing Municipal Waste-Incineration Plants, 89/429/EEC, *Official Journal of the European Communities*, 203, 50–54.
- Eker, H. H., and Bilgili, M. S. (2011). Statistical analysis of waste generation in healthcare services: a case study. *Waste Management and Research*, 29(8), 791-796.
- Ekezie, F. G. C., Sun, D. W., and Cheng, J. H. (2017). A review on recent advances in cold plasma technology for the food industry: Current applications and future trends. *Trends in food science and technology*, 69, 46-58.
- Eliasson, B., and Kogelschatz, U. (1991). Nonequilibrium volume plasma chemical processing. *IEEE transactions on plasma science*, 19(6), 1063-1077.
- EPA (1993). Medical Waste Incineration (AP42-1-2). *U.S. Environmental Protection Agency*, North Carolina 27711, 3-35.
- Erdogan, A. A., and Yilmazoglu, M. Z. (2021). Plasma gasification of the medical waste. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(57), 29108-29125.
- Etim, M. A., Academe, S., Emenike, P., and Omole, D. (2021). Application of Multi-Criteria Decision Approach in the Assessment of Medical Waste Management Systems in Nigeria. *Sustainability 2021*, 13, 10914.
- European Centre for Disease Prevention and Control (ECDC). (2020). Guidance for wearing and removing personal protective equipment in healthcare settings for the care of patients with suspected or confirmed COVID-19. *ECDC*.
- FAO (1986). Wood gas as engine fuel, *Food and Agriculture Organization*, Rome, Italy.
- Fiedler, J., Lietz, E., Bendix, D., and Hebecker, D. (2004). Experimental and numerical investigations of a plasma reactor for the thermal destruction of medical waste using a model substance. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 37(7), 1031.
- Fireye – Carrier® (2021). *Waste Management*. URL: <https://www.fireye.com/applications/Waste-Management>, Son Erişim Tarihi: 21 Ağustos 2022.
- Fourcault, A., Marias, F., and Michon, U. (2010). Modelling of thermal removal of tars in a high temperature stage fed by a plasma torch. *Biomass and Bioenergy*, 34(9), 1363-1374.
- Fridman, A. (2008). *Plasma Chemistry*. Cambridge: Cambridge University Press, 25-32.
- Fulcheri, L., Fabry, F., Takali, S., and Rohani, V. (2015). Three-phase AC arc plasma systems: a review. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, 35(4), 565-585.

- George, A., Shen, B., Craven, M., Wang, Y., Kang, D., Wu, C., and Tu, X. (2021). A Review of Non-Thermal Plasma Technology: A novel solution for CO₂ conversion and utilization. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 135, 109702.
- Godoy-Cabrera, O., López-Callejas, R., Valencia, R., Muñoz-Castro, A., Barocio, S. R., Chávez A, E., Mercado-Cabrera, A., Piedad-Beneitez, A., Rodríguez-Méndez, B., and Rodríguez-Arce, J. (2004). Effect of air-oxygen and argon-oxygen mixtures on dielectric barrier discharge decomposition of toluene. *Brazilian Journal of Physics*, 34, 1766-1770.
- Gomez, E., Rani, D. A., Cheeseman, C. R., Deegan, D., Wise, M., and Boccaccini, A. R. (2009). Thermal plasma technology for the treatment of wastes: A critical review. *Journal of Hazardous Materials*, 161(2-3), 614-626.
- Gorokhovski, M., Karpenko, E. I., Lockwood, F. C., Messerle, V. E., Trusov, B. G., and Ustimenko, A. B. (2005). Plasma technologies for solid fuels: experiment and theory. *Journal of the Energy Institute*, 78(4), 157-171.
- Hartati, A., Widiputri, D. I., and Dimyati, A. (2019). Municipal Solid Waste Treatment Using Plasma Gasification With The Potential Production Of Synthesis Gas (Syngas). *Proceedings of the International Conference on Innovation, Entrepreneurship and Technology (ICONIET)*, 2(1), 8-12.
- Hazeltine, R. D., and Waelbroeck, F. L. (2018). *The framework of plasma physics*. Boca Raton: CRC Press, 41-56.
- He, X., Quan, H., Lin, W., Deng, W., and Tan, Z. (2021). AGV Scheduling Optimization for Medical Waste Sorting System. *Scientific Programming*, 2021, 1-12.
- Hong, J., Zhan, S., Yu, Z., Hong, J., and Qi, C. (2018). Life-cycle environmental and economic assessment of medical waste treatment. *Journal of Cleaner Production*, 174, 65-73.
- Huang, H., and Tang, L. (2007). Treatment of organic waste using thermal plasma pyrolysis technology. *Energy Conversion and Management*, 48(4), 1331-1337.
- Huijbregts, M. A., Steinmann, Z. J., Elshout, P. M., Stam, G., Verones, F., Vieira, M., Zijp, M., Hollander, A., and van Zelm, R. (2017). ReCiPe2016: a harmonised life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 22(2), 138-147.
- Iannotti, M. T. ve Pisani Jr, R. (2013). Inactivation of *Bacillus Atrophaeus* spores in Healthcare Waste by UV Light Coupled with H₂O₂. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 30, 507-519.
- Ibrahimoglu, B., and Yilmazoglu, M. Z. (2020). Numerical modeling of a downdraft plasma coal gasifier with plasma reactions. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(5), 3532-3548.

- Ismail, T. M., Monteiro, E., Ramos, A., Abd El-Salam, M., and Rouboa, A. (2019). An Eulerian model for forest residues gasification in a plasma gasifier. *Energy*, 182, 1069-1083.
- Jang, Y. C., Lee, C., Yoon, O. S., ve Kim, H. (2006). Medical waste management in Korea. *Journal Of Environmental Management*, 80(2), 107-115.
- Jiang, X., Li, Y., and Yan, J. (2019). Hazardous waste incineration in a rotary kiln: a review. *Waste Disposal and Sustainable Energy*, 1(1), 3-37.
- Joseph, B., James, J., Kalarikkal, N., ve Thomas, S. (2021). Recycling of medical plastics. *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*, 4(3), 199-208.
- Kalina, M., and Tilley, E. (2020). “This is our next problem”: Cleaning up from the COVID-19 response. *Waste Management*, 108, 202-205.
- Kanarik, K. J. (2020). Inside the mysterious world of plasma: A process engineer’s perspective. *Journal of Vacuum Science and Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films*, 38(3), 031004.
- Kaur, R. R. (2016). Plasma gasification: an alternative solution for municipal solid waste disposal. *Crime Mapp: A GIS Based Spatial Opt Approach*, 1, 87-92.
- Khan, M. S., Mubeen, I., Caimeng, Y., Zhu, G., Khalid, A., & Yan, M. (2022). Waste to energy incineration technology: Recent development under climate change scenarios. *Waste Management & Research*, 40(12), 1708-1729.
- Klemeš, J. J., Van Fan, Y., Tan, R. R., and Jiang, P. (2020). Minimising the present and future plastic waste, energy and environmental footprints related to COVID-19. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 127, 109883.
- Klenowicz, Z., and Darowicki, K. (2001). Waste incinerators: Corrosion problems and construction materials-A review. *Corrosion Reviews*, 19(5-6), 467-491.
- Kogelschatz, U. (2003). Dielectric-barrier discharges: their history, discharge physics, and industrial applications. *Plasma chemistry and plasma processing*, 23(1), 1-46.
- Kojima, M., Iwasaki, F., Johannes, H. P., and Edita, E. P. (2020). Strengthening waste management policies to mitigate the COVID-19 pandemic. *Economic Research Institute for ASEAN and East Asia*, 5, 1-4.
- Komilis, D., Katsafaros, N., ve Vassilopoulos, P. (2011). Hazardous medical waste generation in Greece: case studies from medical facilities in Attica and from a small insular hospital. *Waste Management and Research*, 29(8), 807-814.
- Korkut, E. N. (2018). Estimations and analysis of medical waste amounts in the city of Istanbul and proposing a new approach for the estimation of future medical waste amounts. *Waste Management*, 81, 168-176.
- Kumar, R. (2021). Tertiary and quaternary recycling of thermoplastics by additive manufacturing approach for thermal sustainability. *Materials Today: Proceedings*, 37, 2382-2386.

- Kuznetsova, I. V., Kalashnikov, N. Y., Gutsol, A. F., Fridman, A. A., and Kennedy, L. A. (2002). Effect of “overshooting” in the transitional regimes of the low-current gliding arc discharge. *Journal of Applied Physics*, 92(8), 4231-4237.
- Lazarević, A., Čojbašić, Ž., and Lazarević, D. (2020). Computationally intelligent modelling of the plasma cutting process. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 33(3), 252-264.
- Lee, B. K., Ellenbecker, M. J., ve Moure-Eraso, R. (2002). Analyses of the recycling potential of medical plastic wastes. *Waste Management*, 22(5), 461-470.
- Li, C. S., and Jenq, F. T. (1993). Physical and chemical composition of hospital waste. *Infection Control and Hospital Epidemiology*, 14(3), 145-150.
- Li, Y., Huang, Z., Xu, Y., and Sheng, H. (2009). Plasma-arc technology for the thermal treatment of chemical wastes. *Environmental Engineering Science*, 26(4), 731-737.
- Liang, Y., Song, Q., Wu, N., Li, J., Zhong, Y., ve Zeng, W. (2021). Repercussions of COVID-19 pandemic on solid waste generation and management strategies. *Frontiers of Environmental Science and Engineering*, 15(6), 1-18.
- Lin, H. T., Huang, M. S., Luo, J. W., Lin, L. H., Lee, C. M., and Ou, K. L. (2010). Hydrocarbon fuels produced by catalytic pyrolysis of hospital plastic wastes in a fluidizing cracking process. *Fuel Processing Technology*, 91(11), 1355-1363.
- Liu, C. J., Xu, G. H., and Wang, T. (1999). Non-thermal plasma approaches in CO₂ utilization. *Fuel Processing Technology*, 58(2-3), 119-134.
- Lu, J. S., Chang, Y., Poon, C. S., and Lee, D. J. (2020). Slow pyrolysis of municipal solid waste (MSW): A review. *Bioresource Technology*, 312, 123615.
- Ma, P., Ma, Z., Yan, J., Chi, Y., Ni, M., and Cen, K. (2011). Industrial hazardous waste treatment featuring a rotary kiln and grate furnace incinerator: a case study in China. *Waste Management and Research*, 29(10), 1108-1112.
- Maamari, O., Mouaffak, L., Kamel, R., Brandam, C., Lteif, R., ve Salameh, D. (2016). Comparison of steam sterilization conditions efficiency in the treatment of Infectious Health Care Waste. *Waste Management*, 49, 462-468.
- Marias, F., Demarthon, R., Bloas, A., Robert-Arnouil, J. P., and Nebbad, F. (2015). Design of a high temperature reactor fed by a plasma torch for tar conversion: comparison between CFD modelling and experimental results. *Waste and Biomass Valorization*, 6(1), 97-108.
- Mashayak, S. Y. (2009). *CFD modeling of plasma thermal reactor for waste treatment*. Doctoral dissertation, Purdue University, West Lafayette, 67-72.
- Mei, D., Wang, Y., Liu, S., Alliat, M., Yang, H., and Tu, X. (2019). Plasma reforming of biomass gasification tars using mixed naphthalene and toluene as model compounds. *Energy Conversion and Management*, 195, 409-419.

- Messerle, V. E., Mosse, A. L., and Ustimenko, A. B. (2016). Municipal solid waste plasma processing: thermodynamic computation and experiment. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 44(12), 3017-3022.
- Messerle, V. E., Mosse, A. L., and Ustimenko, A. B. (2018). Processing of biomedical waste in plasma gasifier. *Waste Management*, 79, 791-799.
- Milhé, M., Van de Steene, L., Haube, M., Commandré, J. M., Fassinou, W. F., and Flamant, G. (2013). Autothermal and allothermal pyrolysis in a continuous fixed bed reactor. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 103, 102-111.
- Mishra, R. K., Iyer, J. S., and Mohanty, K. (2019). Conversion of waste biomass and waste nitrile gloves into renewable fuel. *Waste Management*, 89, 397-407.
- Mohseni-Bandpei, A., Majlesi, M., Rafiee, M., Nojavan, S., Nowrouz, P., and Zolfagharpour, H. (2019). Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) formation during the fast pyrolysis of hazardous health-care waste. *Chemosphere*, 227, 277-288.
- Momeni, M., Tabibiazar, M., Khorram, S., Zakerhamidi, M., Mohammadifar, M., Valizadeh, H., and Ghorbani, M. (2018). Pectin modification assisted by nitrogen glow discharge plasma. *International Journal of Biological Macromolecules*, 120, 2572-2578.
- Munir, M. T., Mardon, I., Al-Zuhair, S., Shawabkeh, A., and Saqib, N. U. (2019). Plasma gasification of municipal solid waste for waste-to-value processing. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 116, 109461.
- National Research Council (1995). Thermal Plasmas. In F. Chen (Ed.), *Plasma Processing and Processing Science*. Washington DC: The National Academies Press, 19-22.
- Nema, S. K., and Ganeshprasad, K. S. (2002). Plasma pyrolysis of medical waste. *Current Science*, 83(3), 271-278.
- Nwakaire, J. N., and Ugwuishiwu, B. O. (2015). Development of a natural cross draft gasifier stove for application in rural communities in Sub-Saharan Africa. *Journal of Applied Sciences*, 15(9), 1149-1157.
- Ojolo, S. J., and Orisaleye, J. I. (2010). Design and development of a laboratory scale biomass gasifier. *Journal Of Energy And Power Engineering*, 4(8), 16-23.
- Olaniyi, F.C., Ogola, J.S., and Tshitangano, T.G. (2018). A review of medical waste management in South Africa. *Open Environmental Sciences*, 10(1), 34-45.
- Ong, H. C., Chen, W. H., Singh, Y., Gan, Y. Y., Chen, C. Y., and Show, P. L. (2020). A state-of-the-art review on thermochemical conversion of biomass for biofuel production: A TG-FTIR approach. *Energy Conversion and Management*, 209, 112634.
- Paksoy Erbaydar, N. (2009). Hastalık yükü kavramı ve hesaplanmasında kullanılan ölçütler ve DALY kavramına kısa bakış. *Toplum Hekimliği Bülteni*, 28(1), 20-25.

- Paulino, R. F. S., Essiptychouk, A. M., Costa, L. P. C., and Silveira, J. L. (2022). Thermodynamic analysis of biomedical waste plasma gasification. *Energy*, 244, 122600.
- Pelesaraei, A., Mohammadkashi, N., Naderloo, L., Abbasi, M., and Chau, K. W. (2022). Principal of environmental life cycle assessment for medical waste during COVID-19 outbreak to support sustainable development goals. *Science of the Total Environment*, 827, 154416.
- Peng, J., Wu, X., Wang, R., Li, C., Zhang, Q., and Wei, D. (2020). Medical waste management practice during the 2019-2020 novel coronavirus pandemic: Experience in a general hospital. *American Journal of Infection Control*, 48(8), 918-921.
- Pietanza, L. D., Colonna, G., and Capitelli, M. (2020). Kinetics versus thermodynamics on CO₂ dissociation in high temperature microwave discharges. *Plasma Sources Science and Technology*, 29(3), 035022.
- Ragaert, K., Delva, L., and Van Geem, K. (2017). Mechanical and chemical recycling of solid plastic waste. *Waste Management*, 69, 24-58.
- Ramos, A., Teixeira, C. A., and Rouboa, A. (2019). Environmental assessment of municipal solid waste by two-stage plasma gasification. *Energies*, 12(1), 137.
- Ranjan, M. R., Tripathi, A., and Sharma, G. (2020). Medical waste generation during COVID-19 (SARS-CoV-2) pandemic and its management: an Indian perspective. *Asian Journal of Environment and Ecology*, 13(1), 10-15.
- Rat, V., and Coudert, J. F. (2006). A simplified analytical model for dc plasma spray torch: influence of gas properties and experimental conditions. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 39(22), 4799-4807.
- Reck, B. K., ve Graedel, T. E. (2012). Challenges in metal recycling. *Science*, 337(6095), 690-695.
- Risco, Á., Sucunza, D., ve González-Egido, S. (2021). Chemical recovery of waste electrical and electronic equipment by microwave-assisted pyrolysis: A review. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 159, 105323.
- Rojas-Pérez, F., Castillo-Benavides, J. A., Richmond-Navarro, G., and Zamora, E. (2018). CFD modeling of plasma gasification reactor for municipal solid waste. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 46(7), 2435-2444.
- Rubio, M. R. (2 Ocak 2021). Everything You Need to Know About PVC Recycling. URL: <https://www.bioenergyconsult.com/recycling-polyvinyl-chloride/>, Son Erişim Tarihi: 9 Eylül 2022.
- Ruj, B., Pandey, V., Jash, P., ve Srivastava, V. K. (2015). Sorting of plastic waste for effective recycling. *International Journal of Applied Science and Engineering*, 4(4), 564-571.

- Sajid, M., Raheem, A., Ullah, N., Asim, M., Rehman, M. S. U., and Ali, N. (2022). Gasification of municipal solid waste: Progress, challenges, and prospects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 168, 112815.
- Sakhraji, M., Ramos, A., Monteiro, E., Bouziane, K., and Rouboa, A. (2022). Plasma gasification process using computational fluid dynamics modeling. *Energy Reports*, 8, 1541-1549.
- Samal, S. (2017). Thermal plasma technology: The prospective future in material processing. *Journal of cleaner production*, 142, 3131-3150.
- Shareefdeen, Z. M. (2012). Medical waste management and control. *Journal of Environmental Protection*, 3(12), 1625-1628.
- Sharifzadeh, M., Sadeqzadeh, M., Guo, M., Borhani, T. N., Konda, N. M., Garcia, M. C., Wang, L., Hallett, J., and Shah, N. (2019). The multi-scale challenges of biomass fast pyrolysis and bio-oil upgrading: Review of the state of art and future research directions. *Progress in Energy and Combustion Science*, 71, 1-80.
- Sharma, D., Mistry, A., Mistry, H., Chaudhuri, P., Murugan, P. V., Patnaik, S., Sanghariyat, A., Jain, V., Chaturvedi, S., and Nema, S. K. (2020). Thermal performance analysis and experimental validation of primary chamber of plasma pyrolysis system during preheating stage using CFD analysis in ANSYS CFX. *Thermal Science and Engineering Progress*, 18, 100525.
- Shen, Y., Li, X., Yao, Z., Cui, X., and Wang, C. H. (2019). CO₂ gasification of woody biomass: Experimental study from a lab-scale reactor to a small-scale autothermal gasifier. *Energy*, 170, 497-506.
- Sikarwar, V. S., Mašláni, A., Hlína, M., Fathi, J., Mates, T., Pohorelý, M., Meers, E., Šyc, M., and Jeremiáš, M. (2022). Thermal plasma assisted pyrolysis and gasification of RDF by utilizing sequestered CO₂ as gasifying agent. *Journal of CO₂ Utilization*, 66, 102275.
- Singh, D. K., and Tirkey, J. V. (2022). Valorisation of hazardous medical waste using steam injected plasma gasifier: a parametric study on the modelling and multi-objective optimisation by integrating Aspen plus with RSM. *Environmental Technology*, 43(27), 4291-4305.
- Singh, K., and Hachem-Vermette, C. (2019). Influence of mixed-use neighborhood developments on the performance of waste-to-energy CHP plant. *Energy*, 189, 116172.
- Singh, N., Ogunseitan, O. A., and Tang, Y. (2022). Medical waste: Current challenges and future opportunities for sustainable management. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 52(11), 2000-2022.
- Snoeckx, R., and Bogaerts, A. (2017). Plasma technology—a novel solution for CO₂ conversion?. *Chemical Society Reviews*, 46(19), 5805-5863.

- Striūgas, N., Valinčius, V., Pedišius, N., Poškas, R., and Zakarauskas, K. (2017). Investigation of sewage sludge treatment using air plasma assisted gasification. *Waste Management*, 64, 149-160.
- Taghipour, H., and Mosaferi, M. (2009). Characterization of medical waste from hospitals in Tabriz, Iran. *Science Of The Total Environment*, 407(5), 1527-1535.
- Tang, L., Huang, H., Hao, H., and Zhao, K. (2013). Development of plasma pyrolysis/gasification systems for energy efficient and environmentally sound waste disposal. *Journal of Electrostatics*, 71(5), 839-847.
- Teymourian, T., Teymoorian, T., Kowsari, E., and Ramakrishna, S. (2021). Challenges, strategies, and recommendations for the huge surge in plastic and medical waste during the global COVID-19 pandemic with circular economy approach. *Materials Circular Economy*, 3(1), 1-14.
- The World Wide Fund for Nature (WWF). (29 Nisan 2020). In the disposal of masks and gloves, responsibility is required. URL: www.wwf.it/pandanews/ambiente/nello-smaltimento-di-mascherine-e-guanti-serve-responsabilita/, Son Erişim Tarihi: 14 Mayıs 2022.
- Twinch, E. (2011). Medical waste management. *International Committee of the Red Cross (ICRC)*. Geneva. 11-14.
- Van der Walt, I. J., Jansen, A. A., and Crouse, P. L. (2017). Plasma-assisted treatment of municipal solid waste: a scenario analysis. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, 37(3), 763-782.
- Vecten, S., Herbert, B., Wilkinson, M., Shaw, A., Bimbo, N., and Dawson, R. J. (2018, July 3-6). *Integrated plasma gasification and SOFC system simulation using Aspen Plus*. 13th European SOFC & SOE Forum, Luceme, 3-4.
- Voudrias, E., and Graikos, A. (2014). Infectious medical waste management system at the regional level. *Journal of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste*, 18(4), 04014020.
- Waldheim, L., and Nilsson, T. (2001). Heating value of gases from biomass gasification. *IEA Bioenergy Agreement Report*. Nyköping. 3-4.
- Wang, J., Shen, J., Ye, D., Yan, X., Zhang, Y., Yang, W., Li, X., Wang, J., Zhang, L., and Pan, L. (2020). Disinfection technology of hospital wastes and wastewater: Suggestions for disinfection strategy during coronavirus Disease 2019 (COVID-19) pandemic in China. *Environmental Pollution*, 262, 114665.
- Wang, M., Mao, M., Zhang, M., Wen, G., Yang, Q., Su, B., and Ren, Q. (2019). Highly efficient treatment of textile dyeing sludge by CO₂ thermal plasma gasification. *Waste Management*, 90, 29-36.
- Weatherford, B. R., and Foster, J. E. (2009, September 20-24). *Initial Performance of a ECR Waveguide Plasma Cathode with Permanent Magnets*. 31st International Electric Propulsion Conference, Ann Arbor, 3-6.

- Wen, Y., and Jiang, X. (2001). Decomposition of CO₂ using pulsed corona discharges combined with catalyst. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, 21(4), 665-678.
- Williams, S. L., and McLaren, S. B. (1990). Modification of storage design to mitigate insect problems. *Collection Forum*, 6(1), 27-32.
- World Health Organization (WHO). (1998). Assessment of the health risk of dioxins: re-evaluation of the Tolerable Daily Intake (TDI). *WHO*, Geneva, 25-29.
- World Health Organization (WHO). (2005). Management of solid health-care waste at primary health-care centres: A decision-making guide. *WHO*, Geneva, 1-3.
- World Health Organization (WHO). (2020). Water, sanitation, hygiene and waste management for COVID-19: technical brief. *WHO and UNICEF*. Geneva, 1-9.
- Xue, Y., and Liu, X. (2021). Detoxification, solidification and recycling of municipal solid waste incineration fly ash: A review. *Chemical Engineering Journal*, 420, 130349.
- Yayalık, İ., Koyun, A., and Akgün, M. (2020). Gasification of municipal solid wastes in plasma arc medium. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, 40(6), 1401-1416.
- Yong, Z., Gang, X., Guanxing, W., Tao, Z., and Dawei, J. (2009). Medical waste management in China: A case study of Nanjing. *Waste Management*, 29(4), 1376-1382.
- Yu, H., Sun, X., Solvang, W. D., and Zhao, X. (2020). Reverse logistics network design for effective management of medical waste in epidemic outbreaks: Insights from the coronavirus disease 2019 (COVID-19) outbreak in Wuhan (China). *International Journal Of Environmental Research And Public Health*, 17(5), 1770.
- Zhang, Q., Dor, L., Fenigshtein, D., Yang, W., and Blasiak, W. (2012). Gasification of municipal solid waste in the Plasma Gasification Melting process. *Applied Energy*, 90(1), 106-112.
- Zhang, S., Yang, X., Zhang, H., Chu, C., Zheng, K., Ju, M., and Liu, L. (2019). Liquefaction of biomass and upgrading of bio-oil: a review. *Molecules*, 24(12), 2250.
- Zhang, Y., Wang, L., Chen, L., Ma, B., Zhang, Y., Ni, W., and Tsang, D. C. (2021). Treatment of municipal solid waste incineration fly ash: State-of-the-art technologies and future perspectives. *Journal of Hazardous Materials*, 411, 125132.
- Zhou, H., Long, Y., Meng, A., Li, Q., and Zhang, Y. (2015). Classification of municipal solid waste components for thermal conversion in waste-to-energy research. *Fuel*, 145, 151-157.
- Zhovtyansky, V. A., Petrov, S. V., Lelyukh, Y. I., Nevzglyad, I. O., and Goncharuk, Y. A. (2013). Efficiency of renewable organic raw materials conversion using plasma technology. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 41(12), 3233-3239.



Gazili olmak ayrıcalıktır