



**PLAZMA TORÇ TEKNİĞİ KULLANILARAK
ÖMRÜNÜ TAMAMLAMIŞ ATIK LASTİKLERİN
BERTARAF EDİLMESİ**

RAMAZAN ÇAKMAK

**2022
YÜKSEK LİSANS TEZİ
ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**Tez Danışmanı
Prof. Dr. Hamiyet ŞAHİN KOL**

**PLAZMA TORÇ TEKNIĞİ KULLANILARAK ÖMRÜNÜ TAMAMLAMIŞ
ATIK LASTİKLERİN BERTARAF EDİLMESİ**

Ramazan ÇAKMAK

**T.C.
Karabük Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Çevre Mühendisliği Anabilim Dalında
Yüksek Lisans Tezi
Olarak Hazırlanmıştır**

**Tez Danışmanı
Prof. Dr. Hamiyet ŞAHİN KOL**

**KARABÜK
Ocak 2022**

Ramazan ÇAKMAK tarafından hazırlanan “PLAZMA TORÇ TEKNİĞİ KULLANILARAK ÖMRÜNÜ TAMAMLAMIŞ ATIK LASTİKLERİN BERTARAF EDİLMESİ” başlıklı bu tezin Yüksek Lisans Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. Hamiyet ŞAHİN KOL

.....

Tez Danışmanı, Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından Oy Birliği ile Çevre Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir. 20/01/2022

Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)

İmzası

Başkan : Prof. Dr. Şükrü DURSUN (KTÜN)

.....

Üye : Prof. Dr. Hamiyet ŞAHİN KOL (KBÜ)

.....

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Ferhat BOZDUMAN (KBÜ)

.....

KBÜ Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulu, bu tez ile, Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Hasan SOLMAZ

.....

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

“Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu; ayrıca bu kuralların ve ilkelerin gerektirdiği şekilde, bu çalışmadan kaynaklanmayan bütün atıfları yaptığımı beyan ederim.”

Ramazan ÇAKMAK

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

PLAZMA TORÇ TEKNİĞİ KULLANILARAK ÖMRÜNÜ TAMAMLAMIŞ ATIK LASTİKLERİN BERTARAF EDİLMESİ

Ramazan ÇAKMAK

Karabük Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı:

Prof. Dr. Hamiyet ŞAHİN KOL

Ocak 2022, 68 sayfa

Ülkemizde ve dünyada artan ticari ve binek araç sayıları ile birlikte her yıl binlerce lastik ömrünü tamamlamaktadır. Ömrünü tamamlamış lastikler genel olarak park ve bahçelerde dekoratif malzeme olarak ya da çimento sanayinde atıktan türetilmiş yakıt olarak yakma fırınlarında ham madde olarak kullanılmaktadır. Yakma işlemi sonucunda sera gazları ile içeriğine göre furan grupları oluşmaktadır. Bu çalışmada, ömrünü tamamlamış atık lastikler atmosferik basınç plazma teknolojisi ile işlenerek çevreye zararlı bileşenlerin meydana gelip gelmediği tespit edildi. Plazma işlemi esnasında oluşacak sentez gazının bileşenleri analiz edildi. Daha sonra plazma tekniği ile ayrıştırma sırasında açığa çıkan ısı ile klasik yanma tekniğinde açığa çıkan ısı karşılaştırıldı. Böylece, bu lastiklerin başarılı bir şekilde bertarafı ile sürdürülebilir bir çevre ve ekonomik geri kazanım hedefi gerçekleştirildi.

Katı atık grubuna giren ömrünü tamamlamış atık lastiklerin plazma teknolojisi ile kullanımı ülkemizde ilk kez tarafımızdan gerçekleştirildi. Mevcut bertaraf yöntemlerine daha temiz ve daha kısa zamanda işlem yapabilen bir teknik eklenmiş oldu. Ayrıca, proses odası gaz ölçümlerini yapabilecek şekilde yine bizim tarafımızdan dizayn edildi.

Hem normal yanma hem de plazma gazlaştırma işlemi 5 lt/dk sabit debide verilen yüksek saflıktaki oksijen ile yapıldı. CO gaz emisyon değerinin normal yanma işleminde az miktarda da olsa plazma gazlaştırma işlemine göre daha fazla çıktığı, yani normal yanmada eksik yanma ürün miktarının daha fazla ölçüldüğü gözlemlendi. Normal yanma işleminde CO₂ gaz emisyonunun miktarı plazma gazlaştırma işlemine göre neredeyse iki kat daha fazla ölçüldü. Bu belirgin farklılık, ömrünü tamamlamış atık lastiklerin atmosferik basınç oksijen plazması işlemi ile bertarafının mevcut normal yanma işlemine göre ne kadar elverişli olduğunu ortaya koymaktadır. Atmosferik basınç plazma teknolojisi ile katı atığın gazlaştırılması işlemi sonucunda maddenin enerji dönüşümü ile oluşan metan gazı miktarı normal yanma işlemine göre daha fazla elde edildi. Tolüen gaz emisyon değerlerinin ise hem atmosferik basınç oksijen plazma işlemi ile gazlaştırmada hem de normal yanma işleminde yaklaşık olarak aynı kaldığı ölçüldü. Kütle miktarının gaz emisyon değerleri ile arasındaki ilişki atmosferik basınç plazma işlemi sonucunda elde edilen verilere göre değerlendirildiğinde kütle miktarı ile orantılı bir gaz emisyonunun olduğu gözlemlendi. Normal yanma işleminde yine bir katı atık olan kül oluşumunun plazma teknolojisi ile oluşan curüf miktarına göre daha fazla olduğu gözlemlendi.

Anahtar Sözcükler : Plazma torç tekniği, atmosferik basınç, katı atık, atık lastik.

Bilim Kodu : 90302

ABSTRACT

M. Sc. Thesis

DISPOSAL OF THE WASTE TIRES BY USING THE PLASMA TORCH TECHNIQUE

Ramazan ÇAKMAK

Karabük University

Institute of Graduate Programs

Department of Environmental Engineering

Thesis Advisor:

Prof. Dr. Hamiyet ŞAHİN KOL

January 2022, 68 pages

With the increasing number of commercial and passenger vehicles in our country and the world, thousands of tires complete their lifespan every year. The waste tires are generally used as a decorative material in parks and gardens or as a raw material in incinerators as fuel derived from waste in the cement industry. As a result of the combustion process, greenhouse gases and furan groups are formed according to their content. In this study, it was determined whether the waste tires that have expired were processed with atmospheric pressure plasma technology and whether environmentally harmful components were formed. The components of the syngas that will be formed during the plasma process were analyzed. Then, the heat released during separation with the plasma technique and the heat released in the classical combustion technique were compared. Thus, with the successful disposal of these tires, a sustainable

environmental and economic recovery target was achieved.

The use of waste tires, which are in the solid waste group, with plasma technology was carried out by us for the first time in our country. A cleaner technique that can be processed in a shorter time has been added to the existing disposal methods. In addition, the process room was designed by us to be able to make gas measurements.

Both normal combustion and plasma gasification processes were carried out with high purity oxygen given at a constant flow rate of 5 lt/min. It was observed that the CO gas emission value was higher in the normal combustion process, albeit in a small amount, than in the plasma gasification process, that is, the amount of incomplete combustion product was measured more in normal combustion. In the normal combustion process, the amount of CO₂ gas emission was measured almost twice as much as in the plasma gasification process. This significant difference reveals how convenient the disposal of the waste tires with atmospheric pressure oxygen plasma treatment is compared to the current normal combustion process. As a result of the gasification of solid waste with atmospheric pressure plasma technology, the amount of methane gas formed by the energy conversion of the material was obtained more than in the normal combustion process. It was measured that toluene gas emission values remained approximately the same both in gasification with atmospheric pressure oxygen plasma treatment and normal combustion process. When the relationship between the mass amount and the gas emission values was evaluated according to the data obtained as a result of the atmospheric pressure plasma treatment, it was observed that there was a gas emission proportional to the mass amount. It was observed that the ash formation, which is also a solid waste in the normal combustion process, was higher than the amount of slag formed by plasma technology.

Keyword : Plasma torch technique, atmospheric pressure, solid waste, waste tires.

Science Code : 90302

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının planlanmasında, araştırılmasında, yürütülmesinde ve oluşumunda ilgi ve desteğini esirgemeyen, bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım danışmanım sayın Prof. Dr. Hamiyet ŞAHİN KOL' a teşekkürlerimi sunarım.

Deneysel çalışmalar için her türlü laboratuvar ortamını ve koşullarını sağlayan, aynı zamanda deneysel çalışmalarda fikir ve yardımları ile beni destekleyen Tıp Fakültesi Biyofizik Anabilim Dalı öğretim üyesi sayın Dr. Öğr. Üyesi Ferhat BOZDUMAN' a teşekkürlerimi sunarım.

Sevgili annem Ayşe ÇAKMAK, sevgili babam Halil ÇAKMAK ve sevgili ablalarım Halime ÇAKMAK ile Elif ÇAKMAK KIZILDAŞ' a daima yanımda oldukları için tüm kalbimle teşekkür ederim.

Üzerimdeki hakkı paha biçilemez olan bir diğer can ablam Fizik Bölümü öğretim üyesi Prof. Dr. Necla ÇAKMAK' a sevgiyle teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL.....	ii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xi
ÇİZELGELER DİZİNİ	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xiv
BÖLÜM 1	1
GİRİŞ VE AMAÇ	1
BÖLÜM 2	3
TEORİK BİLGİ.....	3
2.1. LASTİK.....	3
2.2. LASTİK YAPISI.....	4
2.3. LASTİK ÜRETİMİ.....	4
2.4. ÖMRÜNÜ TAMAMLAMIŞ LASTİKLER.....	5
2.5. ÖMRÜNÜ TAMAMLAMIŞ LASTİKLER VE YÖNETİMİ.....	6
2.6. TÜRKİYE'DE ATIK LASTİK YASAL MEVZUATI	10
BÖLÜM 3	13
PLAZMA TEKNOLOJİSİ.....	13
BÖLÜM 4	19
LİTERATÜR ÇALIŞMASI.....	19

	<u>Sayfa</u>
BÖLÜM 5	25
MATERYAL VE YÖNTEM.....	25
BÖLÜM 6	39
ARAŞTIRMA BULGULARI	39
BÖLÜM 7.....	56
TARTIŞMA VE SONUÇ	56
KAYNAKLAR	63
ÖZGEÇMİŞ	68

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 5.1. Kullanılan atık lastik.....	26
Şekil 5.2. a) Gaz ölçüm sensörleri ile veri toplama kartı b) Veri toplama kartının ayrıntılı fotoğrafı	27
Şekil 5.3. Gaz sensörlerinin proses odasına monte edilmiş görüntüsü.....	27
Şekil 5.4. Gaz sensörlerinin veri toplama kartına bağlı hali.....	28
Şekil 5.5. Plazma kaleminin aktif durumdaki görüntüsü ve plazma oluşumu.....	28
Şekil 5.6. Termal kameranın genel görüntüsü	29
Şekil 5.7. Plazmanın termal kamera ile ölçülen sıcaklığı	30
Şekil 5.8. Plazmanın oluşturulması için kullanılan güç kaynağı ünitesi	30
Şekil 5.9. Osiloskopun ekran görüntüsü.	31
Şekil 5.10. Yüksek voltaj probu.....	31
Şekil 5.11. Proses odası tasarımı.....	32
Şekil 5.12. Gaz betonunda yanma odasının oluşturulması.	32
Şekil 5.13. Yüksek saflıktaki oksijen gazı.	33
Şekil 5.14. Gaz akışının ölçülmesi için kullanılan ayarlı debimetre.....	33
Şekil 5.15. Dijital hassas terazi.	34
Şekil 5.16. İlk kurulumdaki mevcut oda sıcaklığı.	34
Şekil 5.17. Plazma işlemi başlatılmadan önceki düzenek görüntüsü.....	35
Şekil 5.18. Gaz sensörlerinin aktif olduğu bir görüntü.	36
Şekil 5.19. Gaz analiz yazılımının genel bir görüntüsü..	36
Şekil 5.20. Oksijen plazmasının karanlıkta çekilmiş görüntüsü.....	37
Şekil 5.21. Plazma güç kaynağının gücünün ölçülmesinde kullanılan güç metre.	37
Şekil 5.22. Normal yanma işleminin gerçekleştirilmesi.....	38
Şekil 5.23. Deney düzeneği tasarımı	38
Şekil 6.1. Plazma işlemi ile 2,5g kütleli atık lastikten açığa çıkan CO gazı.....	42
Şekil 6.2. Plazma işlemi ile 3g kütleli atık lastikten açığa çıkan CO gazı.....	43
Şekil 6.3. Normal yanma işlemi ile 3g kütleli atık lastikten açığa çıkan CO gazı.....	44
Şekil 6.4. Plazma işlemi ile 2,5g kütleli atık lastikten açığa çıkan CO ₂ gazı	45
Şekil 6.5. Plazma işlemi ile 3g kütleli atık lastikten açığa çıkan CO ₂ gazı.....	46

Sayfa

Şekil 6.6. Normal yanma işlemi ile 3g kütleli atık lastikten açığa çıkan CO ₂ gazı. ..	47
Şekil 6.7. Plazma işlemi ile 2,5g kütleli atık lastikten açığa çıkan CH ₄ gazı.	48
Şekil 6.8. Plazma işlemi ile 3g kütleli atık lastikten açığa çıkan CH ₄ gazı	49
Şekil 6.9. Normal yanma işlemi ile 3g kütleli atık lastikten açığa çıkan CH ₄ gazı. ..	50
Şekil 6.10. Plazma işlemi ile 2,5g kütleli atık lastikten açığa çıkan tolüen gazı.....	51
Şekil 6.11. Plazma işlemi ile 3g kütleli atık lastikten açığa çıkan tolüen gazı.	51
Şekil 6.12. Normal yanma işlemi ile 3g kütleli atık lastikten açığa çıkan tolüen gazı..	52
Şekil 6.13. Normal yanma işlemi sonucu oluşan kül.....	53
Şekil 6.14. Oksijen plazması ile yanma sonucu oluşan kül	55

ÇİZELGELER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 3.1. Temel termokimyasal dönüşüm teknolojilerinin özellikleri.....	18
Çizelge 6.1. Deney parametreleri ve değerleri.....	40
Çizelge 6.2. Plazma ve normal yanma işleminde oluşan gazların dakika başına ppm değerleri.....	53

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER

CO₂ : karbon dioksit

CO : karbon monoksit

H₂ : hidrojen

CH₄ : metan

H₂O : su molekülü

C₇H₈ : toluen

µs : mikrosaniye

kV : kiloVolt

kHz : kiloHertz

mA : miliAmper

MHz : MegaHertz

MW : MegaWatt

eV : elektronVolt

NO_x : nitrojen oksit

SO_x : sülfür oksit

SO₂ : sülfür dioksit

Ar : argon

N₂ : azot

atm : atmosfer

ppm : milyonda bir birim

KISALTMALAR

- ÖTL : Ömrünü Tamamlamış Lastikler
VOC : Uçucu Organik Bileşikler
PAH : Polisiklik Aromatik Hidrokarbonlar
HC : Hidrokarbon
MD : Mikro Dalga
DC : Doğru Akım
AC : Alternatif Akım
RF : Radyo Frekans

BÖLÜM 1

GİRİŞ VE AMAÇ

Yaşadığımız ortamdan uzaklaştırılması gereken ve kullanım süresi tamamlanan her türlü katı malzeme katı atık olarak adlandırılır. Ev, okul, hastane, park ve bahçeler, sanayi ve endüstri gibi birçok farklı alanlarda katı atık oluşabilir. Katı atık miktarı ve bileşimi coğrafi konuma, bireylerin kültürel yaşamlarına ve ekonomik koşullarına göre değişebilir.

Katı atık çeşitlerinin doğaya ve insana zarar vermelerini önlemek için ilgili atıkların çeşitlerine göre toplanması, taşınması, yeniden kullanımı, geri kazanımı ve geri dönüşümü gibi birçok farklı değerlendirme metotları bulunmaktadır. Sürdürülebilir atık yönetimi atıkların yeniden değerlendirilmesi ve ekonomiye kazandırılmasında büyük bir öneme sahiptir.

Katı atık yönetimini katı atıkların çevre ve insan sağlığına zarar vermelerini en aza indirmek amacı ile geliştirilen yöntemlerin düzenli ve kontrollü olarak gerçekleştirilmesi olarak ifade edebiliriz. Daha az atık üretilmesi, bu atıkların yeniden kullanılması ve elbette doğada hasar bırakmadan bertaraf edilmesi katı atık yönetiminin temel prensiplerindedir.

Katı atık yönetimi çevre sorunlarının artmasından dolayı oldukça fazla önemsenen bir konudur. Hollanda, Polonya, İngiltere, Japonya, Güney Kore gibi ülkeler katı atık yönetimi konusunda oldukça başarılılardır. Dünya genelinde katı atık yönetimi endüstrisinin değeri 600 milyar dolar civarındadır Ne yazık ki ülkemiz atık yönetimi sürecinde henüz yolun başındadır. Ülkemizde uzun yıllar katı atıklar herhangi bir kontrol yapılmaksızın düzensiz depolama alanlarına dökülmekte idi, ancak son yıllarda hızlı bir şekilde uygun yer seçimleri ve doğayı koruyacak önlemler ile düzenli depolama alanları inşa edilmekte ve işletmeye alınmaktadır. Dünya ekonomisinde

otomotiv sektörü önemli bir paya sahiptir, dolayısıyla lastik üretimi bu sektörden doğrudan etkilenmektedir. Lastik üretimine paralel olarak ömrünü tamamlamış lastiklerin bertarafı da önemli bir sorun olarak ortaya çıkmaktadır. Lastiklerin belirli bir kullanım ömrü göz önüne alındığında ömrünü tamamlamış atık lastikler her yıl sürekli bir artış eğilimindedir. Herrera-Sosa vd. (2015) yaptıkları çalışmada otomotiv lastiklerinin atıklarının nihai olarak bertarafının dünyadaki en büyük çevre sorunlarından biri olduğunu belirtmişlerdir.

Katı atık grubuna giren ömrünü tamamlamış atık lastiklerin kısa sürede daha temiz olarak işlenmesi oldukça önemlidir. Çünkü ömrünü tamamlamış atık lastikler çevre kirliliği üzerinde büyük bir etkiye sahiptir. Katı atık grubuna giren ömrünü tamamlamış atık lastiklerin çevre kirliliği üzerindeki etkisini azaltmak için yaygın olarak fırın tekniği ile ayrıştırma kullanılmaktadır. Buradaki temel prensip yakma tekniği ile açığa çıkan ısı kullanılarak katı-sıvı-gaz fazı dönüşümü yapılarak bertarafın gerçekleştirilmesidir. Bu esnada faydalı bir proses yapmaya çalışılırken aslında çevreye birçok zararlı bileşen salınmaktadır. Bu bileşenlerinde çevre kirliliği üzerindeki katkı payı oldukça yüksektir. Bu bileşenleri; dioksin ve furan grupları, CO₂, sera gazları, kül ve diğer katı yan ürünler olmak üzere sıralayabiliriz.

Durna vd. (2020) yaptıkları çalışmada atık lastiklerin bertarafında çözüm aranırken doğaya zarar vermeyen teknolojinin kullanılması, hammaddeye dönüşüm sağlanması, ekonomik ve yaygın kullanıma uygun olması, kurulan endüstrilere zararın minimum seviyede tutulması ve elde edilen ürünün ticari değerinin olması gibi durumlar göz önünde bulundurulması gerektiğini ifade etmişlerdir. Tez çalışması kapsamında önerilen atmosferik basınç plazma teknolojisinin kullanımı ise oldukça temiz ve güvenilir bir uygulamadır.

Bu çalışmanın amacı, ömrünü tamamlamış atık lastiklerin atmosferik basınç plazma teknolojisi ile kapalı bir ortam içerisinde işlenerek, çevreye zararlı bileşenlerin meydana gelip gelmediğinin tespit edilmesi, plazma işlemi sırasında oluşacak sentez gazının bileşenlerinin analiz edilmesi ve plazma tekniği ile ayrıştırma sırasında açığa çıkan ısı ile klasik yanma tekniğinde açığa çıkan ısının karşılaştırılmasıdır. Böylece

elde edilen verilerin değerlendirilmesi ile katı atık bertaraf yöntemlerine alternatif yeni bir yöntem eklenmesi hedeflenmektedir.

Bu tez çalışmasında, klasik bertaraf yöntemlerinden farklı olarak ayrıştırma işlemi için atmosferik basınç plazma teknolojisi ülkemizde ilk kez tarafımızdan kullanıldı. Böylece, mevcut bertaraf yöntemlerine daha temiz ve daha kısa zamanda işlem yapabilen yeni bir teknik eklenmiş oldu. Aynı zamanda proses odası, gaz ölçümlerini yapabilecek şekilde tarafımızdan dizayn edildi.

Tez çalışması genel olarak yedi bölümden oluşmaktadır. İlk bölümde çalışmanın önemi ve kısa bir özeti ile belirlenen hedefler verilmiştir. İkinci bölümde lastik yapısı, üretimi, ömrünü tamamlamış lastikler, ömrünü tamamlamış lastik yönetimi, yasal mevzuatlar ile ilgili genel bilgiler sunulmuştur. Üçüncü bölümde plazma teknolojisi hakkında genel bilgi verilmiş olup, dördüncü bölümde katı atıkların atmosferik plazma teknolojisi ile bertaraf edilmesi ile ilgili literatür çalışması verilmiştir. Beşinci bölümde kullanılan materyal ve yöntem anlatılmıştır. Altıncı bölümde ise deneysel çalışmalar ile ilgili araştırma bulguları sunulmuştur. Yedinci bölümde ise deneysel çalışmalar sonucu elde edilen bulgular, normal yanma işlemi ile elde edilen veriler ile karşılaştırılmış ve çalışmanın amacına uygun bir biçimde yorumlanarak sonuçlandırılmıştır.

BÖLÜM 2

TEORİK BİLGİ

Bu bölümde, lastik, lastik yapısı, lastik üretimi, ömrünü tamamlamış lastikler, ömrünü tamamlamış lastik yönetimi, geri dönüşümü, yeniden kullanım süreçleri, depolama, enerji geri kazanımı ve malzeme geri kazanımı ile yasal mevzuatlar ile ilgili genel bir bilgi verilmiştir.

2.1. LASTİK

Lastikler, aracın ağırlığını desteklemek, yol şoklarını emmek, çekiş, tork ve fren kuvvetlerini yol yüzeyine iletme ve sürüş yönünü korumak ve değiştirmek için tasarlanmıştır. Bu dört temel işlevi yerine getirmek için lastikler esnek kauçuktan yapılır ve basınçlı hava ile doldurulur. Bir lastikteki iç lastik, uygun hava basıncının korunması için kullanılır. Ancak tek başına hava basıncını araç yükünü destekleyecek kadar yüksek tutamaz ve hasar veya darbelere dayanacak kadar dayanıklı değildir.

Karkas, yüksek basınçlı hava ile şişirilmiş iç boruyu korur ve araç yükünü destekler. Lastiğin yolla birleşen kısmına yapıştırılan kalın kauçuk tabakası, dış hasara veya aşınmaya dayanabilir. Lastik sırt desenleri, aracın hareket ve stabilite ihtiyaçlarına göre seçilir.

Lastiklerin jantlara güvenli bir şekilde monte edilmesini sağlamak için sağlam bir yapı gereklidir. Nitelikli yüksek performanslı araçlara yönelik artan taleple birlikte, artık daha karmaşık işlemlere ve performansa sahip çeşitli lastikler geliştirilmektedir.

Devlet Planlama Teşkilatı (2008) tarafından hazırlanan araç lastiği-plastik ürünler çalışma grubu raporuna göre lastik, belli bir süre içinde, belli bir sıcaklık ve basınç altında şişirilmiş, genellikle içerisinde bulunan hava ile motorlu veya motorsuz nakil

araçlarının yere sürtünmesi ile hareketini başlatan, hızlandıran ve durmasını sağlayan, kullanım yerlerine göre çeşitli ebatlarda, tiplerde ve yapılarda olabilen kauçuk hava yastığı olarak tanımlanır.

Batır (2002), lastiğin karkas yapısında kullanılan kord bezinin geometrisinin bu sınıflandırma için oldukça önemli olduğunu belirtmiştir.

2.2. LASTİĞİN YAPISI

Lastikler kauçuk, kord bezi, çelik teller ve birçok kimyasal bileşenden oluşan kompozit yapıya sahiptir. Yakaboylu (2010) lastiğin sırt, omuz, yanak, damak ve gövde olmak üzere beş temel bileşenden oluştuğunu ve aynı zamanda çelik, bez kuşaklar, ceyfir ve astarın da lastiğin yapısında yer aldığını ifade etmiştir.

Andrew (2001) yaptığı çalışmada bir otomobil lastiğinde %47 kauçuk, %21,5 karbon siyahı, %16,5 metal, %5,5 tekstil, %1 çinko oksit, %1 kükürt ve %7,5 katkı malzemeleri bulunduğunu ifade etmiştir.

Evans and Evans (2006) çalışmalarında lastik yapımında kullanılan hammaddeleri şöyle sıralamışlardır; doğal ve sentetik yapay kauçuk, silika, fenolik reçine, çinko oksit, titanyum dioksit gibi dolgu malzemeleri, aromatik, naftanik ve parafinik yağ, kükürt ve kükürtlü bileşikler, karbon siyahı, yağ asitleri ve çelik tel.

Zhang vd. (2018) yaptıkları çalışmada; lastiğin üç boyutlu yapıya sahip bir çeşit polimer olduğunu, doğal veya sentetik kauçuk, vulkanizasyon ajanı, dolgu maddesi olarak karbon siyahı ve patlamaya dayanıklı lastik ajanı gibi aramid lif ve vulkanizasyon aktivatörü olarak çinko oksit gibi katkı maddelerinden oluştuğunu ifade etmişlerdir.

2.3. LASTİK ÜRETİMİ

Lastik teknolojisinde, hava tutan yani pnömatik lastiğin icadından bu yana oldukça önemli gelişmeler meydana gelmiş olup lastik üretimi günümüzde oldukça kapsamlı

bir teknoloji ile yapılmaktadır. Rodgers and Waddell (2013) yaptıkları çalışmada, lastik üretimindeki aşamaları aşağıdaki gibi sıralamışlardır:

- ✓ Elastomerlerin (özel bir polimer türü), karbon siyahının ve kimyasalların lastik bileşimini oluşturmak için karıştırılması
- ✓ Tekstil ve çelik kuşakların işlenerek haddeleme operasyonu sırasında elde edilen lastik bileşimiyle kaplanması
- ✓ Lastiğin yanak, sırt ve diğer bileşenlerin ekstrüder makinasında çekilmesi
- ✓ Lastik elemanlarının montajı
- ✓ Lastiğe yüksek sıcaklık ve basınçta şekil verilmesi ve pişirilmesi
- ✓ Lastiğin son kontrollerinin yapıp nakliye edilmesi.

2.4. ÖMRÜNÜ TAMAMLAMIŞ LASTİKLER

Yol ile lastik arasında oluşan sürtünme kuvvetleri lastiklerin aşınmasına dolayısıyla lastiklerin dış derinliğinde azalma meydana gelmesine neden olur. Binek araçlarda lastik dış derinliği 1,6 mm değerine düştüğünde bu lastiklerin kullanımı tehlikelidir. Ancak, otobüs ve kamyon lastikleri gibi bazı lastikler araçtan söküldükten sonra kaplanarak yeniden kullanılabilir. Lastikler araç altından söküldükten sonra ya kullanılmış lastik ya da ömrünü tamamlamış atık lastik olarak sınıflandırılır.

Ömrünü tamamlamış lastikler; T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı'nın, Resmî Gazete' de yayınlanan 26357 sayılı ve 25 Kasım 2006 tarihli "Ömrünü Tamamlamış Lastiklerin Kontrolü Yönetmeliğinde", faydalı ömrünü tamamladığı belirlenerek araçtan sökülen orijinal veya kaplanmış, bir daha araç üzerinde lastik olarak kullanılmayacak durumda olan ve üretim esnasında ortaya çıkan ıskarta lastikleri olarak tanımlanmaktadır (Mevzuat, 2006).

Gönüllü (2004) yaptığı çalışmada ömrünü tamamlamış lastiklerin düzensiz depolama alanlarında taşıdığı başta yangın riskleri ile beraber depolama alanlarında hastalık etkeni olabilecek böcek ile haşeratin doğaya ve insana zarar verebileceğini ifade etmiştir.

Rasher (2008) çalışmasında stok alanlarındaki fazla lastik sayısından dolayı lastik yangınlarının kontrol edilmesinin zor olduğunu belirtmiştir. Ayrıca açığa çıkan yüksek ısı ve oluşan yoğun duman ile yanma sonucunda atmosfere oldukça fazla miktarda zararlı bileşiğin salındığını ifade etmiştir. Bu bileşikler içerisinde, kükürt ve azot oksitleri, uçucu organik bileşikler (VOC), karbon siyahı, polisiklik aromatik hidrokarbonlar (PAH), nitrosaminler ve uçucu partiküller bulunmaktadır.

Polisiklik aromatik hidrokarbonlar, fenoller, çinko ve demir içeren bileşikler yeraltı sularına ve nehirlere sızabilirler. Yağmur suyu veya yangını kontrol edebilmek için kullanılan su bu kimyasal bileşiklerin toprağa geçmesine ve civarda bulunan diğer su kaynaklarına akmasına neden olur. Yangını kontrol edebilmek için kullanılan su lastiklerin oksijenle temasını keser ve pirolizine neden olur. Bilindiği gibi piroliz sonucu oluşan hidrokarbonların toprağa sızma riski bulunur. Yani yangın sonrası kalıntıların da toprağı kirletme potansiyeli mevcuttur.

2.5. ÖMRÜNÜ TAMAMLAMIŞ LASTİK YÖNETİMİ

Atık yönetimi ilk olarak atığın oluşumunu engelleme, atığın oluşumunu azaltma, yeniden kullanma, geri dönüştürme, atıktan enerji elde etme ve depolama süreçlerinin birlikte değerlendirildiği bütüncül bir yaklaşımdır.

Amerika Birleşik Devletleri, Çevre Ajansı (1991) tarafından yayınlanan Hurda Lastik Pazarı ile ilgili raporda, ömrünü tamamlamış lastiklerden enerji geri kazanımının özellikle çimento endüstrisinde olmak üzere kireç fırınlarında, buhar kazanlarında, kâğıt endüstrisinde ve elektrik üretiminde yapıldığını belirtmişlerdir.

Amerika Birleşik Devletleri Lastik İmalatçılar Birliği tarafından hazırlanan raporda, endüstriyel kullanıma ve ekonomik maliyetlere göre ömrünü tamamlamış lastik yönetiminde; geri dönüşüm, yeniden kullanım, depolama, enerji geri kazanımı (yakma) ve malzeme geri kazanımı gibi farklı yöntemlerin mevcut olduğu belirtilmiştir (Rubber, 2002).

Gönüllü (2004) çalışmasında, ömrünü tamamlamış lastiklerin; oyun parkları, motorlu spor alanları, toprak erozyonunu önleme, zeminde su oyması olması durumuna karşı köprü ayaklarının kaplanması, çelik teller ile birbirine balyalanarak yol stabilizasyonunun sağlanması gibi birçok farklı alanda kullanılmakta olduğunu belirtmiştir.

Paine vd. (2004) inşaat sektöründe kauçuk kullanılmış betonlarda ısı ve ses yalıtımında verim artışı olduğunu, ısı iletim katsayısının aynı ağırlıktaki normal betonlara göre daha düşük çıktığını, aynı zamanda sektörde kullanılan diğer ısı yalıtımı iyi olan betonlarla aynı yoğunluk ve dayanıklılık özelliklerine sahip olduğunu göstermiştir.

Rasher (2008) çalışmasında, ömrünü tamamlamış lastiklere bir bütün halinde geri dönüşüm uygulanamayacağını ve kullanılmış lastikler için ise geri dönüşüm işleminin kullanılmış lastiğe eğer yeterli diş derinliği var ise tekrar diş açılması veya lastiğin yeniden kaplanması ile yapılması gerektiğini belirtmiştir. Herhangi bir atığın fiziksel, kimyasal ve diğer özelliklerini değiştirmeden yeniden kullanıma sunulması uygun olmadığı gibi ömrünü tamamlamış lastiklerin de herhangi bir işleme maruz bırakmadan araç lastiği olarak kullanımı uygun değildir.

Çelik ve tekstil kuşaktan arındırılmış granül ve toz halindeki lastikler endüstride yaygın olarak kullanılmaktadır. Parçacık boyutu küçüldükçe proses için gerekli olan enerji ihtiyacı artar. Parçacık boyutu küçültülmüş kauçuğun en yaygın kullanım alanı inşaat sektörüdür. Kauçuk katılmış, beton, agrega ve asfalt yapımı ile ilgili çeşitli uygulamalar bulunmaktadır. Kauçuk özellikle asfalt yapımında kullanıldığında asfaltın kalitesini arttırdığı, düşük sıcaklık nedeniyle oluşan asfalt çatlamlarını ve yüksek sıcaklık nedeniyle oluşan tekerlek izlerini azalttığı, buzlanmaya karşı daha etkili olduğu, trafikte oluşan ses kirliliğini azalttığı ve en önemlisi asfaltın kullanım ömrünü uzattığı ifade edilmiştir (Basel Sözleşmesi, 2008).

Basel Sözleşmesinde (2008) belirtilen çevreye duyarlı teknik yönergede malzeme geri kazanımın parçacık boyutu küçültme, elektrik ark fırınlarında kullanma, devulkanizasyon ve ısıl bozundurma işlemleri ile yapıldığını belirtmiştir.

T.C. Çevre ve Orman Bakanlığı, Atık Yönetimi Dairesi Başkanlığı (2009) tarafından yayımlanan katı atıkların geri kazanımı ve buna yönelik toplama işlemleri ile ilgili raporda, yakıt olarak enerji geri kazanımının ömrünü tamamlamış lastiklerin özelliklerinden faydalanarak içerisindeki bileşenlerin fiziksel, kimyasal veya biyokimyasal yöntemlerle farklı enerjiye çevrilmesiyle gerçekleştiğini ifade etmişlerdir.

Yakaboylu (2010) çalışmasında, ömrünü tamamlamış lastik yönetiminde geri dönüşüm sürecinin atık lastiğin veya lastik bileşenlerini oluşturan maddelerin piroliz, gazlaştırma, normal yanma gibi bir işleme tabi tutularak yeniden elverişli kullanıma hazır hale dönüştürülmesi işlemi olduğunu ifade etmiştir.

Atık lastikler insan sağlığı ve doğa için önemli tehditler oluşturduğu için ömrünü tamamlamış lastik yönetimi için en az tercih edilecek olan yöntem depolama işlemi olmalıdır. Eğer sürekli depolama yapılacak ise geri dönüşüm işlemleri gerçekleştirilene kadar geçen süre çok kısa olmalı, birim başına depolanan miktarı azaltılmalı ve birbirinden yeterince uzak birimler şeklinde depolanarak riskler en aza indirilebilmelidir.

Ömrünü tamamlamış lastiklerin elektrik ark fırınlarında kullanımı oldukça yeni bir teknik olup bu yöntemde, atık lastikler yüksek karbonlu çelik üretimi için karbon ve çelik kaynağı olarak kullanılmaktadır. Bu işlem, sıcaklığı 1650°C' den daha yüksek olan elektrik ark fırınlarında yapılmaktadır. Elektrik ark fırınlarının bütün halinde olan lastikleri kullanıyor olması bu yöntemin en önemli avantajlarından biridir (Rubber, 2006). Bu işlemde yeni çelik üretimi için, ömrünü tamamlamış lastiklerin yanabilir kısmı enerji kaynağı olarak kullanılırken ağırlıkça lastiğin %68'i karbon ve ağırlıkça lastiğin %12'si çelik olarak kullanılmaktadır. Elektrik ark fırınlarında kullanımın en önemli avantajı karbon, çelik ve kauçuğun tamamının geri kazanılmasıdır, ancak işletim maliyetleri oldukça fazladır (Rubber, 2006; Basel Sözleşmesi, 2008).

Malzeme geri kazanımındaki bir diğer devulkanizasyon işlemi, mekanik, ısıl ve kimyasal işlemler ile kauçuğun tekrar karıştırılabilir, işlenebilir ve vulkanize edilebilir hale getirilmesidir. Burada amaç karbon-kükürt bağlarının kırılmasıdır. İlk olarak

boyut küçültme işlemi daha sonra ise kimyasal, ultrasonik, mikrodalga ve biyolojik olarak bağların kırılması işlemi uygulanır (Basel Sözleşmesi, 2008).

Isıl bozundurma işlemleri ise piroliz, karbonizasyon ve gazlaştırma olarak sınıflandırılır ve tüm organik maddelere uygulanabilir. Bu işlemler ile katı, sıvı ve gaz ürünler elde edilebilir (Çift, 1998).

Piroliz, organik maddelerin yüksek sıcaklıklarda ve oksijensiz ortamda veya atmosferdeki inert gazların termokimyasal olarak parçalanmasıdır. Piroliz, sadece sıcaklık veya ısıtma hızı gibi çalışma parametrelerinin değişmesiyle farklı oranlarda katı, sıvı ve gaz halindeki ürünlerin bir kombinasyonunu oluşturma esnekliğine sahiptir. Aynı zamanda düşük enerji yoğunluklu malzemeleri yüksek enerji yoğunluklu biyo-yakıtlara dönüştürme ve daha yüksek değerli kimyasalları geri kazanma imkânı verir. Hızlı, katalitik hızlı, orta, yavaş, vakum gibi farklı piroliz türleri geliştirilmiştir. Bu işlemin en büyük avantajlarından biri, endüstriyel ve evsel atıklar da dahil olmak üzere birçok türde ham maddenin kullanılabilmesidir. Başarılı bir piroliz uygulaması için ön koşul, uygun girdi malzemelerinin seçimi ve optimal proses koşullarının ayarlanmasıdır.

Mui vd. (2008) atık lastik parçacıklarının pirolizini çeşitli ısıtma hızları koşulları altında incelenmiş ve piroliz koşullarını modellemek için Coats-Redfern modeli ve Runge-Kutta algoritması uygulanmıştır. Geliştirilen modellerin, piroliz reaktöründe daha iyi tasarım yapılmasına olanak vereceği ve lastiğin termal bozunmasında hem ısı hem de kütle transferi olaylarının anlaşılmasına olanak sağlayacağı belirtilmiştir.

Karbonizasyon işlemi bilinen en eski ısıl bozundurma işlemidir. Atık lastiklerin karbonizasyon işleminin çeşitli sıcaklıklardaki piroliz işlemi ile gerçekleştirildiği Risoe Ulusal Laboratuvar ekibi tarafından yayınlanan gelişmekte olan biyoenerji teknolojileri ile ilgili raporda belirtilmiştir (Larsen vd., 2003).

Gazlaştırma, katı atık veya biyo-kütle gibi karbon bazlı bir malzemeyi gerçekten yakmadan diğer enerji biçimlerine dönüştüren bir süreçtir. Yani gazlaştırma, katı ve sıvı atık malzemeleri kimyasal bir reaksiyon yoluyla gaza dönüştürür. Katı atıkların

gazlaştırılması, katı atıkların arıtılması için alternatif bir yakıt üretim sürecidir. Gazlaştırma sonucu elde edilen karbon monoksit (CO) ve H₂ karışımına sentez gazı da denilir. Geleneksel bir brülörde veya bir gaz motorunda yakılan bir gaz yakıtı olarak kullanılabilir ve daha sonra ısıyı kullanmak veya elektrik üretmek için bir kazana ve bir buhar türbinine veya gaz türbinine bağlanabilir. Ayrıca, kimyasallar ve diğer yakıt enerjisi türleri gibi değerli ürünlerin üretilmesi için bir yapı taşı olarak kullanılabilir.

Kullanımı Avrupa Birliği topluluğu tarafından öncelikli bir hedef olarak tanımlanan hurda lastiklerin bertaraf edilmesi için katı atık lastiklere bir buhar gazlaştırma işlemi uygulanmıştır. Gazlaştırma testleri, bir kazanda üretilen ve sabit bir akış hızında bir peristaltik pompa aracılığıyla reaktörlere pompalanan buharla gerçekleştirilmiştir. Güvenli çalışma koşulları oluşturmak için taşıyıcı gaz olarak azot kullanılmıştır (Galvagno, 2009; Xiao, 2008).

Caballero vd. (2004) atık lastiğe gazlaştırma işlemini buhar ve oksijen ortamında laboratuvarında incelemiş ve buharla gazlaştırma deneyinde gaz ürün dönüşümünü %60 olarak bulmuştur. Lastik bileşimini oluşturan moleküller, kararlı ağır organik moleküller olduğundan temiz sentez gazı eldesi oldukça zordur. Ayrıca, işletim ve yatırım maliyetleri de oldukça yüksektir.

2.6. TÜRKİYE’ DE ATIK LASTİK YASAL MEVZUATI

Ülkemizde ömrünü tamamlamış lastiklerin yönetimi T.C. Çevre ve Orman Bakanlığı tarafından çıkartılan ve 26 Kasım 2006 tarihi 26357 sayılı Resmî Gazete’ de yayımlanan “Ömrünü Tamamlamış Lastiklerin Kontrolü Yönetmeliği” ile belirlenmiştir (Mevzuat, 2006). Bu yönetmeliğin amacını aşağıdaki gibi özetleyebiliriz:

- ✓ Çevreye zarar verecek şekilde doğrudan veya dolaylı olarak alıcı ortama verilmesinin önlenmesi,
- ✓ Toplama sistemi ve taşıma sisteminin kurulması,
- ✓ Yönetim planının oluşturulması,

- ✓ Ömrünü tamamlamış lastiklerin yönetiminde gerekli düzenlemelerin ve standartların sağlanması,
- ✓ İthalatı, ihracatı ile transit geçişine ilişkin sınırlama ve yükümlülüklerle yönelik idari ve teknik esasların belirlenmesi.

İlgili bu yönetmelik katı atık lastiklerin geri kazanım ve bertaraf işlemlerini aşağıdaki koşullar çerçevesinde

- ✓ Hava, su, toprak, bitki, hayvan ve insanlar üzerinde tehlike yaratmadan,
- ✓ Ses ve koku yoluyla doğaya herhangi bir olumsuz etki bırakmadan,
- ✓ Doğal çevre ile koruma alanlarına zarar vermeden yapılmasını

zorunlu kılmaktadır. Ayrıca,

- ✓ Atık lastiklerin ithalatını,
- ✓ Atık lastiklerin hangi sebeple olursa olsun vadi veya çukurlarda dolgu malzemesi olarak kullanılmasını,
- ✓ Katı atık depolama tesislerine kabulü ve depolanmasını,
- ✓ Isınmada kullanılmasını,
- ✓ Gösteri ve benzeri fiilleri kapsayacak şekilde her ne amaçla olursa olsun yakılmasını,
- ✓ Atık lastiklerin lastik tamirhaneleri, kaplamacılar, perakende satış noktaları, oto sanayi ve benzeri yerlerde açık alanda biriktirilmesini

yasaklamaktadır. Biriktirme yerlerinde yangına, sivrisinek, fare gibi zararlıların üremesine ve toprağa sızıntı ihtimallerine karşı önlem alınmasını zorunlu kılmaktadır. Lastik üreticileri yönetmeliğe göre her yıl bir önceki yıl iç piyasaya sürülen lastik tonajını ve Bakanlığın ortalama lastik aşınma oranını dikkate alarak belirleyeceği oranlarda ömrünü tamamlamış lastikleri toplamak/toplatmak, toplanan miktarın geri kazanımını veya bertarafını sağlamak ve bu işlemleri Bakanlığa belgelemekle yükümlü hale getirilmiştir (Mevzuat, 2006). Yakma, düzenli depolama, geri kazanım, kompost gibi mevcut katı atık bertaraf yöntemleri ülkemiz ve dünyada yaygın olarak kullanılmaktadır.

Atmosferik basınç plazma teknolojisi ile katı atıkların bertarafı birçok ülkede kullanılmakta iken ülkemizde ilk kez tarafımızdan gerçekleştirilmiş olup elde edilen sonuçlar uluslararası dergide bilim insanlarına sunulmuştur. Plazma teknolojisi ve literatür çalışması ile ilgili bilgiler bir sonraki bölümlerde verilmiştir.

BÖLÜM 3

PLAZMA TEKNOLOJİSİ

Plazma teknolojisi temel olarak çok basit bir fiziksel ilkeye dayanmaktadır: Enerji. Eğer maddeye bir enerji girişi var ise madde hal değiştirir. Katı sıvıya dönüşür, sıvı gaza dönüşür. Gaz haline daha fazla enerji girişi olur ise gaz iyonize olur ve maddenin dördüncü hali olan enerji yoğun plazma haline geçer. Bu sürecin tam tersi de gerçekleşir.

Langmuir (1928) yaptığı çalışmada ilk kez plazmanın keşfini ifade etmiştir. Evrendeki gözle görülebilir maddelerin %99'u plazma halindedir. Yıldırımlarda veya kuzey veya güney kutuplarında kutup ışıkları olarak doğal haliyle plazma görülür. Güneş tutulması sırasında güneş etrafındaki aydınlık ışık halesi (korona) olarak da gözlenebilir.

Maddenin katı, sıvı, gaz ve plazma olmak üzere dört hali bulunmaktadır. Maddenin bu halleri arasında sadece enerji farkı vardır. Maddeye enerji verilerek sırasıyla katı, sıvı, gaz ve plazma hali elde edilebilir ya da tersi yapılarak plazma halinden gaz, sıvı ve katı hale geçiş yapılabilir. Enerji kaynağı elektrik, ısı veya ışın kökenli olabilir.

Plazma, yüklü parçacıklar ve iyonlardan meydana gelen bulutsu yapıdır ve iyonize olmuş gaz olarak da tanımlanır. Plazmanın en önemli özelliklerinden biri sanki yüksüz olmasıdır. Artı ve eksi elektrik yüklü parçacıklar birbirinden bağımsız hareket ederken sistemin sanki yüksüz olmasıdır (Fridman and Kennedy, 2011). Bir sistemin plazma olabilmesi için birim hacimde yeteri kadar plazma yoğunluğunun bulunması gerekmektedir ve sistem yüksüzlükten uzaklaştıkça plazma tanımından da uzaklaşır.

Plazma yüksek, kararsız enerji düzeyindeki bir maddeyi tanımlar. Plastik ve metal gibi katı maddelerle temas ettiğinde verilen plazma enerjisi yüzeylerle etkileşime girer ve

yüzey özelliklerini değiştirir. Bu nedenle sanayi ve endüstride kullanım alanları son yıllarda oldukça artmıştır. Vakum ortamında ve oda sıcaklığındaki bazı gazların bir elektrik akımı veya elektromanyetik radyasyon uygulaması sonucu oluşan işlem soğuk plazma olarak adlandırılır (Fernandez and Thompson, 2012).

Soğuk plazmanın gaz sıcaklığı ortalama 300–400 K aralığındadır ve moleküller, iyonlar ve elektronlar termodinamik olarak dengede bulunmazlar. Elektron sıcaklığı 104–105 K (1–10 eV) değerinde ve iyon sıcaklığı da oda sıcaklığına yakın olduğu için bu işlem soğuk plazma adı verilmiştir. Soğuk plazma işlemi 10 mbar basınç ve 1 – 5 eV elektron enerjisinde uygulanmaktadır (Niemira 2012).

Soğuk plazma teknolojisi yeni bir teknoloji olduğundan bilim insanları tek bir sınıflandırma yerine soğuk plazma kaynakları için kademeli yalıtkan bariyer boşaltıcı, kayma arkı plazma boşaltıcı, dirençli bariyer boşaltıcı ve soğuk atmosferik plazma jetleri olarak gruplandırılma yapmışlardır (Fernández and Thompson 2012).

Termodinamik özelliklerine göre plazmalar sıcak ve soğuk plazmalar olmak üzere ikiye ayrılır (Fridman vd., 2007). Soğuk plazma sterilizasyon yöntemleri çalışılan ortam basıncına göre de iki sınıfa ayrılır. Düşük basınçta elde edilen mikrodalga ile çalışan soğuk plazma sistemleri ve radyo frekansı ile çalışan soğuk plazma sistemleridir. Bu plazma sistemlerinde, hızlı periyodik elektriksel uyarılar ile sistemde kullanılan gazları farklı voltajda ve güçte çalıştırarak iyonlaşma sağlanır (Niemira, 2012).

Düşük basınçlı plazma vakumlu ortamda 10 – 3 bar ile 10 – 9 bar arasında kapalı odacıklarda üretilirler. Atmosfer basıncına göre azalan birim hacim başına parçacık sayısı serbest hareket yolunun daha büyük olmasına ve çarpışma süreçlerinin sayısının nispeten az olmasına neden olur. Bu nedenle düşük basınçlı plazma daha az rahatlama eğiliminde olur ve uzam içine daha fazla yayılabilir. Ve odacığın boşaltılması için güçlü pompalara gerek duyulur. Düşük basınç plazma hat içine entegre edilemez.

Düşük basınçta çalışan plazma sistemlerinde kullanılan vakum ekipmanları oldukça pahalı olduğundan hem sanayide hem de laboratuvarlarda 1 atm basınçta çalışan daha

ekonomik ve işlevsel soğuk plazmalar geliştirilmiştir. Yüksek basınç plazmalar özel gaz deşarjlı ampullerde üretilir. Bunlar yüzeylerin işlenmesinde herhangi bir önem taşımaz. Düşük basınçlı plazmaya veya yüksek basınçlı plazmaya nazaran atmosferik plazma normal basınç altında üretilir. Bu nedenle alçak basınç odalarına gerek duyulmaz.

Atmosferik plazma ile yapılan ön işlem çok uygun maliyetlidir ve pek çok alanda düşük basınç plazmanın, yüksek basınç plazmanın ve korona yönteminin alternatifi olmaktadır. Atmosferik plazmanın en büyük avantajı ise hat içine entegre edilebilmesidir (Yüksel ve Karagözlü, 2017).

Geliştirilen farklı özelliklerdeki atmosferik soğuk plazma tekniklerini; korona boşaltım plazması, dielektrik bariyer boşaltım plazmaları, atmosferik basınç plazmajeti, ısıtılı boşaltım plazması, ark boşaltım plazması ve radyo frekansı plazmaları olarak sıralayabiliriz (Bozkurt, 2014; Niemira, 2012).

Plazma teknolojileri, ısı kaynağını işlenen maddelerden bağımsız kılan, yanmadan açığa çıkan termal enerji yerine bir ısı kaynağı olarak elektriği kullanır. Bu da sistem esnekliği, hızlı proses kontrolü ve değerli ürünler üretme olasılığı da dahil olmak üzere proses kimyasında daha fazla seçenek sunar ve plazma teknolojisini gelişmiş katı atık madenciliğinde ilgi çekici bir atık arıtma seçeneği haline getirir (Van Oost, 2006).

Atık arıtma için plazma teknolojileri plazma pirolizi, plazma gazlaştırma ve plazma sıkıştırma ve vitrifikasyon gibi farklı kategorilere ayrılabilir. Plazma gazlaştırma, yüksek oranda organik madde içeren katı atıkların arıtılması için genellikle vitrifikasyon ile birleştirilir. Hem tek aşamalı hem de iki aşamalı plazma gazlaştırma sistemleri mevcuttur. Tek aşamalı tasarımda, atık doğrudan plazma jetleri ile işlenirken, iki aşamalı tasarımda gazlaştırmayı, üretilen sentez gazının plazma temizliği takip eder.

İki aşamalı bir gazlaştırma prosesi geliştirmenin amacı, gazlaştırma ve plazma dönüşümünü bir reaktörde birleştiren prosesle ilgili bazı dezavantajların üstesinden

gelmektir, yani nispeten düşük verim, uçucu organik bileşiklerin / katranların zayıf kontrolü ve değerli bir sentez gazına düşük dönüşüm verimliliğidir.

Elektrik pahalı bir enerji kaynağı olduğu için maliyetlerinin yüksek olması nedeniyle plazma sistemleri öncelikle tıbbi atık, düşük seviyeli radyoaktif atık gibi tedavi için kullanılmıştır. Bu alanda, plazma vitrifikasyon üniteleri halihazırda yaygın olarak kullanılmakta ve plazma sistemleri giderek daha fazla kabul görmektedir. Çöp sahasından kaçınma ile ilişkili maliyet tasarrufları ve potansiyel olarak pazarlanabilir ürünlerin katma değeri, plazma gazlaştırma ve atıkların vitrifikasyonunun başlıca ekonomik avantajlarıdır.

Çevresel bir bakış açısından, plazma sistemleri, daha düşük hava kirliliği ve nihai bertaraf gerektiren neredeyse hiç atık akışı olmadan, düzenli depolama ve geleneksel yakmaya uygulanabilir bir alternatif sunma potansiyeline sahiptir.

Üretilen sentez gazı, verimli elektrik ve/veya ısı üretimi, ikinci nesil sıvı biyoyakıtlara dönüşüm veya diğer uygulamalar için kullanılabilir. Sentez gazı temizleme işlemlerinden uçucu kül, çökeltilmiş metaller, vb. elde edilen atıklar, dahili olarak geri dönüştürülebilir.

Aynı zamanda vitrifiye edilmiş ve bu nedenle hiçbir sızıntı riski göstermeyen cüruf içinde tutulabilir. Bu vitrifiye cüruf, bir inşaat malzemesi olarak veya hatta bu vitrifiye cüruf, bir inşaat malzemesi olarak veya hatta birbirine geçen bloklar, fayanslar ve tuğlalar gibi üst düzey bir ikincil ürün olarak kullanılabilir. Vitrifikasyon işlemi, kül için tipik olarak 5:1' den fazla ve katı atık için 50:1' den fazla olmak üzere önemli bir hacim azalması elde edilmesini sağlar (Gagnon and Carabin, 2006).

Plazma gazlaştırma ve vitrifikasyon bir bertaraf teknolojisinin aksine bir geri kazanım süreci olarak kabul edilmektedir.

Yakmanın yanı sıra piroliz, gazlaştırma ve plazma tabanlı teknolojiler gibi daha gelişmiş termokimyasal yaklaşımlar 1970' lerden beri geliştirilmiştir. Genel olarak, bu alternatif teknolojiler, seçilen atık akışlarına ve yakmadan daha küçük bir ölçekte

uygulanmıştır. Proses koşulları 6zel olarak tasarlanmış reakt6rlerde sıkı bir şekilde kontrol edilmektedir. Her d6n6řt6rme teknolojisini, girdi i7in farklı gereksinimler belirleyen farklı bir 6r6n yelpazesi sunar ve farklı modlarda 7alışan farklı ekipman konfig6rasyonları kullanır. Hem piroliz hem de gazlaştırma, yakma işleminden farklıdır. Enerji değerinden ziyade atığın kimyasal değerini geri kazanmak i7in kullanılabilirler. Elde edilen kimyasal 6r6nler bazı durumlarda diğer işlemler i7in hammadde olarak veya ikincil yakıt olarak kullanılabilir. Ancak, atığa uygulandığında, piroliz, gazlaştırma ve yanmaya dayalı prosesler genellikle entegre bir prosesin par7ası olarak aynı sahada birleştirilir. Genel olarak, bu t6r entegre prosesler, geleneksel bir yakma fırınının yaptığı gibi, atığın kimyasal değerinden ziyade toplamda enerji değerini geri kazanmaya odaklıdır.

Temel termokimyasal d6n6ř6m teknolojilerinin genel 6zellikleri 7izelge 3.1' de 6zetlenmiştir.

Çizelge 3.1. Temel termokimyasal dönüşüm teknolojilerinin özellikleri.

	Piroliz	Gazlaştırma	Normal Yanma	Plazma İşlemi
Amacı	Katı atıkların ısıyla ayrışmasını kok, gazlar ve yoğun fazlar halinde en üst düzeye çıkarmak	Yüksek enerjili yakıt gazlarına atık dönüşümünü en üst düzeye çıkarmak	Yüksek sıcaklıktaki baca gazlarına atık dönüşümünü en üst düzeye çıkarmak	Yüksek enerjili yakıt gazlarına ve inert katı çürük fazına atık dönüşümünü en üst düzeye çıkarmak
Sıcaklık (°C)	250 – 900	500 – 1800	800 – 1450	1200 – 2000
Basınç (bar)	1	1 – 45	1	1
Atmosfer	Nitrojen	Gazlaştırma maddesi: O ₂ , H ₂ O	Hava	Gazlaştırma maddesi: O ₂ , H ₂ O Plazma gaz: O ₂ , N ₂ , Ar
Stokiyometrik oran	0	< 1	>1	< 1
Süreçlerden Elde Edilen Ürünler				
Gaz fazı	H ₂ , CO, H ₂ O, N ₂ , HC	H ₂ , CO, CO ₂ , CH ₄ , H ₂ O, N ₂	CO ₂ , H ₂ O, O ₂ , N ₂	H ₂ , CO, CO ₂ , CH ₄ , H ₂ O, N ₂
Katı fazı	Kül, kok	Çürük, kül	Çürük, kül	Çürük, kül
Sıvı fazı	Piroliz yağı, su			

BÖLÜM 4

LİTERATÜR ÇALIŞMASI

Bir plazma torçu tarafından üretilen ark plazmasının spesifik bir analizi için, stabil plazma oluşumu esnasında fotoğraf tekniği ile plazma jetinin uzunluğu ve çapı akım değerlerine bağlı olarak ölçülebilir. Genellikle 50 ile 300 A akım aralığında, torçun ucunda oluşan plazma jetinin uzunluğu 1 ile 9 cm arasında olmaktadır. Burada argon gazının akış hızı 20 litre/dk olarak belirlenmiştir (Donaldson vd., 1991).

Plazma torç çok etkili bir ısıtma cihazıdır. Ark plazma ısıtma teknolojisi atık arıtımı ve çevrenin iyileştirilmesi ve korunması için çok uygun ve gerekli bir tekniktir (Camacho, 1995).

Geleneksel piroliz ile karşılaştırıldığında, plazma pirolizinin birçok benzersiz avantajı vardır. Örneğin, reaksiyon için yüksek sıcaklık ve yüksek enerji durumu sağlar. Böylece reaksiyon numunesi hızlı bir şekilde yüksek bir sıcaklığa kadar ısıtılır, reaksiyon hızı oldukça hızlıdır ve geleneksel pirolizde görünmeyen bazı reaksiyonlar meydana gelir (Chang vd., 1996).

Lyubina and Suris (1999) organik katı atıkların plazma gazlaştırılmasının termodinamik modelini inceleyerek, plazmotronun gerektirdiği güç, gazın ve diğer gazlaştırma ürünlerinin kalorifik değeri ve birim verimi ile ilgili olarak evsel katı atıkların temel özelliklerinin nasıl etkilendiğine dair bir çalışma yapmıştır.

Lastik tozu gazlaştırmasının özelliklerini araştırmak için laboratuvar ölçekli bir akışkan yataklı gazlaştırıcı kullanılarak lastik tozu gazlaştırma işlemi Leung vd. (2003) tarafından incelenmiştir. 350-900°C sıcaklık aralığında hava ile gazlaştırılan granül lastik tozları ile ilgili bu çalışmada eşdeğerlik oranı, lastik besleme hızı, lastik partikül boyutu, yatak sıcaklığı, ikincil reaksiyon sıcaklığı, ürün gaz bileşimi, gaz verimi, gaz

ısıtma değeri, ürün (yani gaz, katran ve kömür) dağılımı, uçucu salım oranı, sabit karbon dönüşüm oranı ve enerji geri kazanım oranı gibi çeşitli parametrelerin gazlaştırma sonuçları üzerinde önemli etkileri olduğu gösterilmiştir.

Özellikle termal plazmaların katı malzemelerin eritilmesinde, kesilmesinde kullanılması günümüzde büyük bir önem kazanmaktadır. Katı malzemelerin eritilmesindeki avantajı sayesinde katı atıkların bertaraf yöntemlerinde etkin olarak görev almaktadır. Katı atıklar, yüksek enerjili plazma torçları kullanılarak işlenebilir. Plazma her türlü atığı işleyebilir. Plazma torçları teknolojisi oldukça güvenlidir ve atmosferik basınçta 5000°C' nin üzerindeki sıcaklıklarda bulunan plazmanın üretilmesinde en iyi bilinen yöntemidir (Edbertho, 2004).

Bunların yanında plazma tekniği polimer pirolizi için uygun bir yöntemdir. Özellikle ham madde olarak ömrünü tamamlamış eski lastikler termal plazma pirolizi ile sentez gazı üretiminde kullanılabilir. Isıl işlemler sırasında, lastik yapım sürecinden gelen kükürt katkı maddeleri buhar veya sıvı fazlara aktarılır. Isıl işlem veya piroliz, çeşitli imha işlemlerinde yaygın bir adım olduğundan, ısıl işlem sırasında lastiklerdeki kükürdün fiziksel ve kimyasal dönüşümünün anlaşılması, kullanılmış eski lastiklerin rasyonel kullanımı açısından çok önemlidir (Tang and Huang, 2004).

Metallerin kesiminde, yüzey modifikasyonlarında, metalik ve metalik olmayan ince film kaplamalarında, tekstil sanayisindeki kumaşların boyanmasında, malzeme ayrıştırmada ve zenginleştirmede, gıda koruma, mikroelektronik teknoloji gibi birçok endüstri alanında yaygın olarak kullanılan plazmanın önemi çok büyüktür (Teke, 2012; Chu, 2007).

Mountouris vd. (2006) üretilen sentez gazının tahminini, enerji ve ekserji hesaplamalarını içeren plazma gazlaştırma teknolojisinin termodinamik analizini incelemiş ve bu amaçla, katı karbon yan ürünü olarak kurum oluşum olasılığını da dikkate alan son termodinamik veriler kullanılarak GasifEq adı verilen bir denge plazma gazlaştırma modeli geliştirilmiştir. GasifEq modeli bu süreçlerin optimizasyonu için gerekli olan enerji ve ekserji hesaplarını yapabilme özelliğine sahiptir.

Arıtma çamurunun plazma gazlaştırılması ile ilgili proses geliştirme ve enerji optimizasyon hesabı Mountarius vd. (2008) tarafından yapılmış olup, bu çalışmada, GasifEq denge modeli kullanılarak süreç optimize edilmiş ve 250 ton/gün arıtma çamurunun %68 nem ile plazma arıtılmasının net olarak 2,85 MegaWatt (MW) elektrik enerjisi üretimi ile sonuçlandığı gösterilmiştir.

Plazma jeneratörü, iki farklı mod kullanılarak proses odası ile birleştirilebilir. Bunlardan biri, plazma proses odası ve plazma torçlarını tek bir gövdeye birleştiren tek aşamalı bir düzenektir, diğeri ise iki aşamalı bir proses odasıdır ve geleneksel bir proses odasının ardından, önceki aşamadaki ham sentez gazının ve katı kalıntının yeniden biçimlendirildiği bir sistem olarak bilinmektedir (Fourcault vd., 2010). İlk durum, daha yaygın olarak kullanılan bir tekniktir. Birinci durumda, plazma jetleri proses odasının altında veya üstünde bulunur ve atık doğrudan plazma jetleriyle ısıtılır. İkinci durumda ise plazma ısısı, ham sentez gazını temizlemek için ısı kaynağı olarak kullanılır.

Metaller, beton, tuğla, fayans ve seramik, cam, selüloz, bitüm, kömür, pet-kok, tehlikeli atık gazlarında bulunan mevcut hidrokarbonlar (HC' ler) ile ham ahşapla karıştırılmış ham atık sebzelerin işlenmesinde plazma yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu saydığımız prosesler esnasında güç kaynağı olarak mikro dalga (MD), ark, Radyo Frekansı (RF) plazma, plazma torç ve diğeri termal plazmaları kullanarak, birçok uygulamada sentez gazı üretimi gerçekleştirilmektedir (Hassanpour and Mohammadi, 2012).

Bosmans vd. (2013) yaptıkları çalışmada plazma pirolizi tekniği kullanılarak gazlaştırma yapılırken işlem esnasında ortaya çıkan en olası bileşenlerin karbonlu maddelerden oluşan CH_4 , CO , H_2 , CO_2 ve H_2O olduğunu ifade etmişlerdir.

Plazma oluşturma jeneratörünün temel teknik parametreleri dizayna bağlı olarak değişkenlik göstermektedir ve genellikle hat voltajı 220 volt, güç kaynağı akımı 5 amper, voltaj darbe genliği 2,5 kiloVolt' a kadar, plazmanın en az yük direnci yaklaşık 200 ohm, darbe süresi 6, 10 ve 20 μs aralığında ve darbe tekrarlama frekansı 0,5-12 kiloHertz (kHz) arasında karakterize edilir (Bilous vd., 2014).

Yüksek sıcaklığa sahip bir plazma, radyoaktif malzemeler hariç hemen hemen tüm malzemeleri temel formlarına ayırabilir (Gray, 2014).

Analitik bir model yardımı ile içeriği bilinen arıtma çamuru örneğinin plazma ile gazlaştırılması sonucunda üretilen sentez gazının içerikleri hesaplanmış ve plazma torcunun gücü ile açığa çıkan ısı enerjisi hesaplanmıştır (Dereli, 2012).

Plazma gazlaştırmanın tehlikeli atıkların (dioksinler) bertarafından kaynaklanan kül, metal ve cüruf ile karşılaştırıldığında, daha yüksek temel seviyeye tamamen ayrışmadan kaynaklanan brüt enerji geri kazanımı ve daha küçük kurulum boyutu, proses kontrol edilebilirliği gibi birçok avantajı vardır. Daha düşük emisyonlar yoluyla daha iyi çevresel faydalar dahil olmak üzere, vitriye cürufun sayısız kullanım alanı bulunmaktadır.

Yüksek oranda ve daha az çapraz bağlı polimerler, daha yüksek oranda işlevselleştirilmiş filmler ve modifiye edilmiş yüzeyler oluşturmak için çeşitli organik bileşenlerin makromoleküler ince katmanlara dönüştürülmesi plazma kuvvetleri tarafından gerçekleştirilebilmektedir. Ayrıca doğalgazın daha verimli hale getirilmesinde, H₂ üretiminde, yakıt hücrelerinde ve hidrojen zengin gazlarda ve maddenin fiziksel halindeki değişikliklerde termal plazma uygulanmaktadır (Jafari and Hassanpour, 2015).

Evsel katı atıkların güvenilir bir biçimde bertarafı hakkında plazma teknolojisinin uygulanması ile ilgili analitik bir çalışma Topal (2015) tarafından yapılmış olup, bu çalışmada iki metot uygulanmıştır. İlk olarak plazma gazlaştırma işleminde kütleli içerikleri bilinen atıkların sentez gazına dönüşümleri matematiksel bir modelleme ile belirlenmiştir. İkinci olarak ise aynı işlem VMGSim yazılımı ile incelenmiştir. Plazma teknolojisi ile bertarafın diğer yakma teknolojilerine göre daha az atık açığa çıkardığı sonucuna varılmıştır.

Çöpten türetilen yakıt, biyodizel buharının bir yan ürünü olarak gliserol, biyokütle, plastik, kâğıt, Alüminyum folyo, kumaş, kauçuk, ahşap, ağaç dalları gibi farklı atıkların gazlaştırılmasında plazmanın etkisi oldukça fazladır.

Plazma dönüştürme teknolojisi çok aşamalı bir süreçtir. Plazma teknolojisinin gerçek tesis tasarımı ve konfigürasyonu katı atıkların arıtılması, teknolojiye göre önemli ölçüde değişmektedir. Li vd. (2016) yaptıkları çalışmada bir plazma tesisinin aşağıdaki temel unsurlardan oluştuğunu ifade etmişlerdir.

- ✓ Ön işlem,
- ✓ Plazma gazlaştırma,
- ✓ Çıkış gazı temizleme,
- ✓ Cüruf geri kazanımı
- ✓ Enerji kurtarma.

İki aşamalı bir plazma sistemi ile karşılaştırıldığında, tek aşamalı proses odasında üretilen sentez gazı daha uygun özellikler gösterirken, katı kalıntıların camlaşmış cüruf olarak geri kazanılması iki aşamalı proses odası için daha avantajlıdır (Cao vd., 2014; Agon vd., 2016).

Plazma gazlaştırma, besleme stoğundaki nitrojen ve sülfürü nitrojen ve hidrojen sülfite dönüştürerek nitrojen oksit (NO_x) ve sülfür dioksit (SO_2) oluşumunu engeller (Mazzoni and Janajreh, 2017).

Termal plazmalar, üretilme kaynağı açısından doğru akım (DC), alternatif akım (AC) ve radyo frekans (RF) olarak farklılık gösteren, denge dışı plazmatronlar olarak da adlandırılan plazma torçları veya jetleri tarafından meydana getirilir (Unnisa and Hassanpour, 2017).

Plazma oluşturmak için, N_2 , Ar, H_2 , CO ve CO_2 gibi çeşitli gazlar kullanılabilir. Plazma gazlaştırma reaksiyonları oksijen ile oksidasyon reaksiyonları, buhar, hidrojen ve karbondioksit ile gazlaştırma reaksiyonları ve katran ve hidrokarbonların ayrışması olarak ikiye ayrılır. Plazma gazlaştırma reaksiyonları, oksijenin karbon moleküllerine oranı birden az olduğunda gerçekleşir (Munir vd., 2019).

Çevreye duyarlı atık bertarafı için termal plazma teknolojisi ile lastik atıklarının piroliz ve gazlaştırılmasının karşılaştırmalı analizi Gloria vd. (2019) tarafından yapılmış ve

plazma gazlaştırması daha yüksek enerjili değere sahip sentez gazı plazma gazlaştırmasının plazma pirolizinden daha yüksek verimliliğe sahip olduğu gösterilmiştir. Ayrıca her iki proseste de üretilen sentez gazının yakıt olarak kullanılabilceği belirtilmiştir.

BÖLÜM 5

MATERYAL VE YÖNTEM

Bu tez çalışması Karabük Üniversitesi Fen Fakültesi Fizik Bölümü Plazma Fiziği Araştırma Laboratuvarı imkanlarıyla ve Dr. Öğr. Üyesi Ferhat BOZDUMAN' ın araştırmacı olarak yer aldığı KBÜBAP-21-DS-008 numaralı proje ve yürütücü olarak görev aldığı KBÜBAP-21-DS-029 numaralı projelerden destek alınarak yapılmış olup KBÜ Bilimsel Araştırmalar Koordinatörlüğü' ne teşekkür ederiz.

Katı atık grubuna giren ömrünü tamamlamış atık lastiklerin plazma teknolojisi ile işlenmesi ülkemizde ilk kez tarafımızdan gerçekleştirilmiştir. Böylece, mevcut bertaraf yöntemlerine göre daha temiz ve daha kısa zamanda işlem yapabilen bir teknik ülkemiz bilim camiasına kazandırılmıştır.

Atmosferik basınç plazma teknolojisi kullanılarak çevre kirliliğine neden olabilecek zararlı bileşenlerin tespit edilmesi ve analizlerinin yapılması ile ilgili deneysel aşamalar genel olarak aşağıdaki gibi sıralanmıştır:

- ✓ İlk olarak ömrünü tamamlamış atık lastik parçaları toplandı.
- ✓ Daha sonra mevcut güç kaynağı parametrelerine bağlı kalarak plazma kaleminin dizaynı yapıldı.
 - ✓ Deşarj gazı olarak %99 ve üzeri yüksek saflıkta oksijen kullanıldı.
 - ✓ Hava kompresörü kullanılarak atmosfer havası ile deşarj gerçekleştirildi.
 - ✓ Oksijen akış miktarının kontrol edilebilmesi için analog debi ölçer kullanıldı.
 - ✓ Stabil plazmanın oluşabilmesi için güç kaynağı parametrelerinin kalibrasyonu düzenli olarak yapıldı. Bu parametreler akım ve voltaj değerleridir. 500 miliamper (mA) akım değeri ile 220 volt (V) voltaj değeri dikkate alındı.
 - ✓ Daha sonra plazma işlemi esnasında ortaya çıkabilecek çevreye zararlı katı, sıvı ve gaz ürünlerinin analizi için proses odası tasarlandı. Bu odaya gerekli gaz sensörleri eklenerek proses anında bilgisayar destekli ölçümler alındı.

- ✓ Termokupul probu ile proses odasının sıcaklığı tespit edildi. Proses yapıldıktan sonra numune haznesinde biriken gazların analizleri gaz sensörleri ile gerçekleştirildi.
- ✓ Son olarak, elde edilen sonuçlar klasik yöntem ile kıyaslandı.

5.1. DENEY DÜZENEĞİ İLE İLGİLİ EKİPMANLAR

Deneysel düzeneği ile ilgili ekipmanlar bu kısımda ayrıntılı olarak aşağıda verilmiştir. İlk olarak deneysel çalışmada kullanılan ömrünü tamamlamış atık lastik Şekil 5.1’ de ki gibidir. Lastik testeresi yardımıyla 2,5 gram ve 3 gram kütleyle sahip parçalar bu lastikten kesilerek deneysel çalışmalar yapıldı.



Şekil 5.1. Kullanılan atık lastik.

Proses haznesinde biriken karbonmonoksit (CO), karbondioksit (CO₂), metan (CH₄) ve toluen (C₇H₈) gazlarını ölçmek için kullanılan sensörler ve veri toplama kartı Şekil 5.2’ de gösterilmiştir. Veri toplama kartı usb bağlantıya sahip olup dört analog girişi bulunmaktadır. Analog girişleri 0 – 5 volt arasındaki gerilimleri ölçebilmektedir. Veri toplama kartı saniyede 250 bin örneği kaydedebilme kapasitesine sahiptir.

Gaz sensörlerinin çıkış sinyalleri analog formda olup çıkış formu logaritmidir. Gaz sensörlerinin ölçüm aralıkları sırasıyla CO gazı için 0 – 500 ppm, CO₂ gazı için 400 – 16 000 ppm, CH₄ gazı için 0 – 300 ppm ve toluen gazı için ise 0 – 300 ppm değerindedir. 1 (parts per million) ppm değeri milyonda bir birime verilen isimdir.



(a)



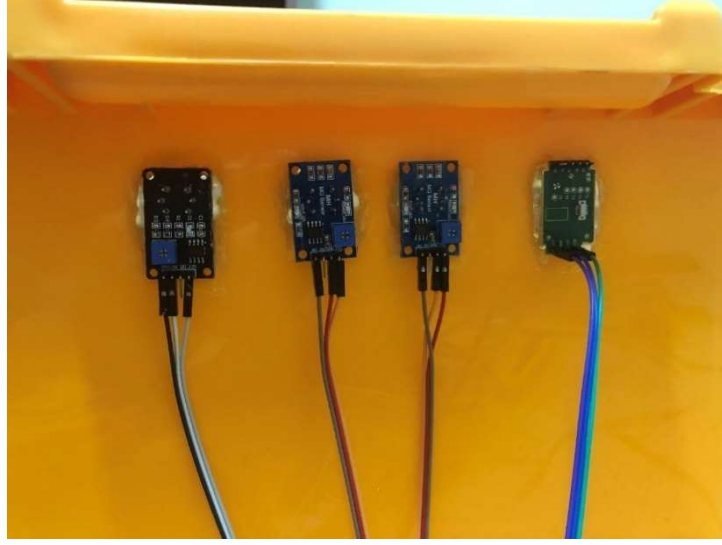
(b)

Şekil 5.2. a) Gaz ölçüm sensörleri ile veri toplama kartı. b) Veri toplama kartının ayrıntılı fotoğrafı.

Gaz sensörlerinin proses odasına monte edilmiş görüntüsü Şekil 5.3’ de ve gaz sensörlerinin veri toplama kartına bağlı halinin ayrıntılı fotoğrafı Şekil 5.4’ de gösterildiği gibidir.



Şekil 5.3. Gaz sensörlerinin proses odasına monte edilmiş görüntüsü.



Şekil 5.4. Gaz sensörlerinin veri toplama kartına bağlı hali.

Atık lastiklerin yakılması için kullanılan plazma kaleminin aktif durumdaki görüntüsü ile plazma oluşumu Şekil 5.5’ de verilmiştir. Plazma kalemi SS304 paslanmaz çelikten yapılmış olup elektrot mesafesi ayarlanabilir düzeydedir. Gaz girişi jak soketi şeklinde kolay giriş çıkışa sahiptir. Plazma kaleminin nozul deliğinin çapı 5 mm değerindedir.



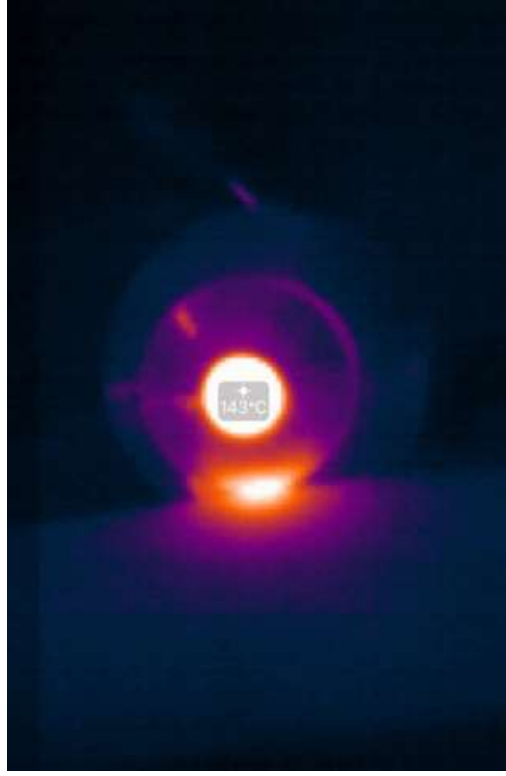
Şekil 5.5. Plazma kaleminin aktif durumdaki görüntüsü ve plazma oluşumu.

Plazma kaleminin sıcaklığının ölçülmesi için IOS arayüzlü ve bağlantı portlu taşınabilir SEEK markalı termal kamera kullanılmıştır. Bu termal kamera 0 – 350 °C ölçüm aralığında ve 206x156 piksel çözünürlüğe sahiptir. Sıcaklık ölçüm hassasiyeti ise 0,1 derecedir.



Şekil 5.6. Termal kameranın genel görüntüsü.

Plazma kaleminin ucunda meydana gelen plazmanın termal kamera ile ölçülen sıcaklığı 143 °C' dir ve görüntüsü Şekil 5.7' de verilmiştir. Bu değer plazma yanma işlemi öncesinde elde edilen değer olup plazma deşarj gazının sıcaklığı hakkında bilgi sahibi olmamızı sağlar.



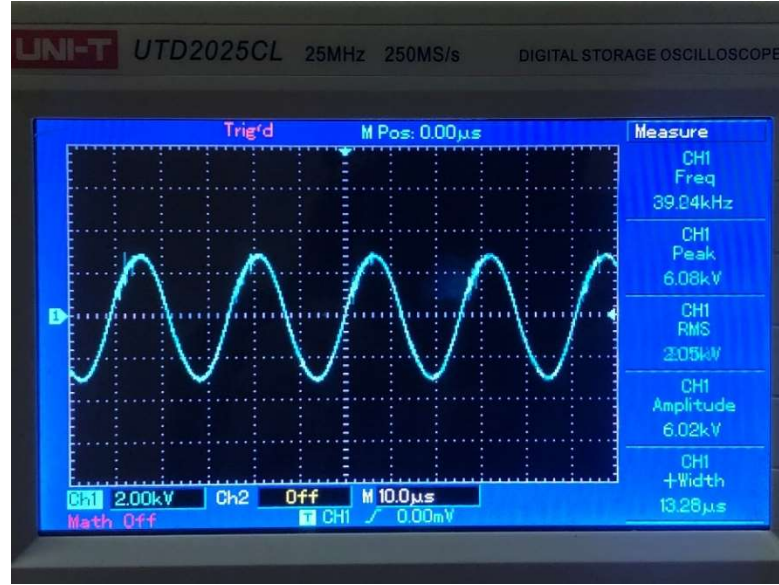
Şekil 5.7. Plazmanın termal kamera ile ölçülen sıcaklığı.

Plazmanın oluşturulması için kullanılan güç kaynağı ünitesi Şekil 5.8’ deki gibidir. Bu güç kaynağı 12 000 V gerilimde ve 800 W çıkış gücüne sahip olup, frekans aralığı ise 0 – 12 kHz aralığındadır. Aşırı akım ve aşırı ısınma koruması mevcuttur. Çıkış dalga formu sinüzoidal formdadır.



Şekil 5.8. Plazmanın oluşturulması için kullanılan güç kaynağı ünitesi.

Çıkış sinyalinin kalibrasyonunda kullanılan osiloskopun ekran görüntüsü Şekil 5.9’ da gösterilmiştir. Osiloskop dijital ekrana sahip olup çift girişi bulunmaktadır ve 0 – 40 MHz arasındaki dalga formlarını ölçebilmektedir. Ayrıca 500 milyon örnek toplama hızına sahiptir.



Şekil 5.9. Osiloskopun ekran görüntüsü.

Güç kaynağının çıkışını ölçmek için kullanılan yüksek voltaj probu ise Şekil 5.10’da gösterildiği gibidir. Bu yüksek voltaj probu 0 – 40 kVolt arasında ac – dc dalga sinyallerini ölçebilmektedir.



Şekil 5.10. Yüksek voltaj probu.

Gaz sensörlerini bir arada tutan ve gazın birikmesini sağlayan proses odasının tasarımı Şekil 5.11’ deki gibidir. İçerisinde seramik battaniyesi ve gaz betonu bulunmaktadır. Gaz betonu yanma odası olarak kullanılır. Seramik battaniyesi ise oluşan yüksek sıcaklıktan dolayı proses odasının yani gaz izolasyon haznesinin zarar görmesini engeller.



Şekil 5.11. Proses odası tasarımı.

Yüksek sıcaklığa dayanıklı gaz betonda yanma odasının oluşturulması ile ilgili çalışma Şekil 5.12’ deki gibidir.



Şekil 5.12. Gaz betonunda yanma odasının oluşturulması.

Atmosferik basınç oksijen plazmasının oluşturulmasında 50 litre hacminde %99,9 yüksek saflıkta oksijen gazı kullanılmış olup Şekil 5.13’de gösterilmiştir.



Şekil 5.13. Yüksek saflıktaki oksijen gazı.

Gaz akışının ölçülmesi için kullanılan 0 – 5 lt/dk arasında ölçüm ve kontrol yapabilen manuel ayarlı debimetre ise Şekil 5.14’ de verilmiştir.



Şekil 5.14. Gaz akışının ölçülmesi için kullanılan ayarlı debimetre.

Kesilen lastik parçalarının kütlelerinin ölçülmesinde kullanılan dijital hassas terazi 0,01 gram hassasiyete ve maksimum 300 gram ölçüm yapabilme kapasitesine sahip olup Şekil 5.15' de gösterilmiştir.



Şekil 5.15. Dijital hassas terazi.

İlk kurulumda mevcut oda sıcaklığını ölçmek için K tipi çift termokupul girişi ile dijital ekrana sahip sıcaklık ölçüm cihazı kullanılmış olup Şekil 5.16' da verilmiştir. CEM DT613K marka termokupl ölçüm cihazı; -200°C ile +1372°C sıcaklık ölçüm aralığına, $\pm 1^\circ\text{C}$ sıcaklık hassasiyetine ve $0,1^\circ\text{C}$ çözünürlüğe sahiptir.



Şekil 5. 16. İlk kurulumdaki mevcut oda sıcaklığı.

Kesilmiş lastik parçaları proses odasının içerisindeki gaz betondan yapılan yanma haznesine yerleştirilmiş ve alüminyum kompozit plaka ile proses odasının üzeri kapatılmıştır. Plazma kalemi alüminyum kompozit plakanın üzerinde açılan deliğe yanma haznesini görecek şekilde yerleştirilmiştir. Gaz sensörleri ile veri toplama kartı proses odasına yerleştirildikten sonra veri analizlerinin aktarımı için bir bilgisayara bağlantısı yapılmıştır. Plazma işlemi başlatılmadan önceki deney düzeneğinin görüntüsü Şekil 5.17’ de gösterilmiştir.



Şekil 5.17. Plazma işlemi başlatılmadan önceki düzenek görüntüsü.

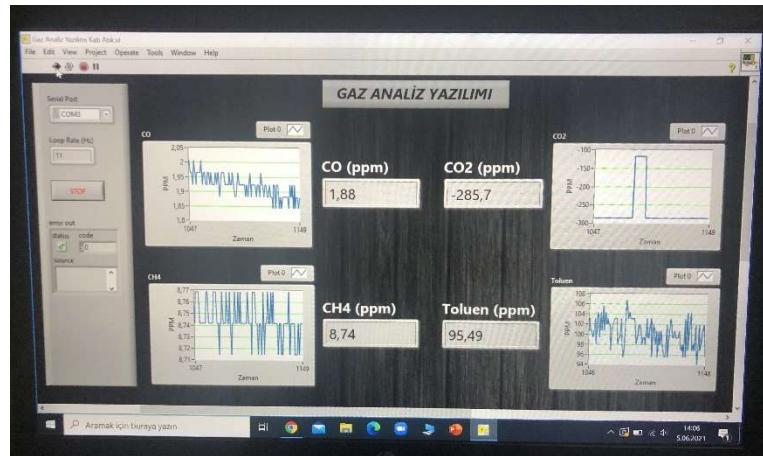
Atmosferik basınçtaki oksijen plazması aktif hale getirildikten sonra bir (1) dakika boyunca plazma yanma işlemi sürdürülmüştür. Daha sonra plazma kaleminin gücü devre dışı bırakılmış yani plazma kaynağı kapatılmıştır. Daha sonra plazma kalemi sistemden çıkarılarak alüminyum kompozit plaka üzerindeki delik ateş tuğlası ile kapatılmıştır. Gaz sızdırmasını önlemek amacıyla ateş tuğlasının ve alüminyum kompozit plakanın etrafı kauçuk bantlar ile izolasyonu sağlanmıştır.

Bu işlemden sonra beş (5) dakika süresince proses odasından gaz sensörleri verileri toplayarak LabView sinyal işleme programı ile bilgisayara aktarmıştır. Gaz sensörlerinin aktif olduğu bir görüntü Şekil 5.18’ de gösterilmiştir.



Şekil 5.18. Gaz sensörlerinin aktif olduğu bir görüntü.

Gaz sensörlerinden gelen sinyallerin analiz edilmesi için demo sürümü olan LabView sinyal işleme programı kullanılmıştır. İncelenen gazların analizleri ile ilgili genel bir görüntü ise Şekil 5.19’ da gösterilmiştir.



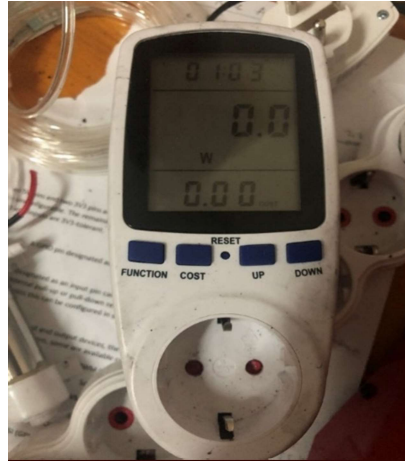
Şekil 5.19. Gaz analiz yazılımının genel bir görüntüsü.

Oksijenin iyonlaşmasından dolayı oluşan oksijen plazmasının belirgin olması için karanlık ortamdaki görüntüsü normal bir telefon kamerası ile görüntülenmiş ve bu görüntü Şekil 5. 20' de verilmiştir.



Şekil 5.20. Oksijen plazmasının karanlıkta çekilmiş görüntüsü.

Yapılan deneyler esnasında ne kadarlık bir güç harcandığının tespit edilebilmesi yani plazma oluşumu esnasında güç kaynağının şebekeden çektiği gücün ölçülmesi için kullanılan bir güç metre kullanılmış olup bu güç metre cihazı Şekil 5.21' deki gibidir.



Şekil 5.21. Plazma güç kaynağının gücünün ölçülmesinde kullanılan güç metre.

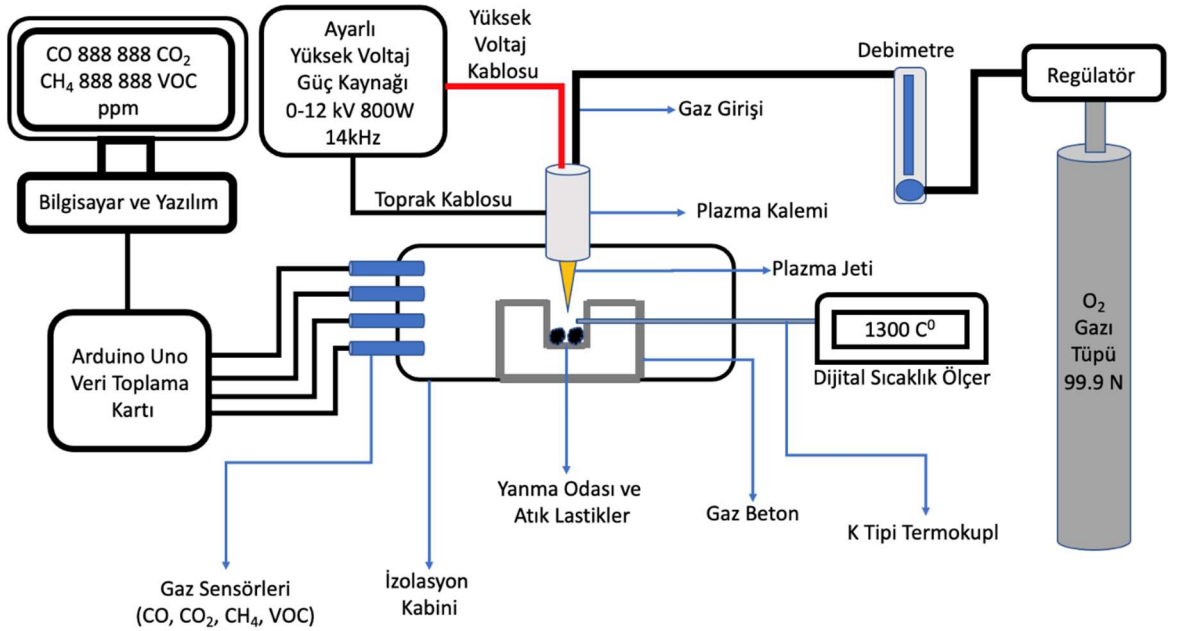
Plazma işlemi ile yanma sonucunda elde edilen verilerin değerlendirilmesinde normal yanma işlemi sonuçları kullanılmıştır. Bunun için aşağıda görüntüsü verilen normal yanma işlemi yaklaşık olarak 500°C değerinde gerçekleştirilmiştir. Bu işlem için deney düzeneğinin bulunduğu ortama 5 lt/dk yüksek saflıkta oksijen salınmıştır.

Atmosferik basınç plazma işlemi sonucundaki gazların analiz edilmesindeki gibi normal yanma işleminde de beş dakika boyunca gaz sensörlerinden veri aktarımı yapılmıştır. Normal yanma görüntüsü Şekil 5.22’ deki gibidir.



Şekil 5.22. Normal yanma işleminin gerçekleştirilmesi.

Son olarak tarafımızdan dizayn edilen deney düzeneğinin genel bir şeması daha net bir olarak tasvir edilmesi açısından Şekil 5.23’de verilmiştir.



Şekil 5.23. Deney düzeneği tasarımı.

BÖLÜM 6

ARAŞTIRMA BULGULARI

Katı atık grubuna giren ömrünü tamamlamış lastiklerin atmosferik basınç plazma teknolojisi ile işlenmesi sonucunda açığa çıkan gazların emisyon değerleri detaylı olarak bu bölümde verilmiştir. Aynı zamanda normal yanma işlemi ile ömrünü tamamlamış atık lastiklerden açığa çıkan gazların emisyon değerleri de sunulmuştur.

Plazma teknolojisi ile numunenin tamamen yakılarak gazlaştırılması bir (1) dakikada olurken normal yanma işleminde bu süre yaklaşık beş (5) dakikada yapılmıştır.

Hem plazma işlemi hem de normal yanma işleminde 5 lt/dk debisinde yüksek saflıkta oksijen gazı proses odasına gönderilmiştir. Plazma işleminde deşarj gazı olarak yüksek saflıkta oksijenin kullanılmasının temel sebepleri tek başına tehlikesiz olması, ekonomik olması ve yakıcı özelliğe sahip olması olarak sıralanabilir.

Plazma kalemi aracılığıyla bu oksijen gazı yanma haznesine oksijen plazması olarak iletilmiştir. Normal yanmanın gerçekleşebilmesi için ise bu oksijen gazı proses odasına doğrudan salınmıştır.

Yanma odasının sıcaklığını doğrudan okuyan bir sıcaklık ölçer probu ile atmosferik termal plazma işleminin 1300°C sıcaklığında, normal yanma işleminin ise 500°C sıcaklıkta olduğu gözlenmiştir.

Yapılan deneysel çalışmalarda gaz sensörlerinin doygunluğuna ulaşabilmesi ortalama 5 dk olarak tespit edildiğinden hem plazma işlemi hem de normal yanma işleminde veri toplama süresi 5 dk üzerinden yapılmıştır. Gaz sensörleri verileri toplayarak LabView sinyal işleme programı ile bilgisayara aktarmıştır. Elde edilen bütün veriler dakika başına ppm değeri olarak sunulmuştur.

Atmosferik basınç oksijen plazma işlemindeki deneysel parametreler ve ilgili değerleri Çizelge 6.1’de sunulmuştur.

Çizelge 6.1. Deneysel parametreleri ve değerleri.

Deneysel Parametreleri	Değerler
Güç	120 W
Voltaj	12 kV
Frekans	14 kHz
Gaz Akışı	5 lt/dk
Deşarj Gazı	%99,99 yüksek saflıkta Oksijen
Yanma Odası Sıcaklığı	1300°C

Yanma haznesi içerisinde gerçekleşecek kimyasal reaksiyonlar genel olarak aşağıdaki gibidir (Mountouris vd., 2006):

Gazlaştırma yükseltgenme reaksiyonu – endotermik;



Boudouard eşitliği – endotermik;



Metan oluşum reaksiyonu – ekzotermik;



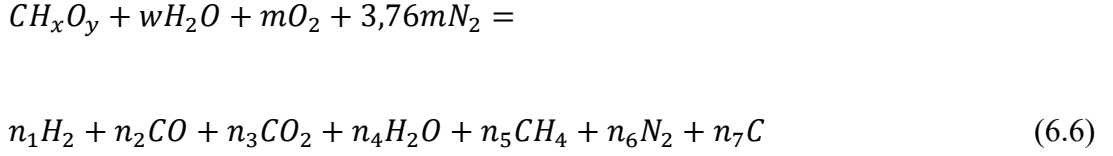
Metan bozunum reaksiyonu – endotermik;



Su-gaz dönüşüm reaksiyonu – ekzotermik;



Atık malzeme nihai analizi genel olarak $C_xH_yO_z$ ile tanımlanır ve küresel gazlaştırma reaksiyonu aşağıdaki gibi yazılır:



Burada, w ve m katsayıları sırasıyla atık maddenin kmol başına su miktarı ve katı atığın kmol başına oksijen miktarıdır. Ayrıca, $n_1, n_2, n_3, n_4, n_5, n_6$ ve n_7 yine kmol cinsinden üretilen gazların ve C – kurumun katsayılarıdır.

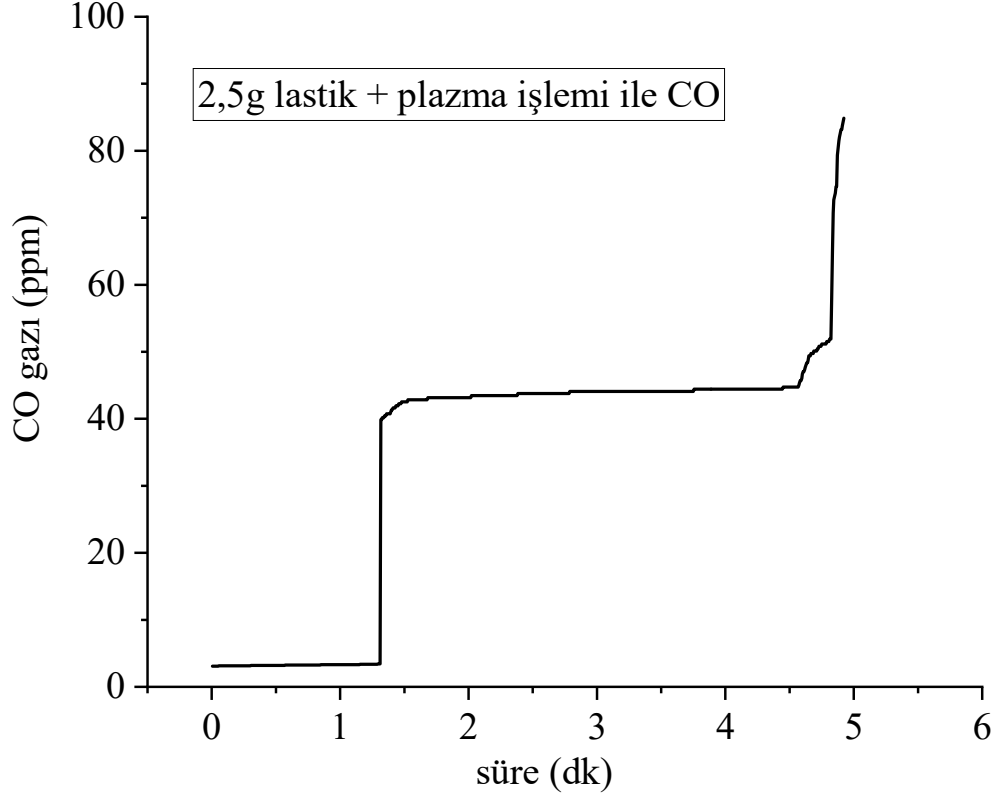
Sistemin dengesi hesaplanmak istendiğinde $CH_4, CO, CO_2, H_2, H_2O$ ve C (kurum) bileşenleri dikkate alınır. Ayrıca sistem analizi, eşzamanlı dengenin C, H ve O için üç kısmi kütle denklikleri ve bir ısı denklığı ile üç bağımsız reaksiyon tarafından tanımladığını göstermektedir. Üretilen gazların entalpi ve özgül ısı değişimleri kimyasal reaksiyonların denge sabitlerinin yanı sıra gazlaştırma sıcaklığının bir fonksiyonu olarak ifade edilir.

Termodinamik dengeye göre plazma gazlaştırma işlemi

- ✓ Ana bölüme sağlanan enerjiyi, yani elektriği,
- ✓ Temel gazlaştırma gaz ürünlerinin oluşumunu
- ✓ Katı karbon, yani kurum parçacıklarının kalma olasılığını

içerir. Bu çalışma ile temel gazlaştırma gaz ürünlerinin gaz sensörleri aracılığıyla tespit edilmesi 2,5 gram ve 3 gram kütleli atık parçalar için 40 kez tekrarlanarak yapıldı. Aynı işlemler 3 gram kütleli atık parçası için normal yanma ile tekrarlandı. Ayrıca atmosferik basınç oksijen plazması ile katı atığın gazlaştırma işlemi neticesinde yanma haznesinde biriken kristalleşmiş kurum parçacıkları da tespit edilerek görüntülendi.

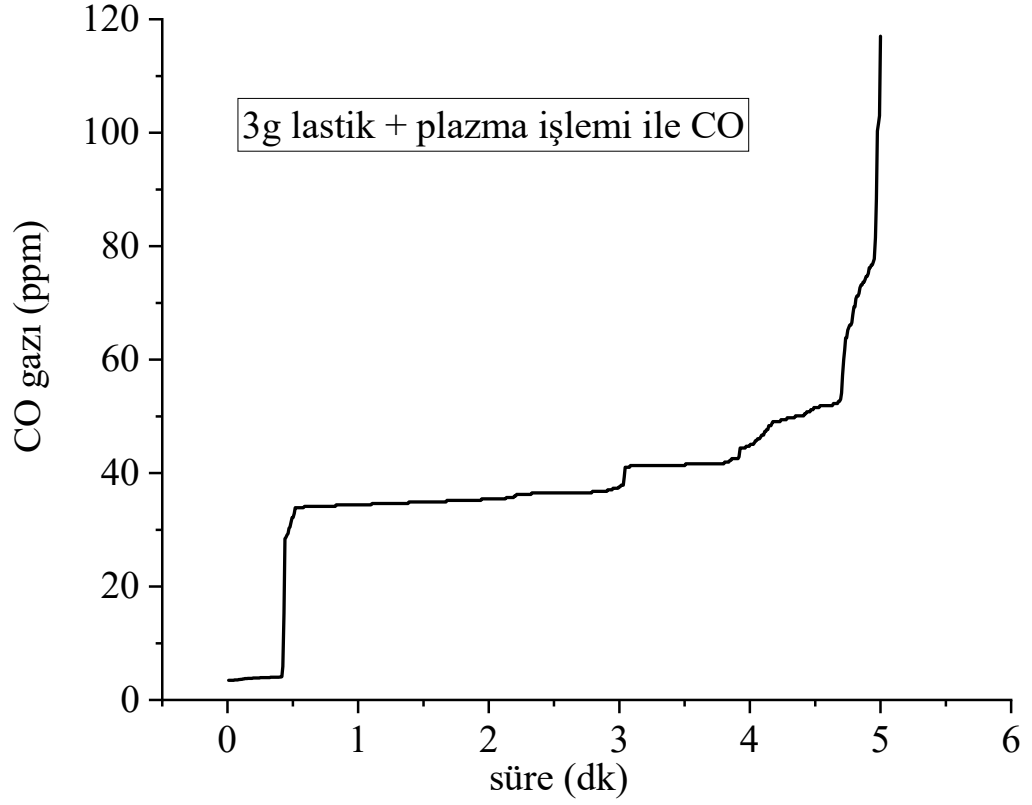
2,5 gram kütleli lastik parçasının %99,99 yüksek saflıkta oksijen gazı ile 1300°C yanma sıcaklığında elde edilen CO gaz emisyon verileri dakika başına ppm değeri olarak Şekil 6.1’ de gösterilmiştir.



Şekil 6.1. Plazma işlemi ile 2,5 g kütleli atık lastikten açığa çıkan CO gazı.

Ortalama 1,2 dk plazma kalemi aracılığıyla yanma işlemi başlatıldıktan hemen sonra 40 ppm değerinde CO gazı ölçülmüş olup 5 dk süresince doygunluğa ulaşan gaz sensörleri 84 ppm değerinde CO gaz emisyonu ölçmüştür.

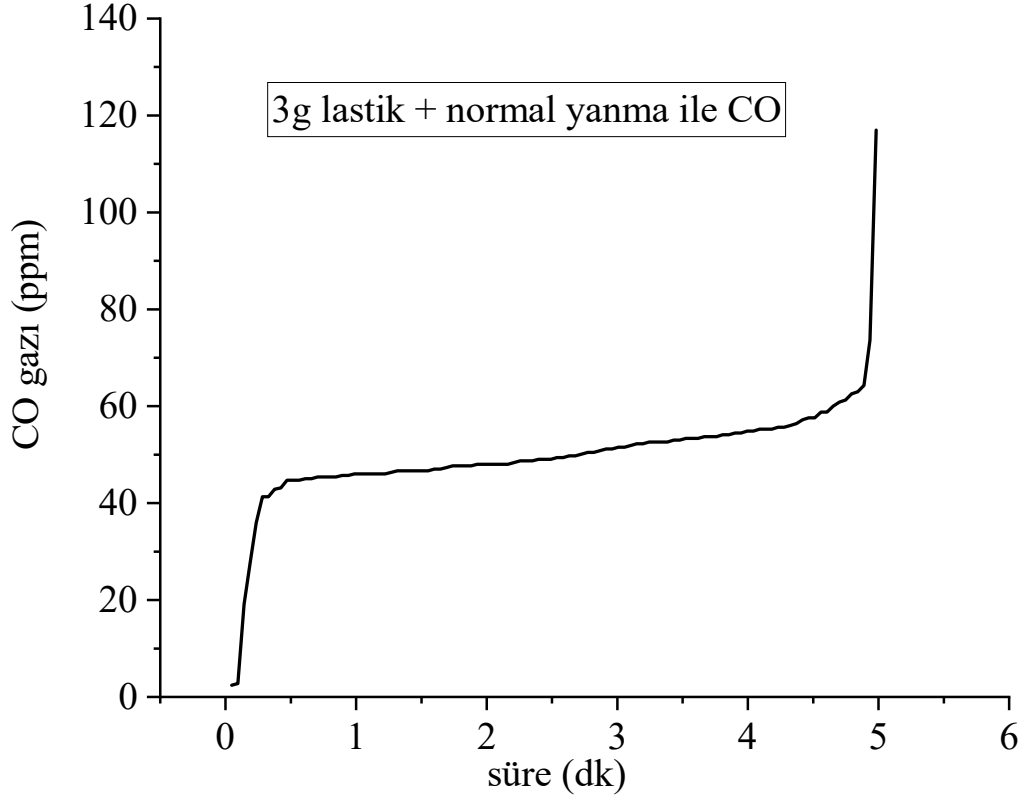
3 gram kütleli lastik parçasının %99,99 yüksek saflıkta oksijen gazı ile 1300°C yanma sıcaklığında elde edilen CO gaz emisyon verileri dakika başına ppm değeri olarak Şekil 6.2’ de gösterilmiştir. Ortalama 0,5 dk plazma kalemi aracılığıyla yanma işlemi başlatıldıktan hemen sonra 38 ppm değerinde CO gazı ölçülmüş olup 5 dk süresince doygunluğa ulaşan gaz sensörleri 117 ppm değerinde CO gaz emisyonu ölçmüştür.



Şekil 6.2. Plazma işleme ile 3 g kütleli atık lastikten açığa çıkan CO gazı.

3 gram lastik parçasındaki CO gaz emisyonunun miktarının 2,5 gram lastik parçasına göre daha fazla ölçülmesi kütle miktarı ile orantılı bir gaz emisyonu olduğunu göstermektedir. Plazma gazlaştırma işleminde kullanılan gaz sensörlerinin algılama zamanının farklılık göstermesi beklenen bir durumdur.

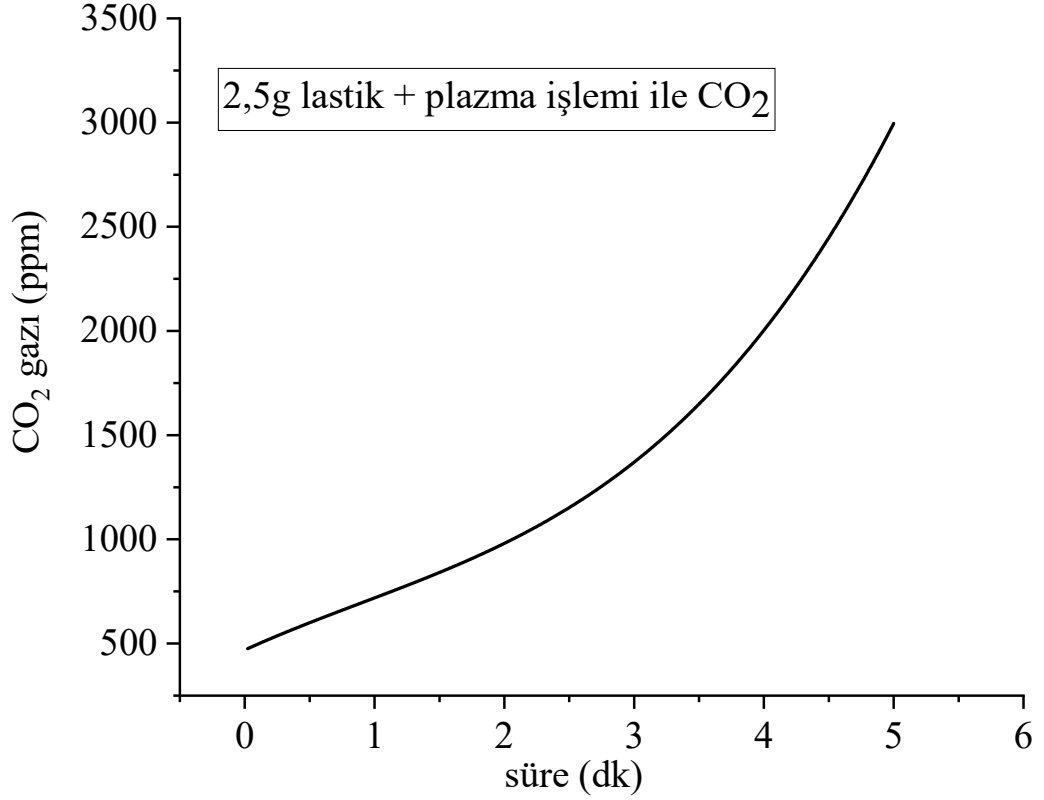
3 gram kütleli lastik parçasının 500°C yanma sıcaklığında elde edilen CO gaz emisyon verileri dakika başına ppm değeri olarak Şekil 6.3' de gösterilmiştir. Ortalama 0,2 dk normal yanma işlemi başlatıldıktan hemen sonra 42 ppm değerinde CO gazı ölçülmüş olup 5 dk süresince doygunluğa ulaşan gaz sensörleri 120 ppm değerinde CO gaz emisyonu ölçmüştür.



Şekil 6.3. Normal yanma işlemi ile 3 g kütleli atık lastikten açığa çıkan CO gazı.

CO gazı eksik yanma ürünü olduğu için az miktarda da olsa plazma gazlaştırma işlemine göre daha fazla çıkmıştır, yani normal yanmada eksik yanma ürün miktarı daha fazladır.

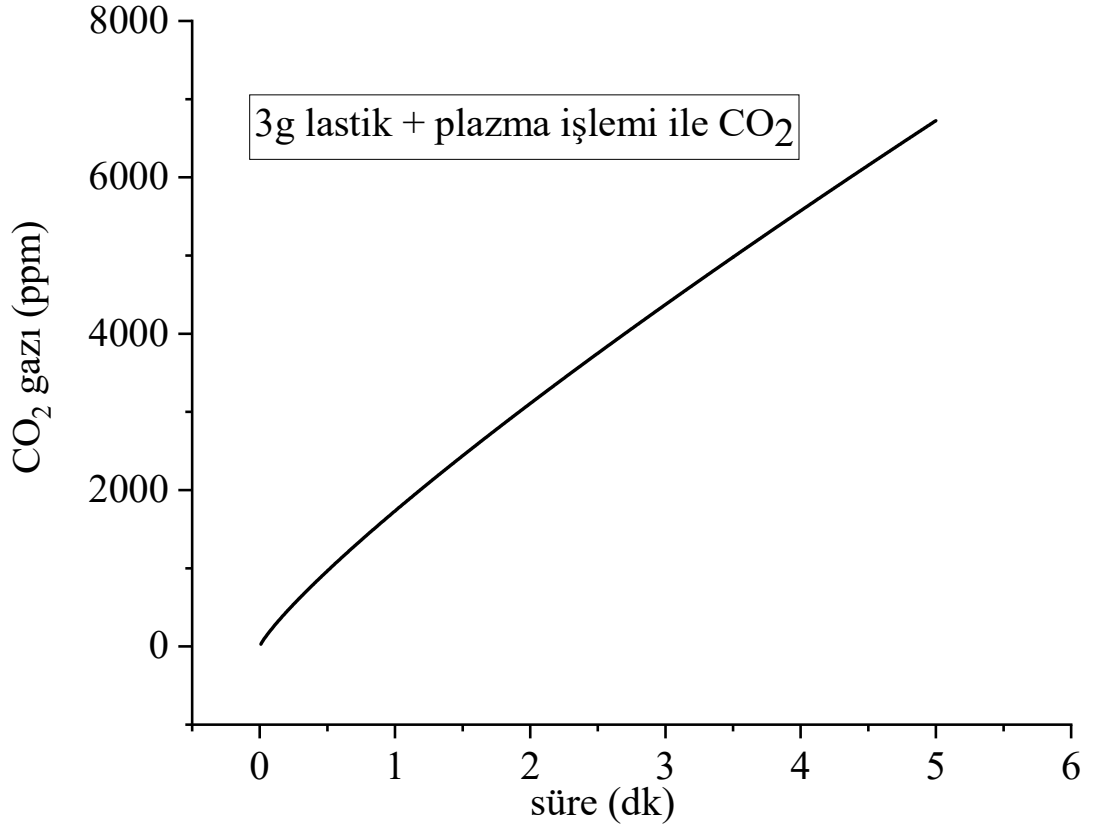
2,5 gram kütleli lastik parçasının %99,99 yüksek saflıkta oksijen gazı ile 1300°C yanma sıcaklığında elde edilen CO₂ gaz emisyon verileri dakika başına ppm değeri olarak Şekil 6.4' de gösterilmiştir. Plazma kalemi aracılığıyla yanma işlemi başlatıldıktan hemen sonra 500 ppm değerinde CO₂ gazı ölçülmüş olup 5 dk süresince doygunluğa ulaşan gaz sensörleri 2730 ppm değerinde CO₂ gaz emisyonu ölçmüştür.



Şekil 6.4. Plazma işleme ile 2,5 g kütleli atık lastikten açığa çıkan CO₂ gazı.

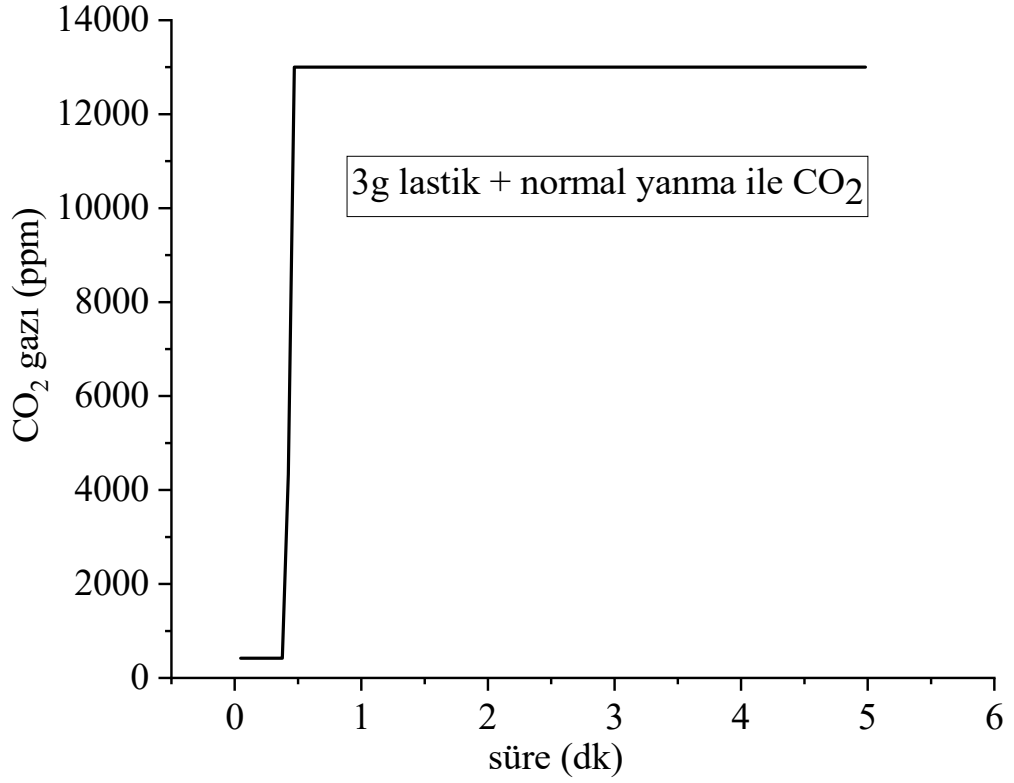
3 gram kütleli lastik parçasının %99,99 yüksek saflıkta oksijen gazı ile 1300°C yanma sıcaklığında elde edilen CO₂ gaz emisyon verileri dakika başına ppm değeri olarak Şekil 6.5’ de gösterilmiştir. Plazma kalemi aracılığıyla yanma işlemi başlatıldıktan hemen sonra 5 dk süresince doygunluğa ulaşan gaz sensörleri yaklaşık 6725 ppm değerinde CO₂ gaz emisyonu ölçmüştür.

3 gram lastik parçasındaki CO₂ gaz emisyonun miktarının 2,5 gram lastik parçasına göre daha fazla ölçülmesi kütle miktarı ile orantılı bir gaz emisyonu olduğunu gösterir. Plazma gazlaştırma işleminde kullanılan gaz sensörlerinin algılama zamanının farklılık göstermesi beklenen bir durumdur.



Şekil 6.5. Plazma işleme ile 3 g kütleli atık lastikten açığa çıkan CO₂ gazı.

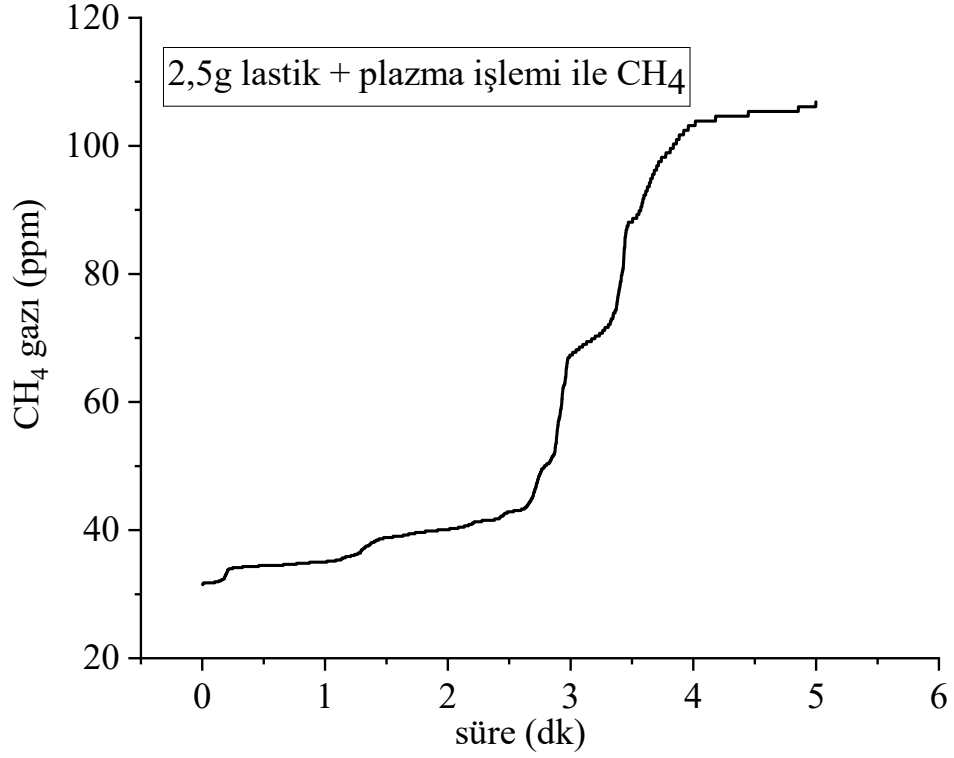
3 gram kütleli lastik parçasının 500°C yanma sıcaklığında elde edilen CO₂ gaz emisyon verileri dakika başına ppm değeri olarak Şekil 6.6' de gösterilmiştir. Normal yanma işlemi başlatıldıktan hemen sonra 13000 ppm değerinde CO₂ gazı ölçülmüş olup 5 dk süresince doygunluğa ulaşan gaz sensörleri bu değerde sabit kalmıştır.



Şekil 6.6. Normal yanma işlemi ile 3 g kütleli atık lastikten açığa çıkan CO₂ gazı.

3 gram kütleli lastik parçalarının plazma işlemi ve normal yanma ile ölçülen gaz emisyon değerleri karşılaştırıldığında plazma gazlaştırma işlemi ile atık lastiklerin bertarafının ne kadar elverişli olduğu görülmektedir.

2,5 gram kütleli lastik parçasının %99,99 yüksek saflıkta oksijen gazı ile 1300°C yanma sıcaklığında elde edilen metan gaz emisyon verileri dakika başına ppm değeri olarak Şekil 6.7' de gösterilmiştir.



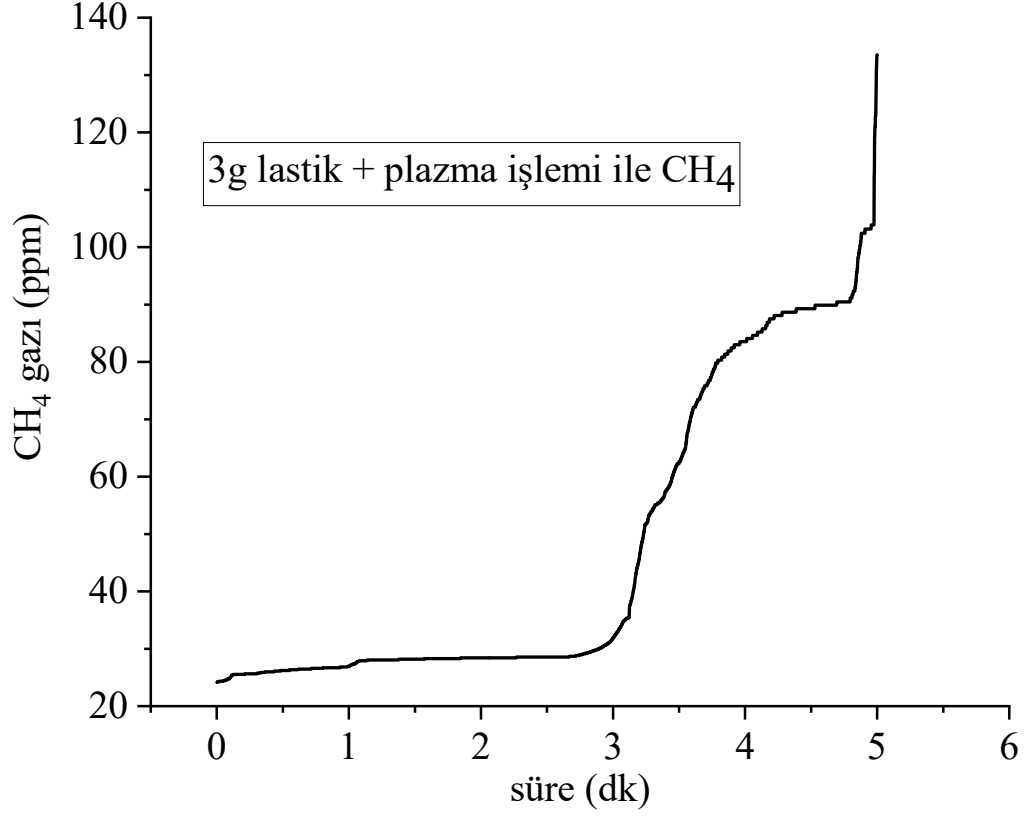
Şekil 6.7. Plazma işlemleri ile 2,5 g kütleli atık lastikten açığa çıkan CH₄ gazı.

Plazma kalemi aracılığıyla yanma işlemleri başlatıldıktan hemen sonra 30 ppm değerinde metan gazı ölçülmüş olup 3 dk süresince gaz sensörleri yaklaşık 40 ppm değerine ve 4 dk süresince doygunluğa ulaşan gaz sensörleri 106 ppm değerinde metan gaz emisyonu ölçmüş ve son 1 dk' da bu değerinde sabit kalmıştır.

3 gram kütleli lastik parçasının %99,99 yüksek saflıkta oksijen gazı ile 1300°C yanma sıcaklığında elde edilen metan gaz emisyon verileri dakika başına ppm değeri olarak Şekil 6.8' de gösterilmiştir.

Plazma kalemi aracılığıyla yanma işlemleri başlatıldıktan hemen sonra 22 ppm değerinde metan gazı ölçülmüş ve bu değer 3 dk boyunca sabit kalmıştır. 5 dk süresince doygunluğa ulaşan gaz sensörleri yaklaşık 133 ppm değerinde metan gaz emisyonu ölçmüştür. 2,5 gram ve 3 gram kütleli lastik parçalarının plazma işlemleri ile

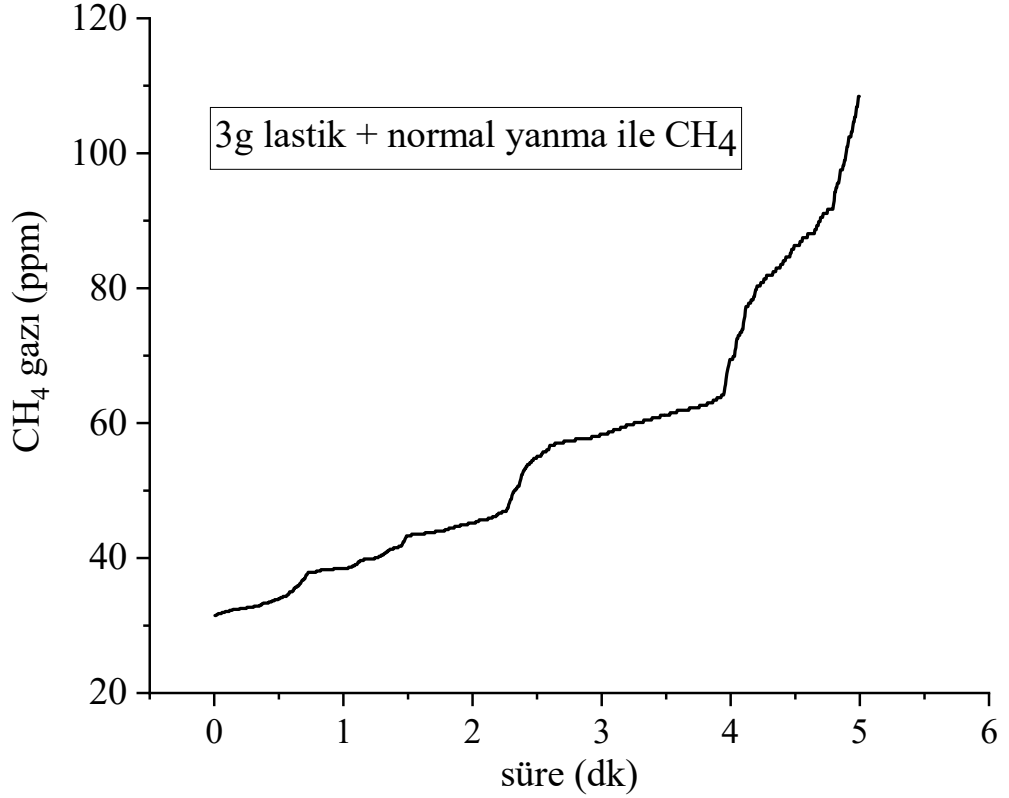
gazlaştırılmasında kütle miktarı artışı ile gaz emisyon değerinin orantılı olduğu gözlenmiştir.



Şekil 6.8. Plazma işlemi ile 3 g kütleli atık lastikten açığa çıkan CH₄ gazı.

3 gram kütleli lastik parçasının 500°C yanma sıcaklığında elde edilen metan gaz emisyon verileri dakika başına ppm değeri olarak Şekil 6.9’ da gösterilmiştir. Normal yanma işlemi başlatıldıktan hemen sonra 30 ppm değerinde metan gaz emisyonu ölçülmüş olup yaklaşık olarak lineer bir artış göstererek 5 dk süresince doygunluğa ulaşan gaz sensörleri 108 ppm değerini ölçmüştür.

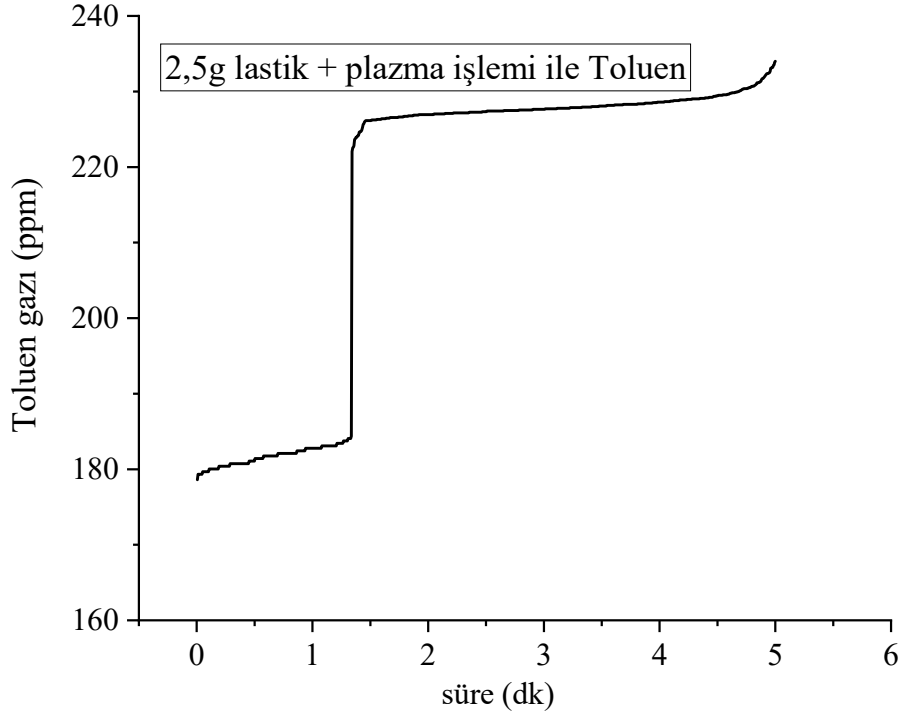
3 gram kütleli lastik parçasının plazma işlemi ve normal yanma ile ölçülen gaz emisyon değerleri karşılaştırıldığında plazma gazlaştırma işleminde metan gaz emisyon değeri biraz daha fazladır, yani oksidasyondan dolayı normal yanma işleminde daha az hidrokarbon üretildiği görülmektedir.



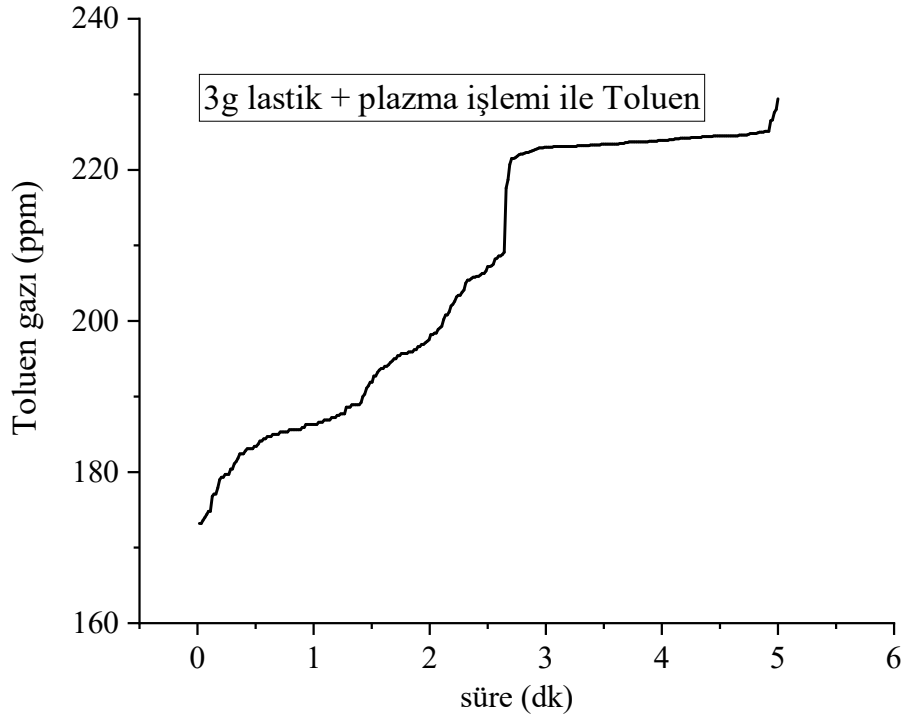
Şekil 6.9. Normal yanma işlemi ile 3 g kütleli atık lastikten açığa çıkan CH₄ gazı.

2,5 gram kütleli lastik parçasının %99,99 yüksek saflıkta oksijen gazı ile 1300°C yanma sıcaklığında elde edilen tolüen gaz emisyon verileri dakika başına ppm değeri olarak Şekil 6.10' da gösterilmiştir. Plazma kalemi aracılığıyla yanma işlemi başlatıldıktan hemen sonra 180 ppm değerinde tolüen gazı ölçülmüş olup 5 dk süresince gaz sensörlerinin 234 ppm değerinde doygunluğa ulaştığı gözlenmiştir.

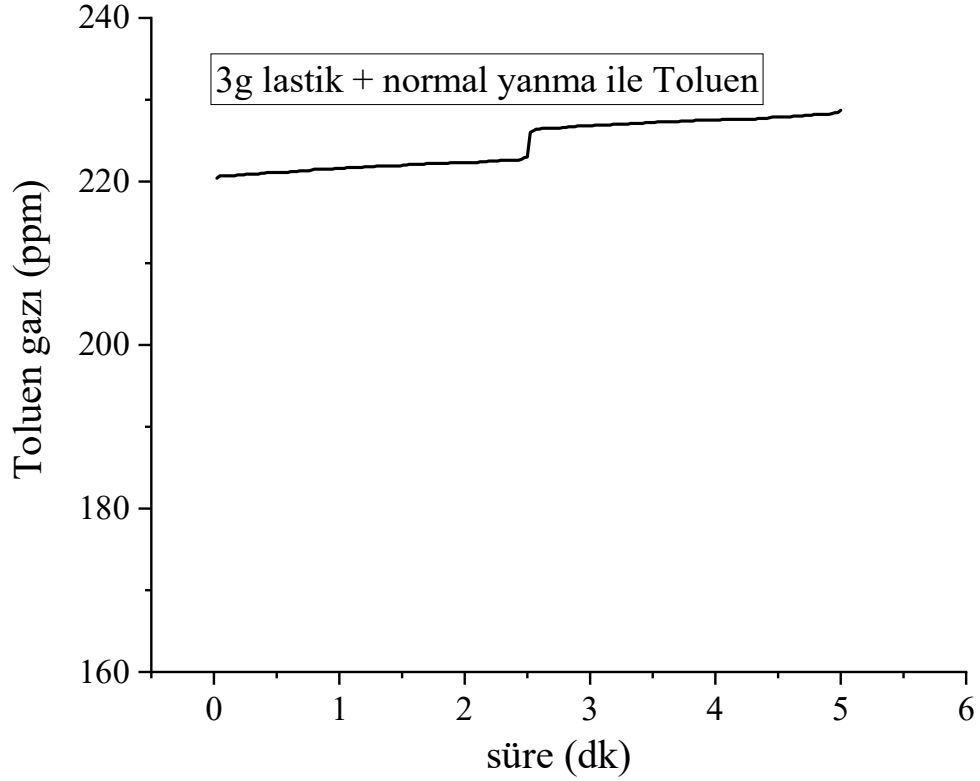
3 gram kütleli lastik parçasının %99,99 yüksek saflıkta oksijen gazı ile 1300°C yanma sıcaklığında elde edilen tolüen gaz emisyon verileri dakika başına ppm değeri olarak Şekil 6.11' de gösterilmiştir. Plazma kalemi aracılığıyla yanma işlemi başlatıldıktan hemen sonra 170 ppm değerinde tolüen gazı ölçülmüş ve 5 dk süresince doygunluğa ulaşan gaz sensörleri yaklaşık 235 ppm değerinde tolüen gaz emisyonu ölçmüştür.



Şekil 6.10. Plazma işlemi ile 2,5 g kütleli atık lastikten açığa çıkan toluen gazı.



Şekil 6.11. Plazma işlemi ile 3 g kütleli atık lastikten açığa çıkan toluen gazı.



Şekil 6.12. Normal yanma işlemi ile 3 g kütleli atık lastikten açığa çıkan tolüen gazı.

3 gram kütleli lastik parçasının 500°C yanma sıcaklığında elde edilen tolüen gaz emisyon verileri dakika başına ppm değeri olarak Şekil 6.12’ de gösterilmiştir. Normal yanma işlemi başlatıldıktan hemen sonra 220 ppm değerinde tolüen gaz emisyonu ölçülmüş olup 5 dk süresince doygunluğa ulaşan gaz sensörleri 229 ppm değerinde tolüen gazı ölçmüştür.

Hem 2,5 gram ve 3 gram kütleli lastik parçalarının plazma işlemi ile gazlaştırılmasında hem de normal yanma işleminde tolüen gaz emisyon değerleri yaklaşık olarak aynı kalmıştır.

Atmosferik termal plazma işlemi ve normal yanma işlemi sonucunda belirlenen kütle miktarlarında açığa çıkan CO, CO₂, CH₄ ve C₇H₈ gazlarının dakika başına ppm emisyon değerleri Çizelge 6.2’ de verilmiştir.

Çizelge 6.2. Plazma ve normal yanma işleminde oluşan gazların dakika başına ppm değerleri.

Oluşan Gazlar	2,5 g Lastik + Plazma (ppm)	3 g Lastik + Plazma (ppm)	3 g Lastik + Normal (ppm)
CO	84,85	117	120
CO ₂	2730,55	6725,27	13000
CH ₄	106,87	133,50	108,42
C ₇ H ₈	234	235	229

Çizelge 6.2' den görüldüğü gibi 3 gram kütleli ömrünü tamamlamış atık lastik parçasının plazma işlemi sonucunda elde edilen verileri ile normal yanma işlemine göre değerlendirildiğinde CO gaz emisyonunun değerinin yaklaşık olarak birbirine yakın olduğu görülmektedir.

CO₂ gaz emisyon değerlerinde belirgin bir şekilde farklılık gözlenmiştir. Plazma işleminin sonucunda açığa çıkan CO₂ gaz emisyon değeri normal yanma işlemindeki verinin yaklaşık 1,94 de biri kadardır. Bilindiği gibi CO₂ emisyonu sera gazı emisyonları içerisinde en yüksek paya sahip olup, sera gazı bileşikler atmosferde ısı tutma özelliğinden dolayı açığa çıkan sera gazı emisyonları atmosferdeki sıcaklığı arttırmaktadır. Ömrünü tamamlamış atık lastiklerin mevcut bertaraf edilmesi ile açığa çıkan CO₂ gaz emisyonunda oksijen plazması işleminin ne kadar elverişli olduğu yapılan deneysel çalışmamızda görülmektedir.

Termodinamiğin temel prensiplerine göre enerji daima korunur. Bu nedenle plazma işlemi ile elde edilen verilerde normal yanma işlemine göre metan gazının daha fazla oluşmasının nedeni CO₂ gaz emisyonunun normal yanma işlemine göre daha az elde edilmesi yani kütlelerin içerisinde bulunan karbon atomlarının metan gazına dönüşmesi olarak ifade edebiliriz.

Plazma işlemi yanma reaksiyonunun hızını artırıcı bir etkiye sahiptir ve plazma işleminde ömrünü tamamlamış atık lastik yüksek sıcaklığa bir anda maruz kaldığından hızlı bir şekilde uçucu organik bileşik haline dönüşmektedir. Uçucu organik bileşiklerden biri olan toluen gazı bu nedenle normal yanma işlemine göre daha hızlı

ve eser miktarda da olsa daha fazla olmaktadır. Plazma işlemi aslında reaksiyon kinetiğini artırmakta ve katalizör etkisi göstermektedir.

Normal yanma ve oksijen plazması ile yanma işlemi sonucunda oluşan küllerin görüntüsü Şekil 6.13 ve Şekil 6.14’ de gösterildiği gibidir. Şekil 6.13’ den görüldüğü gibi normal yanma işleminde oluşan kül yanma haznesinin içerisinde toplu halde bulunmaktadır.



Şekil 6.13. Normal yanma işlemi sonucu oluşan kül.

Ancak, Şekil 6.14’ deki plazma işlemi sonucunda oluşan külün yanma haznesindeki gaz betonunun etrafına püskürtülmüş bir şekilde serpilmiş olduğu gözlenmiştir. Bunun nedeni plazma işleminin reaksiyonu hızlandırması ile yanma işlemindeki gazlaştırmada açığa çıkan metan gazının oksijen plazması ile içeride yeniden yanması ve oluşan basınçtan dolayı küllerin yanma haznesinin etrafına saçılması olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 6.14. Oksijen plazması ile yanma sonucu oluşan kül.

Normal yanma sonucunda yine bir katı atık olan kül oluşumu daha fazladır. Plazma gazlaştırma işleminde ise oluşan curüf miktarı oldukça az miktarda bir hacim kaplar.

BÖLÜM 7

TARTIŞMA VE SONUÇ

Ömrünü tamamlamış atık lastiklerin artışı hem ülkemiz için hem de diğer ülkeler için en önemli çevresel sorunların başında gelir. Katı atık yönetiminde birçok klasik bertaraf yöntemi bulunmaktadır. Ancak, doğaya zarar vermeyen insan sağlığı için problem teşkil etmeyen sürdürülebilir çözümlerden biri olan plazma teknolojisi ömrünü tamamlamış atık lastiklerin bertarafında son yıllardaki en uygun yöntemlerden biridir.

Plazma piroliz ve plazma gazlaştırma teknikleri, lastik atıklarını bertaraf edebilir ve yakıt olarak kullanılacak yanıcı gazlar üretebilir ve daha yüksek moleküler aromatik bileşiklerin oluşumunu önleyebilir.

Plazma gazlaştırma ile ilgili literatür verilerinin çoğu tehlikeli atıklar, plastik atıklar, biyomedikal atıklara dayanırken, lastik atıklarının plazma gazlaştırılmasına ilişkin veriler neredeyse hiç bulunmamaktadır. Dolayısıyla bu çalışma, lastik atıklarının plazma gazlaştırması ve normal yanma işlemini inceleyerek her iki işlemde de gaz emisyon değerlerini karşılaştırmaktır.

Plazma gazlaştırma işlemi sentez gazının oluşumunu artırır, böylece plazma piroliz işlemine kıyasla katı kömür verimini düşürürken gaz ürün verimini artırır. Plazma gazlaştırma işlemi tarafından üretilen sentez gazı, plazma pirolizinden daha yüksek bir enerji değerine ve verimliliğe sahiptir. Her iki işlem de yakıt olarak kullanılacak sentez gazı üretme potansiyeline sahiptir. Ancak, Gloria vd. (2019) tarafından yapılan çalışmada sentez gazı analizleri plazma gazlaştırma işleminde plazma pirolizine kıyasla daha yüksek miktarda CO ve H₂ elde edildiği ve plazma gazlaştırmasında soğuk gaz verimliliğinde %8,18 gibi belirgin bir artış olduğu yani plazma gazlaştırma işleminin plazma pirolizinden daha iyi bir alternatif olduğunu gösterilmiştir.

Piroliz, oksijen yokluğunda yüksek sıcaklıklarda termal bozunma yöntemidir. SO_x , NO_x gibi çok sayıda zehirli gaz üreten yakmanın aksine, piroliz çevre dostu bir yöntemdir. Lastik pirolizi ile üretilen gazlar genel olarak; karbon monoksit (CO), karbon dioksit (CO_2), hidrojen sülfür (H_2S), metan (CH_4), etan (C_2H_6), eten (C_2H_4), propan (C_3H_8), propen (C_3H_6), bütan (C_4H_{10}), büten (C_4H_8) ve bütadien (C_4H_6) olarak sıralanabilir. Üretilen bu gazlar, proses ısını sağlamak için dahili olarak yakıt olarak da kullanılabilir. Piroliz, katı kömür (ağırlıkça %30-40), sıvı kalıntı (ağırlıkça %40-60) ve gazlar (ağırlıkça %5-20) üretir. Plazma piroliz işleminden sonra katı kömür, atık su arıtımında aktif karbon olarak kullanılabilir.

Aynı zamanda lastik atıkları oksijen varlığında da bozunabilir. Bu işleme ise plazma gazlaştırma denir. Gazlaştırma, oksijenin substoikiometrik bir oranda beslenmesi nedeniyle maddenin kısmi yanma işlemidir. Bu işlem gaz verimini artırır ve gazlaştırma çevriminde dahili olarak kullanılabilen veya kömürle çalışan enerji santrallerinde ateşleme yağlarının yerine kullanılabilen daha yüksek enerjili değere sahip yakıt üretir. Gazlaştırma ve piroliz işlemi, bir güç kaynağı olarak plazma kullanılarak daha da geliştirilebilir.

Plazma gazlaştırma işlemi klasik yakma teknolojileri gibi alevli bir yakma sistemi olmayıp, katı ağın içeriğinde bulunan çeşitli kimyasal maddeler nedeniyle organik bileşenleri yanıcı bir gaz olan sentez gazına dönüştürebilmektedir. $1300^{\circ}C$ sıcaklık gibi yüksek bir sıcaklıkta plazma gazlaştırma işlemi yapıldığından dolayı yüksek oranda sera gazı, dioksin ve furan grubu bileşenler oluşmamaktadır. Sadece bu sonuç bile plazma teknolojisinin çevre dostu bir işlem olduğunu ispatlar ki, birçok gelişmiş ülke tarafından tercih edilmektedir. Elbette plazma gazlaştırma işlemi sonucunda ömrünü tamamlamış atık lastiklerden enerji üretimi de söz konusudur, ancak üretilen elektrik enerjisinin maliyeti oldukça yüksektir. Buna rağmen gelişmiş ülkeler çevresel riskleri en az indirmek ve uzun dönemde sürdürülebilir güvenli bir atık yönetimi için bu yöntemi tercih etmektedir.

Plazma, çok yüksek konsantrasyonlarda kimyasal olarak aktif türler üretebildiği için elektronlar, iyonlar, atomlar ve radikallerden oluşan maddenin dördüncü halidir. Plazma, yüksek enerji yoğunluğu ve yüksek sıcaklıklar üretir.

Plazma gazlaştırma işlemi elektriksel bir bozunmadır, yani bir elektrik akımının bir gaz içerisinde geçirilerek kesintisiz bir elektrik arkı oluşturması işlemidir. Elektriksel özdirenç gaz moleküllerinden elektronları ayırır, iyonlaşmış bir gaz akışı ile plazma fazı oluşur ve oldukça yüksek sıcaklık seviyesinde ısı açığa çıkar. Gaz molekülleri atomlarına ayrılır, elektron kaybeder ve iyonlaşırlar. Bu şekilde oluşan gazın sıvılardaki gibi bir viskozitesi vardır. Serbest elektrik yükleri oluşan gaza göre yüksek ancak metallere yakın bir elektriksel iletkenlik verir.

Bu tez çalışmasında hedeflemiş olduğumuz atmosferik basınç plazma yöntemi ile ömrünü tamamlamış atık lastiklerin çevreye duyarlı bir şekilde bertaraf edilmesi işlemi başarı bir şekilde ülkemizde ilk kez tarafımızdan gerçekleştirildi. Mevcut bertaraf yöntemlerine daha temiz ve daha kısa zamanda işlem yapabilen bir güvenilir teknik eklenmiş oldu. Ayrıca, deney düzeneği ve içerisinde yer alan proses odası gaz ölçümlerini yapabilecek şekilde düşük maliyet, büyük gayret, çaba ve emekle yine bizim tarafımızdan dizayn edildi.

Laboratuvar ve malzeme imkanlarımız doğrultusunda karbonmonoksit, karbondioksit, metan ve tolüen gaz emisyon ölçümleri ilgili gaz sensörleri aracılığıyla yapıldı. Gaz sensörlerinden gelen sinyallerin analiz edilmesi için demo sürümü olan LabView sinyal işleme programı kullanıldı.

Hem normal yanma hem de plazma gazlaştırma işlemi 5 lt/dk sabit debide verilen yüksek saflıktaki oksijen ile yapıldı. Atmosferik basınç plazma teknolojisi ile katı atığın gazlaştırılması işlemi sonucunda maddenin enerji dönüşümü ile oluşan metan gazı miktarı normal yanma işlemine göre daha fazla elde edildi. Plazma gazlaştırma işlemi sonucunda daha yüksek enerjili yani yüksek verimliliğe sahip sentez gazı üretildi. Çevreye duyarlı plazma gazlaştırma işleminin yakıt olarak kullanılabilen sentez gazı üretme potansiyeline sahip olduğu gözlemlendi.

Kütle miktarının gaz emisyon değerleri ile arasındaki ilişki atmosferik basınç plazma işlemi sonucunda elde edilen verilere göre değerlendirildi. 2,5 gram ve 3 gram lastik parçaları için yapılan deneylerde 3 gram lastik parçasındaki CO, CO₂, CH₄ ve C₇H₈ gaz emisyon miktarlarının 2,5 gram lastik parçasına göre daha fazla ölçüldüğü

gözlenmiş olup, bu durum kütle miktarı ile orantılı bir gaz emisyonunun olduğunu göstermektedir.

Katı atık yönetiminde mevcut klasik bertaraf yöntem ile plazma gazlaştırma işleminin karşılaştırılması ise 3 gram kütleli lastik parçası için yapıldı. 3 gram kütleli lastik parçasının atmosferik basınç plazma işlemi ile yanma sonucunda elde edilen verileri, tarafımızdan yapılan ve yaklaşık olarak 500°C sıcaklığındaki normal yanma işlemi ile karşılaştırıldığında CO gaz emisyon değerinin normal yanma işleminde az miktarda da olsa plazma gazlaştırma işlemine göre daha fazla çıktığı, yani normal yanmada eksik yanma ürün miktarının daha fazla ölçüldüğü gözlemlendi.

CO₂ gaz emisyonunun miktarı ise 3 gram kütleli lastik parçalarının plazma işlemi sonucunda 6725 ppm değerinde ölçülmüşken normal yanma işleminde bu değer 13000 ppm olarak ölçüldü. CO₂ emisyonu sera gazı emisyonları içerisinde en yüksek paya sahiptir. Aynı zamanda, sera gazı bileşikleri atmosferde ısı tutma özelliğinden dolayı açığa çıkan sera gazı emisyonları atmosferdeki sıcaklığı arttırmaktadır. Bu nedenle belirgin bir şekilde gözlenen CO₂ gaz emisyon miktarındaki bu farklılık, ömrünü tamamlamış atık lastiklerin atmosferik basınç oksijen plazması işlemi ile bertarafının mevcut normal yanma işlemine göre ne kadar elverişli olduğunu ortaya koymaktadır.

Gaz halindeki bileşenler plazma gazlaştırmasında normal yanma işlemine göre daha yüksek miktarda H₂ ve CO miktarına sahiptir. Oksijen içeriği arttıkça oksijenin oksitlenmesi de artacağından dolayı CO₂ içeriğinin atmosferik basınç plazma gazlaştırmasında artması beklenen bir sonuçtur. Bunun nedeni katı atığı CO, CO₂ ve H₂' ye dönüştürmesidir. Böylece sentez gazı oluşumu artar ve oksidasyon nedeniyle daha az miktarda hidrokarbon üretilir. Plazma gazlaştırmada kömürdeki karbon içeriği normal yanma işlemine göre azaldı. Oksijen akış hızı arttıkça, CO, CO₂ ve diğer hidrokarbonları oluşturmak için daha fazla karbon oksitlendiğinden gaz halindeki karbon katı kömürden daha fazladır.

Normal yanma işlemine göre plazma gazlaştırma işleminin en önemli avantajlarından biri olan atmosfere zararlı karbonmonoksit, karbondioksit gibi gaz emisyon miktarlarının daha az ölçüldüğü gözlemlendi.

Aynı zamanda 3 gram kütleli lastik parçasının plazma işlemi ve normal yanma ile ölçülen gaz emisyon değerleri karşılaştırıldığında plazma gazlaştırma işleminde metan gaz emisyon değerinin biraz daha fazla olduğu, yani oksidasyondan dolayı normal yanma işleminde daha az hidrokarbon üretildiği gözlemlendi.

Tolüen gaz emisyon değerlerinin ise hem atmosferik basınç oksijen plazma işlemi ile gazlaştırmada hem de normal yanma işleminde yaklaşık olarak aynı kaldığı ölçüldü.

Normal yanmada tüm enerji ısıya dönüşürken, plazma gazlaştırma işleminde ömrünü tamamlamış atık lastikler yüksek verimliliğe sahip gaz yakıt olarak ayrıştırılabilir.

Ayrıca, SO_x gaz emisyon ölçümlerinin yapılması halk sağlığı açısından büyük bir öneme sahip olduğundan ömrünü tamamlamış atık lastiklerin hem atmosferik basınç plazma işlemi hem de normal yanma işlemi ile bertarafında kükürt temelli gaz ölçümlerinin yapılması çalışmayı biraz daha güçlendirirdi. Ancak çalışma kapsamında maddi imkanlarımız kısıtlı olduğundan sadece CO, CO₂, CH₄ ve C₇H₈ gaz sensörleri temin edilmiş olup SO_x gaz sensörleri temin edilememiştir. Az sayıda da olsa plazma gazlaştırma teknolojisi ile yapılan literatür çalışmalarında SO_x gaz emisyon değerleri de verilmiştir. Yine laboratuvarımızda herhangi bir gaz kromatografi cihazı bulunmadığından katı atık içerisindeki karbon, azot, oksijen, kükürt analizleri yapılamamış ve herhangi bir elemental analiz sonucu verilememiştir. Buna rağmen ilgili gaz sensörleri aracılığıyla ölçülen gaz emisyon değerleri Gloria vd. (2019) tarafından yapılan benzer çalışma ile uyum içerisinde. Bu çalışmada, lastik atıklarının plazma gazlaştırması ve plazma pirolizi işlemleri ile bertarafı yapılarak her iki işlem sonucunda elde edilen gaz bileşimleri, kömür verimi ve işlemin verimliliği karşılaştırılmıştır. Atık lastiklerin plazma gazlaştırılması ve plazma pirolizi işlemleri için grafit elektrotlar ve bir doğru akım (DC) ark plazma sistemine sahip kesikli bir reaktör aracılığıyla yapılmıştır.

Ayrıca katı atık lastik malzemesi 6 dakikada 1 kg oranında sabit hızda geri beslenme ile işlendi. Bu tez çalışmasında ise sabit yataklı bir sistem içerisinde plazma torç kalemi kullanılarak 1 dakikada 2,5 – 3 g lastik parçaları işlenerek gaz emisyon değerleri ölçüldü.

Bu tez çalışması kapsamında yapılan deneylerden elde edilen gaz emisyon değerleri ile Gloria vd. (2019) tarafından yapılan çalışmanın karşılaştırılmasını aşağıdaki gibi özetleyebiliriz:

Hem normal yanma hem de plazma gazlaştırma işlemi 5 lt/dk sabit debide verilen yüksek saflıktaki oksijen ile yapıldığından CO ve CO₂ gaz emisyon değerleri normal yanma işlemine göre daha az ölçüldü. Oksidasyondan dolayı normal yanma işleminde daha az hidrokarbon üretildiğinden CH₄ gaz emisyon değeri normal yanmaya göre daha fazla olduğu ve C₇H₈ gaz emisyon değerinin ise her iki proses işleminde hemen hemen aynı değerlerde olduğu gözlemlendi.

Proliz işlemi oksijensiz ortamda yapıldığından plazma gazlaştırma işleminde oksijen içeriği arttıkça oksijenin oksitlenmesi de artacağından plazma gazlaştırma işleminde CO ve CO₂ gaz emisyon değerleri piroliz işlemine göre daha fazla; oksidasyon nedeniyle sentez gazı oluşumu arttığından daha az miktarda hidrokarbon üretilmiş yani CH₄ gaz emisyon değeri plazma piroliz işlemine göre daha az olduğu gözlenmiştir.

Atmosferik basınç plazma işleminde sıcaklığın yüksek olması nedeniyle reaksiyon sonucunda gazlaşma ürünleri ve yanma haznesinin içerisinde kristalleşmiş yapıda kül meydana gelir. Bu tez çalışmasında normal yanma işleminde yine bir katı atık olan kül oluşumunun plazma teknolojisi ile oluşan curüf miktarına göre daha fazla olduğu gözlemlendi.

Hem gazlaşma ürünleri hem de oluşan kül zararlı bileşenlerden açısından en az riske sahiptir. Ayrıca yanma haznesinin dibinde biriken kristalleşmiş yapıdaki kül zararsız bir şekilde haznedan dışarı alınıp dolgu malzemesi olarak kullanılabilir. Katı atık lastiğinin içerisinde yer alan çelik malzemeler de yüksek sıcaklıkta eridiğinden, yanma haznesinin içerisinde biriken kristalleşmiş yapıdan tekrar geri kazanıldığında hurda metaller gibi oldukça önemli ürünlerin elde edilmesine olanak sağlar.

Böylece, bu atık lastiklerin başarılı bir şekilde bertarafı ile sürdürülebilir bir çevre ve ekonomik geri kazanım hedefi gerçekleştirildi.

Çevreye duyarlı ve çok aşamalı bir süreç olan plazma dönüştürme teknolojisiyle daha yüksek miktarlarda ömrünü tamamlamış atık lastiklerin bertarafı ile daha yüksek enerjili değere yani daha yüksek verimliliğe sahip sentez gazının yakıt olarak kullanılabilceği üretim tesislerinin ülkemizde kurulması ekonomik geri kazanıma büyük oranda katkı sağlayacaktır.

KAYNAKLAR

Agon N., Hrabovsky M., Chumak O., Hlina M., Kopecky V., Maslani A., Bosmans A., Helsen L., Skoblja S., Van Oost G. and Vierendeels J., "Plasma gasification of refuse-derived fuel in a single-stage system using different gasifying agents", *Waste Manage*, 47: 246–255 (2016).

Andrew C., "An Introduction to Rubber Technology 1st ed.", *Rapra Technology Ltd.*, Shrewsbury, England 142-163 (2001).

Batır B., "Türkiye için kullanılmış lastik yönetimi araştırması", Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 32-41 (2002).

Bilous V. A., Voyevodin V. M., Strel'nitskij V. Y., Didenko S. Y., Rybka O. V., Mazilov O. V., Vasylev V. V., Luchaninov O. A., Reshetnyak O. M., Ilchenko M. I., Kutnij V. Y., Vyeryovkin A. A., Shpagina L. O., Borysenko V. M., Pshenichniy D. G., Plisak Y. V. and Kuznetsov A. P., "Organization of the experimental technological complex for serial manufacturing and testing of products and semi-finished goods made of diamondlike and laminated composites for leading branches of mechanical engineering", *Science and Innovation*, 10 (4): 5-19 (2004).

Bosmans A., Vanderreydt I. and Geysen D., "The crucial role of waste-to-energy technologies in enhanced landfill mining: a technology review", *Journal of Cleaner Production*, 55: 10-23 (2013).

Caballero B. M., Marco I., Torres A., Chomon M. J. and Laresgoiti M. F., "Chemical recycling of post-consumer tyres", *Sustainable Waste Management and Recycling: Used/Post-Consumer Tyres*, London, 215-225 (2004).

Camacho S. L., "The plasma arc torch, Its electrical and thermal characteristics", *International Symposium on Environmental Technologies: Plasma Systems and Applications*, Atlanta, 45-66 (1995).

Cao X., Chen J., Xiong J., Luo H., Chen B. and Zheng Z., "Research status in plasma gasification of municipal solid waste", *Modern Chemical Industry*, 34: 26–31 (2014).

Chang J. S., Gu B. W., Looy P. C., Chu F. Y. and Simpson C. J., "Thermal plasma pyrolysis of used old tires for production of syngas", *Journal of Environmental Science Health A*, 31: 1781-1799 (1996).

Chu P. K., "Enhancement of surface properties of biomaterials using plasma-based technologies", *Surface and Coatings Technology*, 201: 8076–8082 (2007).

Çift D. B., “Kolza sap-samanı ısıl davranımının termogravimetrik yöntemle incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 32-41 (1998).

Dereli C. “Plazma gazlaştırma teknolojisi ile katı atık bertarafı”, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 1-3 (2012).

Donaldson A. D., Apa R. P., Eddy T. L. and Flinn J. E., “A review of plasma destruction of hazardous mixed waste”, *Heat Transfer in Thermal Plasma*, New York, United States, 161: 41-45 (1991).

Durna E., Koz G. ve Genç N., “Türkiye’de ömrünü tamamlamış lastiklerin yönetiminde en uygun bertaraf seçeneğinin PROMETHEE ve bulanık PROMETHEE yöntemi ile belirlenmesi”, *Journal of Polytechnic*, 23(4): 915-927 (2020).

Edertho L., “Plasma processing of municipal solid waste”, *Brazilian Journal of Physics*, 34 (4B): 1587-1593 (2004).

Evans A. and Evans R. “The composition of a tyre: typical components”, *The Waste & Resources Action Programme*, Oxon, England, 1-5 (2006).

Fernández A. and Thompson A., “The inactivation of salmonella by cold atmospheric plasma treatment”, *Food Research International*, 45: 678-684 (2012).

Fridman A. and Kennedy L. A., “Plasma physics and engineering, 2nd ed.”, *CRC Press*, Florida, United States, 213-225 (2011).

Fridman G., Brooks A. D., Balasubramanian M., Fridman A., Gutsol A., Vasilets V. N., Ayan H. and Friedman G., “Comparison of direct and indirect effects of nonthermal atmospheric-pressure plasma on bacteria”, *Plasma Processes and Polymers*, 4: 370-375 (2007).

Fourcault A., Marias F., Michon U., “Modelling of thermal removal of tars in a high-temperature stage fed by a plasma torch”, *Biomass Bioenergy*, 34: 1363–1374 (2010).

Gagnon J. and Carabin P., “A torch to light the way: plasma gasification technology in waste treatment”, *Waste Management World*, 1, 65-68 (2006).

Galvagno S., Casciaro G., Casu S., Martino M., Mingazzini C., Russo A. and Portofino S., “Steam gasification of tyre waste, poplar, and refuse-derived fuel: A comparative analysis”, *Waste Management*, 29: 678-689 (2009).

Gloria J., Nema S. K., Anantha S. T. S. and Vadivel P. M., “A comparative analysis of pyrolysis and gasification of tyre waste by thermal plasma technology for environmentally sound waste disposal”, *Seventh International Conference on Sustainable Solid Waste Management*, Heraklion, 121-129 (2019).

Gönüllü M. T., “Atık lastiklerin yönetimi”, *Katı Atık Geri Dönüşüm Teknolojileri Semineri*, İstanbul Sanayi Odası, İstanbul (2004).

Gray L., “Plasma gasification as a viable waste-to-energy treatment of municipal solid waste”, *Solid and Hazardous Waste Prevention and Control Engineering Technical Report in MANE 6960*, Rensselaer Hartford, United States, 1–15 (2014).

Hassanpour M. and Mohammadi A., “Feasibility study of plasma technology application for wastes and hazardous waste materials”, *Fifth National Conference of Environmental Health*, Tehran, 1390-1395 (2012).

Herrera-Sosa E. S., Martínez-Barrera G., Barrera-Díaz C., Cruz-Zaragoza E. and Ureña-Núñez F., “Recovery and modification of waste tire particles and their use as reinforcements of concrete”, *International Journal of Polymer Science*, 2015 (234690): 1-8 (2015).

Jafari A. J. and Hassanpour M., “Analysis and comparison of used lubricants, regenerative technologies in the World”, *Resources, Conservation and Recycling*, 103: 179-191 (2015).

Jun L., Kou L., Shengjun Y., Yaojian L. and Dan H., “Application of thermal plasma technology for the treatment of solid wastes in China: An overview”, *Waste Management*, 58: 260-269 (2016).

Larsen H. H., Kossmann J. and Sonderberg L. P., “New and emerging bioenergy technologies”, *Risoe Energy Report*, Roskilde, Denmark, 35-41 (2003).

Leung D.Y.C. and Wang C.L., “Fluidized-bed gasification of waste tire powders”, *Fuel Processing Technology*, 84: (1-3) 175-196 (2003).

Lyubina L.Y. and Suris L.A., “Thermodynamic model of the plasma gasification of organic solid waste”, *Chemical and Petroleum Engineering*, 35: 403-406 (1999).

Mountouris A., Voutsas E. and Tassios D., “Solid waste plasma gasification: equilibrium model development and exergy analysis”, *Energy Conversion and Management*, 47:1723–37 (2006).

Mountouris A., Voutsas E. and Tassios D., “Plasma gasification of sewage sludge: Process development and energy optimization”, *Energy Conversion and Management*, 49: 2264–2271 (2008).

Mazzoni L. and Janajreh I., “Plasma gasification of municipal solid waste with variable content of plastic solid waste for enhanced energy recovery”, *International Journal of Hydrogen Energy*, 42: 19446–19457 (2017).

Mui E. L. K., Lee V. K. C., Cheung W. H. and McKay G., “Kinetic modelling of waste tire carbonization”, *Energy Fuels*, 22 (3): 1650-1657 (2008).

Munir M. T., Mardon I., Al-Zuhair S., Shawabkeh A. and Saqib N. U., “Plasma gasification of municipal solid waste for waste-to-value processing”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 116 (109461): 1-9 (2019).

Niemira B. A., “Cold plasma decontamination of foods”, *Annual Reviews of Food Science and Technology*, 3: 125-142 (2012).

Paine K., Moroney R. C. and Dhir R., “Application of granulated rubber to improve the thermal efficiency of concrete”, *Sustainable Waste Management and Recycling: Used/Post-Consumer Tyres*, London, 85-96 (2004).

Reshner K., “Scrap tire recycling: A summary of prevalent disposal and recycling methods”, *STR Consulting Tire and Rubber Recycling Report*, Berlin, Germany, 1-16 (2008).

Rodgers B. and Waddell W., “Tire engineering”, *The Science and Technology of Rubber 4th ed.*, Elsevier Academic Press, Amsterdam, Holland, 619-661 (2013).

İnternet: Rubber Manufacturers Association, “2006 Scrap tire markets in the United States: 2005 ed.” <http://www.energyjustice.net/files/tires/files/rma2005.pdf> (2006).

Tang L. and Huang H., “An investigation of sulphur distribution during thermal plasma pyrolysis of used tires”, *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 72: 35–40 (2004).

Topal H., “Plazma gazlaştırma teknolojisi ile katı atık bertarafı”, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 30 (4): 733-741 (2015).

İnternet: T.C. Çevre ve Orman Bakanlığı, “2009 Katı Atıkların Geri Kazanımı ve Buna Yönelik Toplama İşlemleri”, <http://www.atikyonetimi.cevreorman.gov.tr/> (2009).

İnternet: T.C. Devlet Planlama Teşkilatı, “2008 Araç Lastiği-Plastik Ürünler Çalışma Grubu Raporu”, <https://www.sbb.gov.tr> (2008).

İnternet: T.C. Mevzuat Bilgi Sistemi, “2006 Ömrünü Tamamlamış Lastiklerin Kontrolü Yönetmeliği”, <https://www.mevzuat.gov.tr> (2006).

Teke E., “Vakum ortamında plazma kaplama ve plazma parametrelerinin incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Isparta, 3-7 (2012).

İnternet: UN Environment Programme, Basel Convention, “2008 Revised Technical Guidelines on Environmentally Sound Management of Used Tires” <http://www.basel.int> (2008).

Unnisa S. A. and Hassanpour M., “Plasma technology and waste management”, *Journal of Waste Recycling*, 2 (1): 1-3 (2017).

İnternet: US Environmental Protection Agency, “1991 Markets for Scrap Tires”, <https://archive.epa.gov/epawaste/conserva/materials/tires/web/pdf/tires.pdf> (1991).

Xiao G., Ni M.-J., Chi Y. and Cen K.-F., “Low-temperature gasification of the waste tire in a fluidized bed”, *Energy Conversion and Management*, 49: 2078-2082 (2008).

Van Oost G., Hrabovsky M., Kopecky V., Konrad M., Hlina M., Kavka T., Chumak A., Beeckman E. and Verstraeten J., “Pyrolysis of waste using a hybrid argon-water stabilized torch”, *Vacuum* 80, 1132-1137 (2006).

Yakaboylu O. “Atık lastik yönetimi ve atık lastik prolizi model tesisi için yapılabilirlik çalışması”, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 45-53 (2010).

Yüksel Ç. Y. ve Karagözlü N., “Soğuk atmosferik plazma teknolojisi ve gıdalarda kullanımı”, *Aydın Adnan Menderes Üniversitesi Ziraat Dergisi*, 14 (2): 81-86 (2017).

Zhang X., Li H., Cao Q., Jin L. and Wang F., “Upgrading pyrolytic residue from waste tires to commercial carbon black”, *Waste Management & Research*, 36 (5): 436–444 (2018).

ÖZGEÇMİŞ

Ramazan ÇAKMAK, İlk – orta ve lise öğrenimini Tarsus’da tamamladı. 2017 yılında Anadolu Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Çevre Mühendisliği Bölümünden mezun oldu. 2019 yılında Yeni Yüzyıl Üniversitesi Sağlık Bilimleri Enstitüsü İş Sağlığı ve Güvenliği Anabilim Dalında tezsiz yüksek lisans öğrenimini tamamladı. 2022 yılında Karabük Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Çevre Mühendisliği Anabilim Dalında yüksek lisans öğrenimini tamamladı.