

**T.C.
KASTAMONU ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**CO₂ GAZ LAZERİ KULLANILARAK YÜKSEK YOĞUNLUKLU
POLİETİLEN (HDPE) BORULARIN KESİLEBİLİRLİĞİNİN
ARAŞTIRILMASI**

Saleh Jassim Saleh AL-QAISY

**Danışman
Jüri Üyesi
Jüri Üyesi**

**Prof. Dr. Cihan KARATAŞ
Doç. Dr. Serkan ISLAK
Dr. Öğr. Üyesi Erkan KOÇ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MALZEME BİLİMİ VE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

KASTAMONU – 2019


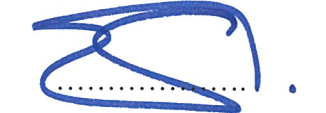
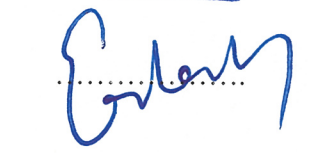
TEZ ONAYI

Saleh Jassim Saleh AL-QAISY tarafından hazırlanan "CO₂ Gaz Lazeri Kullanılarak Yüksek Yoğunluklu Polietilen (HDPE) Boruların Kesilebilirliğinin Araştırılması" adlı tez çalışması aşağıdaki jüri üyeleri önünde savunulmuş ve oy birliği ile Kastamonu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Ana Bilim Dalı**'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman Prof. Dr. Cihan KARATAŞ
Türk Hava Kurumu Üniversitesi

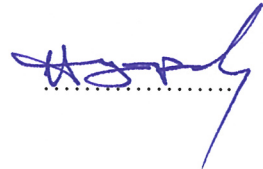
Jüri Üyesi Doç. Dr. Serkan ISLAK
Kastamonu Üniversitesi

Jüri Üyesi Dr. Öğr. Üyesi Erkan KOÇ
Karabük Üniversitesi


.....

.....

.....

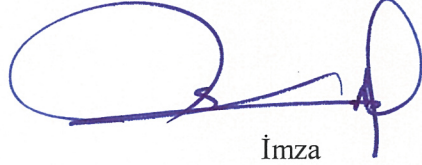
28/02/2019

Enstitü Müdürü Prof. Dr. Hasbi YAPRAK


.....

TAAHHÜTNAME

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildirir ve taahhüt ederim.



İmza
Saleh Jassim Saleh AL-QAISY

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

CO₂ GAZ LAZERİ KULLANILARAK YÜKSEK YOĞUNLUKLU POLİETİLEN (HDPE) BORULARIN KESİLEBİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI

Saleh Jassim Saleh AL-QAISY
Kastamonu Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Cihan KARATAŞ

Yüksek yoğunluklu polietilen, farklı çevresel koşullarda kullanım için en iyi malzemelerden biridir. Isı yalıtımı, hafiflik, düşük maliyet ve en önemlisi zaman faktörü nedeniyle mekanik, kimyasal ve elektriksel özelliklerden dolayı endüstride kullanımı oldukça yaygındır.

Yüksek yoğunluklu polietilen borular moleküler yapısı nedeniyle, metal borulara kıyasla özellikle su, petrol ve gaz nakillerinde oldukça avantajlıdır. Boru endüstrisinde ve çeşitli sıvıların taşınmasında kullanım için idealdir. Bu boruların özellikle sulama sistemlerinde kullanımı kolay kesilebilirliğinden dolayı oldukça önemlidir. Endüstride yaygın şekilde kullanılmamasından dolayı boru hatları kurulurken boruların kesilmesi ardından birleştirilmesi kaçınılmazdır.

Bu tez çalışmasında, boru hattı yapımında yüksek yoğunluklu polietilen malzemelerin avantajlarından yararlanmak amacıyla, borularda farklı geometriye sahip delikler açılmış ve incelenmesi yapılmıştır.

Yüksek yoğunluklu polietilenin verimliliğini ve performansını incelemek için modern kesme yöntemlerinden biri olan Lazer kesme yöntemi kullanılmıştır. Bir CO₂ lazer makinesi ile hava, azot (N₂) ve oksijen (O₂) gibi üç farklı gaz türü kullanılarak piyasada kullanılan yüksek yoğunluklu polietilen borular kesilmiş olup, ısı tesiri altındaki bölge (ITAB), yüzey pürüzlülüğü, yiv, çentik genişliği ve kesme kalitesi detaylıca incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: HDPE, CO₂ lazer kesim, ITAB, çizilme, çentik genişliği

2019, 70 sayfa
Bilim Kodu: 91510

ABSTRACT

MSc. Thesis

INVESTIGATION OF CUTTABILITY OF HIGH DENSITY POLYETHYLENE (HDPE) PIPES USING (CO₂) GAS LASER

Saleh Jassim Saleh AL-QAISY
Kastamonu University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Materials Science and Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Cihan KARATAŞ

Abstract: The high density polyethylene (HDPE) is one of the best materials for use in different environmental conditions. This is due to the mechanical, chemical and electrical specifications of this type, in terms of thermal insulation, lightweight, low cost, and most importantly the time factor.

The molecular structure of the HDPE material has made it the ideal choice for use in the pipe industry, and the transportation of various liquids, compared with the metal pipes and especially in the transportation of water, oil, and gas. And because of the frequent use, especially in the workplace. The need to use the cutting for these pipes has become necessary for the purpose of establishing networks for the transfer of fluids.

In this research, the construction of holes in the pipes and measurements and angles of different for the purpose of taking advantage of these openings in the construction of networks.

The laser was used as one of the modern cutting methods for the purpose of studying the efficiency and performance of CO₂ laser cutting on HDPE, especially on pipes, PN 16 PE 100, 110 mm; diameter, and tested under a CO₂ laser machine, by using a three different kinds of gases, such as the air, the nitrogen (N₂), and the oxygen (O₂), to estimate the changing and evaluate the quality of cutting with surface roughness, HAZ, striation and kerf width of the HDPE.

Key Words: HDPE, CO₂ laser cutting, HAZ, striation, kerf width

2019, 70 pages

Science Code: 91510

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam boyunca her türlü desteği ve imkânı sağlayarak değerli bilgilerinden yararlandığım, danışman hocam Prof. Dr. Cihan KARATAŞ'a, en derin duygularıyla teşekkür ederim.

Tüm çalışmalarında beni desteklediği için Prof. Dr. Özgür ÖZTÜRK'e şükranlarımı sunarım.

Aynı zamanda yardımı ve desteği için Dr. Öğr. Üyesi Senem YETGİN 'e ve tüm çalışmalarındaki yardımları için Dr. Cihan ÖZORAK 'a teşekkür ediyorum.

TOPRAKMAK A.Ş. Fabrikası'nın tüm personeline nazik yardımları ve destekleri için teşekkür ediyorum.

Son olarak, bu tez çalışması sırasında gerekli ortamı sağlamada sonsuz ilgi, destek, yardım, sabır ve minnettar yardımları için aileme ve eşim Dr. Nagham AL-HAYAZEI şükranlarımı sunarım.

Saleh Jassim Saleh AL-QAISY
Kastamonu, Şubat, 2019

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
TEZ ONAYI.....	ii
TAAHHÜTNAME	iii
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER.....	vii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	x
ŞEKİLLER DİZİNİ	xi
TABLolar DİZİNİ	xii
1. GİRİŞ	1
1.1. Tezin Amacı.....	3
1.2. Tezin Yapısı	4
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	6
2.1. HDPE ve Özellikleri	6
2.1.1. HDPE Tarihi	6
2.1.2. HDPE'nin Genel Yapısı	7
2.1.3. HDPE Sıcaklığını Etkileyen Etkenler	8
2.1.3.1. Termoplastik ve termoset polimerler	8
2.1.4. Polietilen Çeşitleri ve Üretimi	9
2.1.4.1. Yüksek basınç yöntemi	10
2.1.4.2. Düşük basınç yöntemi	10
2.1.5. HDPE Mekanik Özellikleri	11
2.1.5.1. HDPE Yoğunluğu	11
2.1.5.2. HDPE Moleküler ağırlık dağılımı.....	12
2.1.5.3. HDPE Erime noktası.....	12
2.1.5.4. HDPE Viskoelastik	13
2.1.6 HDPE Uygulamaları ve Avantajları	13
2.1.6.1. Ekonomiklik	14
2.1.6.2. Kimyasal özellikleri	14
2.1.6.3. Termal iletkenlik	14
2.1.6.4. Asit direnci	15
2.1.6.5. Pürüzlülük	15
2.1.6.6 Yağa dayanıklılığı.....	15
2.1.6.7. Geri dönüşüm	16
2.1.6.8. Korozyon direnci	16
2.2 CO ₂ Lazeri.....	16
2.2.1. Tarih ve Gelişim	18
2.2.2. Lazer Işığı.....	18
2.2.2.1. Mono kromatik	19
2.2.2.2. Tutarlılık	19
2.2.2.3 Yönlük.....	19
2.2.3. Lazer Bileşenleri	19
2.2.3.1. Lazerleme malzemeleri	20
2.2.3.2 Pompalama kaynağı.....	20

2.2.3.3. Optik kavite	20
2.2.3.4. Çıkış sistemi	20
2.2.4. Lazer Işınının Çalışma Prensipleri.....	20
2.2.5. Lazer Türleri	21
2.2.6. CO ₂ Lazer Kesim	22
2.2.6.1. Hızlı aksenal akışlı lazer	23
2.2.7. Lazer Kesim Yöntemi	24
2.2.7.1. İnert gaz	24
2.2.7.2. Füzyon yöntemi	24
2.2.7.3. Lazer buharlaşması	25
2.2.8. Lazer Kesim Parametresi	26
2.2.8.1. Lazer enerjisi	26
2.2.8.2. Kesme hızı	26
3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	27
3.1. Deney ve Materyaller.....	27
3.1.1. Malzemeler	27
3.1.2. Deneysel Ekipman	28
3.1.2.1. CO ₂ Lazer makinesi	28
3.1.2.1.1. Lazer ışını sistemi	28
3.1.2.1.2. Programın kontrolü	30
3.1.2.1.3. Veritabanı	32
3.1.2.2. Deneysel değişkenler ve ölçüm	32
3.1.2.2.1. Malzemelerin Temini	33
3.1.2.2.2. Lazer ışını enerjisi	33
3.1.2.2.3. Lazer ışının hızı	33
3.1.2.2.4. Lazer kolunun hareketi	33
3.1.2.2.5. Lensin odaklanması.....	34
3.1.2.2.6. Gaz basıncı	34
3.2 Deney Veri Tabanı	35
3.2.1. Örnek Çizimi	36
3.3 Malzeme Kesimi.....	36
3.3.1 Yardımcı Gaz Olarak Havanın Kullanılması	36
3.3.2 N ₂ Yardımcı Gaz Olarak Kullanılması	40
3.3.3. O ₂ 'nin Yardımcı Gaz Olarak Kullanılması	43
3.4. Kesim Kalitesinin Değerlendirilmesi	47
3.4.1. Yüzey Pürüzlülüğü	47
3.4.2 Çizilme Frekansı.....	47
3.4.3 Isıdan Etkilenen Bölge (ITAB)	48
4. SONUÇ VE TARTIŞMA.....	52
4.1 Önceki Araştırma Analizi	52
4.2. Analizi Deneyin Sonucu	55
4.2.1. CO ₂ Lazer Kesimin Hızı	55
4.2.2. CO ₂ Lazer Kesimin Gücü.....	55
4.2.3. CO ₂ Lazer Çentiği Genişliği.....	55
4.2.4. Kesim Kenarlarının Dikey sapma.....	56
4.2.5. Malzeme Yüzey Pürüzlülüğü	57
4.2.6. Isıdan Tesiri Altındaki Bölge (ITAB).....	57
4.2.7. Çizgi Frekansı.....	57
4.2.8. Kesim Şekli	58

4.3. Deneysel kurulum.....	58
4.4. Deneysel Tartışma	59
4.4.1. Maksimum Kesme Hızları	60
4.4.2. Maksimum Lazer Gücü.....	60
4.4.3. Çentik Genişliği	60
4.4.4. Kesim Kenarlarının Diklik Sapması	61
4.4.5. Yüzey Pürüzlülüğü	61
ÖZGEÇMİŞ.....	70

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

µm	Mikrometre
µs	Mikrosaniye
bir	Konik Açı
ANSI	Amerikan Ulusal Standartlar Enstitüsü
ASTM	Amerikan Test ve Malzemeler Derneği
CFRP	Karbon Fiber Takviyeli Plastik
CO ₂	Karbondioksit
D	Malzeme Kalınlığı
DR	Ortalama dış çap olan boyut oranı
FAF	Hızlı Eksenel akış
GFRP	Cam Elyaf Takviyeli Plastik
HAZ	Isıyı Etkileyen Bölge
HDPE	Yüksek Yoğunluklu Polietilen
Hz	Hertz
J	Joule
LBC	Lazer ışın kesme
LDPE	Düşük Yoğunluklu Polietilen
MDPE	Orta Yoğunluklu Polietilen
ND: YAG	Neodimyum katkılı Yitriyum Alüminyum Granat
nm	Nanometre
p	Gaz Basıncı
P	Lazer Gücü
PE	Poli Etilen
PN	Basınç barlarında basınç nominal sınıfı
PVC	Polivinil klorür
SDR	Standart Boyut Oranı,
SPI	Plastik Endüstrisi Derneği
SR	Yüzey Pürüzlülüğü
V	Kesme Hızı
W	Watt

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1. Etilen (C ₂ H ₄) moleküler yapısı.	7
Şekil 2.2. Polietilen (PE) moleküler yapısı	7
Şekil 2.3. Termoplastik Malzemelerin Sınıflandırılması	9
Şekil 2.4. LDPE için moleküler ağırlık dağılımı	10
Şekil 2.5. HDPE için moleküler ağırlık dağılımı.....	11
Şekil 2.6. Lazerin çalışma prensibi (Negarestani, 2010).	21
Şekil 2.7. Füzyon kesimindeki alev	25
Şekil 3.1. Yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE) boru	27
Şekil 3.2. CNC lazer kesim makineleri.	28
Şekil 3.3. İş parçasının odak uzaklığı ve mesafesi. (.....	29
Şekil 3.4. Odaklama ışın sistemi memesinin.....	29
Şekil 3.5. Malzeme örneklerinin programı.....	30
Şekil 3.6. Amada Fanuc makinesinin CNC programı	31
Şekil 3.7. Amada bilgisayar programı	32
Şekil 3.8. Kol tezgahı hareketi	34
Şekil 3.9. Objektif odak	34
Şekil 3.10. Örnek çizimler.....	36
Şekil 3.11. Havayla kesilen daire örneğinin iç kısmı	37
Şekil 3.12. Havayla kesilen daire örneğinin dış kısmı.....	37
Şekil 3.13. Havayla kesilen üçgen örneğinin iç kısmı	38
Şekil 3.14. Havayla kesilen üçgen örneğinin dış kısmı	38
Şekil 3.15. Havayla kesilen kare örneğinin iç kısmı.....	39
Şekil 3.16. Havayla kesilen kare örneğinin dış kısmı.....	39
Şekil 3.17. Azotla kesilen daire örneğinin iç kısmı	40
Şekil 3.18. Azotla kesilen daire örneğinin dış kısmı	41
Şekil 3.19. Azotla kesilen kare örneğinin iç kısmı	41
Şekil 3.20. Azotla kesilen kare örneğinin dış kısmı.	42
Şekil 3.21. Azotla kesilen üçgen örneğinin iç kısmı.....	42
Şekil 3.22. Azotla kesilen üçgen örneğinin dış kısmı.....	43
Şekil 3.23. Oksijenle kesilen daire örneğinin iç kısmı.....	44
Şekil 3.24. Oksijenle kesilen daire örneğinin dış kısmı.....	44
Şekil 3.25. Oksijenle kesilen kare örneğinin iç kısmı.....	45
Şekil 3.26. Oksijenle kesilen kare örneğinin dış kısmı.....	45
Şekil 3.27. Oksijenle kesilen üçgen örneğinin iç kısmı	46
Şekil 3.28. Oksijenle kesilen üçgen örneğinin dış kısmı	46
Şekil 3.29. Havayla kesilen numunelerin yüzey pürüzlülüğü fotoğrafları	49
Şekil 3.30. Azotla kesilen numunelerin yüzey pürüzlülüğü fotoğrafları	50
Şekil 3.31. Oksijenle kesilen numunelerin yüzey pürüzlülüğü fotoğrafları.....	51
Şekil 4.1 Çentik genişliği ve derinliği.....	56
Şekil 4.2. CO ₂ lazer kesim kenarlarının dikey sapması.	57

TABLULAR DİZİNİ

	Sayfa
<i>Tablo 3.1. Deneyi başlatmak için gereken parametreler</i>	35
<i>Tablo 3.2. Yardımcı gazın hava olması durumundaki kesim parametreleri</i>	36
<i>Tablo 3.3. Yardımcı gazın azot olması durumundaki kesim parametreleri</i>	40
<i>Tablo 3.4. Yardımcı gazın oksijen olması durumundaki kesim parametreleri.....</i>	43
<i>Tablo 4.1. CO₂ lazer kesim parametreleri</i>	59

1. GİRİŞ

Polimerlerin temel yapısı organik maddelerin altında sınıflandırılabilir. Bunlara; ahşap, kauçuk, pamuk, yün, deri, ipek ve moleküler mühendisliğine ihtiyaç duyan endüstriler, plastik, polivinil klorür (PVC) ve polietilen (PE) türleri örnek olarak verebilir. Ayrıca, polimerler farklı oranlarda karbon (C) ve hidrojen (H) içermekte olup, farklı alanlarda kullanılmaktadırlar. Birçok uygulamalarda, çoğu metal ve ahşap malzemelerin yerini plastik malzemeler almıştır. Bunun en önemli sebeplerinden biri polimerlerin işlenmesinin kolay olmasıdır (Ashby & Jones, 1996; Callister & Rethwisch, 2007).

Polimerler hafif, uzun zincirli ve yüksek molekül ağırlıklı bileşiklerdir. Metllere göre mukavemet, esneklik ve rijitliği düşüktür ancak ucuz olmaları, kolay işlenebilir olmaları ve hafif olmalarının yanında yüksek kimyasal ve korozyon direncine sahip olmaları nedeniyle tüm endüstriyel alanlarda kullanımı oldukça yaygındır(Kadhim, 2017).

Polimer türleri ve malzemeleri, çok farklı gruplara ayrılmıştır. Polimerlerin sınıflandırılmasında sentetik polimerlere en iyi örneklerden biri polietilendir. 1900'lü yılların başından beri, bilim adamları ve araştırmacılar polietileni geliştirmektedirler. Düşük yoğunluklu polietilen (LDPE), orta yoğunluklu polietilen (MDPE) ve yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE) gibi farklı bir tür üretmek amacıyla çalışmalarını sürdürmektedirler (Gabriel, 1998). Yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE) 1990 yılında keşfedilmiştir ve o zamandan beri, özellikle sanayide yüksek performans ve mekanik dirence sahip olan bu polietilen tipi kullanılmaktadır. Böylece; çelik, bakır ve çimento gibi farklı üretimler için alternatif bir ürün elde edilmiştir. (Quality, 2000).

Yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE), geçen yüzyıl sonunda keşfedilen polietilen türlerinden birisi olup diğer türler arasından ayrıcalıklı kalite kriterlerine sahiptir. Çeşitli malzemelerle karıştırılabilir olması kompozit bir malzemede matriks malzeme olarak kullanılmasına sebep olmuştur (Laslau, 2009). Bu tür, diğer yapı malzemeleri ile karşılaştırıldığında, mekanik ve kimyasal davranış avantajlarına ilaveten, su, petrol

ve doğalgaz gibi sıvıların taşınmasında başarılı bir şekilde kullanılan bir türdür (Cheng, 2008).

Bu araştırmada, endüstride en çok kullanılan borulardan olan PE100 boru tipi belirlenmiştir. Bu borudan farklı geometrik şekillerde (kare, daire, üçgen) delikler açılmış ve incelemesi yapılmıştır. Bu şekillerden köşe açıları 45° ve 90° derece olan kesimler araştırılmıştır. CO₂ ile lazer kesim sistemi kullanılarak, pratikteki etki ve kalitesi değerlendirilmiş ve sanayide bu kesim türünün kullanılabilirliği incelenmiştir.

Yüksek yoğunluklu polietilen boru türü PE100 (TS EN 12.201-2 A1) kesme hızı ve lazer sıcaklığı ayarlandıktan sonra özel bir CO₂ lazer makinesi aracılığıyla (Amada Fanuc AF2000E) normal ortam sıcaklığında kesilmiştir. Makinanın ayarları boru üzerine CO₂ lazer kesmenin etkisi göz önünde bulundurularak seçilmiştir. Kesimlerde lazerin kullanılması son derece yüksek maliyet gerektirmesine rağmen üretimde yüksek verimliliğe sahiptir.

Son günlerde, lazer kesim endüstriyel işletmelerde en önemli operasyonel işlemlerden biri haline gelmiştir. HDPE malzemeler için lazer kesim uygulamaları oldukça önemli bir hal almıştır.

Polimerik malzemeler için lazer kesim yöntemi, bazı üretim sektörlerinde önemli bir metottur (Davim, vd. 2008). Lazer, yeni bir mühendislik alanı olarak görülmektedir. 1960'lı yılların sonunda lazer cihazının karlı bir cihaz olduğu ortaya çıkmış ve sonunda birçok sanayi sektörü için ana unsur olarak sanayide yerini almıştır (Christopherson, 2002).

CO₂ Lazer kesimi, farklı malzeme türlerini (metaller ve polimerler) kesmek için kullanılan yöntemlerden birisidir. Karbon dioksit (CO₂) gazı kesmede etkin ana gazdır, Azot (N₂) ve Helyum (He) gazları ise yardımcı gaz olarak kesmeyi etkilemektedir (Wandera, 2006).

İki tür ticari karbondioksit lazer makinesi bulunur:

- Eksenel hızlı akışlı lazer.
- Çapraz akışlı lazer.

Tez çalışmasında, eksenel hızlı akışlı lazer prensibi, eksenel hızlı akım lazeri olarak kullanan CO₂ lazer makinesi kullanılmıştır. Cihaz Amada Fanuc AF2000E sisteme sahiptir ve verileri toplamaktadır. Eksenel hızlı akışlı lazer, çapraz akışlı lazere göre daha iyi bir kesme kalitesi sağlamaktadır. Çapraz akışlı lazer daha fazla etkili alana sahiptir (Choudhury & Shirley, 2010). CO₂ lazer kesimi, farklı tür polimer malzemelerde etkili sonuç veren mükemmel bir metod olarak bilinmektedir (Laslau, 2009).

1.1. Tezin Amacı

Bu çalışmada yüksek yoğunluklu polietilen parçaların kesilmesindeki parametreler ve CO₂ lazer kesim cihazı kullanılmıştır. Böylece, HDPE borudan, farklı tipte gazlar kullanılarak (hava, N₂ ve O₂) üç farklı geometrik parça kesilmiş, malzemede ortaya çıkan değişiklikler araştırılmıştır. Bu çalışmada programın ve lazer kesim makinesinin yolunun yuvarlak bir şekilde ayarlanması tabla hareketiyle mümkün olmuştur. Bunun sonucu olarak üç farklı geometrik şekil (daire, kare ve üçgen) polietilen borudan kesilmiş ve kesim sonrası araştırılmıştır. Borunun yuvarlak olmasından dolayı kesme yüzeyinin etrafındaki mesafeyi kontrol etmek için kesim yapılırken tabla hareket verilmiş ve başarılı olunmuştur.

Bu çalışmanın genel hedefi:

1. Yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE), P100 üzerinde CO₂ gazı lazer kesimini incelemek
2. Üç farklı geometrik şeklin belirli ölçümlerle kesilmesinin değerlendirilmesidir (kare kenarı = 20 mm, daire çapı = 20 mm ve eşkenar üçgen kenarı = 20 mm).

3. Farklı bir yardımcı gaz (hava, N₂ ve O₂) ve basınç altında 4 inç boru, kavisli bir yüzey etrafında CO₂ lazer kesim kullanarak kesilmiştir.

1.2. Tezin Yapısı

Literatürün taranmasıyla önceki araştırmaların bize benzer çalışma ve projeler için başkalarının deneyimlerini aktarmaktadır. Önceki araştırmacılar tarafından ulaşılan sonuç ve öneriler, araştırmayı başarıyla tamamlamaya yardımcı olacak şekilde ve hataları minimize etme amacıyla araştırmacı tarafından kullanılabilir. Özellikle yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE) üzerine CO₂ lazer kesim konusunu ele alırken kullanılmaktadır.

Bu araştırma beş bölüm altında sınıflandırılacaktır. Her bölümün tanımlanmış alt başlıkları olacaktır. Bu çalışmanın ana bölümünde, yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE) ve lazer kesim makineleri tanıtılacaktır. Önsöz, malzemelerin niteliklerini içermekte olup ayrıca, önceki çalışmalarda elde edilen bakış açıları, kullanılan malzemelerin detayları ve günümüz çalışmalarında nasıl yararlanılabileceği incelenecektir.

İkinci bölümde, HDPE terimi ve bu materyalin mekanik özellikleri ile ilgili, çalışmayla bağlantılı tüm terimlerin tanımlarına değinilecektir. HDPE'nin avantajlarını ve uygulamalarını tartışılacaktır. Ayrıca, bu bölüm CO₂ lazer kesmeyi de içerdiğinden önceki ve günümüzdeki tanımları açıklanacaktır. Aynı şekilde lazerlerin önemli parçalarının kapsamlı bir grafiği/gösterimlerini içermektedir.

Üçüncü bölümde, araştırmanın teknikleri, HDPE'nin CO₂ ile kesilerek lazer kesim işleminin prosedürü gösterilecektir. Çalışmayı tamamlamak için kullanılan özel metot bu bölümde belirtilecektir. Ayrıca HDPE için lazer ışını gücünün ayarı, yardımcı gaz türü ve kesme hızı gibi konularda incelenecektir.

Dördüncü bölümde, CO₂ gazı lazer kesimi ile alakalı yapılan önceki araştırmalar hakkında rapor sunulacak ve eğer varsa tavsiyeler ile sonuçlarının detaylarını belirtilecek ve bu deneyden elde edilen sonuçları tartışılacaktır.

Son bölüm olan beşinci bölümde, çalışmanın tüm çıkarımları netleştirilecek ve yüksek yoğunluklu polietilenin kesilmesi deneylerinden elde edilen tüm sonuçlar gösterilecektir. CO₂ lazerle kesme yöntemi ve borudan elde edilen şekiller ele alınacaktır. Dahası sonuç ve tartışma bölümlerinde yüksek yoğunluklu polietilenin farklı şekillerde kesilmesinde iyi sonuçlara ulaşıldığı sonucuna varılmıştır. Öneriler kısmında ise bu çalışmadan sonra gelecek çalışmalarda neler yapılabileceği ile ilgili öngörüler verilmiştir.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Bu bölümde, moleküler yapının detayları ve yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE) borunun özellikleri hakkındaki literatür çalışmalarına değinilecektir. Lazer uygulamalarının genel özellikleri ve CO₂ lazer kesim yöntemiyle literatürde hangi konuların çalışıldığı incelenecektir.

2.1. HDPE ve Özellikleri

2.1.1. HDPE Tarihi

19. yüzyılın sonunda, Alman kimyacı Hans Von Pechmann, eterin bir yapısı üzerinde çalışırken metan birikimini tespit etmiştir ve birkaç yıl sonra 1900'de Alman kimyacı Eugen Bamberger ve Friedrich Tschirner tarafından bu kompozit, bir polimetilen olarak tanımlanmıştır. 1935 yılında, İngiltere'den Eric Fawcett, etilen ile yüksek basınçla çalışırken polimetilenin formülünü icat etmiştir. Yeni bileşik, İkinci Dünya Savaşında radar kablosunun izole edilmesi için ilk kez kullanılmıştır.

Kaiser Wilhelm Enstitüsü'nden Karl Ziegler (Kimyada Nobel Ödülü / 1963) ve Erhard Holzkamp tarafından düşük basınç kullanarak yüksek yoğunluklu polietileni icat edilene kadar 1953'te bilim adamları bu malzemeler üzerinde çalışmaya devam etmiştir. Ziegler ve Holzkamp polietilen bileşiklerinin bazı çeşitleri açıklayan hipotezi bulmuşlar ve iki yıl sonra 1955 yılında yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE) boru üretim araştırmaları başarıyla tamamlanmıştır (Gabriel, 1998). İlk boru PE 63 terimi altında 1959 yılında su ve kimyasal sıvılarda kullanılmak üzere 16 mm'den; 250 mm'ye; kadar üretilmiştir. HDPE malzemesi, korozyon, paslanma ve kolay kurulumu ve dayanıklılık özellikleri ile metal malzemelerin en zorlu rakiplerinden biri sayılmaktadır. Özellikle PE 63 ile PE 80 geliştirdikten sonra ve 1977'de 1000 mm'lik; boru, ve 1995 yılında yüksek kalınlıklı ve basınçlı daha etkili kimyasal ve mekanik özelliklere sahip olan PE100, PE80 yeni bir ürün geliştirilmiştir (Gibson, 2004).

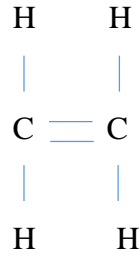
HDPE her türlü polietilen ile karşılaştırıldığında mükemmel bir kimyasal ve mekanik özelliklere sahip olup, diğer çeşitler karşısında; sertlik, rijitlik, çekme mukavemeti,

moleküler yapı ve izolasyon, olması gereken daha yüksek yalıtım gibi benzersiz özelliklere sahiptir. Ayrıca merkezi soğutma sistemlerinde, soğutucudan hava kontrol ünitesine soğutulmuş suyun aktarılması için de kullanılabilir. Son zamanlarda birçok farklı branşta çok sayıda plastik boru kullanılmaktadır. Özellikle HDPE boruları, petrol, gaz, su, vb. taşımada kullanılmaktadır.

2.1.2. HDPE'nin Genel Yapısı

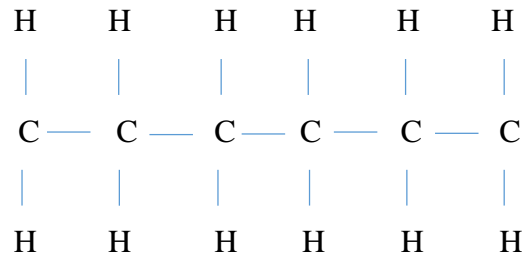
Polietilen, kimyasal olarak basit bir polimerdir, temel tekrarılma ünitesi (- CH₂ – CH₂ -) şeklindedir (Cheng, 2008).

Etilen için (C₂H₄) çevre sıcaklığında gaz yapısı, moleküler yapıda tek bağlı iki hidrojen atomuna iki adet çift bağlı karbon atomu bağlanmış olarak Şekil 2.1 'de gösterilmektedir (Callister & Rethwisch, 2007, Gabriel, 1998),



Şekil 2.1. Etilen (C₂H₄) moleküler yapısı.

Aşağıda Şekil 2.2'de Polietilen (PE) "katı polimerik malzeme" moleküler yapısı gösterilmektedir (Callister & Rethwisch, 2007).



Şekil 2.2. Polietilen (PE) moleküler yapısı

Polietilen, poliolefin tiplerinden biridir ve polietilenin ayrıldığı bir termoset özelliğine sahiptir.

- Düşük yoğunluklu polietilen LDPE
- Orta yoğunluklu polietilen MDPE
- Yüksek yoğunluklu polietilen HDPE

Yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE), yüksek bir moleküler ağırlığa sahiptir. Uzun zincir ve doğrusal yapı anlamına gelen karbon ve hidrojen bileşimi içermektedir. Yoğunluğu 0.941 - 0.965 g/cm³ arasında değişir ve karbon polimer zinciri 1 000 000; birim uzunluğuna ulaşmaktadır. Ana zincir ne kadar uzunsa, atom sayısı o kadar fazla olur (Gabriel, 1998, Callister & Rethwisch, 2007).

Boru, malzemesine ve çalışma sahasına bağlı olarak, endüstri alanında birçok farklı boru tipi kullanılmıştır (Es-Saheb, 1996). En önemli sektörlerden biri, sahada yüksek bir performans olduğunu kanıtlayan HDPE türüdür.

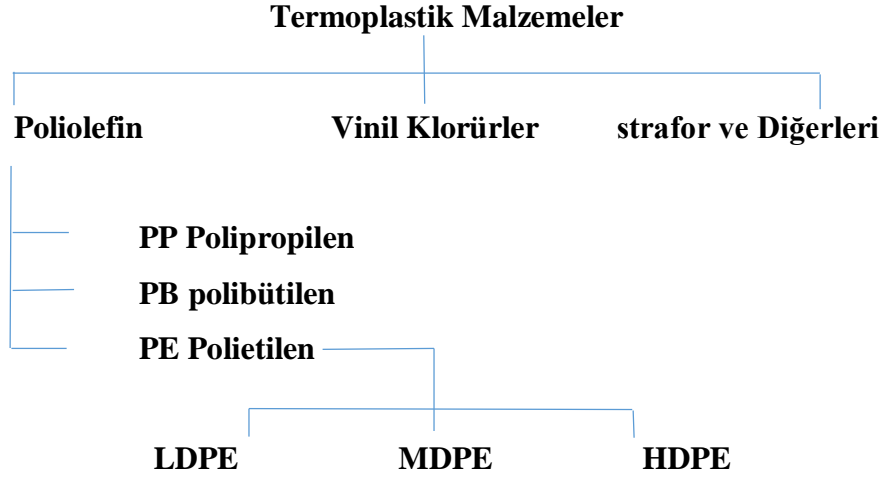
2.1.3. HDPE Sıcaklığını Etkileyen Etkenler

Yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE) boruların standart sıcaklık tasarımı 25 ° C'dir. Doğru sıcaklık altındaki genel özellikler, borunun kullanım alanını belirlemektedir (Nakayama et al., 1991). Yüksek Yoğunluklu Polietilen (HDPE), mekanik kuvvetlerin sıcaklık değişimleri ve kısmi yapısı, yapı zinciri doğrusaldan çapraz bağlı yapıya dönüştürülmesi kabul edilmesiyle karakterize edilen termoplastik bir yapıdır (Callister & Rethwisch, 2007). Bu durum HDPE'nin yapısını ısıyla sertleşen polimer haline getirmektedir. Örneğin, HDPE yüksek yoğunluklu polietilen borular için kaynak kullanırken, borunun uç kısmı ısıtılır ve sıcaklık uygun basınç altında yükseltilmesi gerekmektedir. Bu sürede borunun kesit oluşumunun değişimini gözlemlenebilmektedir (Nexor, 2010).

2.1.3.1. Termoplastik ve termoset polimerler

HDPE termoplastik malzemelerin sınıflandırılması Şekil 2,3' te gösterilmektedir. Bu durumda termoplastik gibi bir yapı gösterir, ısıtıldığında yumuşar ve soğutulduğunda da sertleşir, geri dönüşümü yapılabilmektedir.

HDPE lineer polimerlerdir ve esnek moleküler zincirlerle, bazı dallı yapılara sahiptir. Genellikle ısıyla sertleşen polimerlerden daha az sert ve daha az güçlüdür, bunlar çapraz bağlı ve ağ polimerleridir. Buna en güzel örnek epoksilerdir (Callister & Rethwisch, 2007).



Şekil 2.3. Termoplastik Malzemelerin Sınıflandırılması

2.1.4. Polietilen Çeşitleri ve Üretimi

Farklı polietilen çeşitleri vardır, hepsi karbon (C) ve hidrojen (H) bağlarına sahiptir, bu nedenle farklı özelliklere sahiptirler. Temsil edilen moleküler ağırlıkları ve tüm PE tipleri arasındaki ana özellikleri, çoğu molekülerin ağırlık dağılımına, kristalinite yüzdesine, yoğunluğuna, uzun ve kısa zincirli dallara bağlıdır.

Moleküllerin ağırlıklarının, polietilenin mekanik özelliklerine etkisi vardır. Yarı Kristal polimer yoğunluğu, kristal üzerine etki ederek polietilenin (lineer ve dallı zincirler) zincir türünü direkt etkilemektedir. Kristalin artması, polietilen sertliği, gerilme, akma mukavemeti ve yoğunluğunun artmasına neden olmaktadır.

Polietilen üç tipte sınıflandırılabilir:

- Düşük yoğunluklu polietilen LDPE
- Orta yoğunluklu polietilen MDPE

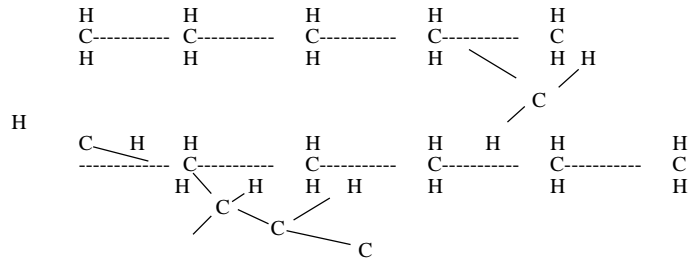
- Yüksek yoğunluklu polietilen HDPE

Yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE), imalatta kimyasal ve mekanik özellikler nedeniyle en çok kullanılan polietilen türüdür.

Polietilen iki farklı yöntemle üretilebilir, birincisi; yüksek basınç metodu kullanarak düşük yoğunluklu polietilen (LDPE) üretmek, ikincisi ise düşük basınç yöntemi kullanılarak, yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE) üretmektir (Lepoutre, 2013).

2.1.4.1. Yüksek basınç yöntemi

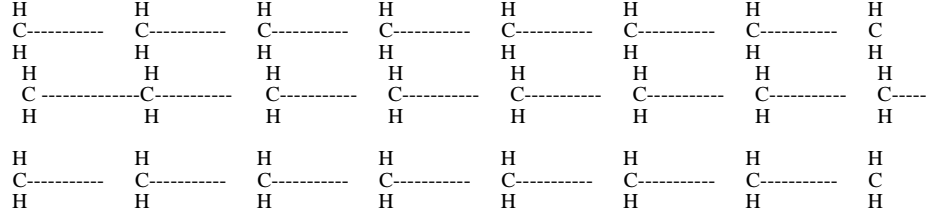
Düşük yoğunluklu polietilen üretmek için (LDPE), yüksek basınç (1000 - 3000) bar tedarik edilerek (80 - 300) ° C de ısıtılması aynı zamanda etilen gaza az miktarda oksijen katılarak kontrollü bir reaksiyona ihtiyaç duyulmaktadır. Bu durumda moleküler ağırlık dağılımı daha fazla olmaktadır. Aşağıda gösterildiği gibi (Şekil 2.4.) çok dallı zincirlere sahip olmaktadır. Düşük yoğunluklu polietilen olarak bugün piyasada “Blown Film” olarak görebiliriz (Lepoutre, 2013).



Şekil 2.4. LDPE için moleküler ağırlık dağılımı

2.1.4.2. Düşük basınç yöntemi

Yüksek basınç yöntemiyle LDPE üretilmesi 1930'da tesadüfen bulunmuştur (Gabriel, 1998). 1952'de Alman ve İtalyan araştırmacılar HDPE'yi, düşük basınç altında (10 - 80) yeni bir Alüminyum katalizör kullanarak ve etilen gazını (70 - 300) °C'de ısıtarak keşfetmişlerdir. Bu prosedür altındaki ürün her türlü PE'den daha serttir. Aşağıdaki Şekil 2.5'te gösterilen doğrusal bir polimer zinciridir (Lepoutre, 2013).



Şekil 2.5. HDPE için moleküler ağırlık dağılımı

2.1.5. HDPE Mekanik Özellikleri

Yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE), LDPE'den daha büyük bir kristalize alana sahiptir ve yüksek yoğunluktan dolayı, polimerik zincir moleküler dağılıma sahiptir. LDPE uzun polimerik zincire sahip bir yapıdadır (Gabriel, 1998). LDPE yüksek esneklikle daha az mukavemetli bir yapıya sahipken, HDPE'nin gerilme mukavemeti ve çevresel gerilim çatlaması direncine sahiptir. PE değişimlerinin mekanik davranışı, moleküler yapısına ve kopolimerlerine bağlıdır. Yapı binlerce CH₂ içermektedir (Catalogue, 2017). HDPE, daha büyük doğrusal, dallanmış bir moleküler yapıya sahipken, LDPE daha küçük dallanmış moleküler yapıya sahiptir (Callister & Rethwisch, 2007; Cheng, 2008).

HDPE 'nin mekanik özelliklerine birçok etkileyen faktör vardır:

- HDPE Yoğunluğu
- HDPE Moleküler Ağırlık Dağılımı
- HDPE Erime Noktası
- HDPE Viskoelastik

2.1.5.1. HDPE Yoğunluğu

Polietilen yoğunluğu 0.910-0.965 g / cm³ arasında değişmektedir. Yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE) yoğunluğu molekül ağırlığının polimerizasyonuna ve kristalin

derecesine bağlıdır (Catalogue, 2017). Artan bu moleküler ağırlık ve büyük karbon dallarının zincir uzunluğu, kristalliği ve nihai yoğunluğu azaltmaktadır (Gabriel, 1998; Nakayama et al., 1991).

AST standartlarına göre polietilen yoğunluğu aşağıdaki gibi sınıflandırmaktadır:

PE Tipi		Yoğunluk (g / cm ³)
Yüksek yoğunluklu polietilen	HDPE	(0.965 - 0.941)
Orta yoğunluklu polietilen	MDPE	(0.940 - 0.926)
Düşük yoğunluklu polietilen	LDPE	(0.925 - 0.910)

2.1.5.2. HDPE Moleküler ağırlık dağılımı

Polimerlerde moleküler ağırlıkları veya moleküler kütleleri bulunmaktadır (Callister & Rethwisch, 2007). Bu durum polimerizasyon sırasında farklıdır ve bu da polimer zincir uzunluğuna bağlıdır. Eriyik viskozitesi moleküler ağırlık veya molekül ağırlık ortalamasıyla değişmektedir. Bu durumda molekül ağırlığının artmasının, eriyik viskozitesini artırdığı anlaşılmaktadır (Catalogue, 2017). Bununla beraber polietilen, farklı bir molekül ağırlığı veren farklı bir moleküler zincir uzunluğuna sahiptir. Bu durum HDPE'nin özelliklerini net bir şekilde açıklamaktadır. Bu durumda daha iyi bir mekanik özellik elde etmek için yüksek moleküler ağırlığa sahip olması gerekmektedir.

2.1.5.3. HDPE Erime noktası

HDPE moleküler yapının plastik formdan şekilsiz forma değiştiği noktadır yani katı halden sıvı hale geçişidir. Erime noktası, PE'nin kristaline ve yoğunluğuna bağlıdır (Catalogue, 2017). HDPE yapısı termoplastik özelliklere sahiptir. Yani, sıcaklık moleküler yapıyı etkilemez, ısıtıldığı zaman çözünürlük derecesine ulaşmaz.

Sıcaklık, erime ısısına ulaşmadan önce, moleküler astar yapısı lineer özelliklerini kaybederek termosete dönüşür (Gabriel, 1998). Bu davranış HDPE (128 °C) ile LDPE (110 °C) arasındaki sıcaklık erime noktasında ki varyasyonları açıklar ki bu da şu anlama gelir; erime noktası sıcaklığı, polimerlerin moleküler ağırlık artışı ile artış göstermektedir (Callister & Rethwisch, 2007).

2.1.5.4. HDPE Viskoelastik

Polietilenin viskoelastik davranışı, hem katı hem de sıvı özellikleriyle sıcaklık değişimlerine sahiptir. Camsı geçiş sıcaklığının polietilen davranışlarına hiçbir etkisi olmadığı gibi, polietilen bu sıcaklıkta sağlam ve sert kalır. Camsı geçiş sıcaklığının üstünde moleküler yapı zinciri hareket ederek PE daha fazla sıvı olarak davranacaktır. Sıcaklık, erime noktasına ulaştığında, PE matrisin içindeki kristal eriyecek ve sıcaklık erimeden daha yüksek hale gelecektir. PE'de yapısal kayıp olmakta ve viskoz sıvı meydana gelmektedir (Callister & Rethwisch, 2007; Cheng, 2008).

2.1.6 HDPE Uygulamaları ve Avantajları

HDPE, PE 100 boru polimerleri üzerinde esneklik, çekme mukavemeti, sertlik, kimyasal direnç, eriyik viskozitesi, iletken olmayan elektrik özellikleri ve termal iletkenlik gibi mükemmel bir fiziksel özellik taşıyan benzersiz bir kimyasal yapıya sahiptir.

Yüksek yoğunluklu polietilenin 1955'te sanayiye başarılı bir şekilde girmesi ve 1990'da HDPE 'nin PE 100 olarak gelişmesi ve büyük çaplı su borularının üretilmesi için kullanılan malzemelerle dünya da bilinir hale gelmiştir. PE 100 borularının kalın duvarlı kaynak karakteristikleri ve bu polimerin LDPE ve MDPE'den farklı özelliklere sahip olması nedeniyle molekül ağırlığı ve bu polimerler arasındaki zincirin yapısal özelliği ve boruların kurulumu, özellikle boru kesitleri arasındaki kaynak derzleri ve sünekliliğin azaltılması nedeniyle, bazen 25 mm'lik kalınlıkta veya daha büyük duvarlara sahip boruların (Pipesystems, 2017), kaynaklarının test edilmesi sırasında daha yüksek gerilmeler gözlemlenmiştir. Tüm bu nedenlerle, HDPE içme suyu, atık su, kimyasallar, petrol, sıkıştırılmış gazlar ve diğer endüstriyel malzemeleri taşımak

için kullanılır hale gelmiştir. Dahası, aynı kriterlerde kullanılan diğer boru malzemeleri ile karşılaştırıldığında, mesafe başına boru montajı ve onarımı için en düşük maliyete sahiptir. Yüksek dayanıklılığa ve yüksek kaliteye sahip HDPE'ler, bize uzun ömürlü ürün elde etmemizi sağlar (Quality, 2000).

Polietilen boruların, imalat ve sanayide kullanılmasını gerektiren ekonomik, mekanik özellikler, asit direnci, yağ direnci, kimyasal özellikler, pürüzlülük, geri dönüşüm vb. gibi birçok faktör bulunmaktadır.

2.1.6.1. Ekonomiklik

Yüksek yoğunluklu polietilen kimyasal bir inerttir. Mükemmel kimyasal direnci ve HDPE'nin kristal yapısı nedeniyle ve aynı zamanda nem ve kimyasal bileşiklere direnç özelliği sebebiyle, sterilize özelliğine sahip tıbbi malzeme ve gama ışınları üretimi ve farklı türde sıvıların taşınması için boru üretimi gibi farklı ekonomik uygulamalarda kullanılmıştır. Burada unutulmaması gereken bu malzemelerin düşük maliyetli olmasıdır (Kadhim, 2017).

2.1.6.2. Kimyasal özellikleri

Yüksek yoğunlulu polietilen, moleküler bileşimi sayesinde korozyona karşı yüksek dayanıklıdır. Bunun nedeni de onun yapısının uzun moleküler zincirlerden oluşması ve esnekliğidir. Bu özelliği ile diğer polietilen türlerinden ayrılır. Bu özellikler PE türüne boru üretiminde ve kimyasal endüstride kullanım avantajı sağlar.(Gabriel, 1998).

2.1.6.3. Termal iletkenlik

Sanayide HDPE 0,44 W / m. K termal iletkenliği (Tarani et al., 2017) nedeniyle farklı türdeki sıvıların taşınmasında önemli faktörlerden biri olarak kabul edilir. Zira sıcaklık arttıkça termal iletkenlik azalır (Tavman, vd., 2011).

HDPE, düşük ısı iletkenliği nedeniyle mükemmel bir yalıtım ürününe sahiptir. Aşağıda verilen örnekte Q ısı kaybını hesaplayabilir ve bir metre uzunluğundaki (L=1 m) boru üzerindeki ısı iletkenliğinin etkisini bulabiliriz:

$$Q = \frac{T_2 - T_1}{\ln \frac{R_2}{R_1} \cdot 2 \cdot \pi \cdot K \cdot L}$$

Borunun iç ve dış çapları R_1 ve R_2 , iç ve dış sıcaklığı T_1 ve T_2 ve borusunun ısı iletkenliği K olması durumunda, PE 100 olur. Bu ölçümün amacı boru izolasyonuna termal iletkenlik etkisini ispat etmektir.

2.1.6.4. Asit direnci

HDPE, $1.5 < \text{pH} < 14$ "aralığında bir değer sağlamakta ve galvanik korozyona ve agresif toprağa karşı bariyer korumasına gerek kalmadan metal borulara alternatif en iyi çözüm sayılmaktadır (Gabriel, 1998).

2.1.6.5. Pürüzlülük

İç yüzeyinin çok kaygan olması nedeniyle drenaj sularının HDPE ile taşınması en uygun seçimdir. Pürüzlülük değerleri ($n = 0.010-0.013$) olduğundan dolayı sürtünme çok düşüktür. Bu yüzden HDPE suların taşınmasında en uygun bir seçenek haline gelir.

2.1.6.6 Yağa dayanıklılığı

HDPE 'nin kimyasal olarak inert olması, metalik olmayan elementlerden üretilmiş olması ve çok yüksek bir korozyon dirence sahip olmasından dolayı, HDPE, her türlü akışkanların taşınmasında en yaygın boru türü haline gelmiştir. HDPE'nin yüksek yoğunluklu polietilen atomlarının nötr kimyasal bileşimi nedeniyle, petrol, gaz gibi

organik ve inorganik maddelerin kimyasal bileşikleriyle etkileşmediği için beton ve metal borulara daha kullanışlıdır. Bunun ötesinde, tüm HDPE boruları 50 yıldan fazla bir süre için tasarlanmakta ve üretilmektedir (Gabriel, 1998).

2.1.6.7. Geri dönüşüm

1988 Plastik Endüstrisi Derneğine (PED) göre HDPE, bir geri dönüşüm polimeridir. Geri dönüşümüne izin verilen plastik türlerini tanımlamak için kullanılan sınıflandırma terimlerini ve kodlarını (SPI kodunu) ya da her türlü plastik ürün için verilen numarayı taşımaktadır (Ryedale District Council, 2014).

Yüksek Yoğunluklu Polietilen (HDPE) çok güvenlidir, inert kimyasalların özellikleri nedeniyle, yiyeceklere veya içeceklere kimyasal bir geçişi yoktur. HDPE'den üretilen mamül maddelerin çoğu süt, motor yağı, şampuan, sabun şişeleri, kutularında ve dahası su, petrol ve gaz borularını kullanıldığı görülmektedir (Gabriel, 1998)

2.1.6.8. Korozyon direnci

Korozyon, metal boru sistemlerinde en önemli problemdir. Borunun her iki tarafını da etkiler ve bu da metal boruları korumak için plastik kaplama veya kılıflar gibi çözümlere iter ve bu nedenle masraflı koruma çözümleri gerektirir. Polimer yapılı HDPE, paslanmaya veya korozyona karşı korumaya ihtiyaç duymaz, çünkü biyolojik olarak dayanıklıdır bu da düşük maliyetli ve uzun ömürlü bir hizmet anlamına gelmektedir.

2.2 CO₂ Lazeri

Lazer, radyasyonun uyarılmış emisyonunun ışık amplifikasyonu demektir (Silfvast, 2004). Endüstride birçok farklı amaçta kullanılan benzersiz bir ışıktır. CO₂ ile yapılan lazer kesimi, malzemeleri şekillendirmek için kullanılan bir tür termal ayırma yöntemidir (Schulz, Nießen, Eppelt, & Kowalick, 2017).

Wandera bu çalışmasında, maliyetin daha az olması, en iyi lazer ışın kalitesine sahip olması ve diğer lazer kesim tiplerine yüksek çıkış gücü sağlaması nedeniyle yaygın olarak kullanılan CO₂ lazer kesim sistemi kullanmıştır (Wandera, 2006).

Birçok araştırmacı, ilk keşfedildiği günden bu yana farklı türdeki polimerlerle CO₂ lazer kesimi üzerinde çalışmış ve özellikle PE'nin 500 W lazer gücü ile kesilebileceği sonucuna varmışlardır (Caiazza, vd. 2005; Zhou & Mahdavian, 2004), çalışmalarında plastik tahta deneyine bağlı olarak 60 Watt'tan fazla CO₂ lazer enerjisi gerektirmediği sonucuna varmışlardır. CO₂ lazer kesimi enerjisi, istenen şekle bağlı olarak kesme etrafında yüksek verim sağlamaktadır (Choudhury & Shirley, 2010).

Ayrıca CO₂ lazer sistemi 8000 W'a ulaşan yüksek güç sağlamaktadır. Paslanmaz Çelik ve yüksek alaşımlı malzemeler gibi farklı bir malzemeleri kesmek için kullanılmaktadır (Wandera, 2006). Bununla birlikte, malzemelerin son şekli, lazer gücüne ve makinenin yüksek kalite değerlerini üretme hızına bağlıdır (Choudhury & Shirley, 2010). Yüksek lazer gücü ve lazer kesim hızına bağlı olarak kesim ve ısı alanında bazı etkileşimlere rastlanmaktadır (Davim et al., 2008).

Ozcan, 2007'nin çalışması incelendiğinde CO₂ lazer sisteminin karışım oranlarını belirlemek için kaynaklar farklılaştırılmıştır. CO₂ lazer sistemi, 2.5 cm'lik çaplı ve 2 m'lik uzunluklu su soğutmalı tüp içerisinde % 5 CO₂, % 10 N₂ ve % 85 He gaz karışımı denenmiştir. Laslau, 2009'un çalışmasında ise CO₂ lazer karışımı içeren başka bir oran göze çarpmaktadır. Bu oran CO₂ % 6, N₂% 20 ve % 74'tür.

Güç etkisine bağlı olarak üç tip CO₂ lazer sistemi vardır:

- Düşük güç sistemleri 3 - 100 W
- Orta güç sistemleri 300 - 3000 W
- Yüksek güç sistemleri 6000 W'a

Bu sistemde Nitrojen parçacıkları CO₂ parçacıklarına enerjiyi sağlamaktadır. Gaz karışımı, yüksek yoğunluklu elektronlar aracılığıyla iyonize olacak ve titreşim seviyesi

katot olarak adlandırılan üst seviye ile anot olarak adlandırılan alt seviye arasında geçiş yaptığı gözlenecektir. Elektrotlara uygulanan yüksek voltaj sayesinde lazer ışını yapan fotonlar serbest kalırken, bu arada helyum da, CO₂ partiküllerinin tekrar kullanılmak üzere depolamasını sağlayacak şekilde çalışmaktadır (Wandera, 2006).

Genel olarak, matriks içindeki lif yapısı ve proses sırasında radyasyon kızılötesi için büyük emilim nedeniyle ametaller ve kompozit malzemelerin çoğunda CO₂ lazer kesim kullanılmaktadır (Laslau, 2009).

2.2.1. Tarih ve Gelişim

1958 yılında Schawlow Further Townes'ın deneylerinde, morötesi ışığın hazırlanmasında dinamik ortam olarak potasyum buharları kullanmıştır. Bu olay “LAZER” olarak adlandırılan yeni bir ışık türünün keşfedilmesine yol açmıştır. Schawlow 1959'da “LAZER, Radyasyonun Uyarılmış Emisyonuyla Işık Amplifikasyonu” adlı icadını açıklamıştır. (Tahir, 2015).

1968'den 1970'lere kadar mühendislik teknolojisi geliştirilmiş ve özellikle ticari ve endüstriyel pazarda yer alan lazer kesme cihazları geliştirilmiştir. 1980'lerin ortalarından 1990'ların ortalarına kadar yeni nesil lazer teknolojisi ortaya çıkmıştır. Bunlar; kompakt optik diskler, lazer yazıcılar ve barkod tarayıcıları gibi örneklerdir. Lazerlerin küresel ticareti milyarlarca ulaşmaktadır (Negarestani, 2010).

Buluşun geliştirilmesi ve lazerin kalitesi, mühendislik ve teknoloji devrimi ve lazerle buluşların geliştirilmesi talebi ve ihtiyacından dolayı o endüstride ortaya çıktığı günden bu yana gelişmektedir (Tahir, 2015).

2.2.2. Lazer Işığı

Lazer ışığı, normal ışıktan farklı olarak, aynı frekansa sahip olmasıyla beraber ekstra faza sahip fotonlar içermesi nedeniyle değişiklik arz etmektedir. Lazer ışığı tek renkli, doğrudan ve tutarlıdır. Bu, bir lazer ışığının küçük bir noktanın lekelerini tutabileceğini manasına gelmektedir. Buna ek olarak, büyük miktarda enerji yoğunluğu sağlayabilir (Negarestani, 2010).

2.2.2.1. Mono kromatik

Genellikle fotonlar, lazer ışınının içinde eşit dalga boyları içerir ve malzemelerde enerji aktarımını kontrol ederek lazer ışığını yansıtır, bu durum monokromatik yayılan frekansların ortalamalarının sınırlı olacağı anlamına gelir. Tam olarak sınırlı genişliklerden tek veya birkaç hareketli çizgiye bağlıdır. Lazer ışığı tek bir frekansa ve dalga boyuna sahiptir, yani bir prizma ile bir lazer ışığı kullanırsak, lazer ışığını prizma ile aynı frekans ve dalga boyu rengine benzer şekilde gözlemleyebiliriz (Negarestani, 2010; Trumpf, 2007).

2.2.2.2. Tutarlılık

Fotonlar normal olarak temel modda titreşir ve dalga zinciri aynı seviyede bir pozisyon seviyesinde bulunur. Yani, tutarlılık elektromanyetik dalgadaki elektronla manyetik bileşenlerin ilişkisini temsil eder, başka bir deyişle, vakumda aynı noktada faz düzeltmesi farklı zamanlarda, lazer ışığının tutarlılığı, bir yöne doğru sürekli hareket eden bir foton yoluna doğru yönlendirildiğini göstermektedir. Foton yolunda ışık penetrasyonunu ve rastgele dağılımını önler ve lazer ışığını sürekli hale getirir (Negarestani, 2010).

2.2.2.3 Yönlük

Fotonlar genellikle bir yönde ve tek seviyede ve bilhassa paralel yönde hareket ederler. Oysa lazer ışığı, hafifçe değişen kompakt bir ışık paketinin şekline sahiptir, enerjinin küçük bir alanda yoğunlaşmasına izin verir ve bu da makine kullanımını prensibidir (Trumpf, 2007).

2.2.3. Lazer Bileşenleri

Lazer üretmek için gerekli dört unsur vardır:

2.2.3.1. Lazerleme malzemeleri

Genellikle lazerleme bir ortam içerir ve lazerleme segmentleri katı, sıvı, gaz ve yarı iletken olma durumu vardır. (Abdullah, 2008). Lazer çubuğu ortamı genellikle 100 mm; uzunlunda ve 12 mm; çapındadır (Negarestani, 2010).

2.2.3.2 Pompalama kaynağı

Pompa sıcaklık noktasında (uyarma ortamı) genellikle bir kontrol kaynağı bulunmaktadır. Lazer aracına ışın pompalama yoluyla enerji sağlamaktadır. Lazer cihazına ışık enerjisi gönderilerek elektronları bir üst seviyeye yükseltmektedir. Sonuç olarak atomlar uyarılmış ve yükseltilmiş olur (Abdullah, 2008).

2.2.3.3. Optik kavite

Optik kavite, lazer ışını üretiminin temellerinden biridir. Bu da emisyon yaratmak için emisyonu uyarır, yansıtma aynaları taşıyan optik kavite, içinde hareket ettiğinde, bu aynalar arasındaki ışık yönünün yansımalarını kontrol etmek için çalışır ve bu şekilde fotonların sayısı genişlemektedir. (Tahir, 2015; Abdullah, 2008).

2.2.3.4. Çıkış sistemi

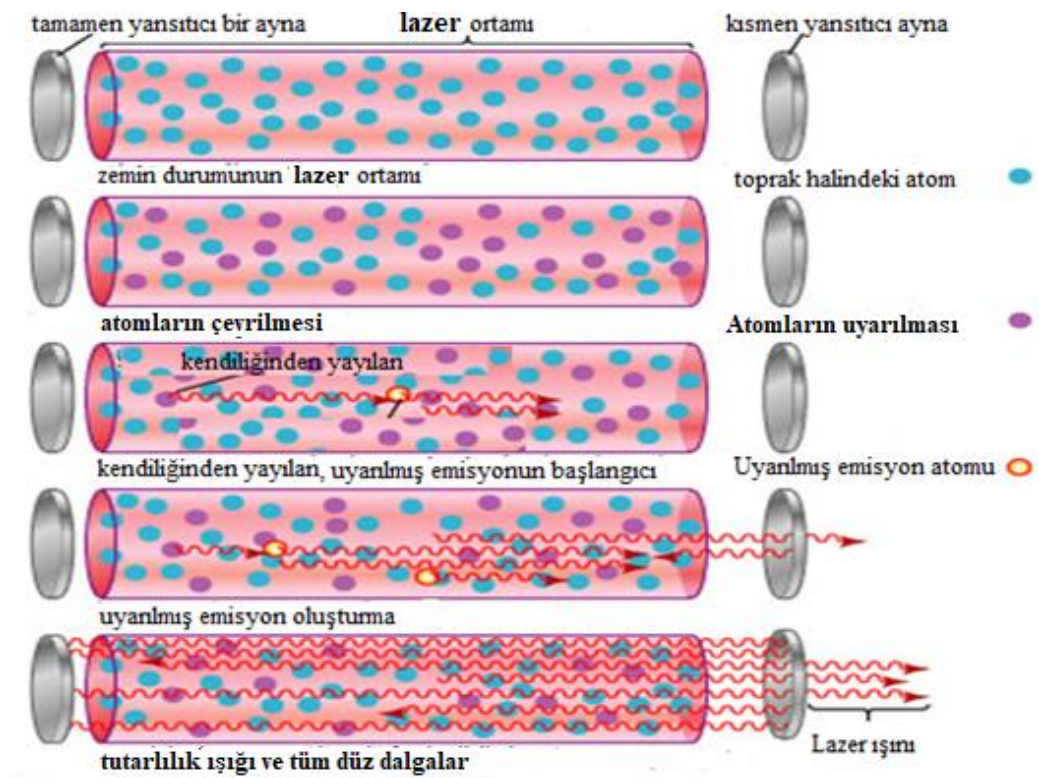
Lazer malzemesinin ve pompanın kaynağı ile optik kavitenin bir sonucu olarak enerji bir ışığa yükseldiğinde, uyarım merkezinden başlayacaktır, tam olarak ışığın çıkış sisteminden geçer, kavitede yarı saydam bir ayna olan, lazer ışınının üretileceği ve kullanıma hazır hale getirileceği yerdir (Abdullah, 2008).

2.2.4. Lazer Işınının Çalışma Prensibi

Lazer ışını, lazer kesim makinesindeki önemli unsurlardan biridir (Tahir, 2015). Öncelikle, yüksek enerji; atomlara enerji vererek yüksek enerji çizgisi ile ışık yayar. Bundan sonra, belirli bir enerji çizgisine doğru, bir kaç atom ışık partikülleri yayar ve foton haline getirir, başlangıçtaki fotonlar, bütün yönlerde doğru hareket ederler, bazı fotonlar atomlardan çıkmaya başlar ve bu durum yayılma yaratmaktadır. Fotonların bu

hareketi, ışığın ilk prensibidir ve bu ışık enerjinin hızlı bir şekilde yükseltildiği anlamına gelir.

Çalışma prensibi Şekil 2.6 'da verilmiştir. Fotonlar aynalar arasında ileri ve geri hareket etmesine sınırlı yansıtma ile zorunlu kılırken, bu aynaların iki tarafından kullanımı açıklığa kavuşturur, ayrıca bu fotonların hareket etmesi, yayınlama ve çoğaltma uyarılmasının prosedürü haline getirmektedir. Aynalar arasında fotonları yayılmaya zorlamaktadır (Abdullah, 2008).



Şekil 2.6. Lazerin çalışma prensibi (Negarestani, 2010).

2.2.5. Lazer Türleri

1960'lardan beri imalat sanayinde birçok farklı türde lazer üretilmiştir. Lazer endüstrisi piyasa ihtiyacına ve daha düşük bir maliyet sağlama kabiliyetine bağlı olarak hala gelişmektedir. Genel olarak, lazer kesiminin kullanılması, ortama bağlı olarak katı, gaz ve sıvı anlamına gelen üç önemli bileşene ayrılmıştır (Evonik Industries AG, 2011). Yardımcı gazlar ise lazer ışını üzerinde düşük ve yüksek enerjiyi üretme yeteneği nedeniyle çoğunlukla ticari işletmelerde kullanılmaktadır (Choudhury & Shirley, 2010).

Ancak lazer türlerinden ND: YAG ve CO₂, birçok farklı endüstriyel makinelerde çoğunlukla lazer ışını üretmek için kullanılmıştır.

CO₂ lazer, mükemmel verimlilik ile 10,6 µm; yüksek bir dalga boyuna sahiptir ve özellikle yüksek hızlı kesme makinelerinde en kaliteli lazer ışını sayılmaktadır. (Patel, Gohil, & Rajpurohit, 2013). Kısa dalga boyu 1 mikrondur. Darbeli modda ve büyük pik enerjisinde çalışmak için kullanılan ışın enerjisi, aynı zamanda daha ince şekillerle bile makineye uygun şekilde daha kısa bir darbe süresine sahiptir (Dubey & Yadava, 2008). Bu çalışmada, CO₂ gazı ile lazer kesimini çalışılmış ve bu türden (kesme hızı, lazer gücü ve gaz desteği) parametrelerini değerlendirilmiştir.

2.2.6. CO₂ Lazer Kesim

Lazerle kesme, yüzyılın en önemli teknolojilerinden biridir, bir malzemeyi eriterek, yakarak veya buharlaştırarak kesmek için bir programlama bilgisayarı tarafından kontrol edilen lazer enerjisi miktarını kullanarak, imalat piyasasında farklı metal ve ametal türlerini kesmek için kullanılmaktadır. Kesim tamamlandıktan sonra yüksek verim yüzeyi sonucu için kontrollü bir gaz jetini kullanılmaktadır. Ayrıca mekanik lazer kesiciler kullanarak, düz sac malzeme, yapısal ve boru malzemeleri kesmek için kullanılır.

CO₂ lazer 1964 yılında Kumer Patel tarafından üretilmiş ve o yıldan beri endüstriyel alanda önemli yöntemlerden biri haline getirene kadar geliştirmiştir. CO₂ lazer, şu anda erişilebilir en yüksek enerji, kesintisiz dalga ve gerçekten etkili olmasına ihtiyaç duyar. Pompa enerjisine orantılı çıkış gücü aynı şekilde % 20'dir. Pompa enerjisinin orantılı çıkışı % 20 civarında olduğunda, bu enerjiyle farklı tür metaller ve ametaller kesilebilir (Abdullah, 2008).

Azot molekülleri karbon dioksit (CO₂) atomlarını uyarması ve uyarılmış atomların olabildiğince yüksek olduğundan emin olmak için katalizör görevi görmektedir (Tahir, 2015). Ancak enerji üretimindeki değişim, karbondioksit CO₂ parçacıklarındaki elektronların titreşimi bir sonuç olarak ortaya çıkmaktadır. Lazer, titreşim çizgisi üzerinde enerji yüklü CO₂ parçacıkları ile başlar, sonra foton deşarjı ile devam eder ve lazer ışının yayılması ile son bulur.

CO₂ atomları, soğutma için eklenen helyum (He) atomları ile çarpışarak zemin seviyesine geri döner, bundan sonra, gaz karışımının ana etkisini içeren kırılmamış uyarılmış emisyonu korumak için enerji geri yüklenir, zira zemin seviyesindeki CO₂ parçacıkları daha sonra ek bir döngü için erişilebilir olacaktır. Bu işlem, bir radyo frekansı uyarmak için alternatif akım ile gaz karışımındaki elektrikli gaz salımı yoluyla üretilmektedir (Wandera, 2006). Azot (N₂) atomları etkisi, geçiş sırasında enerji ve kuvvet kaybetmiş bir karbon dioksit molekülü enerjisini şarj etmek için etkilidir. Helyum (He) gazı kullanımının nedeni, diğer parçacıklardan daha yüksek termal iletkenlik özellikleri, karbondioksit atomları için bir soğutma sistemi olarak görev yapmakta ve lazer fotonunu sağlamaktadır (Tahir, 2015).

Literatür incelendiğinde CO₂ lazerin verimliliğinin ve etkinliğinin artırılması için, yardımcı gaz kullanılması gerekliliği görülmektedir. Azot (N₂), kullanılan yardımcı gazlardan biridir ve bir destek gazı olarak çalışmıştır (Yilbas, Akhtar, & Karatas, 2017). İkinci gaz ise Helyum'dur. Bu gazların faydaları, % 10 - 25 arası lazer malzemesinin etkinliğini arttırmasıdır (Powell, 1998).

Gaz yönüne ve soğutma sistemlerine bağlı olarak Işın enerjisi çıkışını etkileyen, CO₂ lazerin farklı sistem tasarımları bulunmaktadır (Wandera, 2006).

2.2.6.1. Hızlı aksenal akışlı lazer

Hızlı aksenal akışlı lazer yirminci yüzyılın sonlarından beri kullanılmaktadır. Bu yöntem, aynanın yapısal düzenlemesi nedeniyle çapraz akışlı lazere kıyasla büyük bir enerji sağlar, üç çeşit düzenleme vardır. Birincisine üçgen ışın, ikincisine dikdörtgen ışın denir ve sonuncusu ise 45°'lik derece boyunca dönmüş olan yörünge düzlemidir (Wandera, 2006).

Işın çizgisi etrafında 100 W; ila 20 KW; arasında benzer bir dağılım enerjisi sağlayan fiziksel özellikler nedeniyle hızlı aksenal akış tipi, kesme ve kaynak üretimi için kullanılmaktadır. Hızlı aksenal akışın yapısı ışının yolunu kontrol etmek için değişebilmektedir. Ayna U rezonatör çizgisini takip etmektedir (Rath, vd., 1994). Lazer ışını tekrar yansıtmaya çalışan katlanan aynalara ulaşana kadar lazer ışını üretildikten sonra ilk aynadan geçerek ışını yansıtacaktır. Sonra yüksek enerjili lazer

ışını oluşturmak için aynı yolda ışınları arka aynaya geri yansıtır. Ayrıca U yolunun iki tarafı rezonatörde lazer gazı dolaşım hızını ayarlar (Wirth, 2004).

2.2.7. Lazer Kesim Yöntemi

Üç çeşit lazer kesim metodu vardır bunlar;

2.2.7.1. İnert gaz

İnert gaz yöntemi genellikle lazer enerjisi ile ısınarak erimiş faz altında malzemeleri kesme alanı boyunca transfer etmeye çalışır. Bu sistemlerdeki yüksek basınçlı inert gaz jeti şekil 2.3'te gösterilmektedir.

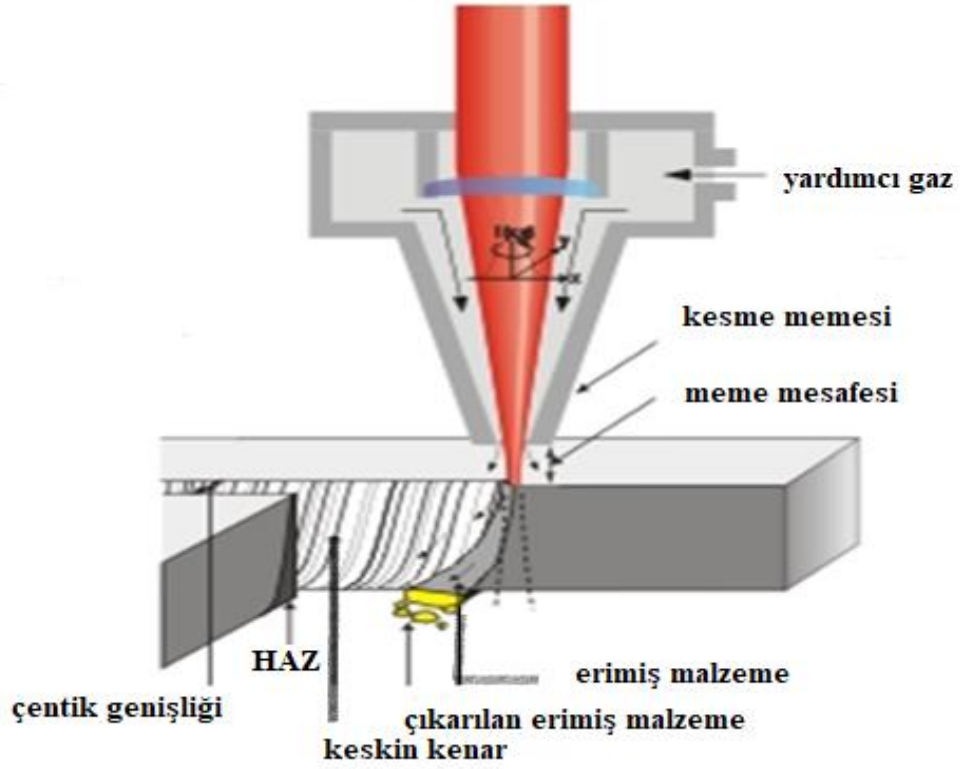
Kesme metodunun ana ısı enerjisi, lazer ışınıdır. İnert gaz, ısıtılmış alanın ana kategorisine sahiptir. Aynı zamanda, argon ile nitrojen gazları dönüşümlü olarak, hava ile başlayan ısıtılmış malzemenin korunmasını sağlamaktadır.

Metot, genellikle paslanmaz çelik ve farklı yüksek alaşımlı çelik, titanyum, alüminyum gibi farklı metaller ve polimerler gibi ametal malzemeler ile de kullanılabilir. Füzyon yöntemi, diğer cihazlarda kullanılan aktif gazla karşılaştırıldığında düşük kesme hızına rağmen mükemmel bir kesme sağlamaktadır.

Bu metodolojik özellik, oksidasyondan arınmış olup, daha da önemlisi, kesme işleminde kullanıldığında ön kaynak hazırlığı gerektirmez (Wandera, 2006; Rajendran, 1990; Wilson, 1977) .

2.2.7.2. Füzyon yöntemi

Bu kesme işlemin tipi, malzeme için yüksek enerji sağlamaktadır. Şekil 2.7.'de gösterilen ve sıcaklığın oksitlenmiş havayla yükselmesi sonucu, bu malzemedeki oksijenin ısınma tepkisini uyarmaktadır. Bununla birlikte, termal ısıtma oksidasyon tepkisi, kesme alanını daha fazla kesme hızı sağlayarak iyileştirmek için ek ısıtma ile kesme metodolojisini desteklemektedir. Bu kısım, füzyon yönteminin üzerinde kesme avantajı sağlar. Ayrıca, lazer ışını ateşlemeyi kontrol eder (Wirth, 2004).



Şekil 2.7. Füzyon kesimindeki alev

Erimiş alan içinde yanma dönüşümü dengelenir, aynı zamanda eritilmiş malzeme boyunca bu kesim bölgesinde sıvı olarak yardımcı gaz lazer optiklerini korumaktadır. Bu yöntem türü yüksek kesme hızı, enerji ve oksidasyon nedeniyle, yumuşak çelik gibi, düşük alaşımlı çelik ve metallerle kullanılır. Düşük viskoziteli yüzey gerilimi sağlamaktadır (Wandera, 2006; Powell, 1998; Rajendran, 1990; Wilson, 1977).

2.2.7.3. Lazer buharlaşması

Lazer kesim boyunca, malzeme çok ısınmış olur. Sıcaklık etkisi altında erir sonra buharlaşmaktadır. Gaz, malzemelerin yayılan sıcak buharlarından gelen her türlü reaksiyonu engellemek için kullanılır (Wandera, 2006). Ayrıca, bu yöntemle kesilen malzemelerin çoğu, polimerler, akrilikler ve kağıt gibi metalik olmayan malzemelerdir. Bu teknik, aynı işin etkili bir şekilde ısıtılmasını sağlamak için lazer ışınının ve ışın konsantrasyonunun uygun bir şekilde eşleştirilmesi yoluyla devasa bir enerjinin hazırlanmasını gerektirir. Bu özellikler nedeniyle, metal olmayan ve ince malzemeler için daha uygundur (Wandera, 2006).

2.2.8. Lazer Kesim Parametresi

Her türlü malzemenin uygun bir kesme yöntemine ihtiyaç duyulduğu anlaşılmaktadır. Yönteme karar verdikten sonra, makinenin parametreleri seçilmeye başlanır çünkü parametreler lazer enerjisine, kesme hızına, yardımcı gaz tipine, ışın formuna, malzeme çeşitlerine ve iş parçası kalınlığına bağlıdır. Aynı zamanda iş parçasının karakteristiği, kesme metodunu ve kesim performansını belirlemektedir (Yilbas, vd., 1992).

2.2.8.1. Lazer enerjisi

Lazer kesim prosedüründe en önemli faktörlerden biridir. Lazer enerjisi, kaliteyi belirleyen kesme işlemine başlamadan önce malzemeyi ısıtır. Doğru enerjiyi seçmek yüksek enerji nedeniyle yakma alanından ve düşük enerji nedeniyle kötü kriterlerden kaçınmaya yardımcı olmaktadır (Chen, 1999). CO₂ gazı lazer kesimi, kesme yöntemlerinin en etkili yöntemlerinden biridir. Birçok araştırmacı bu yöntemi çalışmalarında kullanmıştır (Radovanovic & Madic, 2011; Yilbas vd., 2017; Eltawahni, 2010).

2.2.8.2. Kesme hızı

Kesme hızı kesim performansını etkileyen ikinci en önemli faktördür. Belirli bir parametrenin altına düştüğünde ve özellikle yüksek sıcaklık malzemelerin kesilmesi performansında en güçlü etkiye sahip olduğu keşfedilmiştir. Sonunda, iki parametre çentik eni ve ısıdan etkilenen bölge (ITAB) lazer kesme hızı ile etkilenmektedir. Kısaca, Stournaras, vd., 2009 çalışmalarında işlem sürecinde düşük kesim hızının gerekli olduğu ve yüksek hız kesme kenarının performansını olumsuz yönde etkileyeceğini, sonucuna vardıklarını belirtmiştir. Bu sonuç Yilbas et al., 2017 tarafından onaylanarak, kendi deneyinde kesme hızı ne zaman artsa çentik genişliğinin arttığını görmüşlerdir.

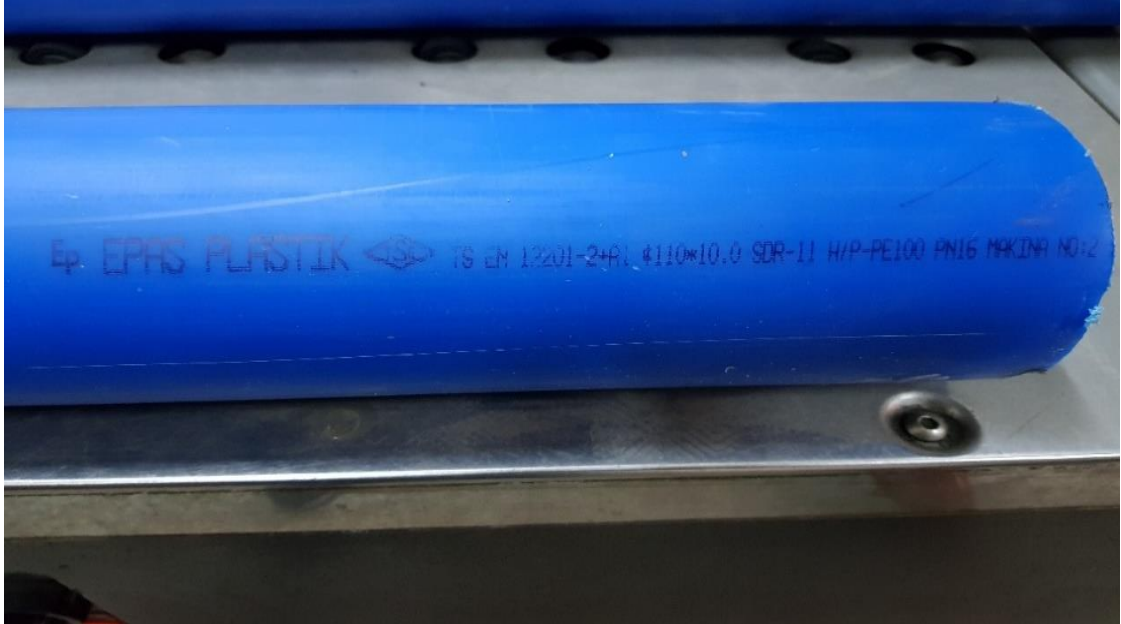
3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu çalışma, lazer kesme yöntemi parametrelerinin kesmeye etkisi için yapılan araştırmadır. Yüksek yoğunluklu polietilenin CO₂ gazı lazerle kesilirken üç farklı gaz (Hava, O₂, ve N₂) kullanılmış olup sabit kesme hızında kesim kalitesi, yüzey pürüzlülüğü incelenmiştir.

3.1. Deney ve Materyaller

3.1.1. Malzemeler

Yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE) TS - TR 12.201-2 A1 (SANICA 2017), boru PE = 100 ve PN mavi renkle = 16, 4 inç (110 mm) çapında, 1 m; uzunlukta SDR = (EPA PLASTİK ŞİRKET, TSE, 2015) Ankara'dan satın alınmıştır ve Şekil 3.1'de gösterilmiştir.



Şekil 3.1. Yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE) boru

3.1.2. Deneysel Ekipman

3.1.2.1. CO₂ Lazer makinesi

Lazer ışını sağlayan ve besleyen lazer makinesi ile sisteme ait tüm detaylar ve kesimi kontrol eden bilgi verileri bu bölümde açıklanacaktır:

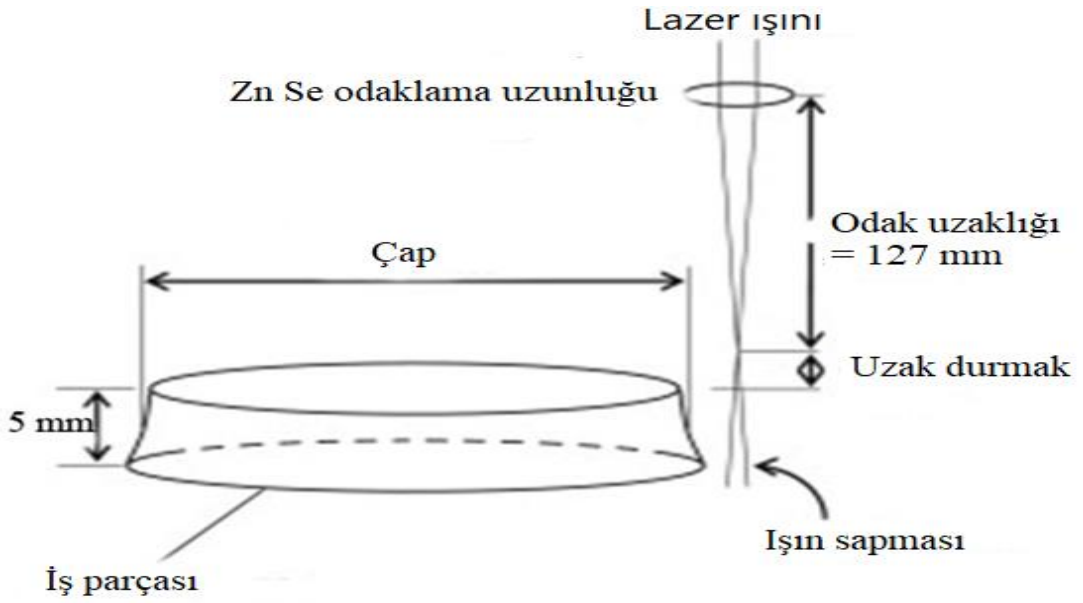
3.1.2.1.1. Lazer ışını sistemi

Karbondioksit (CO₂) 'den elde edilen analizler için gerekli olan enerjiyi üreten lazer sistemi, CNC lazer kesim makineleri Amada - Fanuc - AF2000E - LC 2415 alfa III kontrol sistemine sahiptir. Çalışma aralığı XYZ: 2520 x 1550 x 300 mm; maksimum lazer gücü ile: 2000 Watt, Fanuc FS 160i-L CNC kontrol, maksimum iş parçası 330 kg; maksimum hız 80/80/60 m / dak; uzunluk: 4370 mm; genişlik: 2500 mm; yükseklik: 2275 mm; ağırlık: 6800 kg'dır. CO₂ lazer kesme cihazı düşük ve yüksek güç ile farklı malzemelerin kesimleri için kullanılabilir. CO₂ lazer kesme cihazı ile HDPE boru PE=100 ve PN=16 kesilecektir. Boru kalınlığı ile ilgili bilgileri hazırladıktan sonra CO₂ lazer kesme makinesinde, üç farklı geometrideki (Daire 20 mm'lik çap, 20 x 20 mm²; kare ve 20 x 20 x 20 mm; üçgen) verilerinin kodları girilecektir. CNC lazer kesim cihazı Şekil 3.2'de gösterilmiştir.

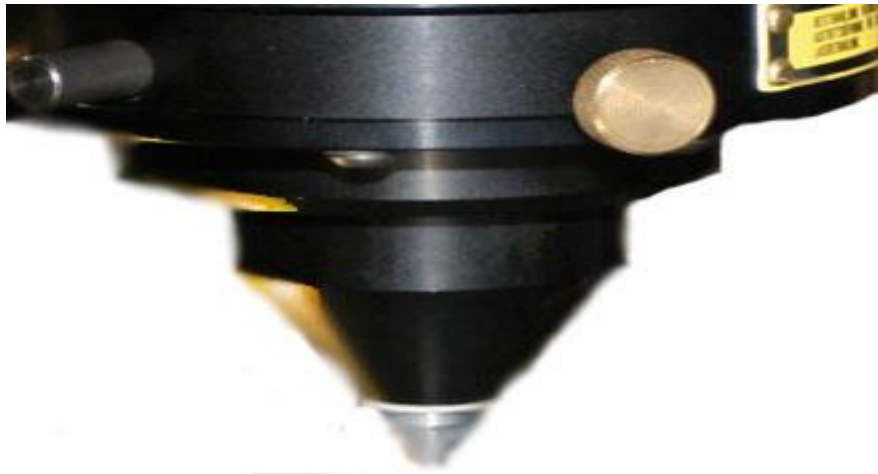


Şekil 3.2. CNC lazer kesim makineleri.

Lazer ışınının odaklanma alanı 0.2 mm; Şekil 3.3. ve Şekil 3.4. 'de belirtildiği gibi hesaplanacaktır (Tamrin, Nukman, Choudhury, & Shirley, 2015). Bu lensleri korumak için, lazer üretimi sırasında, yardımcı gaz kullanılabilir. Prosedürün sonunda nozul, lazer ışını kesme işleminin son adımını sağlayacaktır. Prosedürün sonundaki lensleri, lazer ışını kesim işleminde son adımı sağlayacaktır. 2.0 mm boşluk çapına sahip standart bir ağız kullanılmıştır.



Şekil 3.3. İş parçasının odak uzaklığı ve mesafesi. (



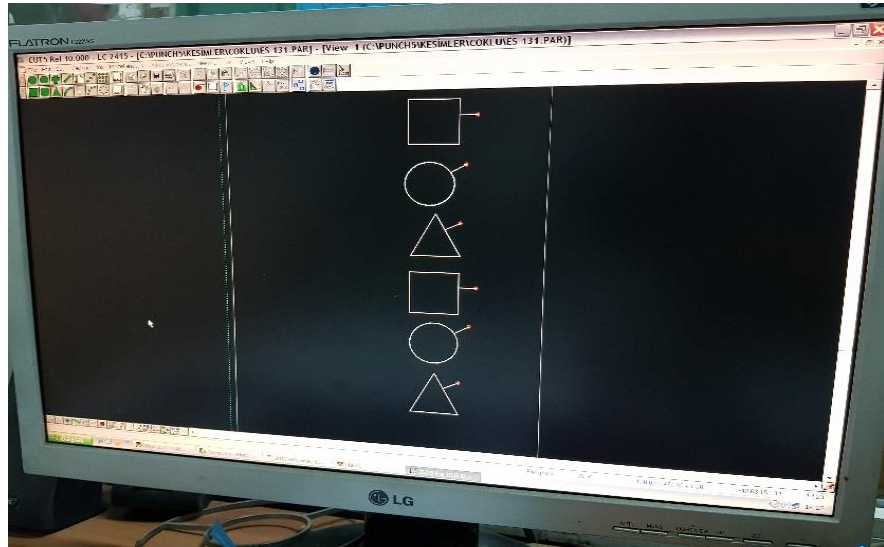
Şekil 3.4. Odaklama ışın sistemi memesinin

3.1.2.1.2. Programın kontrolü

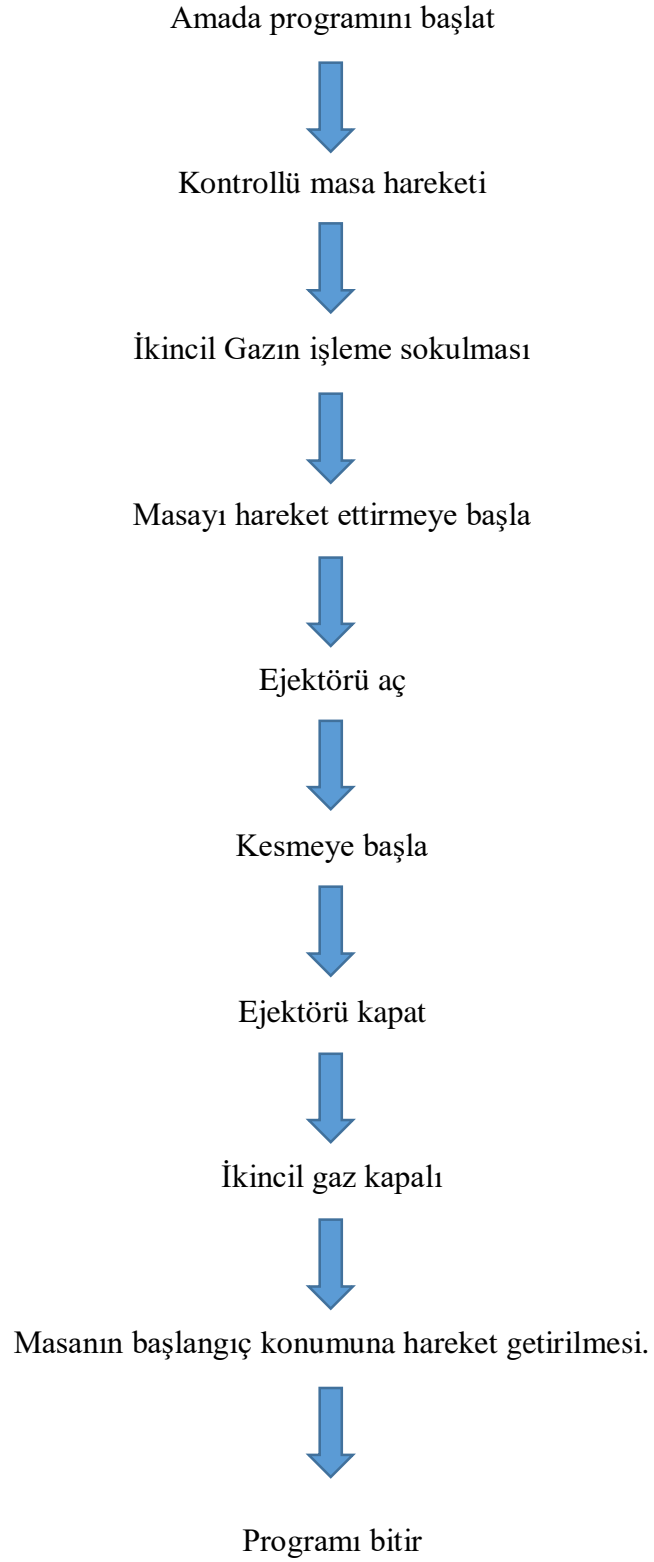
CO₂ Lazer kesme makinesinde CNC programı bulunmaktadır. Lazer memesi, yardımcı gaz ve tablanın hareketi FANUC kontrol sistemi ile kontrol edilmektedir. Normal yürütmenin lazer kesmeye dönüştürmesi sırasında, CNC kontrol ünitesi programlanabilir moda aktarılır. Program Şekil 3.5’de gösterilmiştir. Bu kesme prosedürünü üretmek için kullanılan operasyonel adımlar Şekil 3.6.’da belirtilmiştir. Ejektörün açılmasından önce yardımcı gazların (Hava, O₂ ve N₂) nakil işleminin başlatılması en önemli unsur olacaktır. Aksi takdirde, lazer ışını malzemenin yüzeyine temas ederse, mercek kesilecek malzemenin buharlaşmasından zarar görebilir.

Yüksek yoğunluklu polietilen HDPE boru, CO₂ lazer kesme cihazı çalışma masasında, hareket programlayıcı kontrolü ile düzenleneceği şekilde konumlandırılmıştır.

CO₂ lazer kesme cihazı tabla çalışması, X, Y, Z eksenleri boyunca 2520 mm x 1550 mm x 300 mm harekete ve X, Y eksenleri boyunca yaklaşık 42.33 mm / s ile yüksek hıza sahiptir. Çalışma tablası, lazer ışınının etkisinin emilmemesi için alüminyumdan üretilmiştir. Bu nedenle lazer ışını güvenli şekilde kesilecek malzemeye ulaşır ve tam güçle kesim yapar.



Şekil 3.5. Malzeme örneklerinin programı



Şekil 3.6. Amada Fanuc makinesinin CNC programı

3.1.2.1.3. Veritabanı

CO₂ lazer kesme cihazında programlama ünitesi fanuc'tur. Elektronik bilgi, daha sonra kullanılabilir bir belge üzerinde saklanır. Bu sistem birden fazla kez kullanılmak üzere düzenlenmiştir. Bilgiler gerektiği gibi güncellenebilmektedir. Buradaki işlemler örneklere göre değişir, makine en hızlı şekilde bilgi toplamaktadır.

Sıcaklık bilgisi, hızlı dönüşüm olmadığı alanlar arasında hızlı bir şekilde toplanmış, sürekli istendiği zaman ulaşabilmek amacıyla, bilgiler fanuc sisteminden bilgisayar programına şekildeki gibi (Şekil 3.7) aktarılabilir.



Şekil 3.7. Amada bilgisayar programı

3.1.2.2. Deneysel değişkenler ve ölçüm

Lazer kesim performansı ve çentik genişliği test çalışmaları sonucunda tespit edilmiştir. Yüksek yoğunluklu polietilen malzeme için ısıdan etkilenen bölge ITAB, yüzey pürüzlülüğü ve çizilme frekansı, ayrıca kesici kenarın dikey sapması, Lazer kesim dönüşümünün deneysel değişkenleri, fanuc sistem tarafından yönetilmektedir. Bu değişkenlerin herhangi birinde değişiklik olması durumunda, ısı iletkenliği özellikleri ve lazer kontrol çıkışı, lazer ışını, yardımcı gaz (Hava, O₂ ve N₂), basınç ve

lazer ışını performans hızı, ayrıca optik odaklama gibi değişkenlerden direkt olarak etkilenmektedir.

3.1.2.2.1. Malzemelerin Temini

Bu çalışmada kullanılan malzeme, ticari olarak sıklıkla kullanılan yüksek yoğunluklu polietilen malzemedir (HDPE). (TS - TR 12201-2+A1) (SANICA, 2017) boru PE = 100 ve mavi rengin PN = 16, 4 inç (110 mm) Çap ve 1 m; SDR = 11 (EPAS PLASTİK FİRMASI) TSE (TSE, 2015) Ankara piyasasından satın alınmış bu malzeme genellikle kolay bulunan bir malzemedir. Borunun kalınlığı 5 mm'dir. Borunun üzerinde CO₂ lazer kesme sistemi kullanılarak üç farklı geometrik şekil kesilmiştir. Bunların boyutları 20 mm kenar uzunluğuna sahip kare, bir kenarının uzunluğu 20 mm olan eşkenar üçgen ve 20 mm'lik bir dairedir.

3.1.2.2.2. Lazer ışını enerjisi

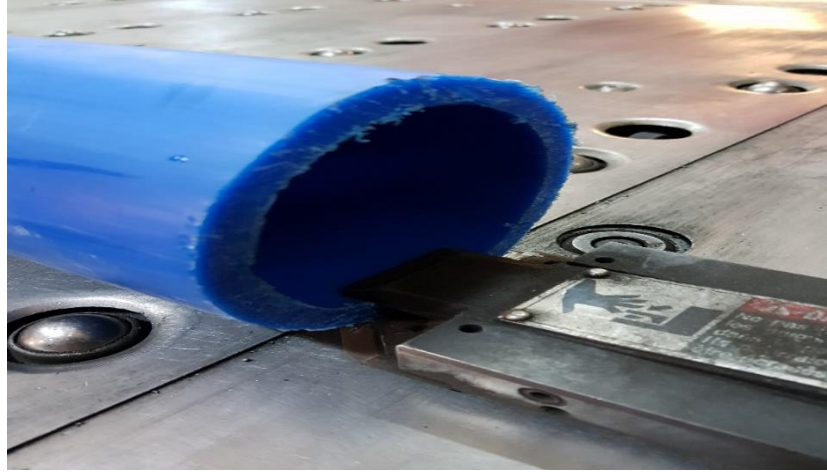
Çalışmada kullanılan CO₂ lazeri 2000W'lık bir lazer enerji formuna sahiptir. Lazer kesim prosedürünü etkileyen birçok farklı özellik nedeniyle, literatür incelense dahi parametrelerin seçimi çokta kolay değildir. Ancak makul bir lazer enerjisi kullanılmıştır. Bu nedenle üç deneyde 200 ila 500 W; arasında değişen bir lazer ışını enerjisi kullanılmıştır.

3.1.2.2.3. Lazer ışının hızı

Lazer ışın hızı sabit olsa da yüksek yoğunlukta polietilen malzemesinin kesimi için lazer ışını, 100 mm / dak hızında üç boyutta hareket etmektedir. Lazer ucun sabit bir hızda hareket etmektedir.

3.1.2.2.4. Lazer kolunun hareketi

Lazer kolu CO₂ lazer kesme cihazı fanuc kontrol programıyla çalışmaktadır. Genellikle işlem, malzemelerin masaya konulmasıyla başlamaktadır. Kolun ilk hareketi yapması için programı kontrol etmek gerekmektedir. Lazer kolunun hareketi 42.33 mm / sn 'dir. Şekil 3.8'de lazer kolu ve tabla gösterilmiştir.



Şekil 3.8. Kol tezgahı hareketi

3.1.2.2.5. Lensin odaklanması

Kullanılan lensin odaklamasının düzlemi, odaklama çapını hesaplamaktadır. Küçük bir odaklama çapı daha büyük bir akım sağlamaktadır. Kesme yöntemleri için küçük odak uzaklığı tercih edilmektedir. çalışmada 25.4 mm çapında ve 127 mm uzunluğunda Zn-Se lens kullanılmıştır. Şekil 3.9'da objektif odak gösterilmiştir.



Şekil 3.9. Objektif odak

3.1.2.2.6. Gaz basıncı

Kesme çalışması için gaz yardım veya destek için kullanılmıştır. Bu incelemelerde kullanılan nozul standarttır. Ayrıca, işlemi yapmak için de sağlanan gaz, dönüşümlü kontrol sistemi ile açılıp kapatılabilir. Silindirden gelen basıncı kontrol eden bir ayara sahip bir N₂ ve O₂ gazı boruları bulunmaktadır. Ancak, bu çalışmada 1 bar; basınçta üç çeşit gaz (Hava, O₂ ve N₂) kullanılmıştır.

3.2 Deney Veri Tabanı

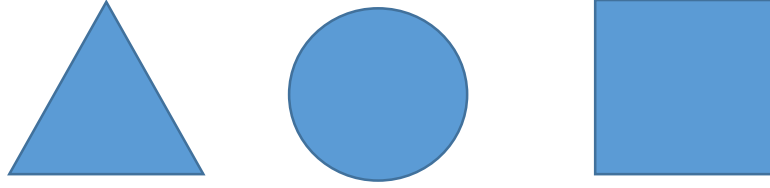
Bu deneyde kullanılan parametreler Tablo 3.1’de verilmiştir.

Tablo 3.1. Deneyi başlatmak için gereken parametreler

Parametreler	Kullanılan
Lazer tipi	CO ₂
Lazer çalışma modu	Alternatif
Güç yoğunluğunun dağılımı	Gauss
Polarize ışın	Dairesel
Işın gücü yoğunluğu	105 watt / mm ²
Lazer gücü	2000 watt
Lazer ışını enerjisi (Hava)	467 watt
Lazer ışını enerjisi (N ₂)	470 watt
Lazer ışını enerjisi (O ₂)	218 watt
Hız kesmek	100 mm / dak
Yardımcı gaz	Hava, N ₂ , O ₂
Gaz basıncı	1 Bar
Objektif odak uzaklığı	127 mm
Odak Çapı	0,2 mm
Odaklanma Konumu	İş malzemesinin yüzeyi
Nokta çapı	2 mm
Uzak mesafe	0,2 mm
Meme Çapı	1,5 mm
Meme Basıncı	1 Bar
Malzemeler	HDPE boru
Malzeme kalınlığı	5 mm

3.2.1. Örnek Çizimi

Bu bölümde, ana koordinatlar üçgen dahil olmak üzere, boru çeşitli şekillerde çalışma olasılığının izlenmesi amacıyla dahil edilmiştir. Çember ve kare şekillerinin amacı verimliliği ve CO₂ lazer kesme etkinliğini incelemektir. Özellikle açılar, şekiller kavisli boru 90° derece ve 45° derecedir. Şekil 3.10 da örnek çizimler gösterilmiştir



Şekil 3.10. Örnek çizimler

3.3 Malzeme Kesimi

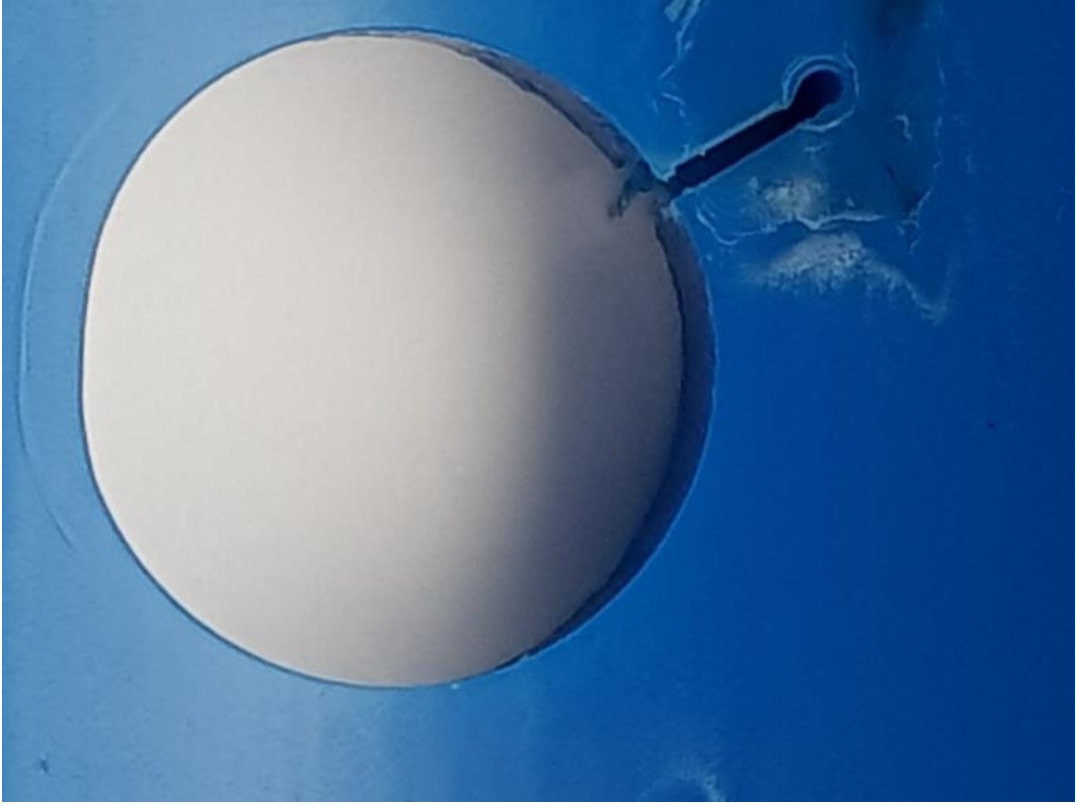
Lazer kesiminde kullanılan çoğu parametrelerden biri de asal gazdır. Bu araştırmada, şekiller gerek daire, üçgen, kare üretmek üzere gaz CO₂ lazer, gaz yardımı (Hava, N₂ ve O₂) farklı parametreleri altında, yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE) kesmek için kullanılmıştır.

3.3.1 Yardımcı Gaz Olarak Havanın Kullanılması

Lazer boyunca füzyon kesme ilerlemesinde kullanılan gaz yardımlarından biri, normalde düşük maliyet ve kullanım kolaylığı nedeniyle hava kullanılır. Aynı zamanda yüksek kesme lazeri ile sadece iyi bir kesme performansı sağlar. Bununla birlikte, füzyon ve yarı füzyon kesme yöntemi daha yüksek olmalıdır. Lazer kesimde iyi bir yüzey kalitesi elde edilir.

Tablo 3.2. Yardımcı gazın hava olması durumundaki kesim parametreleri

Şekiller	Besleme mm / dak	Güç watt	Frekansi	yük %	AWP Watt
Daire	100	2000	100	25	467
Üçgen	100	2000	100	25	467
Kare	100	2000	100	25	467



Şekil 3.11. Havayla kesilen daire örneğinin iç kısmı



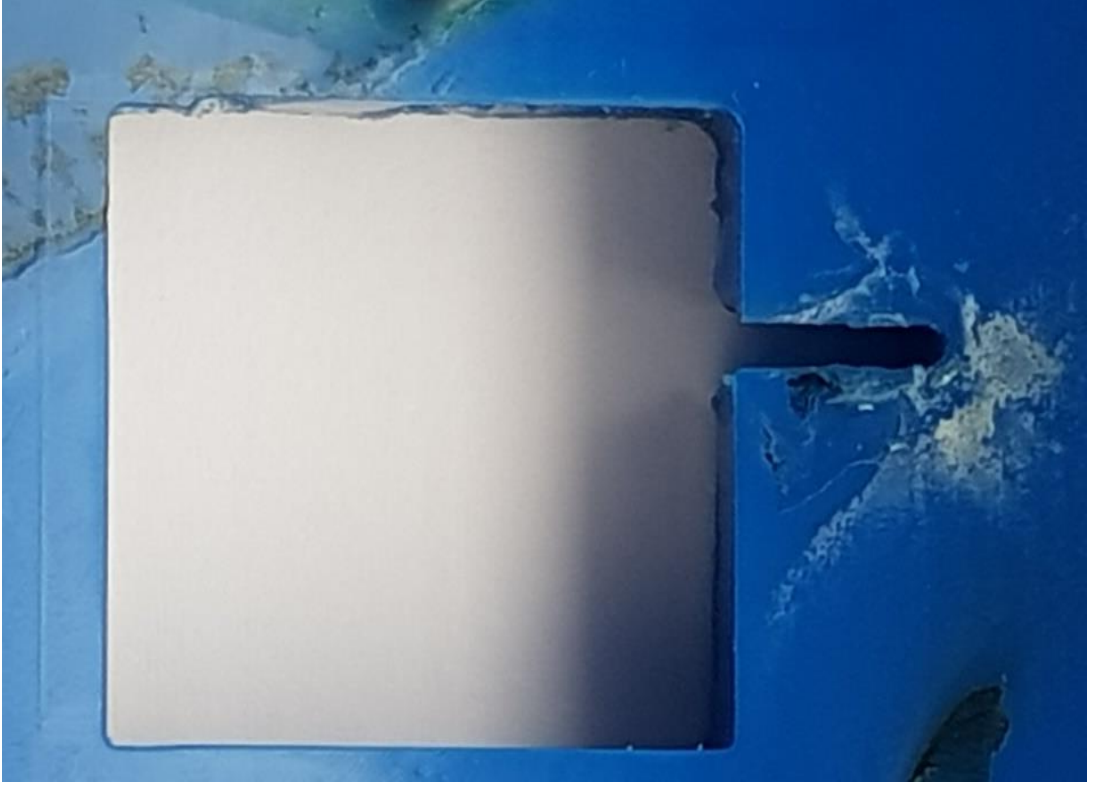
Şekil 3.12. Havayla kesilen daire örneğinin dış kısmı



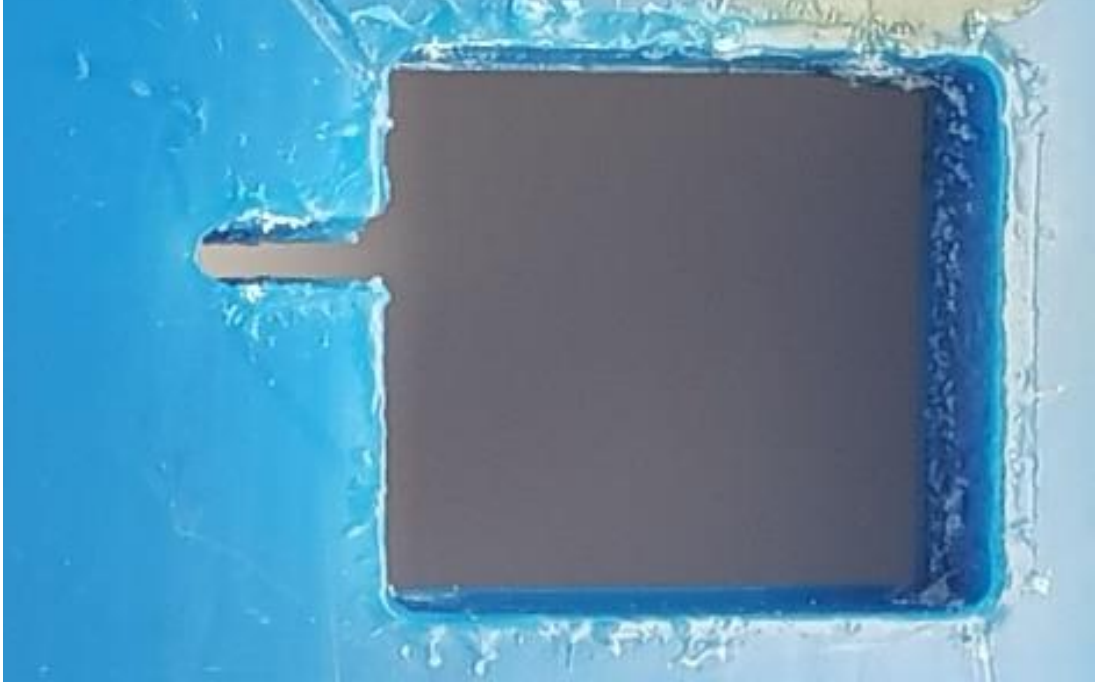
Şekil 3.13. Havayla kesilen üçgen örneğinin iç kısmı



Şekil 3.14. Havayla kesilen üçgen örneğinin dış kısmı



Şekil 3.15. Havayla kesilen kare örneğinin iç kısmı



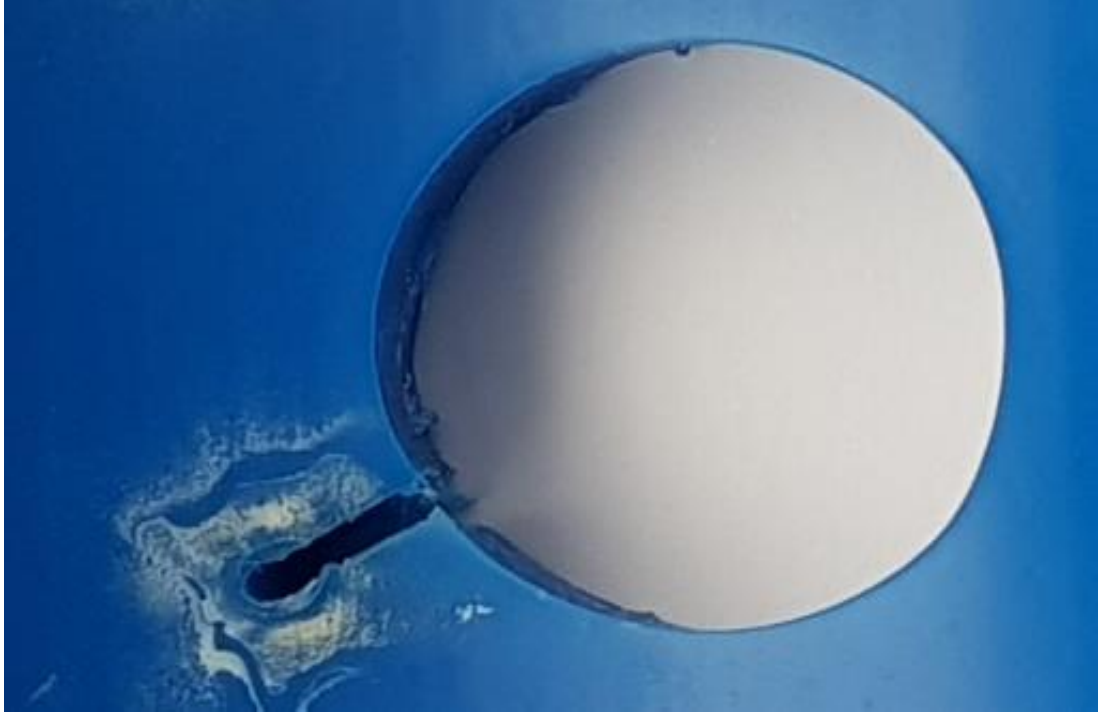
Şekil 3.16. Havayla kesilen kare örneğinin dış kısmı

3.3.2 N₂ Yardımcı Gaz Olarak Kullanılması

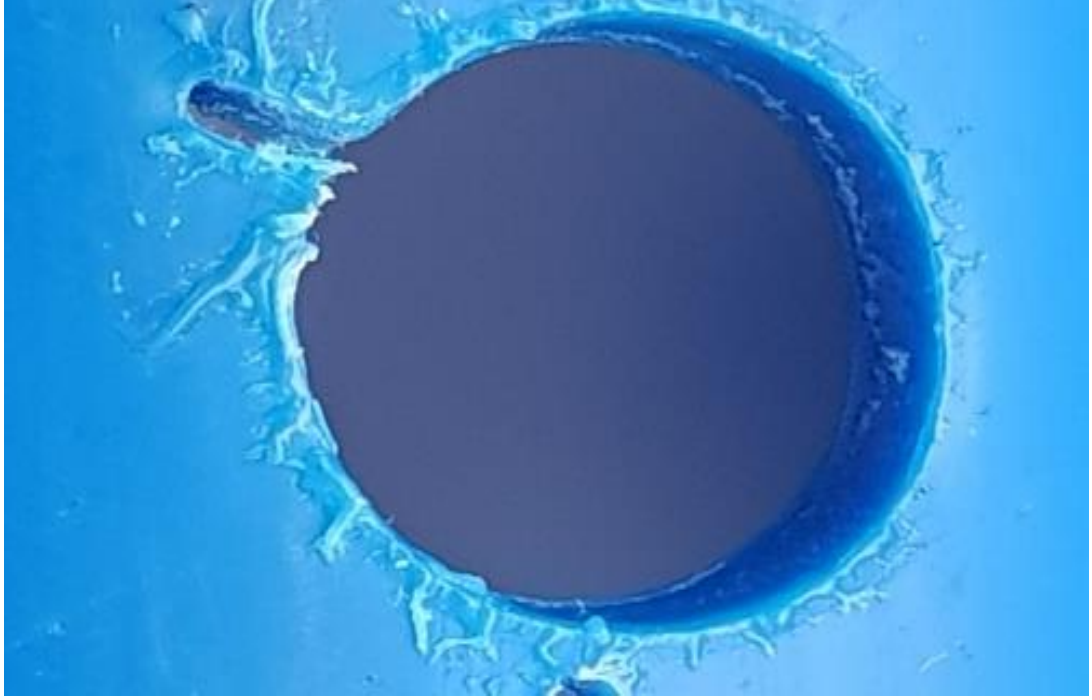
Lazer kesmede düşük maliyeti nedeniyle azot gazı yaygın şekilde yardımcı gaz olarak kullanılmaktadır. Azot gazı, argon gazı ile karşılaştırıldığında kimyasal özellikleri, doğru kesme hızı sağlandığında iyi bir kesme performansı göstermektedir. Ayrıca kesmede iyi bir yüzey kalitesine sahiptir.

Tablo 3.3. Yardımcı gazın azot olması durumundaki kesim parametreleri

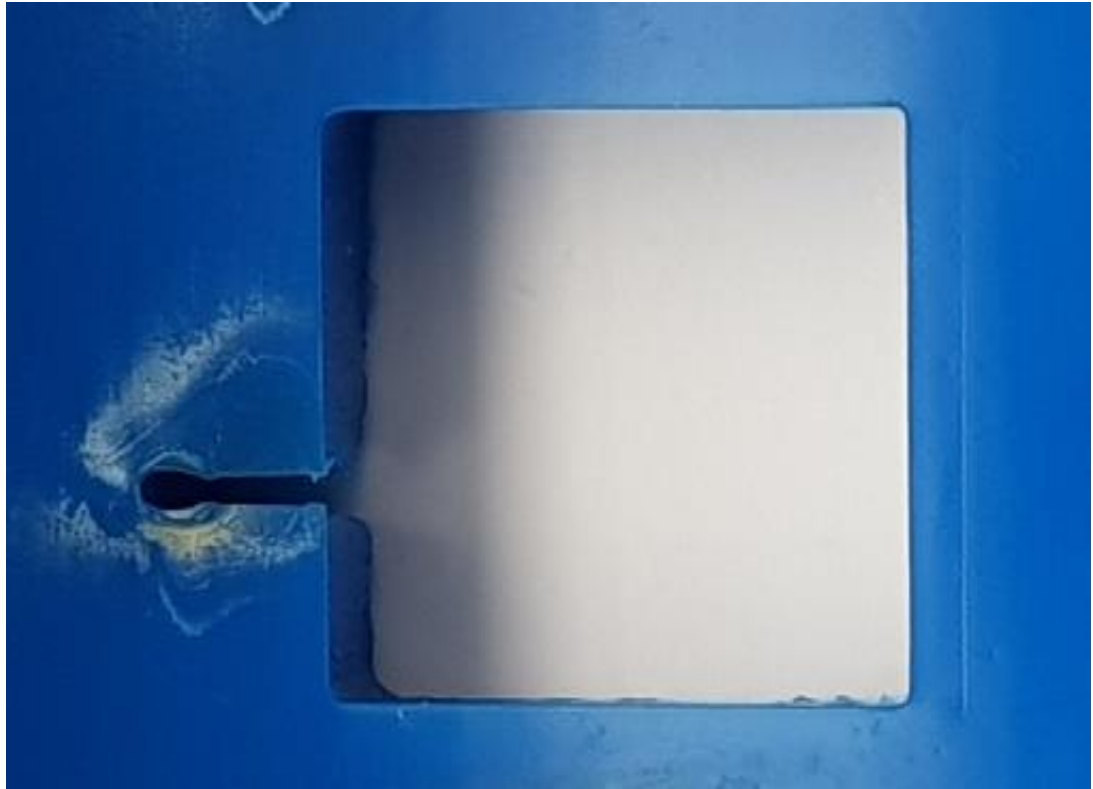
Şekiller	Besleme mm / dak	Güç watt	Frekansi	yük %	AWP watt
Daire	100	2000	100	25	470
Üçgen	100	2000	100	25	470
Kare	100	2000	100	25	470



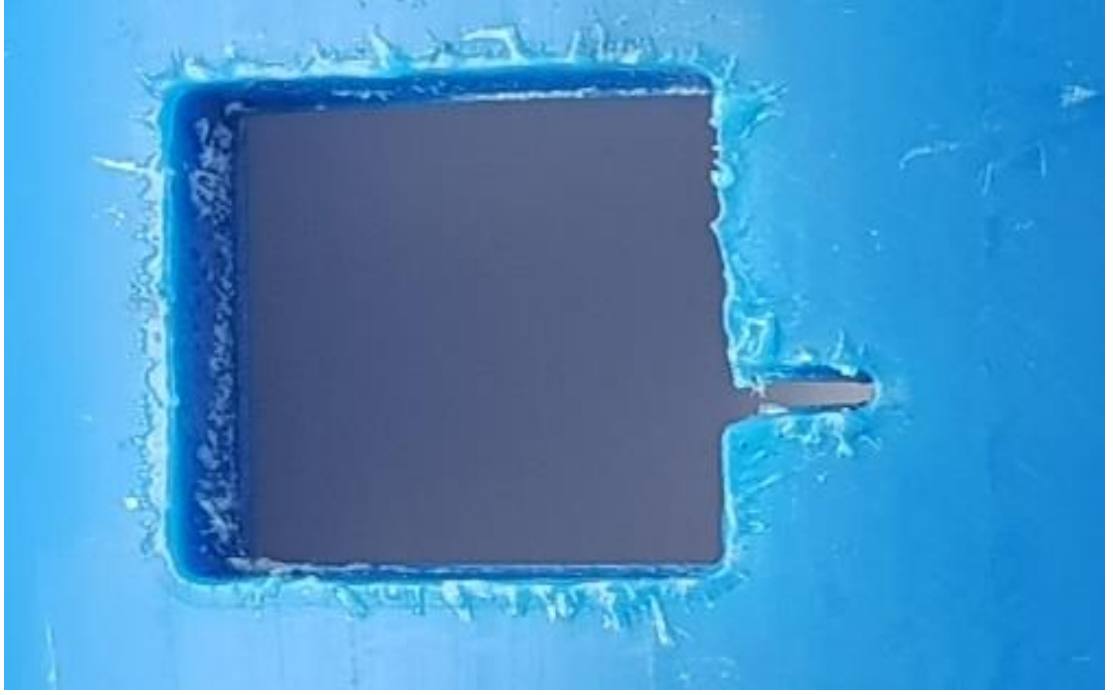
Şekil 3.17. Azotla kesilen daire örneğinin iç kısmı



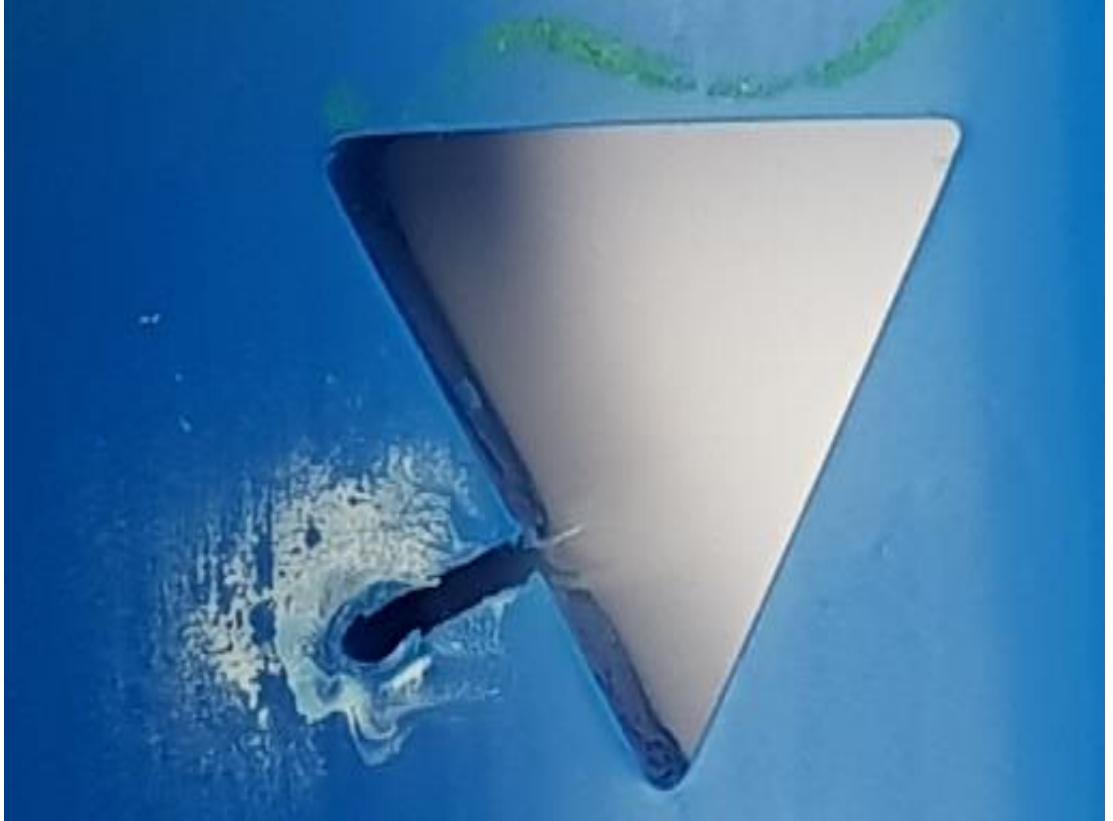
Şekil 3.18. Azotla kesilen daire örneğinin dış kısmı



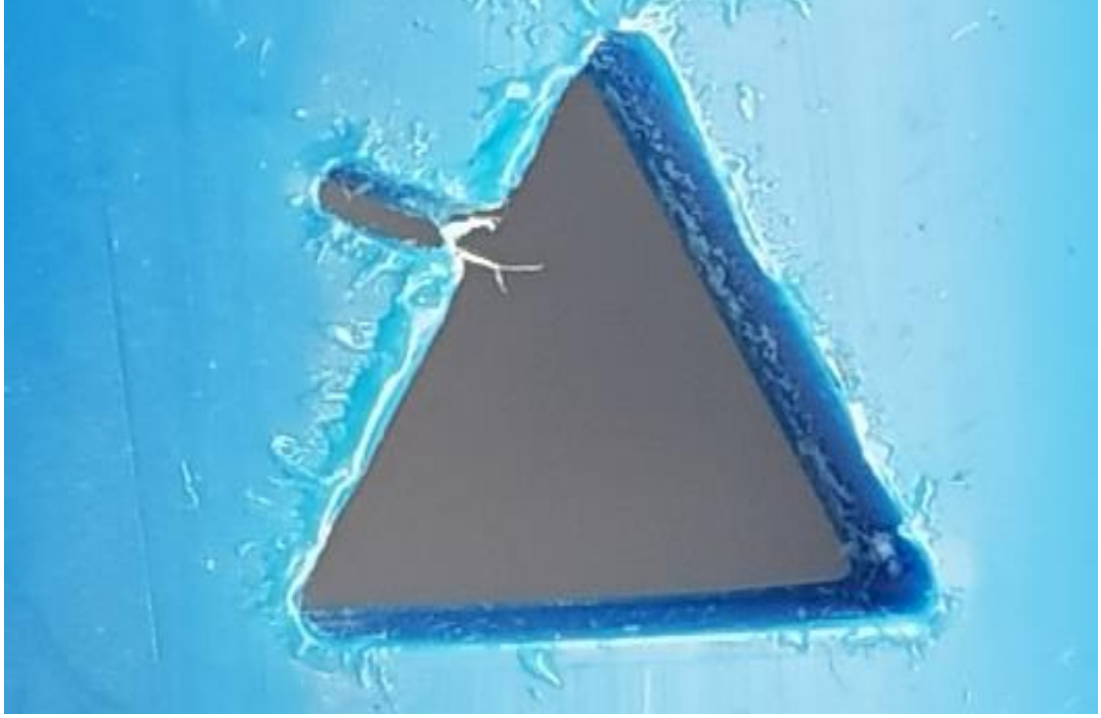
Şekil 3.19. Azotla kesilen kare örneğinin iç kısmı



Şekil 3.20. Azotla kesilen kare örneğinin dış kısmı.



Şekil 3.21. Azotla kesilen üçgen örneğinin iç kısmı



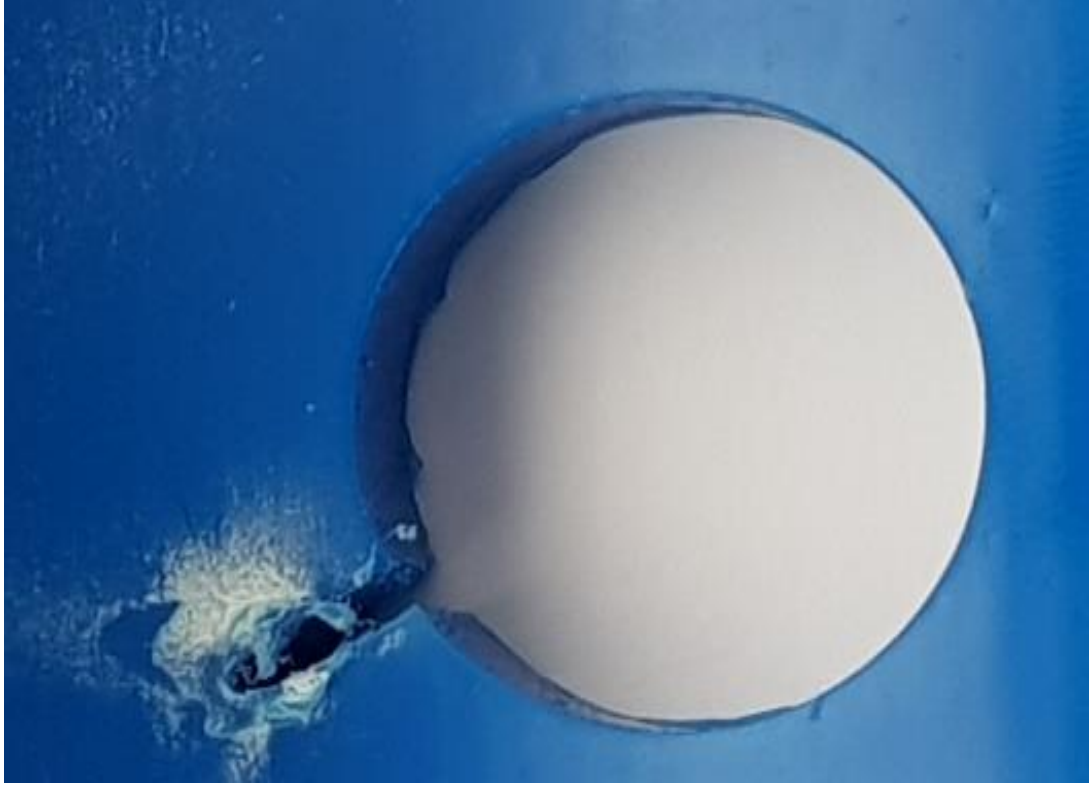
Şekil 3.22. Azotla kesilen üçgen örneğinin dış kısmı

3.3.3. O₂'nin Yardımcı Gaz Olarak Kullanılması

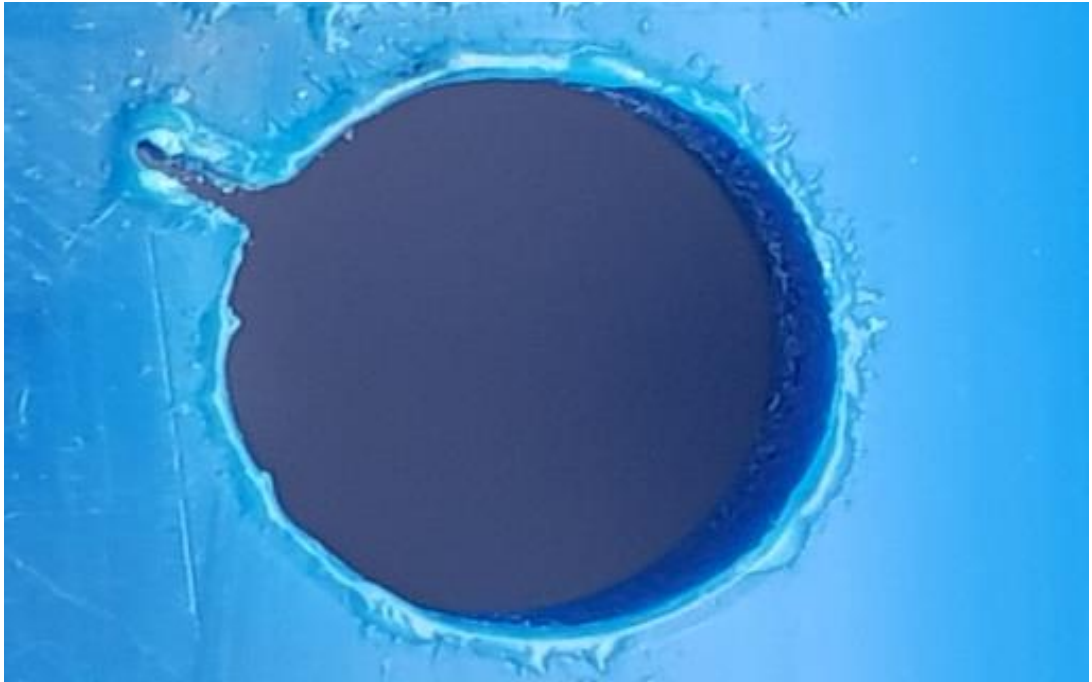
Bu araştırmada üçüncü en önemli parametre oksijenin yardımcı gaz olarak kullanılmasıdır. Lazer ışın kaynağı, ana ısı kaynağı olabilir ancak yardımcı gaz erime jeti için teknik enerjiyi sağlar. Yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE) çok az ısı iletkenliğe sahiptir. Yani, lazer ışını jetinin etkisi, CO₂ lazer kesiminin ortalama parametrelerinden birine sahiptir.

Tablo 3.4. Yardımcı gazın oksijen olması durumundaki kesim parametreleri

Şekiller	Besleme mm / dak	Güç watt	Frekansi	yük %	AWP watt
Daire	100	2000	100	10	218
Üçgen	100	2000	100	10	218
Kare	100	2000	100	10	218



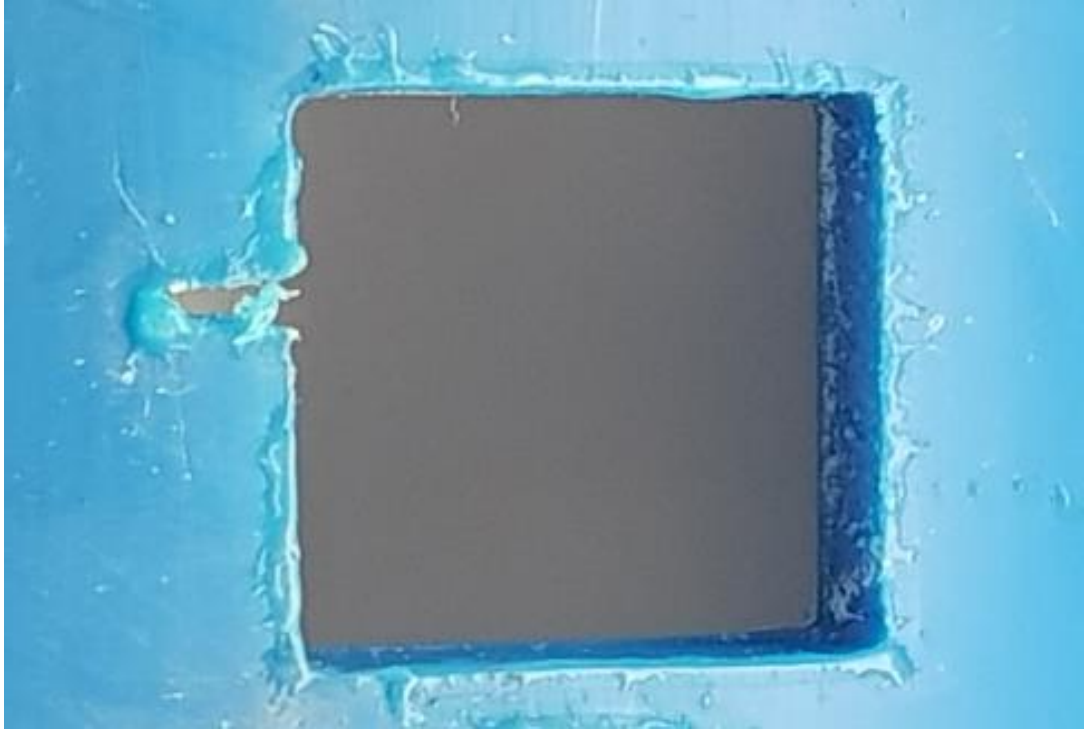
Şekil 3.23. Oksijenle kesilen daire örneğinin iç kısmı



Şekil 3.24. Oksijenle kesilen daire örneğinin dış kısmı



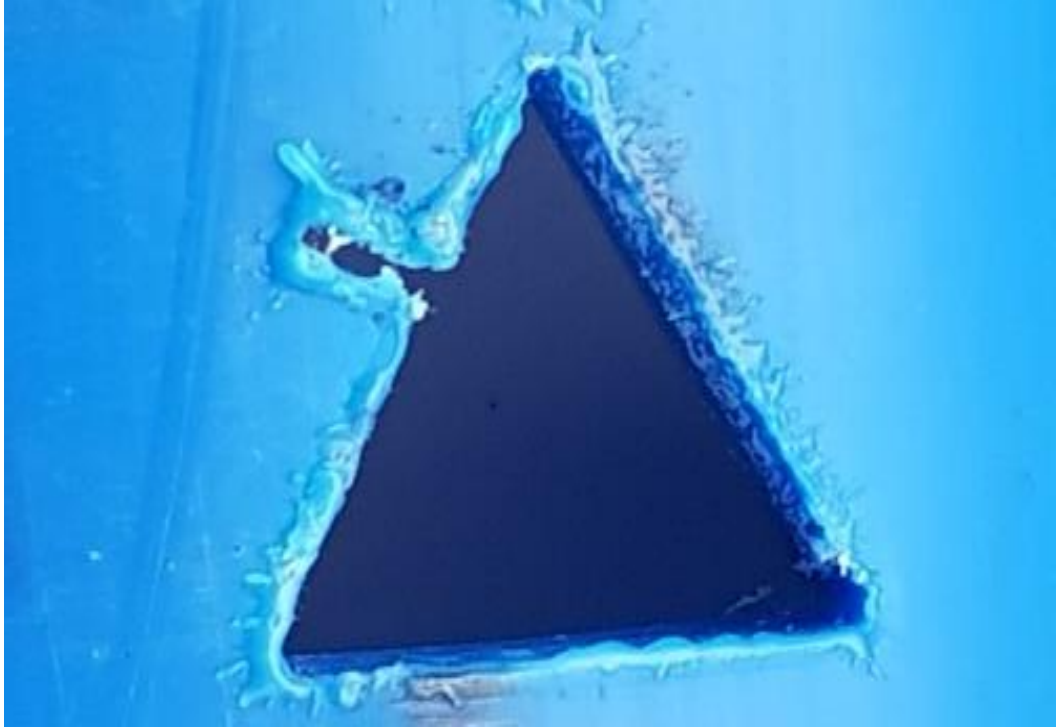
Şekil 3.25. Oksijenle kesilen kare örneğinin iç kısmı



Şekil 3.26. Oksijenle kesilen kare örneğinin dış kısmı



Şekil 3.27. Oksijenle kesilen üçgen örneğinin iç kısmı



Şekil 3.28. Oksijenle kesilen üçgen örneğinin dış kısmı

3.4. Kesim Kalitesinin Değerlendirilmesi

CO₂ lazer kesimde lazer gücü ve yardımcı gaz kesme hızının en önemli parametreleridir. Bununla birlikte, ısıdan etkilenen bölge (ITAB), pürüzlülük ve çizgi frekansı, kesme kalitesini değerlendirmek için kullanılan parametrelerdendir.

3.4.1. Yüzey Pürüzlülüğü

Kesim kalitesini değerlendirmek için kullanılan ikinci parametre, kesme bölgesi üzerindeki etkilerden dolayı yüzey pürüzlülüğüdür. Dahası, yüzey pürüzlülüğü genellikle ticari işletmeler tarafından yapılan bilinmesi gereken önemli bir parametredir. CO₂ lazer kesme sisteminde yüksek yoğunluklu polietilen için kesme hızının azaltılması, yüzey pürüzlülüğü kalitesi etkilemektedir. Bazı araştırmacılar, yardımcı gazın yüzey pürüzlülüğü ile bağlantılarını da araştırmışlardır. Bu çalışmalar lazer gücünün artırılması veya yüzey pürüzlülüğünün azalmasındaki ilişkiyi ortaya çıkarmaya yöneliktir. Bu çalışmada yardımcı gazların yüzey pürüzlülüğüne çok fazla etki etmediği tespit edilmiştir. Termoplastik malzeme için üç farklı kesimi Şekil 3.29, Şekil 3.30, Şekil 3.31’te hava, N₂ ve O₂ ortamlarda kesildikten sonra yüzey pürüzlülüklerinin resimleri verilmiştir.

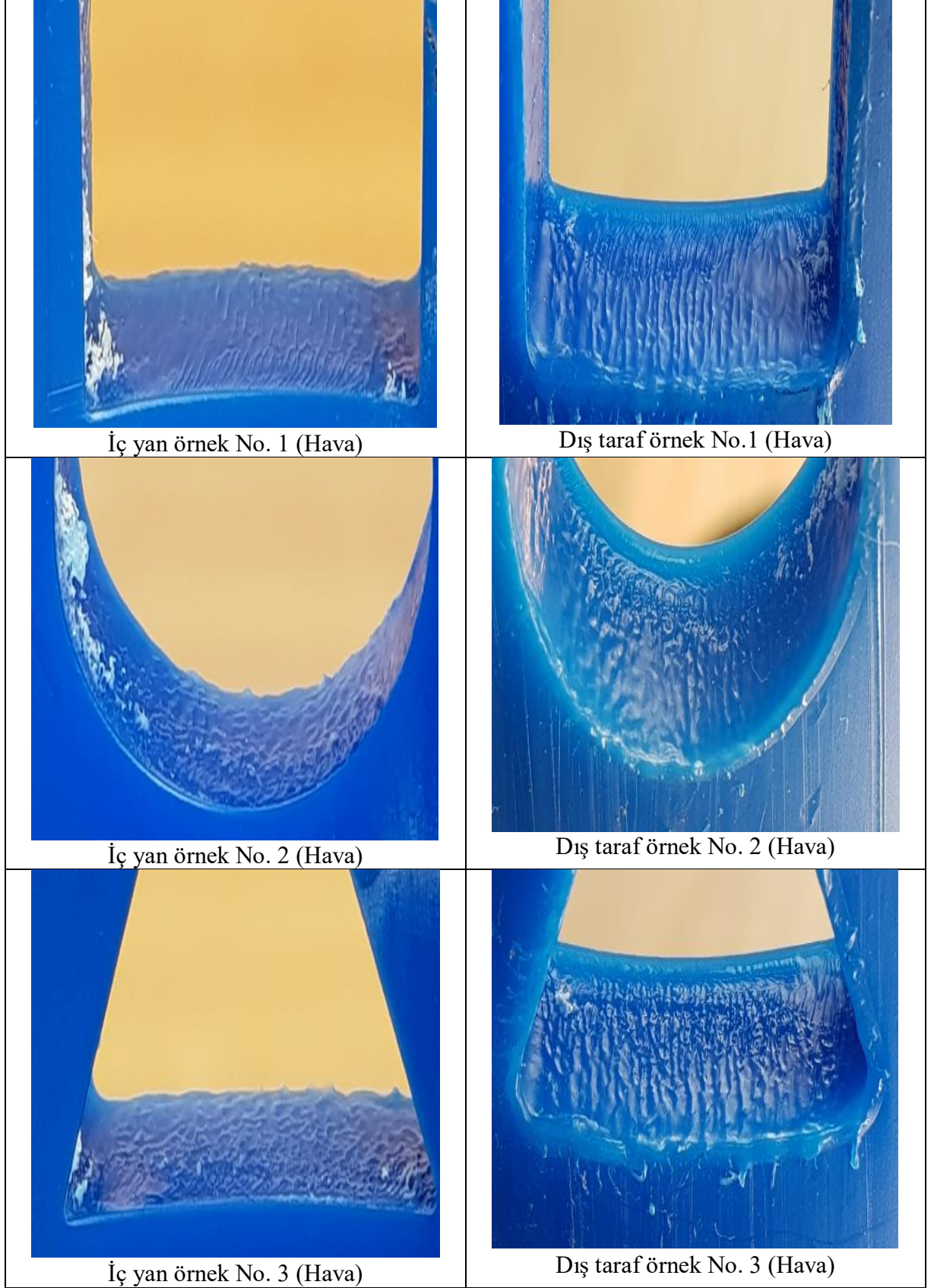
3.4.2 Çizilme Frekansı

Lazer kesim sırasında iş parçası yüzeyinde görülen çizgi ve lazer ışınının hareketi lazer kesimi değerlendirmek için kullanılan önemli parametrelerden biridir. Ancak, bu konu üzerine çalışmalar sınırlıdır (Narendra B. Dahotre, 2008). Çizgi kesme prosedürünün verimliliği en aza indirebileceği anlaşılmaktadır. Parçanın pürüzlülüğüne çizgi frekansının bir etkisi olabilir, fakat pürüzlülüğün azaltılmasını, çizgilerin azaltılmasını sağlamaktadır. Buna ek olarak, daha az kalınlıktaki yivli oluşumları kontrol etme olasılığı bulunmaktadır (S R Rajpurohit, 2012).

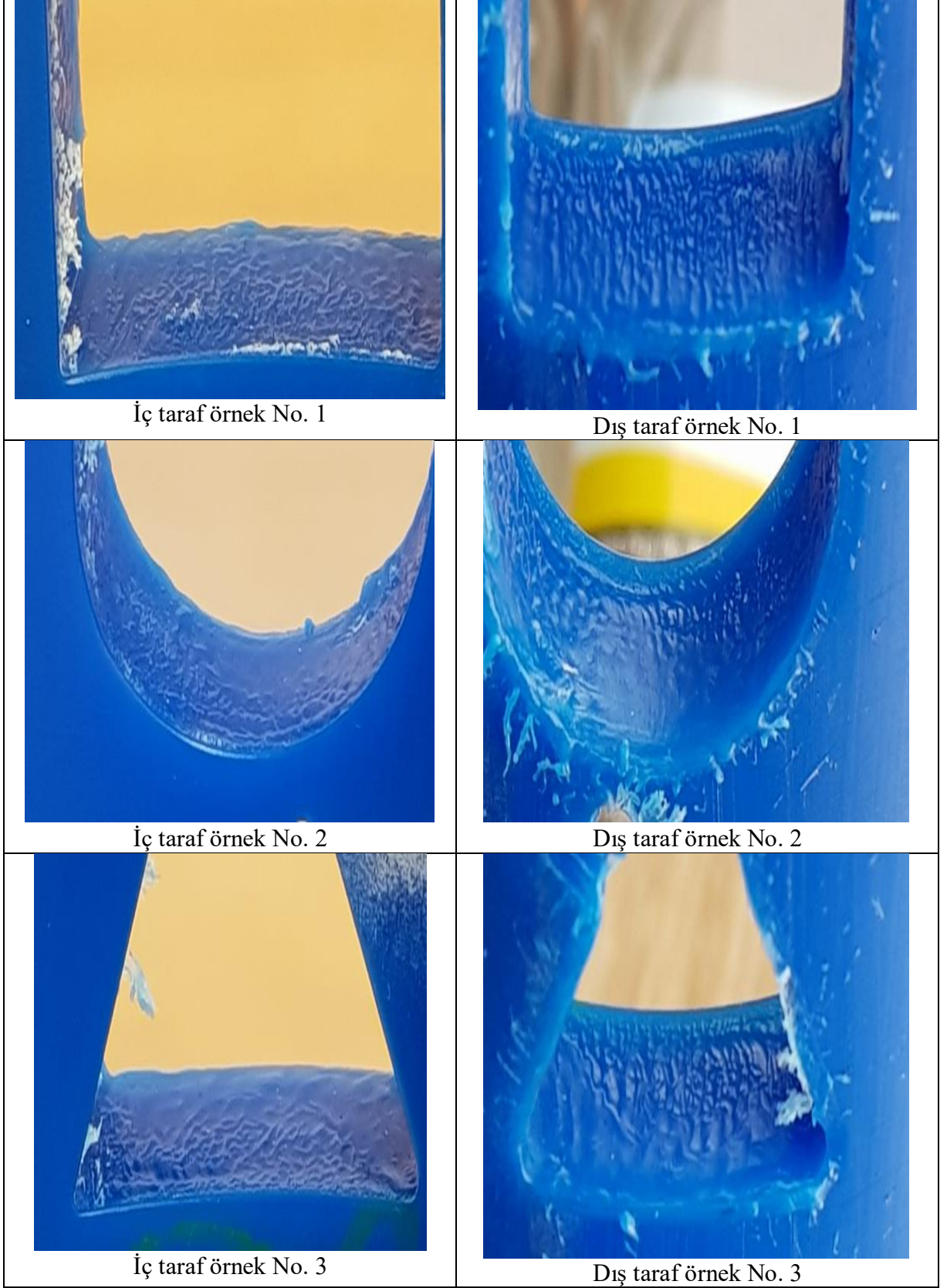
3.4.3 Isıdan Etkilenen Bölge (ITAB)

CO₂ Lazerle kesim sırasında sıcaklıkla birlikte mikroyapı veya mekanik özellikler değişebilir. Mikroyapı veya mekanik özellikler modifikasyonu ısıdan etkilenen bölgenin düzenlenmesini sağlar.

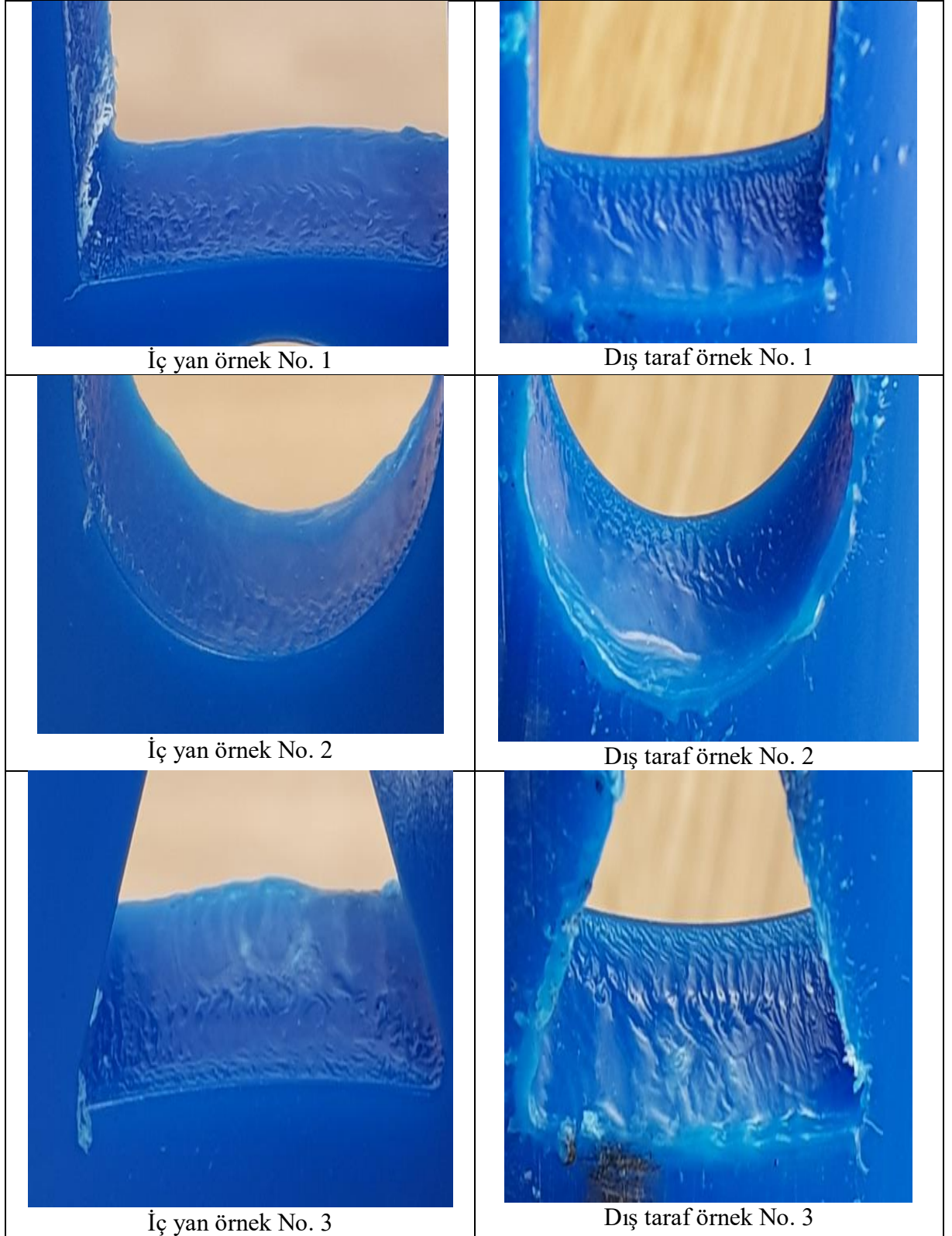
Isıdan etkilenen bölge istenmeyen etkilerle bağlantılı olabilir. Normalde, CO₂ ile lazer kesim parametreleri, ısıdan etkilenen bölgeyi azaltmak için kullanılmaktadır. Bununla birlikte, lazer kesme hızının artırılmasıyla, ısıdan etkilenen bölge azalabilmektedir. Isıdan etkilenen bölge, oksijen ve azota bağlı olarak yüksek sıcaklık nedeniyle daha kalın olabilir. Ayrıca CO₂ lazer kesim parametrelerinin kesme kalitesi ölçülebilir. Kesme kalitesi ölçülürken bazı yöntemler kullanılmaktadır (Narendra B. Dahotre, 2008).



Şekil 3.29. Havayla kesilen numunelerin yüzey pürüzlülüğü fotoğrafları



Şekil 3.30. Azotla kesilen numunelerin yüzey pürüzlülüğü fotoğrafları



Şekil 3.31. Oksijenle kesilen numunelerin yüzey pürüzlülüğü fotoğrafları

4. SONUÇ VE TARTIŞMA

Lazer kesim performansına çeşitli faktörler etki etmektedir. Bununla birlikte, en önemli faktör çentik genişliği, diklik, yüzey pürüzlülüğüdür. Bölge ve yivli oluşumlar bundan etkilenmektedir. Farklı geometrik şekillerin kesmeye etkisini açıklamak için yüksek yoğunluklu polietilen boru 100 mm / dak kesme hızı baz alınmıştır. CO₂ lazer gücü için yarı füzyon ve füzyon olmayan kesmede 470 W; füzyon 218 W olarak ayarlanmıştır. Bu parametrede 1 bar gaz basıncı ve 10,6 µm dalga boyu kullanılmıştır.

4.1 Önceki Araştırma Analizi

Son birkaç yılda, birçok çalışmada metaller ve ametaller gibi farklı türdeki malzemelerin CO₂ lazer kesiminde yardımcı gazların basıncı, gaz türlerinin etkisini ve kesim performansını araştırılmıştır. Polimerler ve kompozitlerle yaptıkları çalışmalardaki problemler bununla bağlantılıdır.

CO₂ lazer kesimi altındaki ametal malzemelerin kesilmesiyle önceki deneylerden elde edilen sonuçlar analiz edilmiştir. CO₂ lazer kesiminin kesme hızı ve gücü gibi kesimde etkili olan parametreler gözlemlenebilir. Aynı zamanda farklı yardımcı gazların etkisi, CO₂ lazer kesiminin, çentik genişliği, dikeyliği, yüzey pürüzlülüğü, ısıdan etkilenen bölge ve çizilme üzerindeki etkisini de bulunabilir. Önceki araştırmacılar lazer kesim ametal malzemelerle çalışmışlardır. Kesme parametreleri ve metodolojileri üzerine tartışmışlardır. Araştırmacılar, bazı metal olmayan malzemeler CO₂ lazerle kesilmiş ve fiziksel özellikleri incelenmiştir. Buna ek olarak yüksek güçten dolayı iş parçasında ısıdan etkilenen bölgede oluşmaktadır (Riveiro et al., 2017). Deneylerindeki sıcaklık ve basınç yüksektir, bunun sebebi kesme kenarı boyunca tüm işlemlerde lazer ışınının kalınlığının değişimi ve iş parçasının alt tarafının biraz çapaklanmaya rastlanmıştır. Bu da işlemdeki yardımcı gazın azaltılmasına atfedilmektedir (Yilbas et al., 2017). Conroy, 2016 yaptıkları çalışmada 10.2 mikron dalga boyu kesim için mükemmel bir seçim olduğu tespit etmiş ve farklı araştırmalar için CO₂ lazer kesiminin endüstriyel alanda büyük miktarlarda kullanıldığı sonucuna varmıştır. Hangi polimerlerin hangi türlerde çok sayıda ticari parça üretebildikleri, yani kesimleri daha az maliyet ve daha

az zaman içinde gerçekleşmektedir (D. Vasiga, 2015). Ayrıca, lazer gücünün, termoplastik polimerler için ITAB bölgesindeki en etkili parametrelerden biri olduğunu da tespit edilmiştir (Tamrin et al., 2015). CO₂ lazer kesiminde iyi bir kesim kalitesi elde edildiğinde bile ITAB alanı oluşmaktadır (Riveiro et al., 2012). Yüksek kesme hızında küçük bir ısıdan etkilenen bölge görülmekte ve ısıtma buharlaştırma ile iyi bir kesim gerçekleşmektedir. Sonuç olarak çalışma sırasında kenarın bozulması önlenecektir (Schneider, vd., 2013).

Choudhury & Shirley, 2010 yaptıkları çalışmada, CO₂ basıncına göre hava basıncını ayarlamış ve üç farklı polimer türü üzerinde çalışmışlardır. Bunlar Polimer Metakrilat (PMMA) ve Polikarbonat (PC), Poli Propilen (PP)'tir. Bu üç polimer, yüzey pürüzlülüğünü ve ısıdan etkilenen bölgeyi belirlemek için 3 mm kalınlığa sahiptir. Çalışmada Polimetil Metakrilat (PMMA), Polikarbonat (PC) ve Poli Propilen (PP) karşılaştırıldığında ısıdan etkilenen bir bölgenin daha az olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca yüzey pürüzlülüğü ile kesme performansları karşılaştırıldığında en iyi özelliğe Poli Propilene (PP) 'in sahip olduğu görülmüştür. Polikarbonat (PC) incelendiğinde ısıdan etkilenen bölgenin ve pürüzlülüğün, lazer gücü ile doğrudan bir ilişki içinde olduğu, yardımcı gaz ve kesme hızı ile ters orantılı olduğu sonucuna varmışlardır.

Davim vd. 2008 yaptıkları çalışmada kesme hızı faktörlerini değerlendirmek için CO₂ lazer kesimini kullanmışlardır. Kesme hızı 250-4000 mm/dk arasındadır. Ayrıca, lazer gücü 280 - 900 W ve yardımcı gaz da 0,5 - 4 bar Azot (N₂) gazı kullanılmış ve kesimin performansını araştırılmıştır. Farklı kalınlıklarda bazı polimerler için (Polimetil Metakrilat, Polikarbonat, Polipropilen, ayrıca termoset malzemeleri, cam lifleri ile takviye edilmiş epoksi reçine, ve fenolik reçine gibi), ısı etkilenen bölge 2 ila 8 mm arasındadır. Malzemelerin kalınlığı, deneylerin sonunda etkilenen ısı bölge'nin artışı, lazer gücünün artmasına bağlıdır. Bu durum polimerler için CO₂ lazer kesiminin hızını düşürür, ancak termoset malzemelerde yüksek ısıya dayanan ITAB bölgesini ortaya çıkarmıştır. Fenoliğin daha düşük işlenebildiğinden dolayı PMMA malzemesi bulunmuş ve PC ve PP'den daha iyi özelliklere sahiptir.

Dubey & Yadava, 2008 yaptıkları çalışmada, CO₂ lazer makinesi gibi lazer ışını makinesi ile kağıt kesimi yapmışlar, bu makinedeki lazer ışınını iyileştirmek için lazer

performansının geliştirilmesi gerektiği sonucuna varmışlardır. Bu malzemelerin doğru kalınlığı ve büyüklüğü olması halinde, lazer makinesi, LBM işlemi, frekans, yardımcı gazı türü ve aynı zamanda basınç parametreleri pürüzlülük, çentik, delik, kavite gibi önemli etkiye sahiptir.

Yusoff, vd., 2008 yaptıkları çalışmada, CO₂ lazer kesimini maksimum güçle 100-500 watt; farklı kesim hızına sahip, lazer gücü ve gaz basıncının yardımcı parametrelerini değerlendirmek için, kalınlığı 10 mm olan bir kontrplak çentik eni performansını belirlemek için, kesimin performansının ahşabın nemine bağlı olduğu sonucuna varmışlardır. Çentik genişliği etrafında çok fazla yanma ve çok fazla malzeme kaybı meydana gelmiştir.

Caiazzo vd., 2005, yaptıkları çalışmada 0.25 m / dk'da; kullanılan kesme hızı faktörlerini değerlendirmek için CO₂ lazer kesimini kullanmışlardır. 10 m / dk; ilerleme hızında ayrıca 200 W' tan 1400 W'a lazer gücü için; 3 barlık üç farklı yardımcı gaz (argon, Azot (N₂) ve Hava) kullanmış ve kesimin kalınlık ve çentik genişliğindeki performansını değerlendirmişlerdir. Ayrıca farklı kalınlıkta (2 ile 10 mm) üç tip polimerde Polikarbonat (PC) ve Polipropilen (PP), ayrıca polietilen (PE) yüzey pürüzlülüğü değerleri incelenmiştir. Her zaman iyi bir performans ve çentik genişliğinin elde edilmesi için gerekli olanın yüksek güç olduğu tespit edilmiştir.

Zhou & Mahdavian, 2004, CO₂ lazer kesimini kullanarak yaptıkları araştırmada, 6 ile 60 W arasında lazer gücünün farklı değerini kullanmışlardır. Kesme hızı 0.25 ile 400 mm / s arasındadır. Metal olmayan malzemeler üzerinde, kauçuk, sunta, çam ağacı ve polimetil meth akrilat, plastik akrilik gibi malzemelerin 30 mm kalınlığında kesim derinliğinin belirlenmesi, yüksek bir güç ve yüksek bir derinlik oluşturabilmektedir. Dahası, derinliğin 5 mm olduğu durumlarda 1.6 mm / s kesme hızının altında olabilmektedir. Ayrıca düşük lazer gücü ametal malzemelerin kesilmesinde etkili olabilir. Ancak kuru çam ve suntanın yavaş kesiminde yanmadan dolayı kömürleşmeler meydana gelmektedir. Bunlara ek olarak kauçuk için ısı buharlaşması kaldırıldığında mükemmel bir kesim sağlar. Ayrıca, kesme derinliği artırıldığında daha fazla enerji kullanıldığı için ve CO₂ lazer kesimi ile yapılan tüm işlemlerde çok fazla duman çıkışı göstermeyeceğini tespit etmişlerdir.

4.2. Analizi Deneyin Sonucu

Bu tez çalışmasında, CO₂ lazer kesimini kullanarak HDPE borudan 3 farklı geometrik şekil kesilmiş ve üç farklı yardımcı gaz kullanılmıştır. Bu gazlar Hava, Azot ve Oksijen'dir. Bir borudan üç farklı geometrik şekil kesilmiştir. Bunlar üçgen, kare ve dairedir. Çalışmada geometrik şekilleri keserken köşelerin kesiminde verimliliğine odaklanılmıştır.

4.2.1. CO₂ Lazer Kesimin Hızı

CO₂ lazer kesme hızı 100 mm / dak olarak belirlenmiş ve tüm kesimlerde sabit tutulmuştur. CO₂ lazer kesiminde kullanılan yüksek yoğunluklu polietilen borunun kalınlığı 5 mm'dir. CO₂ lazerleri için kesme hızının en iyi performansı, lazer ışını veriminin kalitesiyle alakalıdır. Bu deneyde 100 mm / dak kesme hızı, üç farklı tipte yardımcı gaz (Hava, N₂ ve O₂) kullanılmış ve yüksek yoğunluklu poli etilenin kesiminde bir performans sağlamaktadır.

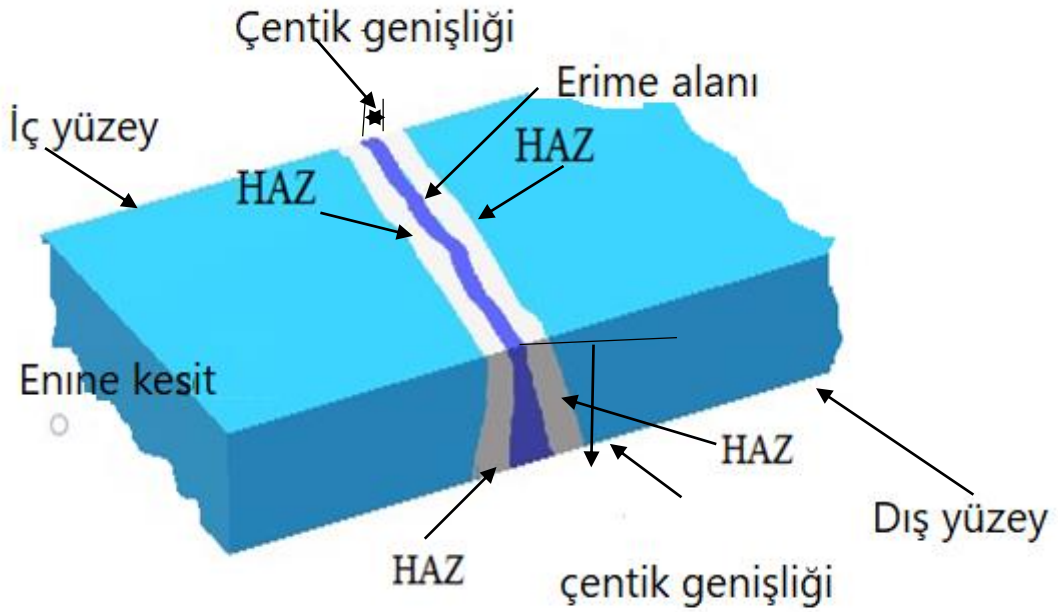
4.2.2. CO₂ Lazer Kesimin Gücü

CO₂ lazer kesme cihazının gücü 2000W'tır. Kesme işlemleri sırasında 200 W ile 500 W arasında kullanılmıştır. Yardımcı gazların türüne bağlı olarak en düşük gücün 218 W olduğu tespit edilmiştir. O₂'yi yardımcı gaz olarak kullandığımızda, yüksek yoğunluklu polietilen, O₂ için yüksek enerjiden dolayı kesme için iyi bir performans sağlamıştır. Lazer kesim gücünün, hava ve N₂ gibi yardımcı gazlarda yüksek güç kullanıldığı ve bunun da 470 W olduğu tespit edilmiştir. Aynı yüksek kalitede kesim sağlamak için, lazer gücünün, füzyon kesimi üzerindeki yüksek oksijen oranının gözlemlenmesi nedeniyle termoplastik polimerler için kesmenin değerlendirilmesinde en etkili parametreler olabileceği anlamına gelmektedir.

4.2.3. CO₂ Lazer Çentiği Genişliği

CO₂ lazer kesiminde iç yüzeyde farklı çentik genişliği tespit edilmiştir. Borunun dış yüzeyinde ise üç tür yardımcı gazın etkisiyle çentik genişliği farklılık göstermemiştir. Yani, çentik genişliğini iç pozisyonda ihmal edilebilir.

Bu çalışmada, iç kısımlar arasında daha düşük bir ayırımın yanı sıra CO₂ çentik genişliğinin kesildiğini görülmektedir. Çentik genişliğindeki bu kesim yüksek yoğunluklu polietilen malzemesinin 5mm olan kalınlığından ve kesme alanının merkezindeki lazer ışını etkisinden kaynaklanabileceği düşünülmektedir. Şekil 4.1’de çentik genişliği ve derinliği gösterilmiştir.

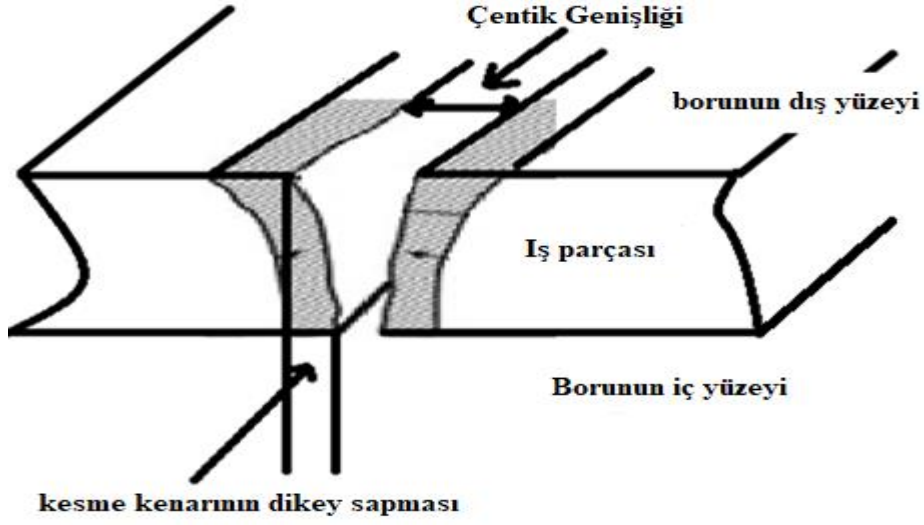


Şekil 4.1 Çentik genişliği ve derinliği.

4.2.4. Kesim Kenarlarının Dikey sapma

Dış yüzey ile iç yüzeyin arasındaki kesim işleminden sonraki dikey kayma mesafesidir. Şekil 4.2’de dikey sapmaya ait resim verilmiştir.

CO₂ lazer kesimde dikey sapma tahminlerinin 5 mm için çok az sapma olduğu tespit edilmiştir. Yüksek yoğunluklu polietilen kalınlığı, üç farklı yardımcı gaz (Hava, N₂ ve O₂) için üç farklı geometrik şekil kesilmesi için (daire, dikdörtgen ve üçgen) dikey sapma ihmal edilebilir.



Şekil 4.2. CO₂ lazer kesim kenarlarının dikey sapması.

4.2.5. Malzeme Yüzey Pürüzlülüğü

CO₂ lazer kesimi ametal olmayan malzemelerde yüzey pürüzlülüğünün çok az etkisi olduğunu tespit edilmiştir. HDPE, 5 mm kalınlığında dış yüzey ve iç yüzey arasında küçük bir pürüzlülük etkisi vardır. Şekil 3.29, Şekil 3.30, Şekil 3.31 incelendiğinde borudan farklı şekiller üretilmiştir (daire, üçgen ve kare) ve yüzey pürüzlülüğü için herhangi bir etki görülmemiş fakat erimiş alanda ortaya çıkan çizikler fark edilmiştir.

4.2.6. Isıdan Tesiri Altındaki Bölge (ITAB)

Genellikle, ısıdan etkilenen bölge lazer kesim kalitesini belirlemektedir ve bu deneyde, numune yüksek yoğunluklu polietilen olduğu için termoplastik bir malzeme olarak sınıflandırılabilir. Bu malzemede ITAB için herhangi bir değişim görülmemiştir. Bu bölge, genellikle kesme alanının yakınında lazer kesimi için bir termal ısı tarafından üretilir.

4.2.7. Çizgi Frekansı

Şekil 3.29 ve 3.30 incelendiğinde 470 W gücünde CO₂ kesim kalitesi ile ilgili ayrıntıları görülmektedir. Şekillerdeki parçalar sabit kesim hızında (100 mm / dk) ve iki tür yardımcı gaz altında (Hava ve N₂), füzyon olmayan ve yarı füzyon kesmelerdir.

Çizgi frekansının sabit güç ve hızda olduğu tespit edilmiştir. Şekil 3.31 incelendiğinde 218 W gücünde CO₂ kesim kalitesi ile ilgili ayrıntılar görülmektedir. Sabit kesme hızı 100 mm / dak olan O₂ 'yi yardımcı gaz olarak kullandığımız füzyon kesimidir. Üç çeşit yardımcı gaz ile 5 mm kalınlıkta bile kesimden sonra yüzey düzleştirilebilir ve numunenin kalınlığı ve erimiş alan çizgilerinin yok olduğu görülmektedir.

4.2.8. Kesim Şekli

CO₂ lazer kesim cihazıyla HDPE borudan 3 farklı geometrik şekil kesilebilirliği, köşeleri ve yüzey pürüzlülüğü incelenmiştir. Kesimde çok iyi sonuçlar elde edilmiştir. Özellikle farklı yardımcı gazlar kullanılmasıyla açılı ve kıvrımlı işlerde lazer kesme işleminin kullanılabilirliği ve sonuçta 90° derece ve 45° derece açılarda temiz modellerin kesildiği görülmüştür. CO₂ lazer kesimini kullanarak, diğer model ve biçimlerin üretilmesinde araştırmacıların çalışabileceği konulardandır.

4.3. Deneysel kurulum

Yüksek yoğunluklu polietilenin CO₂ lazer kesimi için Tablo 4.1.'deki parametreler kullanılmıştır.

Tablo 4.1. CO₂ lazer kesim parametreleri

Parametreler	Birimler	Ölçüm
Lazer tipi	-----	Darbeli
Lazer gücü	W	Hava ve N ₂ için 470
Hız kesmek	mm/min	O ₂ için 218
Frekans darbe	Hz	100
Yük döngüsü	%	100
Odak uzaklığı	mm	Hava ve N ₂ için% 25
Odak pozisyonu	mm	O ₂ için% 10
Yardımcı gaz	-----	127
Gaz basıncı	Bar	Yüzey
Ağızlık	-----	Hava, N ₂ , O ₂
Meme çapı	mm	1
Soğukluk	mm	Konvansiyonel - Süpersonik

4.4. Deneysel Tartışma

Bu çalışmada CO₂ lazer kesimi sistemiyle 5 mm kalınlığındaki yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE) kesilmiştir. Yardımcı gaz olarak Hava, Azot (N₂) ve Oksijen (O₂) kullanarak üç farklı türde gazın 90° derecelik, 45° derece, eğri ve keskin açılarının kesim kalitesini değerlendirmek için kesimler yapılmıştır. Aynı zamanda parametrelerin gözlemlenmesinde, çentik genişliğinin, kesme kenarının diklik sapması ve ayrıca yüzeyin pürüzlülüğü incelenmiştir. Dahası, ısıdan etkilenen bölge ve malzemelerin çizilme yolları incelenmiştir.

Üç farklı gaz da optik hasarları önleyebilecek önemli parametrelerdendir. Bu deney için, üç tür yardımcı gazın yüksek basıncının, kerf genişliği gibi kesim kalitesine etki eden parametreleri azaltacağını söyleyebiliriz. Isıdan etkilenen bölgede, diklik, pürüzlülük ve çiziklik gibi ayrıntıları gözlemleyebiliriz.

4.4.1. Maksimum Kesme Hızları

Bu çalışmada kesme hızı sabit tutulmuştur ve polimerlerin kesme hızının 100 mm / dak olması gerektiğini tespit etmişlerdir (Choudhury & Shirley, 2010). Kesme hızı ile polimerlerin kalitesi arasında ters bir ilişki olduğu, ayrıca çalışmalarında en yüksek 100 mm / dak; kesme hızı gerekliliği sonucuna varmışlardır. Düşük iletkenliğe sahip malzemeler ve polimerler iyi bir performans ve kalite sağlayabilmektedir (Caiazza et al., 2005, Zhou & Mahdavian, 2004).

4.4.2. Maksimum Lazer Gücü

Maksimum lazer gücü için yardımcı gazın lazer makinesindeki güçleri değiştirilmiştir. Bu da yarı füzyon ve füzyon olmayan kesimde, hava ve azotun kullanılması malzeme karakteristiğini ve özelliğini etkilemektedir. Diğer yardımcı gaz olan oksijen ise lazer ışınının CO₂ lazer kesmede iş parçası üzerinde etkili olabilecek önemli parametrelerden biri olduğu tespit edilmiştir. Bu da malzeme yapısına ve deney durumuna bağlı olabilir.

Birçok araştırmanın, bu çalışmada elde edilen sonuçlarla benzer sonuçlar bulduğu görülmektedir (Caiazza et al., 2005, Choudhury & Shirley, 2010). Araştırmalarında vardıkları sonuç, farklı tipteki polimerler ile iyi bir kalite elde etmek için çok fazla güce ihtiyaç olmadığıdır.

4.4.3. Çentik Genişliği

CO₂ lazer kesim sisteminde çentik genişliği kesme işlemine etki etmektedir. Çentik genişliğinin odak noktası çoğunlukla tahmin edilmektedir. Ayrıca optik merkezleme ile hesaplabilmektedir. Lazer ışınının performansı, giriş noktasının malzeme örneğine herhangi bir hareketi, çentik için boyutun kalitesini yansıtmaktadır.

Şekil 4.1'de üç çeşit yardımcı gaz ile kesilen HDPE'in 5 mm kalınlıkta olduğu görülmektedir. Kesim hızının sabit parametrelerine bağlı olarak oluşan çok küçük bir çentik bulunmaktadır. Merkez nokta ölçüsü de yardımcı gazların farklı çeşitlerinin çentik genişliği üzerinde herhangi bir etki göstermediğine dair bir işaret vermektedir.

Küçük çentik, CO₂ lazer kesiminin lazer ışınının kalitesiyle ilgili olan merkezi nokta ölçüsü nedeniyle ortaya çıkmıştır.

Çok küçük çentik genişliğiyle bile, iç çentiğin dış çentikten daha küçük olduğu farkedilmektedir. 5 mm'lik dikey derinlik üzerindeki kayıp gaz basıncı nedeniyle iç çentik dış çentikten daha küçüktür. En yüksek ışın performansı ve düşük kesme hızı bir merkez noktasında küçük bir çentik genişliği oluşturmakta, düşük kesme hızları ve kesme bölgesini içeriden eritirken, dış tarafta daha geniş çaplı çentik oluşmasına neden olmaktadır. Bu durum yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE) 'nin iletkenliği ve özellikleri ile ilgili olabilir. Dış çentik, lazer kesiminde çok az artmıştır. Bu nedenle, farklı yardımcı gazlarla bile bu çalışmada çentik genişliğini değerlendirilemez. Esas olarak lazer kesim alanından eriyen sıvı kullanılır. Çentik genişliğinin frekans ve darbe gücü tarafından etkilendiği tespit edilmiştir (Caiazza et al., 2005). Sonuç olarak, kesme hızı, güç ve yardımcı gaz parametrelerinin çentik genişliğini azaltabileceği sonucuna varılmıştır.

4.4.4. Kesim Kenarlarının Diklik Sapması

Şekil 4.1 incelendiğinde ergiyen bölgedeki numunenin üst yüzeyiyle alt yüzeyi arasındaki farktan bahsedilmektedir. Bu olay işlem parametrelerine bağlıdır. Ancak, farklı yardımcı gazları basıncına göre diklik sapmaları değişmemiştir. Diğer parametrelerin farklı kalınlıklarda ki etkisini hesaplamak ve belirlemek için farklı yardımcı gazların dik yol üzerindeki etkisi çalışılabilir.

4.4.5. Yüzey Pürüzlülüğü

HDPE 5 mm kalınlık için, iç ve dış yüzey pürüzlülüğünü incelenmiştir. Yardımcı gazların farklı çeşitleri, sabit kesim hızında yüzey pürüzlülüğünü etkilemediği tespit edilmiştir. CO₂ lazer kesimde HDPE 'nin 5mm kalınlığı için füzyon olmayan ve yarı füzyon için 470 W, füzyon kesimi için 218W güç harcadığı tespit edilmiştir. Ayrıca 100 mm / dak'lık kesme hızı daha iyi sonuçlar verebilmektedir. Muhtemelen bu durum daha düşük bir pürüzlülüğe sahip olduğunda gerçekleşmektedir ama farklı çalışmalarda farklı kalınlıklar araştırılabilir.

Bu çalışmanın sonuçları incelendiğinde pek çok araştırmanın sonuçlarıyla paralel olduğu görülmektedir (Choudhury & Shirley, 2010). Yardımcı gazlar ve polimerlerin pürüzlülüğü arasında ters bir ilişki olduğunu kanıtlamıştır (Caiazza et al., 2005). Kesme hızının doğru parametreleri, yardımcı gazların gücü ve türü, pürüzlülüğü azaltabilmektedir.

4.4.6. Isıdan Etkilenen Bölge (ITAB)

CO₂ lazerle kesme kalitesini belirleyen en önemli faktörlerden biri, ısıdan etkilenen bölgedir. Çünkü bu parametre özellikle füzyon kesme tipinde oksidasyon alanını ve malzemenin kesim tarafındaki ısınma yolunu değerlendirmektedir.

Çalışmada füzyon olmayan ve yarı füzyon için 470 W, füzyon için 218 W, her türlü kesim için 100 mm / dk kesme hızı kullanıldığından, ısıdan etkilenen bölgenin ihmal edilebilecek kadar az olduğu tespit edilmiştir. Isıdan etkilenen bölge, farklı yardımcı gaz türlerinden etkilenmemektedir. Ancak güce, kesme hızına ve iş parçasının tipine bağlıdır.

Düşük güç, ısıdan etkilenen bölgeyi ihmal edilebilecek kadar küçük olduğunu göstermiştir. Choudhury & Shirley, 2010; Davim vd, 2008 çalışmalarında daha düşük basınç ile yardımcı gaz kullanmışlardır ve sonuçlar bizim sonuçlarımızla paraleldir.

4.4.7. Çizgi Frekansı

İç kesim yüzeyindeki çizgilerin ortaya çıktığı olaylar ile açıklanabilir. Malzemenin üst kısmından erimiş malzemelere kadar olan işlem sırasında ısı transferiyle, malzemelerin üstündeki ilk buharlaştırmaya kadar HDPE 'nin lazerle kesilmesi sırasında farklı türdeki yardımcı gazların kararsızlığını görülmektedir.

Kesme işlemi boyunca malzeme içindeki sıcaklık varyansı nedeniyle, iş parçasının bu sıcaklık değişimi, polimer malzemelerin davranışı olan sıvı erimiş tabakanın davranışı olacaktır. Bu prosedürde, polimer malzemeler için bu davranış, CO₂ lazer kesiminin enerjisinden etkilenir. İşlem sırasında sıcaklığın azalmasına neden olur ve yardımcı

gazın yüksek direnci nedeniyle, sıcaklık düşer, dahası, katmanların doğru kalınlıkta geliştirilmeleri gerektiğinde, üstteki yüzeyleri açığa çıkarmaya başlamaktadır.

Bu çalışmada CO₂ lazerinin bu parametrelerle kullanılması, kararlı durum yönetimini teşvik edici şekilde çizgi çizme yoluna ulaşmak için kolay etkinlik göstermektedir. Bu da, çentiğin ışınlamasını sağlayacaktır. Bundan dolayı viskozite erimesinden kaynaklı ortaya çıkan çizgilerin patlamasına neden olabilmektedir. Dahası, yüzeydeki yüksek gerilim tekdüze bir akış şeklinde olabilmektedir.

5. GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1. Genel Sonuçlar

Bu çalışmada elde edilen tüm sonuçlar ve neticeler, iç gaz türünden başlayarak, sabit hız ve güç kesmeye varan deneylerde yer alan maddeler de dâhil olmak üzere, özel bir seçim ve koşullar altında ele alınmıştır.

Sonuçlar aşağıdaki şekilde temsil edilmiştir:

- CO₂ lazer kesiminin kullanılması, kare, üçgen, 90° derece ve 45° derecelik açılar ve eğri şekil gibi farklı formlardaki temiz modellerin üretilmesinde etkili bir işlem olmasıdır.
- CO₂ lazer kesim ile HDPE borunun kesilmesi, 100 mm / dak hızda gerçekleşmiştir ve enerji, yardımcı gazın türüne ve malzemenin kalınlığına bağlıdır.
- HDPE boru, CO₂ lazer kesimi altında iyi bir kalite sağlamakta ve bu her bir numunede bulunan açılar net şekliyle görülmektedir.
- CO₂ lazer kesim ile 5 mm kalınlığında HDPE boru çok iyi bir kesim sağlamıştır.
- HDPE için yardımcı gazlarının farklı çeşitleri 5 mm kalınlığında ve 1 bar basınç altında en iyi kesme etkisi göstermiştir. Diğer parametrelerin CO₂ lazer kesimi üzerinde gerçek bir etkisi olduğunu gösterir.
- Üç farklı gaz türüyle 1 bar yardımcı gazın basıncı, kesme kalitesine etki oluşturur.
- Bu araştırmada CO₂ lazer kesimi parametreleri yüksek verimlilik göstermiştir.

- En yüksek kesimle ilgili olarak, hız, kesme kalitesinin geliştirmesi 100 mm/dak, 5mm HDPE boru kalınlığı için, çentik genişliği, ITAB, pürüzlülük, dikeylik ve çizgi frekansı en iyi şekilde gözlenmiştir.
- CO₂ lazer kesimi, HDPE için uygulamalarda düzgün ve mükemmel yüzey performansı sağlar.
- CO₂ lazer kesim kullanarak boru numunesinin kalınlığında deforme olmadığı tespit edilmiştir.
- İç çentik genişliği dış çentik genişliğinden daha azdır, bu hız ve kesme enerjisi sabitken malzemenin türüne bağlıdır.
- Pürüzlülük, parametreler sabit kaldıkça azalır ve farklı yardımcı gazlardan gelen yüksek basıncın bunun üzerinde pek fazla etkisinin olmadığı tespit edilmiştir.
- Çalışmada iş parçasında duman tütmesi gözlenmemiştir.
- HDPE boru yüksek verim, ısıl iletkenlik ve korozyon direncine sahip olduğu gibi, bu boruların başarılı bir şekilde kesilmesi, sıvı taşımacılığında metal borulara ideal bir rakip oluşturmaktadır. Örneğin, soğutma sistemlerinde soğutulmuş suyu taşımak için kullanılan karbon çelik borular.

5.2. Öneriler

Gelecek çalışmalar için, yüksek yoğunluklu polietilen kullanılarak malzemelerden farklı kalınlık ile lazer kesiminin farklı türünü kullanabilirler. Kesik değerlendirmesi ve çentik genişliğinin, pürüzlülük, ısıdan etkilenen bölge, dikeylik ve çizgililik değerlendirmesi ile karşılaştırma performansını incelemek ve piyasaya kaliteli ve daha az maliyetli üretim sunmak için kullanılabilir. Çalışmamızda bulunan sonuçlar göz önüne alınırsa, CO₂ lazer kesimi 5 mm kalınlığındaki yüksek yoğunluklu polietilen boruda yüksek kalite ve performans sağlamıştır.

KAYNAKLAR

- Abdullah, M. A. S. (2008). Carbon Dioxide. Thesis.
- Ashby, M. F., & Jones, D. R. H. D. R. H. (1996). Engineering Materials 1. Engineering Materials 1, 322. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-096665-6.00030-1>
- Caiazzo, F., Curcio, F., Daurelio, G., & Minutolo, F. M. C. (2005). Laser cutting of different polymeric plastics (PE, PP and PC) by a CO₂ laser beam. Journal of Materials Processing Technology. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2004.02.019>
- Callister, W., & Rethwisch, D. (2007). Materials science and engineering: an introduction. Materials Science and Engineering (Vol. 94). [https://doi.org/10.1016/0025-5416\(87\)90343-0](https://doi.org/10.1016/0025-5416(87)90343-0)
- Catalogue, P. (2017). High Density Polyethylene Why To Choose Mol Group ?
- Chen, S. (1999). The effects of high-pressure assistant-gas flow on high-power CO₂ laser cutting, 88, 57–66.
- Cheng, J. J. (2008). Mechanical and Chemical Properties of High Density Polyethylene : Effects of Microstructure on Creep Characteristics by, 1–302.
- Choudhury, I. A., & Shirley, S. (2010). Laser cutting of polymeric materials: An experimental investigation. Optics & Laser Technology. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2009.09.006>
- Christopherson, T. (2002). Laser Processing of Plastic Sheet. Article, 4.
- Conroy, J. (2016). Investigation of Improved Label Cutting By Co₂ Lasers With Wavelength. USA.
- D. Vasiga, D. C. (2015). A Review of Carbon Dioxide Laser on Polymers. International Journal of Engineering Research and Technology (IJERT), 4(3), 874–877.
- Davim, J. P., Barricas, N., Conceição, M., & Oliveira, C. (2008). Some experimental studies on CO₂ laser cutting quality of polymeric materials. Journal of Materials Processing Technology. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.06.056>
- Dubey, A. K., & Yadava, V. (2008). Laser beam machining-A review. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 48(6), 609–628. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2007.10.017>
- Eltawahni, H. A. (2010). Effect of process parameters and Optimization of CO₂ laser cutting of Ultra High Performance Polyethylene. School of Mech. & Manu. Eng., Dublin City University, Dublin 9, Ireland.

- Es-Saheb, M. (1996). The Temperature Effects On High Density Polyethylene (HDPE) Pipes, 8, 47–60.
- Evonik Industries AG. (2011). Polymers & Lasers.
- Gabriel, L. H. (1998). Service life of drainage pipe. ., Transportation Research Board, 254, pp1-18.
- Gibson, R. (2004). History of HDPE and HDPE pipe products. PE Specialisten Technology, 1–2.
- Kadhim, L. F. (2017). Mechanical Properties of High Density Polyethylene / Chromium Trioxide under Ultraviolet Rays, 12(10), 2517–2526.
- Laslau, R. (2009). Introduction in the Polymer Matrix Composite Laser Cutting Technology. In International Conference – Innovative technologies for joining advanced materials – tima09 (pp. 1–5). Timisoara - Romania.
- Lepoutre, P. (2013). The manufacture of polyethylene. New Zealand Institute of Chemistry, 1–5. Retrieved from <http://nzic.org.nz/ChemProcesses/polymers/10J.pdf>
- Nakayama, K., Furumiya, A., Okamoto, T., Yagi, K., Kaito, A., Choe, C. R., ... Nakajima, A. (1991). Structure and Mechanical Properties of Ultra-High Molecular Weight Polyethylene Deformed Near Melting Temperature. Pure Appl Chem, 63(12), 1793–1804.
- Narendra B. Dahotre, S. P. H. (2008). Laser Fabrication and Machining of Materials (first eddi). Tennessee, USA: Springer science + Business Media, LLC.
- Negarestani, R. (2010). Laser Cutting of Carbon Fibre - Reinforced Polymer Composite Materials. Thesis metd.
- Nexor. (2010). Butt Fusion Welding of HDPE pipes.
- Patel, P., Gohil, P., & Rajpurohit, S. (2013). Laser Machining of Polymer Matrix Composites: Scope , Limitation and Application. International Journal of Engineering Trends and Technology, 4(6), 2391–2399.
- Pipesystems, G. (2017). Jointing of Polyethylene Pipe Systems. Retrieved from <http://www.glynwedasia.com/upload/DoandDontsforPolyethyleneJointing.pdf>
- Powell, J. (1998). Laser Cutting. <https://doi.org/10.1007/978-1-4471-1279-2>
- Quality, S. (2000). Pressure Pipe Hdpe Pipe Systems.
- Radovanovic, M., & Madic, M. (2011). Experimental Investigations of Co 2 Laser Cut Quality : a Review. Nonconventional Technologies Review, 4(4), 35*42.

- Rajendran, N. (1990). An experimental and theoretical study of heat transfer effects during a laser-cutting process.
- Rath, W., Northemann, T., & Gmbh, R. L. (1994). Industrial fast axial flow CO2 laser series from 10 kW to 20 kW. The International Society for Optical Engineering.
- Riveiro, A., Quintero, F., Lusquiños, F., del Val, J., Comesaña, R., Boutinguiza, M., & Pou, J. (2017). Laser cutting of Carbon Fiber Composite materials. *Procedia Manufacturing*, 13, 388–395. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.09.026>
- Ryedale District Council. (2014). Different types of plastics and their classification. DIFFERENT TYPES OF PLASTICS AND THEIR CLASSIFICATION The. Retrieved from http://www.ryedale.gov.uk/attachments/article/690/Different_plastic_polymer_types.pdf
- S R Rajpurohit, P. . D. M. P. (2012). Striation Mechanism in Laser Cutting – the Review **. *International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA)*, 2(2), 457–461.
- Schneider, F., Wolf, N., & Petring, D. (2013). High power laser cutting of fiber reinforced thermoplastic polymers with cw- and pulsed lasers. *Physics Procedia*, 41, 415–420. <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2013.03.096>
- Schulz, W., Nießen, M., Eppelt, U., & Kowalick, K. (2017). *The Theory of Laser Materials Processing* (Vol. 119). <https://doi.org/10.1007/978-3-319-56711-2>
- Silfvast, W. T. (2004). *Laser-Fundamentals* (second edi). Cambridge, UK.
- Stournaras, A., Stavropoulos, P., Salonitis, K., & Chryssolouris, G. (2009). An investigation of quality in CO2laser cutting of aluminum. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 2(1), 61–69. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2009.08.005>
- Tahir, A. F. B. M. (2015). Experimental Evaluation of CO2 Laser Cutting Quality of Ultra High Strength Steel (UHSS) Using Nitrogen as an Assissted Gas. Faculty of Mechanical and Manufacturing Engineering Universiti Tun Hussein Onn, Malaysia.
- Tamrin, K. F., Nukman, Y., Choudhury, I. A., & Shirley, S. (2015). Multiple-objective optimization in precision laser cutting of different thermoplastics. *Optics and Lasers in Engineering*, 67, 57–65. <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2014.11.001>
- Tarani, E., Terzopoulou, Z., Bikiaris, D. N., Kyratsi, T., Chrissafis, K., & Vourlias, G. (2017). Thermal conductivity and degradation behavior of HDPE / graphene nanocomposites Thermal conductivity and degradation behavior of HDPE / graphene nanocomposites. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, (March). <https://doi.org/10.1007/s10973-017-6342-0>

- Tavman, I., Aydogdu, Y., Kök, M., Turgut, a, & Ezan, a. (2011). Measurement of heat capacity and thermal conductivity of HDPE / expanded graphite nanocomposites by differential scanning calorimetry. *Archives of Materials Science and Engineering*, 50(1), 56–60. Retrieved from http://www.archivesmse.org/vol50_1/5016.pdf
- Trumpf. (2007). Technical information Laser processing CO2 laser. Retrieved from http://www.iconmachinetool.com/education/Library_Laser_CO2_Laser.pdf
- Wandera, C. (2006). Laser Cutting of Austenitic Stainless Steel with a High Quality Laser Beam. Lappeenranta University of Technology.
- Wilson, M. (1977). Laser processing of engineering materials. *Tribology International* (Vol. 10). [https://doi.org/10.1016/0301-679X\(77\)90212-2](https://doi.org/10.1016/0301-679X(77)90212-2)
- Wirth, P. (2004). Introduction to Industrial Laser Material s Processing (Rofin). Hamburg.
- Yilbas, B. S., Akhtar, S. S., & Karatas, C. (2017). Laser circular cutting of Kevlar sheets: Analysis of thermal stress filed and assessment of cutting geometry. *Optics and Laser Technology*, 96, 180–189. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2017.05.029>
- Yilbas, B. S., Davies, R., & Yilbas, Z. (1992). Study into penetration speed during CO2 laser cutting of stainless steel. *Optics and Lasers in Engineering*, 17(2), 69–82. [https://doi.org/10.1016/0143-8166\(92\)90013-W](https://doi.org/10.1016/0143-8166(92)90013-W)
- Yusoff, N., Ismail, S. R., Mamat, A., & Ahmad-Yazid, A. (2008). Selected Malaysian wood CO2-laser cutting parameters and cut quality. *American Journal of Applied Sciences*, 5(8), 990–996.
- Zhou, B. H., & Mahdavian, S. M. (2004). Experimental and theoretical analyses of cutting nonmetallic materials by low power CO2-laser. *Journal of Materials Processing Technology*, 146(2), 188–192. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2003.10.017>

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Saleh Jassim Saleh Al-QAISY

Doğum Yeri ve Yılı : Irak - Bağdat

Medeni Hali : Evli

Yabancı Dili : İngilizce

E-posta : gscs_company@yahoo.com



Eğitim Durumu

Lise : AL-NEZAL, 1987

Lisans : Makine Mühendisliği, Teknoloji Üniversitesi, Bağdat/Irak,
1992