

Atmosferik Basınç Soğuk Plazma Jetler

Ece Dallı

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Fizik Anabilim Dalı

Haziran 2013

Atmospheric Pressure Cold Plasma Jets

Ece Dalli

MASTER OF SCIENCE THESIS

Department of Physics

June 2013

Atmosferik Basınç Soğuk Plazma Jetler

Ece Dallı

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Lisansüstü Yönetmeliği Uyarınca
Fizik Anabilim Dalı
Yüksek Enerji Ve Plazma Fiziği Bilim Dalında
YÜKSEK LİSANS TEZİ
Olarak Hazırlanmıştır

Danışman: Doç. Dr. Tamer Akan

Haziran 2013

ONAY

Fizik Anabilim Dalı Yüksek Lisans öğrencisi Ece Dallı' nın YÜKSEK LİSANS tezi olarak hazırladığı “Atmosferik Basınç Soğuk Plazma Jetler” başlıklı bu çalışma, jürimizce lisansüstü yönetmeliğin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek kabul edilmiştir.

Danışman : Doç. Dr. Tamer AKAN

İkinci Danışman : -

Yüksek Lisans Tez Savunma Jürisi:

Üye : Prof. Dr. K. Gediz AKDENİZ

Üye : Prof. Dr. Naci EKEM

Üye : Prof. M. Selami KILIÇKAYA

Üye : Prof. Dr. M. Celalettin Baykul

Üye : Doç. Dr. Tamer AKAN

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun tarih ve sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Nimetullah BURNAK

Enstitü Müdürü

ÖZET

İnsanoğlunun yeryüzünde ürettiği ilk plazma ateştir ve çok yüksek sıcaklıklara sahiptir. 20. yüzyılda kapalı hacimler içinde ateşin yapısı ile benzer özelliklere sahip, oda sıcaklığında gaz deşarj plazmaları üretilmiştir. Son 20 yıl içerisinde de üretilen bu soğuk plazmalar kapalı hacim içerisinde atmosfer koşullara çıkarılmıştır. Atmosfer koşullarına çıkan bu plazmalar “jet” olarak adlandırılmaktadır.

Bu tez çalışmasında son 20 yıl içerisinde üretilen tüm atmosferik basınç soğuk plazma jetleri incelenmiş ve bunların içinden özellikle 100 °C’ nin altında sıcaklıklara sahip jetler konu edilmiş ve detaylıca açıklanmıştır. Seçilen atmosferik basınç soğuk plazma jetleri, kullanılan güç kaynağı cinsinden yani üretilen plazmanın elektromanyetik alan yapısına göre sınıflandırılmıştır. Son 5 yıl içinde geliştirilen ve teknolojiye kullanılan sistemler özellikle çalışmanın içine alınmıştır. Kullanılan güç kaynağına göre ana başlıklarda verilen sistemler, elektrot dizaynlarına göre alt başlıklar altında incelenmişlerdir. Her bir sistemin elektrotlar dizaynı, kullanılan gaz, gaz akış hızı ve jet sıcaklığı verilmiştir. Ayrıca üretilen plazmaların elektriksel karakteristikleri ve spektroskopik bilgileri verilmiştir. Son olarak atmosferik basınç soğuk plazma jetlerinin yüzey temizleme ve aktivasyon, sıvı arıtma, hücreler üzerine etkisi, diş çürüğü tedavisi, cilt yenileme, yara tedavisi ve kanser tedavisi gibi alanlarda kullanımları açıklanmıştır.

Bu literatür çalışmasından sonra tümüyle orijinal yeni bir atmosferik basınç soğuk plazma jet üretilmesi için çalışmalar yapılmıştır. Yapılan ilk çalışmalarda cam vakum odası içinde havanın DC soğuk plazma jeti üretilmiştir. Su soğutmalı paslanmaz çelik elektrotlar sistemi kullanan bu DC plazma jetini atmosferik koşullara çıkarmak ve sıcaklığını düşürmek için ön çalışmalar yapılmıştır.

SUMMARY

The first plasma generated in earth by human being is fire and it has high temperatures. In 20th century, gas-discharging plasmas were generated at room temperature in closed chambers bearing similar properties to those of the fire. In the past two decades, these cold plasmas have been taken out from closed chambers to atmospheric conditions, which are now called “jet”.

In this study, all the atmospheric pressure cold plasma jets that have been produced in the past 20 years were investigated, with the atmospheric pressure cold plasma jets that have temperatures lower than 100 °C chosen and explained in detail. The selected atmospheric pressure cold plasma jets are classified in accordance with the type of the power supply utilized. In other words, they were chosen in accordance with the structure of electromagnetic field of plasma generated. Especially the systems developed and used in technology over the past five years were included in the present study. These systems were first categorized into subtitles based on their power supply and then investigated based on their electrode design. Electrode design, operated gas, gas flow rate and jet temperature of each system have been presented in this study. Moreover, electrical characteristics and spectroscopic data of plasmas generated have also been presented. Finally, using atmospheric pressure cold plasma jets in surface cleaning and activation, liquid waste treatment, dental therapy, skin regeneration, wound healing and cancer treatment has also been explained.

The literature review leads to explain the production process of an entirely new atmospheric cold pressure plasma. First, a DC cold pressure plasma has been placed in a glass vacuum room. Preliminary activities include creating an atmospheric condition and decreasing the temperature. For this purpose, water cooling stainless steel electrode system has been used.

TEŞEKKÜR

Öncelikle bir danışmandan çok daha fazlası olup yeri geldiğinde bir ağabey, yeri geldiğinde bir arkadaş, yeri geldiğinde büyük bir yol gösterici olan, tez çalışmam süresince her türlü bilgisini ve deneyimini benimle paylaşan, beni destekleyen, cesaretlendiren, çalışkanlığını, aydınlığını ve ileri görüşlülüğünü örnek aldığım değerli hocam Doç. Dr. Tamer AKAN' a en içten teşekkürlerimi sunarım.

Gerek lisans gerekse yüksek lisans dönemim boyunca her türlü sıkıntıda yanımda olan, beni hiç yalnız bırakmayan arkadaşlarım Alican ŞAHİN, Neslihan YÜKSEL, Serde KIRARSLAN, Bilgenur ALIŞ ve Sezen YILMAZ' a teşekkürü bir borç bilirim.

Son olarak beni dünyaya getiren, bulunduğum yerde olmamı sağlayan, her kararında arkamda olan, beni destekleyen biricik anneme ve biricik babama, her şeyden çok değer verdiğim kardeşlerim Efe ve Duru Ege' ye yanımda oldukları için çok ama çok teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET.....	v
SUMMARY.....	vi
TEŞEKKÜR.....	vii
İÇİNDEKİLER.....	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xi
TABLolar DİZİNİ.....	xvi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xvii
1. GİRİŞ.....	1
2. PLAZMANIN TANIMI VE PARAMETRELERİ.....	11
2.1. Plazmanın Tanımı.....	12
2.2. Plazma Parametreleri.....	13
2.2.1. Plazma Yoğunluğu.....	13
2.2.2. İyonlaşma Derecesi.....	15
2.2.3. Plazma Sıcaklığı.....	16
2.2.4. Plazma Frekansı.....	19
2.2.5. Debye Uzunluğu ve Plazma Kılıfı.....	21
2.3. Plazma ile Gazlar Arasındaki Farklar.....	23
3. PLAZMA ÜRETİMİ.....	25
3.1. Elektriksel Gaz Deşarj.....	26
3.2. DC Elektriksel Gaz Deşarj Karakteristikleri.....	31

İÇİNDEKİLER (Devam)

Sayfa

4. ATMOSFERİK BASINÇ SOĞUK PLAZMA JETLER.....	45
4.1. Puls DC Plazma Jetler.....	46
4.1.1. Dielektrik Kaplı Yüzük Elektrotlar.....	48
4.1.2. Çift Metal Elektrot.....	52
4.1.3. Dielektrik Kaplı Tek Çubuk Elektrot.....	54
4.1.4. Çubuk-Yüzük Elektrot.....	58
4.1.5. Ayrık Elektrot.....	61
4.2. Düşük Frekans AC Plazma Jetler.....	64
4.2.1. Sıvı Elektrot.....	66
4.2.2. Mikrop plazma Jetler.....	67
4.2.3. Şırınga Elektrot.....	73
4.2.4. Düzlem Elektrot.....	76
4.2.5. İğne Elektrot.....	78
4.3. Yüksek Frekans AC Plazma Jetler.....	81
4.3.1. İğne Katot/Silindirik Anot.....	81
4.3.2. Su Soğutmalı Elektrotlar.....	82
4.3.3. İğne Elektrot.....	83
4.3.4. Mikrodalga Plazma Jetler.....	85
4.4. Yüksek Frekans Puls AC Plazma Jet.....	86
5. UYGULAMA ALANLARI.....	90
5.1. Yüzey Temizleme.....	91
5.2. Yüzey Aktifleştirme.....	93
5.3. Yüzey Dağlama (Etching).....	97
5.4. Plazma İle Arıtma.....	98
5.5. Uygulamalı Plazma Tıp.....	99

İÇİNDEKİLER (Devam)**Sayfa**

5.5.1. Soğuk Plazma Jetlerin Hücreler Üzerine Etkisi.....	102
5.5.1.1. Prokaryot Hücreler.....	102
5.5.1.2. Ökaryot Hücreler.....	105
5.5.2. Diş Temizleme ve Çürük Tedavisi.....	107
5.5.3. Cilt Yenileme.....	108
5.5.4. Yara Tedavisi.....	110
5.5.5. Kanser Tedavisi.....	112
6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	114
SONUÇ VE YORUM.....	118
KAYNAKLAR DİZİNİ.....	125

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
1.1. Şimşek, doğanın ürettiği bir gaz deşarj plazmadır.....	3
1.2. Elektriksel gaz deşarj sistemi.....	4
1.3. ESOGÜPFL’ da üretilen neon gazının glow deşarj plazması.....	5
1.4. Plazma küresi.....	5
1.5. Ark plazma jetleri; plazma kaplama, plazma kesme ve plazma ile materyal işleme teknolojilerinde kullanımı.....	6
1.6. Elle dokunulabilecek kadar soğuk atmosferik basınç plazma jeti.....	6
1.7. E. Coli bakterisinin soğuk plazma ile inaktivasyonu.....	7
2.1. Maddenin dört hali.....	12
2.2. Plazma frekansı ν_p olan bir plazma katmanına kaynak frekansı ν_0 olan bir elektromanyetik radyasyonun gelişi.....	21
3.1. DC elektriksel gaz deşarjın akım voltaj karakteristiği.....	32
3.2. Farklı gazlar için Paschen eğrileri.....	37
3.3. DC glow deşarjda elektrotlar arasındaki elektrik ve potansiyel alan dağılımı ile yük ve akım yoğunlukları değişimi.....	39
4.1. Laroussi ve Lu tarafından geliştirilen plazma jetin şematik gösterimi.....	48
4.2. Bir uygulama esnasında dielektrik kaplı yüzük elektrot kullanan plazma jet sistemi (Plasma Pencil).....	49
4.3. Yüzük elektrot kullanan atmosferik basınç puls plazma jeti üretmek için kullanılan puls voltaj ve üretilen plazmanın akım – voltaj karakteristiği.....	50
4.4. Yüzük elektrot kullanan atmosferik puls plazma jeti tarafından üretilen plazma atmaları.....	51
4.5. Plazma kalemin optik emisyon spektroskopisi.....	52
4.6. Deşarj odası içerisinde üretilen argon glow deşarj.....	53
4.7. a) DC argon ‘‘Plasma Brush’’ görüntüsü. b) argon plazma jetin kağıt üzerine temas hali.....	53
4.8. a) Şematik deney düzeneği b) Plazma jetin bir fotoğrafı.....	55

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
4.9. a) Uygulanan voltaj (V_a), toplam akım (I_{on}) ve deplasman akımının (I_{off}) zamana bağlı grafiği b) Uygulanan voltaj (V_a), deşarj akımı (I_{dis}) ve plazma akımının (I_{plume}) zamana bağlı grafiği.....	56
4.10. İnsan parmağının plazma jet ile kontak hali.....	57
4.11. a) 300-500 nm' den b) 500-800 nm' ye plazma jetin emisyon spektroskopisi.....	57
4.12. Dielektrikle kaplanmamış çubuk elektrot ve yüzük elektrot kullanan atmosferik basınç plazma jetin şematik gösterimi.....	58
4.13. Soğuk ve düşük voltaja sahip plazma jeti.....	59
4.14. Hava ortamından gelen kararsız N_2 ve OH radikalleri bulunan argon plazma jetin spektrumu.....	60
4.15. Plazma jetin şematik gösterimi.....	60
4.16. 20 m/s hızında He jet görüntüsü örneği.....	61
4.17. Ayrık elektrot kullanılan atmosferik soğuk plazma jeti.....	62
4.18. APGD jetin uygulanan voltaj ve deşarj akımı.....	63
4.19. 200-800 nm arası optik emisyon spektroskopisi a) pulslu çıkış b) sinüzoidal çıkış.....	64
4.20. (a) Deşarj sisteminin şematik diyagramı (b) Atmosferik basınç Argon glow deşarjın fotoğrafı.....	66
4.21. Akış hızı $0.1 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ olan argon için akım – voltaj karakteristiği.....	67
4.22. Kalem şeklinde nitrojen mikrop plazma jet cihazının şematik ve gerçek görüntüsü.....	68
4.23. Mikrop plazma jetin tipik akım-voltaj karakteristiği.....	69
4.24. Mikrop plazma jet ile üretilen nitrojen plazmasının optik emisyon spektroskopisi.....	70
4.25. Atmosferik basınçta üretilen mikrop plazma jet.....	71
4.26. N_2 mikrop plazma jetin akım – voltaj karakteristikleri.....	72

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
4.27. N ₂ gazı için optik emisyon spektroskopisi.....	72
4.28. Şırınga elektrot kullanılan plazma jet cihazının parçaları.....	73
4.29. Çeşitli toprak elektrotu tiplerine göre akım – voltaj eğrileri.....	74
4.30. Toprak elektrotlarına bağlı olarak plazma jetin yapısı.....	75
4.31. Düzlem elektrot kullanılarak üretilen plazma jet.....	76
4.32. Düzlem elektrot kullanılan, farklı çıkış ağzı çaplarında üretilen plazma jetler.....	77
4.33. Deşarj akım (koyu renk) ve voltaj (açık renk) karakteristikleri.....	77
4.34. İğne elektrotlu plazma jet düzeneği.....	78
4.35. Atmosferik basınç Ar plazma jetin çeşitli voltaj değerlerinde ve sabit gaz akış hızında gelişimi.....	79
4.36. Kararlı ve kararsız durumlara karşılık gelen deşarj voltajı ve deşarj akımı dalga formlarının karakteristikleri.....	80
4.37. 250 – 900 nm arası optik emisyon spektroskopisi.....	80
4.38. Koinuma ve ekibi tarafından geliştirilen plazma jetin şematik gösterimi.....	81
4.39. Deney düzeneğinin şematik gösterimi.....	83
4.40. Plazma jet cihazının şematik (a) gösterimi ve fotoğrafı (b).....	84
4.41. Mikroplazma kaynağı ve prob elektrotun jet içerisine yerleştirilmesi.....	85
4.42. Mikrodalga plazma jetin bir görüntüsü.....	86
4.43. Atmosferik basınç soğuk plazma jetin ana bileşenlerinin verildiği şematik (a) gösterimi ve dijital görüntüsü (b).....	87
4.44. Puls RF soğuk plazma jetin elektriksel karakteristikleri.....	88
4.45. Gaz sıcaklığı (siyah) ve 777 ve 845 nm’ de optik emisyon yoğunlukları (mavi).....	88
5.1. Plazma ile yüzey temizleme işlemi a) Kirli metal bir yüzeye plazma uygulanmadan önce b) Kirli partiküller arıtılırken c) Plazma işleminden sonra temizlenmiş metal yüzeyi.....	91
5.2. Plazma ile elektronik kart temizliği.....	92

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
5.3. Hassas bir materyal olan plastiğin atmosferik basınçta üretilen soğuk plazma ile temizlenmesi.....	92
5.4. Plazma ile yüzey aktivasyonu a) Plastik bir yüzeye plazma uygulanmadan önce b) Plazma işlemi c) Plazma yöntemi uygulandıktan sonra.....	93
5.5. Plazma ile yapılan yüzey aktivasyonu a) Plazma uygulanmış yüzey b) Plazma uygulanmamış yüzey.....	94
5.6. Ahşap yüzeyin modifikasyonu (sol: plazma uygulama yapılmamış ahşap yüzeyindeki su damlası, sağ: plazma uygulaması sonrası su damlasının durumu).....	95
5.7. Çeşitli yüzeylerde su damlalarının plazma uygulama öncesi ve sonrası yüzeyle kontak açıları.....	95
5.8. Plazma uygulama yapılmamış (sol) ve plazma uygulaması yapılmış (sağ) PP ve PET dokularının SEM görüntüleri.....	96
5.9. Plazma dağlama uygulaması a) Plazma işlemi öncesi b) Plazma uygulanırken c) Plazma işlemi sonrası.....	97
5.10. a) POM plazma işlemi öncesi b) Plazma işlemi sonrası.....	98
5.11. a) PTFE plazma işlemi öncesi b) Plazma işlemi sonra.....	98
5.12. Plazma uygulaması yapılan çeşitli sıvıların önceki ve sonraki halleri.....	99
5.13. Hava plazmasının E.coli bakterileri üzerine a) 0 s, b) 10 s, c) 30 s, d) 50 s e) 70 s sürelerle uygulandıktan sonra çekilen SEM görüntüleri.....	103
5.14. MRSA hücreleri üzerine mikrodalga plazmaların etkisi. a) referans, b) 1s, c) 2s, d) 3s, e) 4s, ve f) 5 s plazma ortamına maruz kalan MRSA hücrelerinin SEM görüntüleri.....	104
5.15. a) Helyum plazması ile yapılan inaktivasyon b) He + % 0.75 O ₂ katkılı plazma ile yapılan inaktivasyon.....	105
5.16. CHO-K1 hücrelerinin plazma uygulanmadan önceki (a) ve sonraki (b) görüntüleri.....	106

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
5.17. Bir atmosferik basınç soğuk plazma jeti olan “Plazma Needle” uygulanması.....	108
5.18. RF soğuk plazma üreten PSR ³ cihazı (sol) ve tedavi sıralaması (sağ).....	109
5.19. Leke tedavisi.....	109
5.20. Kırışıklık tedavisi.....	110
5.21. Soğuk plazma ile kronik ülser yarası tedavisi.....	111
5.22. Ağır korneal ülser yaralarının soğuk plazma tedavisi öncesi ve 6 seans plazma tedavisinden sonraki durumu.....	111
5.23. 40 kV/cm elektrik alanın 300 ns puls zamanı ile Melanom üzerine uygulanması. Geçirmeli aydınlatma (Transillumination) görüntüleri, tümörün zaman içinde gerilemesini göstermektedir.....	113
6.1. Deneysel düzenek.....	114
6.2. Sistemin şematik gösterimi.....	115
6.3. DC plazma görüntüleri.....	116

TABLolar DİZİNİ

<u>Tablo</u>	<u>Sayfa</u>
2.1. Doğada bulunan ve laboratuvar koşullarında üretilen bazı plazmaların parçacık yoğunlukları.....	15
2.2. Çeşitli düşük basınç plazmalarının iyonlaşma dereceleri.....	16
2.3. Bazı plazma türlerinin eV cinsinden elektron sıcaklıkları.....	19
2.4. Bazı plazma türlerinin plazma frekansları.....	20
2.5. Bazı plazma türlerinin debye uzunlukları.....	22

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simge</u>	<u>Açıklama:</u>
V	Potansiyel farkı
n_n	Nötral parçacık yoğunluğu
n_e	Elektron yoğunluğu
n_i	İyon yoğunluğu
$f_n(W)$	Nötral parçacıkların enerji dağılım fonksiyonu
$f_e(W)$	Elektronların enerji dağılım fonksiyonu
$f_i(W)$	İyonların enerji dağılım fonksiyonu
α_{iz}	İyonlaşma derecesi
N	Nötral atom yoğunluğu
T	Sıcaklık
T_g	Gaz atomlarının sıcaklığı
T_u	Uyarılmış atomların sıcaklığı
T_i	İyonların sıcaklığı
T_e	Elektron sıcaklığı
T_a	Ayrılmış atom sıcaklığı
T_f	Foton sıcaklığı
$f(v)$	Maxwell dağılım fonksiyonu
m	Kütle
m_e	Elektronun kütlesi
k	Boltzman sabiti
v	Hız
ν_L	Langmuir plazma frekansı
e	Elektron yükü
ϵ_0	Boşluğun geçirgenliği
λ_D	Debye uzunluğu
N_D	Debye küresi içindeki parçacık sayısı
τ	Ortalama çarpışma zamanı

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

<u>Simge</u>	<u>Açıklama:</u>
ω	Çarpışma frekansı
d	Elektrotlar arası uzaklık/elektronların anot içinde durdurulduğu uzaklık
L	Plazma boyutları
E	Elektrik alan
V_B	Breakdown voltajı
p	Gaz basıncı
A_1	Deneysel olarak elde edilen kat sayı
A_2	Deneysel olarak elde edilen kat sayı
j	Akım yoğunluğu
ρ	Yük yoğunluğu
v_i	İyon hızı
v_e	Elektron hızı
A	Akım
V_a	Uygulanan voltaj
I_{on}	Plazma varlığında toplam akım
I_{off}	Deplasman akım
I_{dis}	Deşarj akımı

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

<u>Kısaltma</u>	<u>Açıklama:</u>
DC	Doğru akım
AC	Alternatif akım
MW	Mikrodalga
RF	Radyo frekans
DBD	Dielektrik bariyer deşarj
ESOGÜPFL	Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Plazma Fiziği Laboratuvarı
TTE	Toplam termodinamik denge
LTE	Lokal termodinamik denge
Non-LTE	Lokal termodinamik dengede olmayan
UV	Ultraviole
ICCD	Intensified charge coupled device
sccm	Standard Cubic Centimeters per Minute
OES	Optik emisyon spektroskopisi
SEM	Scanning electron microscope
APGD	Atmospheric pressure glow discharge
VOC	Volatile organic compound
PP	Polipropilen
PET	Polietilen Tereftalat
PTFE	Polytetrafluoroethylene
FEP	Fluorinated ethylene propylene
POM	Polyoxometalate
MRSA	Methicilin resistant staphylococcus aureus
PSR	Plasma skin regeneration
DNA	Deoxyribonucleic acid
µm	mikrometre
nm	nanometre

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Çevremize baktığımızda oturduğumuz sandalye gibi katı, içtiğimiz su gibi sıvı ve soluduğumuz hava gibi gaz halinde çok sayıda maddenin farklı hallerini görebiliriz. Madde farklı hallere dönüştürülebilir. Örneğin katı bir madde eritilerek sıvı hale, sıvı daha da ısıtılarak buhara dönüştürülebilir. Bu nedenle maddeyi en genel olarak katı, sıvı ve gaz olarak üç halde tanımlarız. Aristo da M.Ö. 300' lü yıllarda içinde bulunduğumuz evrenin tümüyle toprak, su ve havadan oluştuğunu ileri sürmüş yani bu üç halin bileşimini tüm evrenin hammaddesi olabileceğini düşünmüştür. Ancak ateşi bu üç halden farklı görüyordu ama bir hammadde olarak görmüyordu. Bugün evrenin neredeyse tümünün hammaddesinin ateş (*plazma*) olduğu anlaşıldı. Ateş gerçekten ne katıdır, ne sıvıdır, ne de gazdır. Bir odun ateşine bakıldığında aslında odun ile katıyı, odun içindeki nemin dışa çıkması ile sıvıyı ve odundan çıkan is ile gazı aynı anda görebiliriz. Fakat odun ateşinin o kırmızı ve mavi alev kısmı tümüyle bambaşka haldedir. Alev, maddenin dördüncü hali olarak tanımlanan *plazma* halindedir.

Plazma, bir maddenin atomlarının iyonlaştırıldığı hali yani maddenin atomlarının parçalandığı halidir. Bir buza biraz ısı vererek onu eritip atomları arasındaki bağı zayıflatarak sıvıya dönüştürürüz. Sıvıyı daha ısıtırsak buharlaşır ve sıvı, atomları arasındaki bağ iyice zayıflayarak gaz haline dönüşür. Öyleyse bir maddeye ısı veya bir enerji verilince hal değiştirmesi aslında sadece atomları arasındaki bağın azalmasına harcanmaktadır. Maddeyi oluşturan atomların yapısında bir değişiklik olmamaktadır. Fakat gaz halinde atomlar arası bağ neredeyse sıfırdır ve bu durumda gaza ısı verilirse bu enerji atomların parçalanmasına harcanacaktır. Bu durumda gaz atomlarından elektronlar kopmaktadır yani gaz atomları iyonlaşmaktadır. İşte bu durumdaki maddenin hali, plazma olarak adlandırılır. Bu nedenle plazma içinde çok sayıda elektronlar ve pozitif/negatif iyonlar bulunur.

Ayrıca iyonlaşmamış atom ve moleküller, radikal parçacıklar, uyarılmış atom ve moleküller ve fotonlar da içerir. Radikal parçacık, iyonlaşmamış ama son derece aktif parçacık demektir. Oksijen (O) ve azot (N) atomları radikal parçacıklara örnek olarak verilebilir. Plazma içindeki bu farklı parçacıkların en önemli özelliği, her zaman birlikte hareket etmeleri ve birlikte reaksiyona girmeleridir. Plazma içinde hiçbir parçacık diğer parçacıklardan ayrı olarak davranamaz yani tüm parçacıklar kolektif bir davranış içinde olmak zorundadırlar. Plazmanın bu kendini koruma çabası o kadar ilginçtir ki bu nedenle maddenin tüm halleri yayılmaya çalışırken (örneğin su) plazma sürekli toplaşmaya çalışır.

Laboratuvar koşullarında maddenin dördüncü hali olan plazmayı üretmek için en kolay yol, bir gazı iyonlaştırmaktır. Bunun için farklı metotlar kullanılabilir; Bir gaz içinden doğru ya da alternatif elektrik akımı geçirmek, yüksek radyo frekans (RF), mikrodalga (MW) gibi elektromanyetik dalgalarla gazın indüklenmesi, yüksek pulslu çok kısa elektromanyetik alanlar kullanmak, alternatif akımı bir dielektrik üzerinden gaza aktarmak, yüksek güçte yüklü parçacıkları gazlarla etkileştirmek bu yöntemlere örnek olarak verilebilir. Bu yöntemlerden herhangi birisi ile gazın iyonlaştırılarak plazma haline getirilmesi genelde “*gaz deşarj*” olarak isimlendirilir ve üretim yöntemine göre DC deşarj, AC deşarj, RF deşarj, MW deşarj, DBD deşarj gibi farklı isimlerle anılır.

Bir gaz içinden elektrik akımı geçirilmesi (gaz deşarj), maddenin dördüncü hali olan plazmanın ortaya çıkmasına neden olan 1800’ lü yıllarda yapılan ilk çalışmalardandır. Bu çalışmalar aslında modern fiziğin doğuşuna sebep olan katot tüpü, Crookes tüpü, fotoelektrik etki gibi çalışmaların da başlangıcıdır. Bu yöntem (gaz deşarj); plazmanın ilk üretim tekniklerinden biri olması, kolay ve ucuz bir plazma üretim tekniği olması ve bazı önemli özellikleri nedeniyle bugün teknolojiye onlarca uygulama alanı bulmuştur. Hemen hemen her ev ve işyerinde bulunan flüoresans lambalar, farklı basınçlarda cıva buharı lambaları, sodyum lambalar, neon ve xenon lambalar, gaz deşarjların aydınlatma sanayinde kullanımlarına örnek

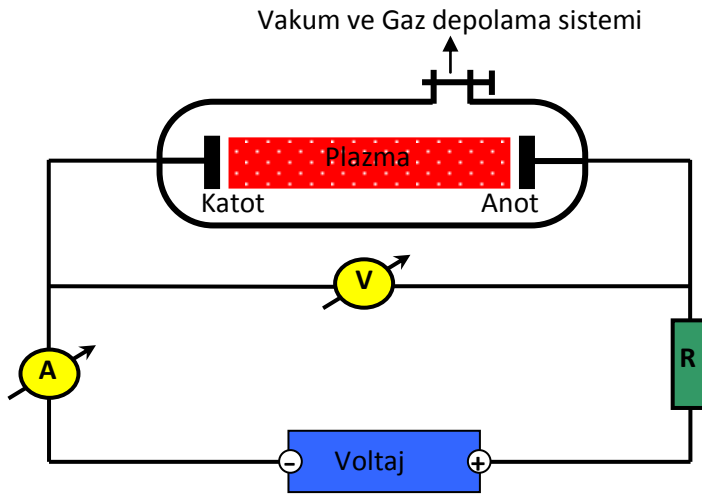
verilebilir. Bunun yanında gaz deşarjlar; materyal sanayinde, askeri endüstrilerde, elektronik malzeme üretiminde, biyomedikalde, ozon üretiminde, atık ve çöp arıtma gibi çevresel uygulamalarda, polimer sanayinde, plazma ekranlarında, lazer üretiminde, plazma klimalar gibi son derece hayatımıza girmiş yüksek teknolojilerde kullanılmaktadırlar.

Herhangi bir ortamdan elektrik akımı iletilebilmesi için o ortam içinde yüklü parçacıkların bulunması gereklidir. Doğada bulunan bütün gazlar içinde; güneşten gelen morötesi ışınlar, radyoaktif ışınlar veya kozmik ışınlar nedeniyle bir miktar yüklü parçacık bulunur. Bu yüklü parçacıklar, gazın nötral atomları ile çarpışarak yeni yüklü parçacıkların (elektronların, pozitif ve negatif iyonların) oluşmasına neden olabilirler. Bu şekilde gaz içindeki yüklü parçacık sayısının artmasıyla gaz, elektriksel olarak iletken hale gelebilir. Bu nedenle bir gazın iyonlaştırılması ile oluşan plazma hali, gaz halinden farklı olarak elektrik akımını iletir, elektrik ve manyetik alanlarla etkileşir. Örneğin doğanın oluşturduğu gaz deşarj plazmalarından birisi olan şimşekte (Şekil 1.1.), her iki elektrotta bulut olabildiği gibi biri bulut diğeri de yer olabilir ve elektrotlar arasında cm başına 20.000 V' luk potansiyel farkı ile binlerce amper akım taşınabilir.



Şekil 1.1. Şimşek, doğanın ürettiği bir gaz deşarj plazmasıdır
(<http://environment.nationalgeographic.com>, 15.06.2013)

Laboratuar koşullarında gazlarda elektriksel deşarj oluşturmak için en yaygın şekilde kullanılan ve elektriksel gaz deşarj tüpü olarak adlandırılan sistem Şekil 1.2.'de şematik olarak gösterilmiştir. Vakum ve gaz depolama sistemi ile vakumlanabilen ve sonra istenilen basınçta istenilen gazla doldurulabilen bu sistem, birbirine paralel düzlem levha tipi iki metal elektrot bulunan bir cam tüpten oluşur. Vakum ve gaz depolama sistemi bir vakum pompası, valf sistemleri, manometreler ve gaz tüplerinden oluşur. Vakum pompası ile öncelikle deşarj tüpünün içi vakumlanır. Vakum ve gaz depolama sistemi içinde bulunan valfler ve manometreler yardımıyla gaz tüplerinden deşarj tüpü içine istenilen basınçta istenilen gaz yerleştirilir ve elektrotlar arasına DC veya herhangi başka türde voltaj uygulanarak bu gaz iyonlaştırılır ve böylece gaz deşarj plazması oluşturulur. Şekil 1.3.'te böyle bir deşarj tüpü içinde oluşturulan neon gazının glow deşarj plazması fotoğrafı verilmiştir



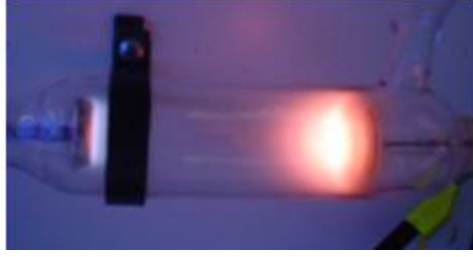
A; Ampermetre

V; Voltmetre

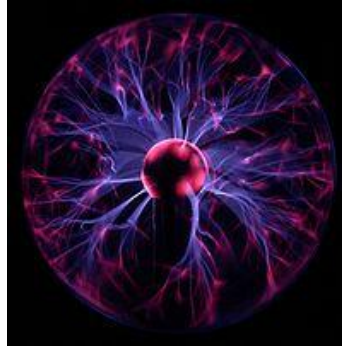
R; Akım kontrol direnci

Güç kaynağının bağlantısına göre metal elektrotlar; katot ve anot olarak adlandırılır.

Şekil 1.2. Elektriksel gaz deşarj sistemi.



Şekil 1.3. Neon gazının glow deşarj plazması.



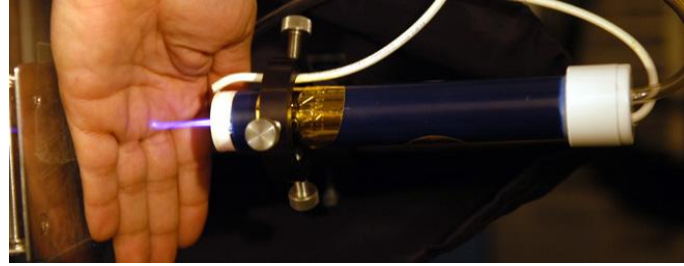
Şekil 1.4. Plazma küresi (<http://en.wikipedia.org>, 15.06.2013).

Şekil 1.4.' te görülen plazma küre içindeki plazma da gaz deşarj plazmasıdır. Görüldüğü gibi plazma bir cam tüp içindedir ve plazmanın bulunduğu ortamda yüksek voltaj bulunmaktadır. Bu plazmaların dışarı yani atmosfer koşullarına çıkarılması çok önemlidir. Plazma, atmosfer koşullarına çıkarıldığında plazma ortamında var olan yüksek elektrik alandan sakınılmış olunur. Bu, hem kullanıldığı bölgede yüksek elektrik alanla materyalin etkileşmesini önler hem de kullanıcı bu yüksek elektrik alandan korunmuş olur. Ayrıca yalnızca plazma ortamı teknolojik olarak kullanılacağı ortama çekilmesine imkân sağlar. Bu işlem ilk olarak Şekil 1.5.' te görüldüğü gibi ark plazma jetleri ile sağlanmıştır. Ancak bu ark plazma jetleri bin derece kadar sıcaklıklarda olmaktadır. Bu nedenle yüksek sıcaklık gereksinimi duyulan birçok teknoloji de kullanılmaktadırlar.



Şekil 1.5. Ark plazma jetleri; plazma kaplama, plazma kesme ve plazma ile materyal işleme teknolojilerinde kullanımı (www.gordonenglan.co.uk, 08.06.2013)

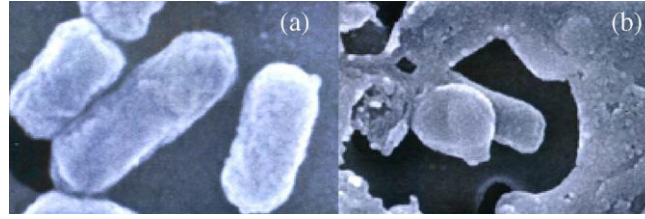
Bir kap içerisinde üretilen plazmanın, üretildiği kabın dışına çıkarılması ve plazmanın oda sıcaklığı civarında olması çok önemlidir. Bu insanoğlunun en önemli keşiflerinden biri sayılabilir zira artık insanlar ilk kez ateşle aynı yapıya sahip bir fazı üretebilmekte ve buna çıplak elle dokunabilmektedir. Şekil 1.6.’ da çıplak elle dokunulabilecek atmosferik şartlara çıkabilen soğuk plazma jetin fotoğrafı verilmiştir.



Şekil 1.6. Elle dokunulabilecek kadar soğuk atmosferik basınç plazma jeti (<http://www.insidescience.org>, 19.06.2013).

Plazmaların milyon derece sıcaklıklardan on bin derece sıcaklıklara kadar geniş bir sıcaklık yelpazesi vardır. Ancak “soğuk” kelimesi ile elle dokunulabilecek sıcaklıklar kast edilmektedir. Atmosferik basınçta soğuk plazma jetlerin üretilmesi, bu jetlerin insan hayatında yer eden uygulamalarda ve özellikle insan üzerinde

uygulamaları açısından oldukça önemlidir. Bu jetler ile birlikte hem plazma içinde bulunda yüksek elektrik alandan sıyrılmış hem de polimer gibi, canlı doku gibi veya bitki gibi son derece hassas yüzeylerde plazma uygulamalarına kapı açılmış olmaktadır. Özellikle tıp alanındaki uygulamalar için plazmaların kesinlikle atmosfer koşullarına çıkarılması ve dokulara zarar vermeyecek sıcaklıklarda olması gerekmektedir. Örneğin Şekil 1.7.' de E. Coli bakterisi üzerine farklı sürelerde soğuk plazma uygulanması sonucu bakterinin yapısındaki değişim görülmektedir. Yapılan çalışmalar ile 5 s kadar kısa sürelerde soğuk plazmalar ile birçok bakterinin steril edilebildiği gösterilmiştir (Lee et al., 2005).



Şekil 1.7. E. Coli bakterisinin soğuk plazma ile inaktivasyonu (Laroussi, 2009).

Soğuk plazmaların yukarıdaki gibi bakterileri tümüyle steril edebilme özelliği bilim insanlarını çok heyecanlı çalışmalara sevk etmiştir. Acaba bu soğuk plazmaların insan üzerinde uygulanması mümkün olabilir mi? Ya da polimer, elektronik aksam gibi çok hassas yüzeylerde kullanılması mümkün olabilir mi? Örneğin diş çürümesine neden olan bakteri veya sivilceye neden olan bakteri, insan üzerinde yok edilebilir mi? Bunun için üretilen plazmanın atmosferik koşullarda çalışması, insana yani dokuya zarar vermeyecek kadar soğuk olması ve yüksek elektrik alandan uzaklaştırılmış olması gereklidir. Aynı zamanda kullanıcıya zarar verecek kimyasal atık üretmemesi gerekmektedir. Bu şartları sağlayan atmosferik basınç soğuk plazma jetleri son 20 yıldır üretilmektedir. Ayrıca soğuk plazmaların bakteriler üzerindeki bu öldürücü ve son derece yan etkisiz uygulaması farklı türde bakteriyel enfeksiyon tedavi yöntemini de

beraberinde akıllara getirmektedir. Örneğin kışın hemen hemen herkes gribe yakalanmıştır. Grip beraberinde çoğu kere boğaz iltihabına da yol açmaktadır. Bu durumda doktorların hemen ürettikleri çözüm bir antibiyotik kullanımıdır. Antibiyotik aslında vücuda yerleşen ve enfeksiyona sebep olan bakterilerin yok edilmesi için kullanılmaktadır. Neredeyse tüm bakteriyel enfeksiyonlarda aynı yöntem kullanılmaktadır. Bu antibiyotiklerin insana hiç yan etkisi olmadığı söylenemez. Ayrıca tüm dünya insanlığı açısından düşünüldüğünde son derece büyük bir ilaç sektörü de göz önünde tutulmalıdır. Eğer atmosferik basınç soğuk plazma jeti insan üzerindeki bakteri ölümünü gerçekleştirirse enfeksiyon tedavisinde bir çığır açılmış olacaktır. Örneğin bir boğaz iltihabını insanın boğazına dışarıdan uygulanan bir soğuk plazma jeti öldürürse kişi hiç ilaç kullanmadan ve son derece kısa sürede enfeksiyondan kurtulacaktır. Bu şimdiye kadar gerçekleşmiş bir uygulama değildir ama hayal edilen bir uygulamadır. İnsan üzerinde yapılan plazma uygulamaları, aynı zamanda virüsler üzerine de plazmaların etkisi olup olmadığı konusunda merakla yol açmıştır. Özellikle AIDS virüsü üzerine plazmaların etkisi son derece merak konusu olmaktadır. Virüsler üzerine çalışmalar devam etmektedir. Ancak birkaç yıl önce geliştirilen soğuk plazma jetlerin bu kadar hassas uygulamalar için çalışmaları biraz daha zaman alacaktır.

Atmosferik koşullarda soğuk plazma jetleri özellikle hassas materyaller üzerinde plazma uygulamaları için de çok önemlidir. Örneğin bilgisayar çipleri üreten bir firma, çipleri çeşitli kirlenme ve yağlanmadan bu şekilde açık havada soğuk plazma üreterek kolayca temizleyebilir ve ısı ve kimyasal kullanılmadığı için çiplere herhangi bir zarar verilmez. Aynı şekilde tıpta artık polimer ve silisyum tabanlı birçok malzeme kullanılmaktadır. Bunların klasik yöntemlerle steril edilmesi mümkün değildir. Örneğin bir insanda tıkalı damar araması yapmak için kullanılan mikro kamera, bir hastada kullanıldıktan sonra diğer bir hastada kullanılamamaktadır. Çünkü böyle hassas bir malzemenin klasik yöntemlerle sterilizasyonu cihaza zarar verecektir. Özellikle yüksek ısı ile sterilizasyon bu tür cihazlar için uygun değildir. Ancak atmosferik basınçtaki soğuk plazma jetleri ile bu

şekilde hassas materyallerin sterilizasyonu mümkün olacaktır. Bu tip cihazlar önce kapalı bir hazne içerisinde üretilip sonra atmosferik koşullara çıkarılabilen soğuk plazma sistemleri ile de steril edilebilir.

Soğuk plazmaların en önemli kullanım alanlarından biri de hassas yüzey uygulamalarıdır. Örneğin plastik yüzeylerde temizleme, kaplama ve aktivasyon işlemleri rahatlıkla yapılabilir. Bu işlemler için mevcut yöntemler ısı ve kimyasal yöntemlerdir. Ancak bu yöntemlerin plastik gibi hassas yüzeylerde zararlı etkileri bulunmaktadır. Bilindiği gibi plastik yüzeyler üzerine kaplama, boya ve yapıştırıcı malzeme uygulaması gibi birçok uygulama yapılmaktadır. Ancak birçok teknolojiye bu uygulamaların plastik yüzey üzerinde tutunma sorunu yaşanmaktadır. Örneğin bir otomobilin tampon bölgesi plastiktendir ve kaporta ile aynı renkte boyanmak istenmektedir. Tampon bölgesindeki boyanın sökülmesi istenilen bir durum değildir. Bu nedenle boyanın yüzeye sıkıca tutunması gerekir. Bu da plastik yüzeyin aktivasyonu ile mümkündür. Soğuk plazmalar yüzeye uygulandıklarında yüzeyi aktifleştirmekte ve boya, yapıştırıcı gibi maddelerin materyal yüzeyine sıkıca tutunmasını sağlamaktadırlar. Bu tip uygulamalar için jetler, taşınabilir olmaları, farklı açılı yüzeylere kolayca uygulanabilmeleri ve atmosferik koşullarda üretilmeleri nedeniyle çok daha uygun bir yöntem olmaktadır.

Benzer şekilde elektronik sanayinde hem üretilen hassas malzemelere zarar vermedikleri hem de üretim aşamasında kolay kullanıma sahip oldukları için atmosferik basınç soğuk plazma jetleri çokça tercih edilmektedirler.

Atmosferik basınç soğuk plazma jetlerin yukarıda örnek verilen uygulamalarının yanında optik, tekstil, estetik, uçak, biyomedikal gibi birçok endüstriyel uygulamalarda da çok önemli avantajlara sahip oldukları için tercih edilmektedirler.

Bu çalışmada; özellikle son 5-10 yıl içinde üretilen atmosferik basınç soğuk plazma jetleri açıklanmıştır. Bölüm 2’ de genel olarak plazmanın tanımlanması ve temel parametreleri, Bölüm 3’ te genel olarak bir elektriksel gaz deşarj plazmasının nasıl üretildiği, Bölüm 4’ te son yıllarda üretilen atmosferik basınç soğuk plazma jetleri, Bölüm 5’ te atmosferik basınç soğuk plazma jetlerinin bazı kullanımları açıklanmış, Bölüm 6’ da ise tümüyle orijinal yeni bir atmosferik basınç soğuk plazma jeti üretmek için yapılan ön çalışmalar verilmiştir.

BÖLÜM 2

PLAZMANIN TANIMI VE PLAZMA PARAMETLERİ

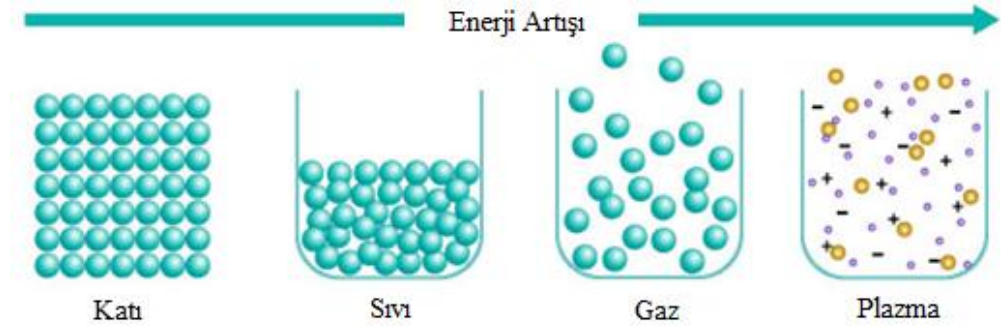
Plazmanın bilimsel olarak incelenmesi ilk olarak, 1808 yılında Sir Humphry Davy tarafından kararlı-hal DC ark deşarjın incelenmesiyle ve 1830' lu yıllarda Michael Faraday ve arkadaşları tarafından, yüksek voltaj DC elektriksel gaz deşarj tüpünün geliştirilmesi ile yapılmıştır. Gazlarda elektriksel deşarj daha sonra Sir William Crookes tarafından incelenmiş ve Crookes 1879' da iyonlaşmış bir gazın; “maddenin 4. hali” olduğunu ifade etmiştir. 1926 yılında F.M. Penning, cıva buharında düşük basınç gazında radyo dalgası titreşimlerini bulmuştur. 1929 yılında Irving Langmuir bu titreşimlerin bulunduğu bölge için ilk kez “plazma” terimini kullanmıştır (Tonks and Langmuir, 1929). 1932 yılında I. Langmuir plazma üzerindeki çalışmalarında kimya dalında, 1970 yılında İsveçli Hannes Alfvén “Plazmaya verilen pertürbasyonun manyetik alan yönünde plazma frekansı ile yayılması” çalışması ile Fizik dalında Nobel ödülü almışlardır. 2000' li yıllarda plazma fiziği çalışmaları daha çok füzyon reaktörlerinin geliştirilmesi ve soğuk plazmalar üzerine olmuştur.

İçinde bulunduğumuz evrenin % 99' u plazma halindedir. Yerin yaklaşık 50 km üzerinde bulunan kısmi olarak iyonlaşmış gaz bölgesi olan atmosferin katmanlarından iyonosfer, 10^6 cm^{-3} elektron yoğunluğuna ve 0.1 eV elektron sıcaklığına sahip bir plazmadır. $1 \text{ eV} \cong 11604 \text{ K}$ dir. Yerin manyetik alanı tarafından yüksek mesafelerde tuzaklanmış, yüksek enerjili iyonlaşmış parçacıkların oluşturduğu “Van Allen kuşakları”, güneşten kopan plazmaların (güneş rüzgârları) atmosferin üst katmanlarında oluşturduğu ve genelde kutuplarda gözüken ve kutup ışıkları olarak da bilinen “Aurora”, güneşin dış atmosferindeki korona kısmından yüksek sıcaklıklar nedeniyle kopup evrene dağılan yüklü parçacıkların sürekli şekilde akışı olan elektron yoğunluğu 5 cm^{-3} ve elektron sıcaklığı 50 eV olan “güneş rüzgârları” ve hemen hemen her yağmurlu günde gördüğümüz “şimşek”, evrende doğal olarak oluşan plazmalardır (Goldston and Rutherford, 1995). Yıldızlar arası ortamı oluşturan “gaz bulutları” 1 cm^{-3} yoğunluklu hidrojen plazması içerir. Güneş ve

yıldızların yüzey sıcaklıkları 5.000 K' den 70.000 K' e kadar değişmektedir ve bunlar tümüyle plazmadan oluşurlar. Dış kısımları kısmi olarak iyonlaşmışken, iç kısımları % 100 iyonlaşacak kadar sıcaktır. Örneğin güneşin merkezindeki sıcaklık 2 keV civarındadır (Kikuchi, 1988).

2.1. Plazmanın Tanımı

Plazma; elektriksel olarak nötral olan ve rastgele doğrultularda birlikte hareket eden, hemen hemen eşit yoğunluktaki pozitif ve negatif yüklü parçacıklar topluluğudur. Bu tanımı daha anlaşılır yapmak için Şekil 2.1.' i inceleyelim.



Şekil 2.1. Maddenin dört hali (<http://www.intechopen.com>, 11.04.2013).

Bilindiği gibi termal dengedeki katı bir madde, genelde sabit bir basınçta sıcaklığının arttırılması ile sıvı haline geçer. Sıcaklık biraz daha arttırılırsa sıvı, gaz haline geçer. Yeterince yüksek bir sıcaklıkta gaz içindeki moleküller, atomlar arasındaki nadir çarpışmalar hariç, rastgele doğrultularda serbestçe hareket eden gaz atomlarını oluşturmak için ayrışır. Eğer sıcaklık daha fazla arttırılırsa, gaz atomlarından bir ya da birkaç elektron kopar ve gaz atomları serbestçe hareket eden yüklü parçacıklara (elektronlara ve pozitif iyonlara) ayrılmış olur. Böylece

maddenin dördüncü hali olan “plazma” oluşur. Buradan görüldüğü gibi plazma halinde, maddenin atomları parçalanmıştır ve sürekli hareket halinde olan, pozitif yüklü iyonların ve elektronların oluşturduğu bir sistem haline gelmiştir. Plazma içinde aynı zamanda negatif iyonlar, fotonlar, uyarılmış atomlar, ayrılmış atomlar, radikaller, metastable atomlar, nötral atomlar da vardır (Tanenbaum, 1967).

Bazı özellikler plazmayı karakterize eder ve bu özellikler plazmayı katı, sıvı ve gazlardan ayırır. Plazmanın en önemli ve diğer hallerden farklı özelliği, plazmayı oluşturan parçacıkların yüklü olması ve bu yüklü parçacıkların Coulomb kuvvetleri ile birbirlerine etki etmesidir. Plazma içindeki her parçacık komşusu bulunan her parçacığa ve hatta kendisinden daha uzakta bulunan parçacıklara aynı zamanda etki eder. Bu nedenle plazma içindeki parçacıklar, sürekli birbirleriyle etkileşerek kolektif bir davranış içindedirler. Plazma içindeki yüklü parçacıkların difüzyonu bundan dolayı elektronların ve iyonların bireysel difüzyon katsayıları ile değil, ambipolar difüzyon katsayısı ile verilir (Krall and Trivelpiece, 1973). Şekil 2.1. ile maddenin hal değişimi, maddenin sıcaklığının arttırılması ile açıklanmıştır. Plazma, maddeye ısı enerjisi verilmesi ile elde edildiği gibi başka yöntemlerle de elde edilebilir. Bu farklı üretim yöntemleri plazmaların farklı isimlerle anılmalarına neden olur (Roth, 1995).

2.2. Plazma Parametreleri

2.2.1. Plazma Yoğunluğu

Plazma yapı itibariyle birçok farklı nötral ve yüklü parçacık içerir. Plazma içerisindeki özdeş parçacık grupları genel ifade ile ‘türler’ olarak adlandırılırlar.

Plazma, genel olarak nötral parçacıkların yoğunluğu n_n , elektronların ve iyonların yoğunlukları n_e ve n_i ile nötral parçacıkların $[f_n(W)]$, iyonların $[f_i(W)]$ ve elektronların $[f_e(W)]$ enerji dağılımları ile karakterize edilir.

Plazma içinde oluşan süreç ve reaksiyon oranları genellikle direkt olarak yüklü parçacık yoğunluğuna bağlı olduğu için plazma yoğunluğu önemli bir parametredir. Dış elektrik alandan deşarj gazına enerji transferinde temel faktör elektronlardır. Elektriksel olarak yüklü oldukları için hem elektronlar hem de iyonlar uygulanan elektrik alan ile etkileşirler ve elektrik alandan absorbe ettikleri enerji ile hızlanırlar. Elektronlar absorbe ettikleri bu enerjiyi çarpışmalar boyunca gaz molekülerine aktarır onların iyonlaşmalarına ve ayrışmalarına sebep olurlar. Bu süreçlerin etkinliği elektron yoğunluğunun artması ile artar. İyonlar da plazma içerisinde gerçekleşen kimyasal reaksiyonlarda önemli rol oynarlar. Plazma içerisinde gerçekleşen birçok reaksiyon iyon kimyası ile ilişkilidir. Bu nedenle iyonları içeren reaksiyon oranlarını arttırmak için yüksek iyon yoğunluğuna ulaşmak önemlidir (Grill, 1993).

Birçok plazma, “yaklaşık olarak nötral (quasi neutrality)” özelliğe sahip olduğu için,

$$n_i \cong n_e \cong n \quad (2.1)$$

dir. Burada n , “Plazma Yoğunluğu” olarak tanımlanır.

Tablo 2.1. Doğada bulunan ve laboratuvar koşullarında üretilen bazı plazmaların parçacık yoğunlukları (Akan, 2005).

Plazma Türü	Parçacık Yoğunluğu n_e (m^{-3})
Yıldırımlar Arası Plazma (Nebula)	10^6
Güneş Rüzgârları	10^7
Van Allen Kuşakları	10^9
İyonosfer	10^{11}
Güneş Koronası	10^{13}
Endüstriyel Plazmalar	10^{16}
Gaz Deşarjlar	10^{18}
Soğuk Plazmalar	10^{18}
Füzyon Reaktörü	10^{20}
Elektriksel Ark	10^{22}

2.2.2. İyonlaşma Derecesi

Plazma, iyonlaşmış parçacıklar ile nötral parçacıkların diğer birçok parçacık ile bir arada bulunduğu ortamdır. Plazma içindeki nötral parçacık sayısı ile iyonlaşmış parçacık sayısı oranı plazmanın birçok özelliğini karakterize eder. Tümüyle iyonlaşmış plazmalara güneş ve yıldızları örnek verirken laboratuvar plazmalarının çoğu için aynı şey söylenemez. Laboratuvar koşullarında üretilen plazmaları kısmi olarak iyonlaşmış plazmalardır. Örneğin içinde bulunduğumuz hava dahi güneşten ve uzaydan gelen çeşitli radyasyonlar sebebiyle bir miktar iyonlaşmıştır.

Plazma içindeki yüklü parçacık sayısını ifade eden parametre, gazın iyonlaşma derecesidir. İyonlaşma derecesi α_{iz} ;

$$\alpha_{iz} = \frac{n_i}{n_i + N} \quad (2.2)$$

şeklinde ifade edilir. Burada N ; nötral atomların yoğunluğudur. $\alpha_{iz}=1$ olduğunda plazma tümüyle iyonlaşmış demektir (Lieberman and Lichtenberg, 1997). Bu durum yıldızlarda ve termonükleer füzyon reaktörlerinde gözlenir. İyonlaşma derecesi, plazmayı tanımlamak veya sınıflandırmak için gerekli en önemli parametrelerden biridir. Çok düşük iyonlaşma derecesine sahip plazmalarda, plazma içi reaksiyonlar nötral parçacıklar ve elektronlar ile gerçekleşirken yüksek iyonlaşma derecesine sahip plazmalarda iyonlar, plazma içi reaksiyonlarda daha etkindir.

Düşük basınç deşarjları için iyonizasyon derecesi tipik olarak 10^{-6} ile 10^{-3} arasında değişir. Ancak, eğer elektriksel deşarj ek bir magnetik alan ile desteklenmiş ve hapsedilmiş ise iyonizasyon derecesi değerleri 10^{-2} ve daha yüksek değerlere ulaşabilir. Buna örnek olarak elektron siklotron rezonans plazması verilebilir. Tablo 2.2.' de farklı düşük basınç plazmalarının iyonlaşma derecelerinin değerleri verilmiştir.

Tablo 2.2. Çeşitli düşük basınç plazmalarının iyonlaşma dereceleri (Grill, 1993).

Plazma Türü	İyonlaşma Derecesi
Etching	10^{-6}
Reaktif İyon Etching	10^{-6} - 10^{-4}
Magnetron Sputtering	10^{-4} - 10^{-2}
Elektron Siklotron Rezonans	$<10^{-1}$

2.2.3. Plazma Sıcaklığı

Termodinamik dengedeki bir nötral gaz halini tanımlayan en önemli parametre, sistem içindeki moleküllerin ortalama taşınım enerjisini ifade eden sıcaklıktır. Plazma içinde, farklı elektrik yüklü ve kütleli parçacıkların bir karışımı vardır. Bu nedenle gaz halinde gazın sıcaklığından bahsedilirken bundan farklı

olarak plazmada ise plazma sıcaklığından ziyade, plazma içindeki parçacık türlerinin ayrı ayrı sıcaklıklarından söz edilmelidir. Örneğin T_g ; nötral atomların yani plazması oluşturulan gazın sıcaklığını, T_u ; uyarılmış atomların sıcaklığını, T_i ; iyonların sıcaklığını, T_e ; elektronların sıcaklığını, T_a ; molekül durumundan atoma ayrılmış atomlar için ayrılmış atom sıcaklığını ve T_f ; fotonların enerjisini karakterize eden foton sıcaklığını ifade etmektedir. Eğer plazma içindeki her türün sıcaklığı eşit ise yani,

$$T_g \cong T_u \cong T_i \cong T_a \cong T_f \cong T_e = T_p \quad (2.3)$$

ise bu plazma, “ Toplam Termodinamik Dengede Plazma (TTD Plazma) ” olarak isimlendirilir. Burada T_p ; “ Plazma Sıcaklığı ” olarak tanımlanır. Bu tip plazmalar yalnızca güneşte ve yıldızlarda meydana gelir. Genelde TTD plazmaları “ Termal Plazmalar ” ya da “ Sıcak Plazmalar ” olarak bilinirler.

Eğer plazma içinde foton sıcaklığı haricinde her türün sıcaklıkları eşit ise yani,

$$T_g \cong T_u \cong T_i \cong T_a \cong T_e \neq T_f \quad (2.4)$$

ise bu plazma, “ Lokal Termodinamik Dengede Plazmalar (LTD Plazma) ” olarak isimlendirilir. Laboratuvar koşullarında atmosferik basınçlarda lokal termodinamik dengede olan plazmalar üretilebilir ve bunlar da genellikle “ Termal Plazmalar ” ya da “ Sıcak Plazmalar ” olarak adlandırılır. Termal plazmalar yüksek basınçlarda meydana geldiği için “ Yüksek Basınç Plazmaları ” olarak da anılırlar. Plazma içinde basıncın artmasıyla, elektronlar ile nötral atomlar arasındaki çarpışma sayısı artar. Bu nedenle 1 atm. civarındaki yüksek basınçlarda meydana gelen, elektriksel ark ve plazmatron olarak adlandırılan plazma jetleri ve kontrol edilebilen termonükleer füzyon reaktörlerinde oluşturulan plazmalar, laboratuvar koşullarında üretilen lokal termodinamik dengedeki plazmalara örnek olarak verilebilir.

Daha düşük basınçlarda elektronlar ile nötral atomlar ve iyonlar arasında termal dengeye ulaşılamaz. Bu nedenle, $T_e \gg T_i > T_g > T_u$ şeklinde, elektronların sıcaklıklarının diğer türlerden çok büyük olduğu ve hiçbir tür arasındaki sıcaklığın eşit olmadığı plazmalar “ Lokal Termodinamik Dengeye Olmayan Plazmalar (Non-LTD plazmalar) ” olarak adlandırılır. Elektronların kütlesi plazma içindeki diğer türlerden çok daha küçüktür. Bu nedenle elektronlar, plazmanın oluşması için dışarıdan verilen elektrik alanı ya da enerjiyi diğer türlerden çok daha fazla absorbe ederler. Plazması elde edilen gazın basıncı düşük olduğu için elektronlar, diğer türlerle çok sayıda çarpışma yapamaz ve böylece diğer türlere enerjisini aktaramaz. Bu nedenle düşük basınç plazmalarında elektronların sıcaklıkları, diğer türlerden her zaman çok daha büyük olur. “ Düşük Basınç Plazmaları ” olarak adlandırılan Non-LTD plazmalarında nötral atomların sıcaklığı yani gazın sıcaklığı çok düşük olduğu için, bu plazmalar aynı zamanda “ Soğuk Plazmalar ” olarak da adlandırılırlar (Grill, 1993). Soğuk plazmalarda gazın sıcaklığı oda sıcaklığı kadar düşük kalırken elektron sıcaklıkları on bin dereceden daha yüksek olabilir. Ancak bir hususun altı çizilmelidir: Soğuk plazmalarda gaz sıcaklığı 500 °C -1000 °C olabileceği gibi 50 °C -100 °C civarında da olabilir. Bu çalışmada geliştirilen soğuk plazma jetler arasından özellikle oda sıcaklığı civarında sıcaklıklara sahip olanlar seçilmiştir. Bu seçim, bu tür soğuk plazma jetlerinin gelecekte insan hayatında önemli yerler edineceği düşünülerek yapılmıştır.

Elektronların plazma içindeki dağılım fonksiyonu;

$$f(v) = \frac{4n_e}{\pi} \left(\frac{m_e}{2kT_e} \right)^{\frac{3}{2}} v^2 e^{-\frac{m_e v^2}{2kT_e}} \quad (2.5)$$

Maxwell dağılım fonksiyonu ile verilir (McDaniel, 1964). Burada m_e ; elektronların kütlesi ve k ; Boltzman sabitidir. Tablo 2.3.’ de bazı plazma türlerinin elektron sıcaklıkları değerleri verilmiştir.

Tablo 2.3. Bazı plazma türlerinin eV cinsinden elektron sıcaklıkları (Akan, 2005).

Plazma Türü	Elektron Sıcaklığı T_e (eV)
Yıldızlar Arası Plazma (Nebula)	1
Güneş Rüzgârları	10
Van Allen Kuşakları	10^2
İyonosfer	10^{-1}
Güneş Koronası	10^2
Endüstriyel Plazmalar	5-10
Gaz Deşarjlar	2
Soğuk Plazmalar	10^2
Füzyon Reaktörü	10^4
Elektriksel Ark	1

2.2.4. Plazma Frekansı

Plazma ile ilişkili diğer bir özellik, plazma içindeki parçacıkların, plazma içindeki bir yüklü parçacık tarafından ya da dışarıdan oluşturulan bir elektrostatik alana karşı “kalkan” oluşturacak şekilde, kendilerini yeniden düzenleme eğiliminde olmalarıdır. Eğer plazma içinde bir elektrik alan oluşturulursa, plazma içindeki yüklü parçacıklar alanın etkisini azaltmak için tepki vereceklerdir. Bu tepki, daha hafif ve daha hızlı olan elektronlar tarafından, elektrik alanın etkisini azaltmak için plazma içindeki diğer türlere göre daha hızlı bir şekilde verilecektir. Plazma içindeki yüklü parçacıklar, bu etkiyi azaltmak için verecekleri tepkiyi, bir titreşim hareketi şeklinde yaparlar. Bu titreşim hareketini düşük kütleleri nedeniyle elektronlar, diğer türlere nazaran daha şiddetli yaparlar. Elektronların bu etkiyi azaltmak için yaptıkları titreşim hareketinin frekansı “Plazma Frekansı” olarak adlandırılır. Başka bir deyişle plazma içinde meydana gelen bir etki, plazma içinde plazma frekansı ile yayılır. Plazma frekansı Langmuir frekansı olarak da bilinir ve

$$\nu_L = \left(\frac{e^2 n_e}{m_e \epsilon_0} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.6)$$

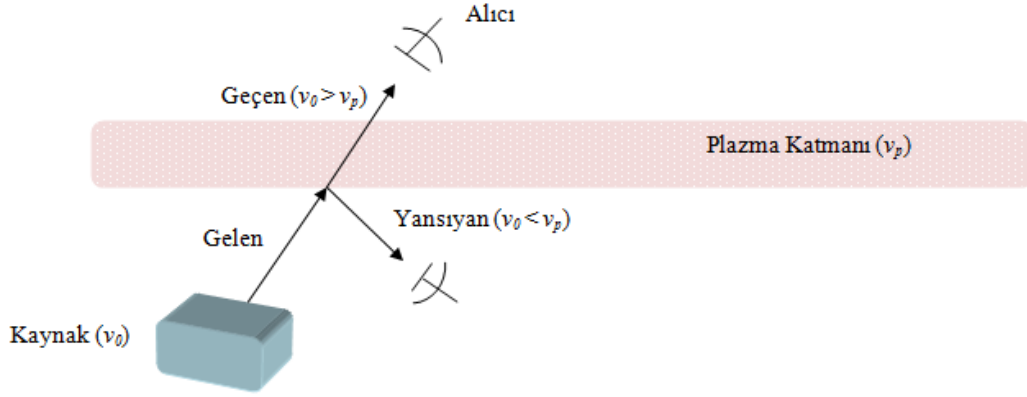
şeklinde verilir (Muraoka and Maeda, 2001). Burada ϵ_0 ; boşluğun geçirgenliği ve e ; elektronun yüküdür. Tablo 2.4.' te bazı plazmaların plazma frekansı değerleri verilmiştir.

Tablo 2.4. Bazı plazma türlerinin plazma frekansları (Akan, 2005).

Plazma Türü	Plazma Frekansı ν_L (Hz)
Yıldızlar Arası Plazma (Nebula)	9×10^{-3}
Güneş Rüzgârları	3×10^4
Van Allen Kuşakları	3×10^5
İyonosfer	3×10^6
Güneş Koronası	3×10^7
Endüstriyel Plazmalar	9×10^8
Gaz Deşarjlar	9×10^9
Soğuk Plazmalar	9×10^9
Füzyon Reaktörü	9×10^{11}
Elektriksel Ark	9×10^{11}

Plazma frekansı ν_L , elektromanyetik radyasyonun plazma içinde yayılabilmesi için kesme frekansıdır. Şekil 2.2.' de görüldüğü gibi plazma frekansı ν_p olan bir plazma ortamına (örneğin iyonosfer), ν_0 frekanslı bir elektromanyetik radyasyonun gönderildiğini düşünelim. Plazma ortamı üzerine gönderilen elektromanyetik radyasyonun frekansı, plazma frekansından küçük ($\nu_0 < \nu_p$) ise gelen radyasyon, plazma ortamı tarafından yansıtılır. Eğer gelen radyasyonun frekansı, plazma katmanının frekansından büyük ($\nu_0 > \nu_p$) ise elektromanyetik radyasyon plazma katmanı içerisinde

yayılabilir ve plazma ortamından geçebilir. Örneğin radyo dalgaları ile karasal yayın ya da uydu ile iletişim, iyonosferin plazma frekansı değeri göz önünde tutularak yapılır.



Şekil 2.2. Plazma frekansı ν_p olan bir plazma katmanına kaynak frekansı ν_0 olan bir elektromanyetik radyasyonun gelişi.

Son yıllarda plazmanın elektromanyetik dalgaları yansıtabilme özelliği birçok yeni teknoloji yaratmıştır. Örneğin plazma antenler normal çanak antenlerden yüz kat daha fazla yansıtma özelliğine sahiptir. Benzer şekilde askeri alanda kullanılan klasik antenler, kullanım sırasında tespit edilirken plazma antenler tespit edilememektedir.

2.2.5. Debye Uzunluğu ve Plazma Kılıfı

Lokal elektrik alanların etkisini azaltmak için yüklü parçacıkların tepkisi Debye Kafeslemesi (Debye Shielding) olarak adlandırılır (Goldston and Rutherford, 1995). Debye kafesleme etkisi nedeniyle plazma içinde lokal elektriksel alanların oluşmasına izin verilmediği için plazma sürekli olarak nötral halde kalmaya çalışır. Debye kafesleme etkisi ile plazmanın bu şekilde nötral halde kalma isteği “Yaklaşık Olarak Nötral (Quasi-Neutrality)” olarak adlandırılır (Kunkel, 1966). Ancak plazma içinde,

$$\lambda_D = \left(\frac{\epsilon_0 k T_e}{n_e e^2} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.7)$$

ile verilen ve “ Debye Uzunluğu ” olarak adlandırılan uzunluk, plazma içindeki minimum nötral olan bölgeye karşılık gelir. Daha doğrusu plazma içinde λ_D yarıçaplı Debye küresi, plazma içindeki minimum nötral olan yani lokal elektrik alanların oluştuğu hacme karşılık gelir. Tablo 2.5.’ te bazı plazma türlerinin debye uzunlukları verilmiştir.

Tablo 2.5. Bazı plazma türlerinin debye uzunlukları (Akan, 2005).

Plazma Türü	Debye Uzunluğu λ_D (m)
Yıldızlar Arası Plazma (Nebula)	7.5
Güneş Rüzgârları	7.5
Van Allen Kuşakları	7.5
İyonosfer	7.5×10^{-3}
Güneş Koronası	2×10^{-2}
Endüstriyel Plazmalar	2.5×10^{-4}
Gaz Deşarjlar	10^{-5}
Soğuk Plazmalar	7.5×10^{-5}
Füzyon Reaktörü	7.5×10^{-5}
Elektriksel Ark	7.5×10^{-8}

Plazma içine bir metal sokulursa, Debye kafesleme etkisi ile bir kılıf oluşur. Plazma içindeki elektronlar, iyonlardan daha büyük hızlara sahip olduğu için bu metale daha çabuk ulaşırlar. Bu nedenle metal yüzeyi ile plazma arasında bir potansiyel farkı oluşur. Bundan dolayı plazma, kendisi ile temasta olan herhangi bir yüzeye göre, her zaman bir pozitif potansiyele sahip olur. Debye kafesleme etkisi nedeniyle yüzeyle plazma arasında oluşan potansiyel, birkaç Debye uzunluğundaki kalınlıkta bir

tabakayı kuşatır. Plazma ile kontakta bulunan tüm yüzeyler arasında oluşan pozitif uzay yüklerinin bu tabakası “ Plazma Kılıfı (Plasma Sheath) ” olarak adlandırılır. Bu nedenle elektriksel deşarjlar için kullanılan elektrotların ön kısmında katot potansiyeli (katot düşümü) ve anot potansiyeli (anot düşümü) olarak adlandırılan pozitif ve negatif yükler için hızlandırıcı bir potansiyel her zaman bulunur. Bununla birlikte plazma içine sokulan metal civarındaki bu potansiyel yardımıyla plazmanın elektron sıcaklığı, elektron yoğunluğu gibi birçok parametresi hesaplanabilmektedir. Langmuir prob plazma diagnostiğinde kullanılan en önemli parametrelerden biridir.

Debye uzunluğu plazma için çok önemli bir parametredir. Langmuir iyonlaşmış gazla plazma ismini vermesine rağmen, her iyonlaşmış gaz plazma değildir. İyonlaşmış bir gazın plazma olarak tanımlanabilmesi için üç şartın gerçekleşmesi gerekir. Bunlardan birincisi, plazmanın oluşturulduğu sistemin boyutları (L), Debye uzunluğundan büyük olması gerekir. Yani iyonlaşmış bir gazın plazma olarak tanımlanması için $L \gg \lambda_D$ olmalıdır. İkinci olarak λ_D yarıçaplı ve Debye küresi olarak adlandırılan hacim içindeki yüklü parçacık sayısının $N_D \gg 1$ olması gerekir. Üçüncü şart plazmadaki çarpışma frekansı ile ilgilidir. Eğer plazma içindeki yüklü parçacıklar, nötral atomlarla çok sık çarpışıyorsa, kolektif davranış şartı sağlanmaz ve gaz bir plazma olarak davranamaz. τ , nötral atomlarla yüklü parçacıkların çarpışmaları arasında geçen ortalama zaman ve ω , çarpışma frekansı olmak üzere, iyonlaşmış bir gazın plazma olabilmesi için $\omega \cdot \tau > 1$ olmalıdır (Grill, 1993).

2.3. Plazma ile Gazlar Arasındaki Farklar

Plazmanın açıklanan özelliklerini daha anlaşılır yapmak için, plazma ile plazmaya en yakın hal olan gazlar arasındaki farklar aşağıda sıralanmıştır.

- i. Gazlar elektriği iletmezler. Plazma ise elektriksel nötralitesine rağmen, iyi bir elektriksel iletkenidir. Bazen bakır veya gümüşten bile daha iyi iletkenlerdir.

- ii. Gazlar nötral parçacıklardan oluşur. Bu nedenle elektrik ve manyetik alanlarla etkileşmez. Plazma ise elektriksel nötralitesine rağmen, elektrik ve manyetik alanlarla etkileşir.
- iii. Plazma içindeki herhangi bir pertürbasyonun yayılması elektromanyetik dalga hızında gerçekleşirken, bu yayılım gaz içinde ses hızında gerçekleşir.
- iv. Plazma halinde kimyasal reaksiyonlar, gaz halinden daha büyük hızlarda gerçekleşir.
- v. Plazma içinde yüklü parçacıklar arasındaki Coulomb çekim kuvvetleri çok uzak mesafelerde bile etkilidir. Bu nedenle plazma içindeki her parçacık civarındaki tüm parçacıklarla sürekli etkileşim halindedir. Gaz halinde parçacıklar arasındaki Coulomb etkileşimi ancak iki parçacık yarıçapı toplamı uzaklığında gerçekleşir. Bu uzaklıklar dışında parçacık etkileşmesi yok sayılır.
- vi. Gazların boş olan her şeyi doldurma özelliğine karşılık, plazmalarda bir toplama eğilimi vardır.
- vii. Plazma elektromanyetik dalgalarla etkileştiği gibi, kendisi de elektromanyetik alan oluşturur.

BÖLÜM 3

SOĞUK PLAZMA ÜRETİMİ

Maddenin plazma halini üretmek için maddenin atom ya da moleküllerinin iyonlaştırılması gereklidir. Bunun için maddeye enerji aktarılmalıdır. Maddeye ısı enerjisi, kimyasal enerji, elektrik enerjisi, nükleer enerji gibi enerjiler aktarılabilir gibi elektron veya foton gibi parçacık bombardımanı ile de bu işlem gerçekleştirilebilir. Hangi türde olursa olsun maddeye enerji aktarıldığında maddenin atomları iyonlaşarak maddenin plazma hali üretilebilir. Laboratuvar koşullarında en yaygın plazma üretimi, maddeye özellikle bir gaz elektrik enerjisi verilerek yapılmaktadır. Bu durumda üretilen plazma “elektiriksel gaz deşarj plazması” olarak isimlendirilmektedir. Elektiriksel gaz deşarj plazmaları daha çok vakumlanmış bir oda içinde üretilse de atmosferik basınç plazmaları hem ekonomik olmaları nedeniyle hem de sistemin basitliği nedeniyle teknolojik kullanımlar için daha idealdir. Atmosferik basınç plazmalarında düşük basınç plazmaları gibi vakum gereçleri kullanılmadığı ve gaz olarak atmosferik hava kullanılması nedeniyle birçok avantaja sahiptirler.

Bu çalışmada; atmosferik basınçta üretilen gaz deşarj plazmalarının aynı zamanda atmosfer koşullarına çıkartılabildiği ve oda sıcaklığına olabildiğince yakın sıcaklıklara sahip olan “atmosferik basınç soğuk plazma jetleri” açıklanmıştır. Hemen hemen bütün atmosferik basınç plazma jetleri öncelikli olarak bir bölgede elektiriksel gaz deşarj plazması üretmekte ve daha sonra bu deşarj plazmasını atmosfer koşullarına çıkartmaktadır. Bu nedenle bu bölümde, atmosferik basınç plazma jetlerinin daha iyi anlaşılabilmesi için en genel haliyle soğuk yani termal dengede olmayan plazmalara örnek olarak elektiriksel gaz deşarj plazmalarının üretimi açıklanmıştır.

3.1. Elektriksel Gaz Deşarj

Plazmalar arasında plazma içindeki parçacıkların sıcaklığı referans alınarak “sıcak plazmalar (termal dengede olan plazmalar)” ve “soğuk plazmalar (termal dengede olmayan plazmalar)” şeklinde bir sınıflandırma yapılabilir. Termal denge; plazma içindeki tüm parçacıkların (iyonlar, elektronlar, nötral parçacıklar ve diğerleri) sıcaklıklarının eşit olmasıdır. Bu, örneğin yıldızlarda ve füzyon plazmalarında gerçekleşir. Plazma içindeki farklı parçacıkların sıcaklıklarının eşit olmaması yani daha açık bir deyişle elektronların sıcaklıklarının, diğer ağır kütleli parçacıkların (iyon, nötral atom veya molekül gibi) sıcaklıklarından çok daha yüksek olması durumu ise “termal dengede olmayan” durum olarak ifade edilir. Termal dengede olan plazmalar çok yüksek elektron ve ağır parçacık sıcaklıkları ile karakterize edilir ve neredeyse %100 iyonlaşmışlardır. Elektriksel arklar, ark plazma jetleri ve termonükleer füzyon reaksiyonları termal dengede olan plazmalara örnek olarak verilebilir. Termal dengede olmayan plazmalar çok yüksek sıcaklıklı elektronlar ve buna nazaran çok düşük sıcaklıklı ağır parçacıklardan oluşmuştur ve iyonlaşma dereceleri 10^{-4} ile %10 arasında oldukça düşüktür. Çoğunlukla elektriksel gaz deşarj plazmaları “soğuk plazmalar” yani “termal dengede olmayan plazmalar” olarak adlandırılır. Soğuk plazmaların, bin derece sıcaklıklardan daha yüksek sıcaklıkta gaz sıcaklığına sahip plazmaları da içerdiğini bir kez daha hatırlatmakta fayda vardır. Bu tez çalışmasında özellikle $17^{\circ}\text{C} - 100^{\circ}\text{C}$ arası sıcaklıklara sahip plazma jetleri incelenmiştir. Bu nedenle son 20 yılda bu sıcaklıklarda üretilebilen atmosferik basınç plazma jetleri bu tezin konusu olmuştur.

Dengede olmayan plazmalar yukarıda belirtildiği gibi ağır parçacıklara nazaran çok yüksek elektron sıcaklıkları ile karakterize edilir. Bu sırada plazmanın oluşturulduğu gazın sıcaklığı başka bir deyişle plazmanın oluşturulduğu kabın sıcaklığı oda sıcaklığı derecesinde kalır. Termal dengede olmayan plazmalar temel olarak;

- I. Düşük Basıncılı Dengede Olmayan Plazmalar
- II. Atmosferik Basıncılı Dengede Olmayan Plazmalar
- III. Düşük Basıncı, Yüksek Yoğunluklu Plazmalar

şeklinde üçe ayrılır. Düşük Basıncılı Dengede Olmayan Plazmalar; DC deşarjlar (karanlık deşarj, DC glow deşarj ve DC ark deşarj), düşük basıncılı alternatif akım deşarjlar ve yüksek frekans plazmalar (radyo frekans deşarj) gibi farklı plazma tekniklerini içerir. Atmosferik Basıncılı Dengede Olmayan Plazmalar; Dielektrik Bariyer Deşarj (DBD), Korona Deşarj, Sıkıştırılmış Glow (Constricted glow), Elektron Çoğalma (Electron Avalanche), Lokal Townsend Deşarjlar (Localized Townsend Discharges) ve Kıvılcımlar (Streamers) atmosferik basınç dengede olmayan plazma üretmek için kullanılan bazı tekniklerdir. Düşük Basıncı-Yüksek Yoğunluklu Plazmalar; Elektron Siklotron Rezonans Plazmalar (Electron Cyclotron Resonance Plasmas), Magnetik Olarak Hapsedilmiş Plazmalar (Magnetically Confined Plasmas), Helicon Plazmalar (Helicon Plasmas), Mikrodalga Plazmalar (Microwave Plasmas) genellikle 1-20 mtorr gibi düşük basınçlarda yüksek güç yoğunluklu ve yüksek iyonlaşma dereceli plazma üreten dengede olmayan plazmalardır. Ancak bu sınıflandırmaların gelişen teknolojiye sınırları değişebilmektedir. Örneğin puls voltajlar kullanılarak atmosferik basınçlarda ya da RF güç kaynakları ile atmosferik basınçlarda dengede olmayan DC deşarjlar ve RF deşarjlar üretilmektedir.

Termal dengede olmayan plazmaların (soğuk plazmalar) üretim teknikleri ve özellikleri değişkenlik göstermektedir. Ancak genel olarak karakteristikleri aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- i. Elektronlar; iyonlar ve nötral moleküler- ve atomik- parçacıklardan çok daha büyük hızlara dolayısıyla enerjilere sahiptir. Elektronların sıcaklıkları 10^4 - 10^5 K (1-10 eV) olurken plazması üretilen gazın sıcaklığı oda sıcaklığı civarında olabilmektedir. Bu nedenle elektronlar, inelastik çarpışmalarla

uyarılma ve iyonlaşma gibi plazma reaksiyonlarını gerçekleştirerek dışarıdan verilen enerjinin plazmaya aktarılmasına neden olurlar. Bununla birlikte deşarj parametreleri ile elektronların enerjisi ve gaz sıcaklığı kontrol altında tutulabilir.

- ii. Plazması oluşturulan gazın ve dolayısıyla plazma çeperlerinin sıcaklığı oda sıcaklığı civarında olur. Bu nedenle soğuk plazmalar olarak da adlandırılırlar. Bu özellik, dengede olmayan plazmaların numune işleme uygulamalarında yaygın kullanımına neden olmaktadır. Hangi tür numune işleme uygulaması olursa olsun, işlem sırasında numunenin sıcaklığının artması numunede hasara neden olmaktadır. Örneğin ince film depolamada numune sıcaklığı artarsa plastik üzerine depolama yapılamaz ya da herhangi bir biyomedikal cihaz steril edilirken yüksek sıcaklıklarda hasara uğrar.
- iii. Çok çeşitli reaktör tipleri ve reaktör boyutları kullanılabilir. Bu özellik, teknolojik uygulamalarda, probleme ve koşullara uygun sistemler üretilmesini sağlar.
- iv. Çok çeşitli elektrot tipleri ve boyutları kullanılabilir. Hatta hiç elektrot kullanılmadan da üretilirler. Elektrotların plazma ile temas etmemesi sağlanabilir. Sıvı elektrotlar dahi kullanılabilir.
- v. Çok geniş basınç aralıklarında çalışılabilir. Hatta atmosfer basıncında üretilirler. Ayrıca istenilen gaz ya da gaz karışımları kullanılabilir.
- vi. Çok küçük deşarj boyutlarında üretilirler. Böylece plazma televizyonlarındaki bir pikselin ışık kaynağı dahi olabilirler.
- vii. Çok çeşitli güç kaynağı seçenekleri ile plazma üretilir.
- viii. Son derece ucuz, kolay ve basit metotlar geliştirilebilir.
- ix. Farklı iyonizasyon dereceleri elde edilebilir.
- x. Bölgesel olarak homojen plazmalar elde edilebilir.
- xi. Aktif türler üretebilirler. Yeni ürün keşfedilebilir.
- xii. Kimyasal reaksiyon oranları yüksektir. Bu nedenle yüksek üretim oranı sağlarlar.
- xiii. Kararlı plazmalar üretirler.

- xiv. Atmosferik basınçlarda çalışabilmeleri nedeniyle herhangi bir vakum sistemine ihtiyaç duyulmadığı için son derece verimli ve düşük maliyette olabilmektedirler.

Bütün bu özellikleri ile dengede olmayan plazmalar, teknolojiye çok sayıda kullanım alanı bulmuştur. Bu alanlara örnek olarak; yüzey kaplama, ince film depolama, yüzey sertleştirme (plazma nitrüleme, karbürleme, borlama), yüzey oyma (etching), yüzey koparma (ashing), ozon üretimi, plazma polimerizasyon, plazma sterilizasyon, lazer, UV üretimi, plazma kimyası (metan-oksijen den metanol üretimi, hidrojen ve nitrojen den amonyak üretimi, XeF_4 gibi soygaz bileşikler üretimi, metan gazından asetilen üretimi, metan gazından elmas yapıda karbon üretimi), petrokimya, eksoz gazları kontrolü, baca gazı temizleme, baca gazlarından nitrojen ve sülfür oksitlerin ayrıştırılması, plazma görüntü ekranları ve televizyonları, su arıtma, boyalardan uçucu bileşiklerin atılması, plastik kaplama, iyon kaynağı, ışık üretimi (floresans, neon, sodyum ve civa lambalar), şehir çöpü, tıbbi ve sıvı atık arıtma, yarıiletken teknoloji, entegre devre üretimi, yüzey aktivasyonu ve polimerlerin fonksiyonelleştirilmesi, yüzey temizleme, oksidayson (TiO_2 gibi), plazma adresli sıvı kristaller, protez yapımı, amorf silikon ve elmas yapıda karbon üretimi, organik ve inorganik kaplama verilebilir.

Son yıllarda gaz deşarj plazmaların uygulama alanları oldukça genişlemiştir. Bunun en önemli nedeni, plazmaların dengede olmayan taraflarıyla ortaya çıkan geniş seçim özgürlükleridir. Dengede olmayan koşulların bu geniş değişimi aşağıda sıralandığı gibi dışarıdan kontrol parametrelerinin kolayca değiştirilmesi sebebiyle son derece kolaydır:

i- Kullanılan Gaz: Bu plazma içinde farklı parçacık türlerini ifade eder.

ii- Basınç: 0.1 Pa ile atmosferik basınç arasında değişebilir. Yüksek basınç genellikle çarpışma ortalama serbest yolunun düşmesine ve plazmanın denge haline geçmesine sebep olur.

iii- Elektromanyetik Alan Yapısı: Genellikle dışarıdan verilir fakat plazma içindeki parçacık türleri tarafından modifiye edilebilirler. Bu elektrik ve/veya manyetik alanlar plazma içindeki parçacıkları hızlandırmak, ısıtmak ve yönlendirmek için kullanılırlar.

iv- Deşarj Konfigürasyonu: Örneğin elektrotlu veya elektrotsuz deşarj sistemleri ve küçük deşarj hacimleri büyük değişimlere dolayısıyla dengeden sapmalara neden olur.

v- Zaman Davranışı: Plazmaya uygulanan elektromanyetik alanların zamanlaması. Örneğin puls plazmalarda voltaj belirli pulslarda plazma üzerine uygulanır.

Plazma koşullarının bu çok-boyutlu parametreleri, çok farklı uygulamalarda kullanılan gaz deşarj plazmalarının üretilmesine imkân sağlar. Bu parametreler aslında “termal dengede olmayan” yani “soğuk” plazmaların farklı isimlerle anılmasına neden olmaktadır. Kullanılan gaza göre hava, oksijen, helyum, argon plazması gibi isimlerle karşılaşılabılır. Kullanılan gazın basıncına göre “düşük basınç plazmaları” ya da “yüksek basınç plazmaları”, “atmosferik basınç plazmaları” isimleri ile de karşılaşmak mümkündür. Bu çalışmada özel olarak atmosferik basınçta üretilen plazmalar konu edilmiştir. Kullanılan elektromanyetik alan yapısı, daha çok plazmayı üretmek için kullanılan güç kaynağının özelliğini ifade eder. Plazmayı üretmek için kullanılan güç kaynağı DC voltaj üretiyorsa plazma DC gaz deşarj olarak isimlendirilmektedir. Benzer şekilde kullanılan güç kaynağına göre DC puls deşarj, AC deşarj, kHz deşarj, RF deşarj, MW deşarj gibi isimlendirmeler de yapılmaktadır. Bu çalışmada atmosferik basınçta üretilen plazma jetleri; kullanılan güç kaynağına yani plazma içindeki elektromanyetik alan yapısına göre sınıflandırılarak açıklanmıştır. Deşarj konfigürasyonu da farklı türde plazmaları isimlendirmek için kullanılmaktadır. Örneğin; dielektrik bariyer deşarj plazmaları daha çok elektrotların yapısı ile ilgili bir isimlendirmedir. Burada metal elektrotlar birer dielektrik malzeme ile kaplı olduğu için plazma bir dielektrik bariyer içinde bulunmaktadır. Elektrotların yapısına göre plazma içindeki elektrik alan dağılımında da farklılıklar söz konusu olmaktadır. Örneğin; DC elektrik deşarj iğne

şeklinde sivri elektrotlarda “corona deşarj” olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu nedenle elektrot konfigürasyonu da plazmaları farklı isimlerle anmak için kullanılmaktadır. Zaman davranışı olarak kullanılan parametre aslında elektromanyetik alan yapısının başka türde ifadesidir. Örneğin; RF deşarjlar aslında AC deşarjların içindedir. AC deşarjlarda plazmaya voltaj belirli frekanslarda verilmektedir. Örneğin; kHz mertebesindeki frekanslarda uygulanan voltajlarla üretilen plazmalar kHz plazmaları ya da düşük frekans plazmaları olarak isimlendirilirken, MHz mertebesinde voltaj uygulanarak üretilen plazmalar radyo frekans (RF) plazmaları, GHz mertebesinde frekanslarda uygulanan voltajlarla üretilen plazmalar mikrodalga (MW) plazmaları olarak isimlendirilmektedir.

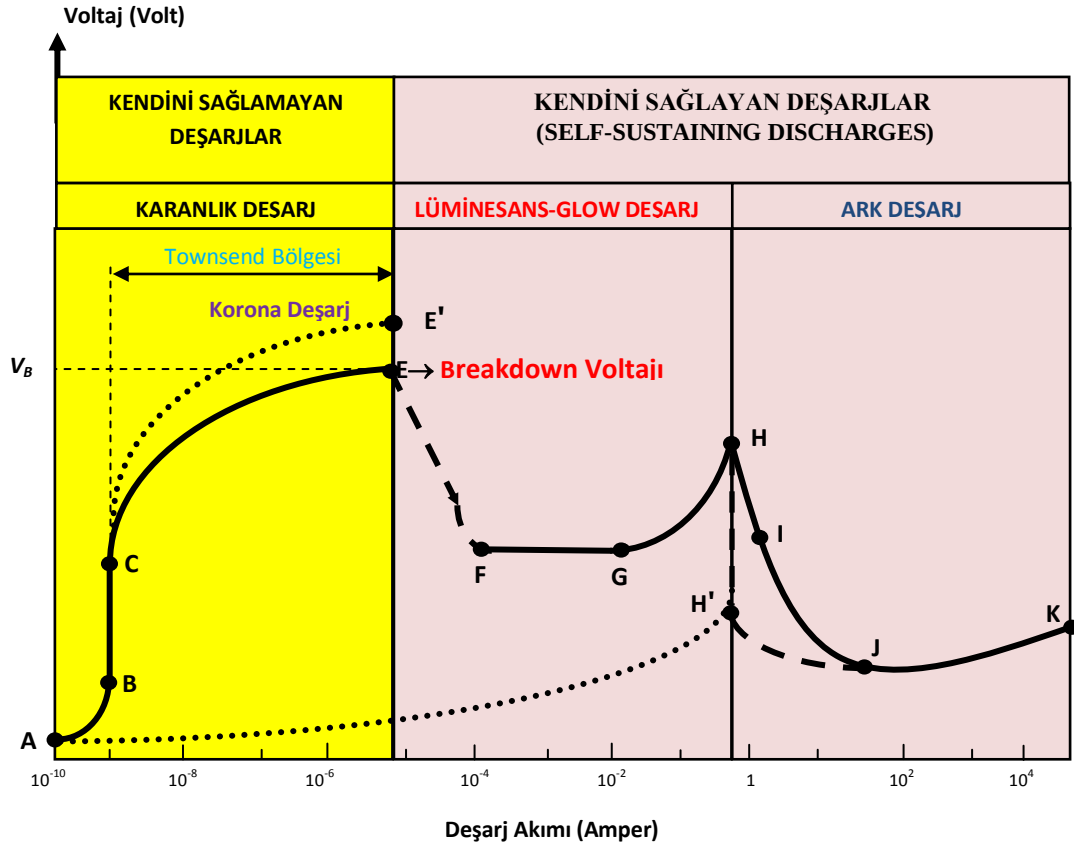
Bu çalışmada yukarıda söz edildiği gibi atmosferik basınçlarda elektromanyetik alan yapısına göre soğuk plazma jetleri açıklanmıştır. Açıklanan her bir jet yukarıdaki diğer parametrelere göre bir “elektriksel gaz deşarj” üretmektedir. Bu nedenle bu bölümde en genel halde elektriksel gaz deşarj plazmasının anlaşılması için DC voltaj kullanılarak bir vakum odası içinde düşük basınç plazmaları açıklanmıştır. Burada açıklama için DC deşarj seçilmesinin nedeni diğer tüm elektriksel gaz deşarjların da aslında DC deşarjların bir versiyonu olmasıdır. Örneğin AC deşarjın DC deşarjdan farkı sadece belirli zamanlarda elektrotlar üzerindeki voltajın yönünün değişmesidir. Bu zaman dilimi içerisindeki olaylara bakıldığında burada açıklanacak olan DC deşarjdan çok farklı plazma içi reaksiyonlar gerçekleşmemektedir.

3.2. DC Elektriksel Gaz Deşarj Karakteristikleri

Laboratuvar koşullarında, gazlarda elektriksel deşarj oluşturmak için en yaygın şekilde kullanılan sistem elektriksel gaz deşarj tüpü’ dür. Vakum ve gaz depolama sistemi ile vakumlanabilen ve sonra istenilen basınçta istenilen gazla doldurulabilen bu sistem, birbirine paralel düzlem levha tipi iki metal elektrot (genelde tungsten,

molibden gibi erime sıcaklığı yüksek metaller) bulunan bir cam tüpten (genelde pyrex cam) oluşur. Vakum ve gaz depolama sistemi; bir vakum pompası, valf sistemleri, manometreler ve gaz tüplerinden oluşur. Deşarj tüpü sisteminde ayrıca, elektrotlar arasına elektrik voltajı uygulamak için bir DC voltaj güç kaynağı ve gaz içinden geçen akımın kontrol edilebilmesi için akım ayarlayıcı bir direnç de kullanılır.

Vakumlandıktan sonra, içine saf gaz yerleştirilen bir gaz deşarj tüpünün elektrotları arasına DC voltaj güç kaynağı ile voltaj uygulandıktan sonra içinden geçen akımın ve deşarj üzerindeki voltajın ölçülmesi ile elde edilen akım-voltaj karakteristiği Şekil 3.1.' de verilen grafiğe benzer olur. Grafik üzerindeki değerler, kullanılan gazın cinsine ve basıncına, elektrotlar arası uzaklığa, elektrotların cinsine ve yapısına göre farklılıklar gösterebilir.



Şekil 3.1. DC elektriksel gaz deşarjın akım voltaj karakteristiği.

Şekil 3.1.' den görüldüğü gibi akım-voltaj karakteristiği çok farklı davranışlar göstermektedir. Bu, deşarj tüpü içindeki yüklü parçacık sayısındaki artışa neden olan kaynakların değişmesinden dolayıdır. Bu nedenle bu karakteristik üzerinde farklı bölgeler oluşmaktadır. Deşarj tüpü içindeki yüklü parçacıkların artışı, deşarjın kendisi tarafından sağlanıyorsa kendini sağlayan (self sustaining) deşarj, yük artışı bir dış kaynak tarafından sağlanıyorsa, kendini sağlamayan (non-self sustaining) deşarj olarak adlandırılır. Deşarj tüpü içinde, yüklü parçacıkların artışına sebep olan elektron emisyon kaynakları da değişmektedir. Örneğin karanlık deşarj bölgesinde doğal radyasyon (fotoelektrik emisyon) yoluyla, lüminesans (glow) deşarj durumunda ikincil elektron emisyonu yoluyla, ark deşarj bölgesinde termiyonik emisyon ve alan emisyonu yoluyla, yüklü parçacık sayısında artış sağlanmaktadır. Bununla birlikte karakteristik üzerinde, deşarj tüpünden yayınlanan radyasyon şiddetine göre de sınıflandırma yapılmıştır. Karanlık deşarj olarak adlandırılan bölgede, yayınlanan radyasyon görünür bölgede olmadığı için karanlık deşarj olarak adlandırılır. Lüminesans (glow) deşarj bölgesinde yayınlanan radyasyon, görünür bölgede olduğu için gözle görünür bir ışıltı meydana gelir. Bu nedenle lüminesans veya diğer adı ile glow deşarj bölgesi olarak adlandırılır.

Şimdi bir gaz içinden DC elektrik akımının geçişini ve böylece Şekil 3.1.' de verilen akım-voltaj karakteristiğini adım adım inceleyelim. Deşarj tüpü içindeki elektrotlar arasına voltaj uygulanmadan önce, deşarj tüpü içine yerleştirilen gazda, her zaman bir miktar serbest elektron ve iyon vardır. Bunlar, güneşten gelen radyoaktif ışınlar ve uzaydan gelen kozmik ışınların gaz içindeki nötral atomları iyonlaştırması ve ayrıca doğada bulunan bu radyoaktif ışınların, deşarj cihazının elektrotlarından fotoelektrik emisyon yapmasıyla oluşurlar. Deşarj tüpünün yapıldığı camın kendisi de radyoaktif yayınlama yapabilir. Elektrotlar arasına uygulanan voltaj yavaş yavaş arttırılırsa, gaz içinde doğal olarak bulunan elektronlar anoda, pozitif iyonlar katoda doğru hareket etmeye başlarlar ve bu yüklü parçacık hareketi nedeniyle deşarj içinden bir miktar akım geçer. Katot ile anot arasına uygulanan voltaj belli bir değere gelinceye kadar (B noktası) bu akım artar ve bu noktada birim

zamanda üretilen tüm yükler elektrotlar tarafından toplanılmıştır ve voltajın arttırılmaya devam edilmesiyle birim zamanda elektrotlar tarafından toplanan yük sayısında artış olmayacaktır. Sonuç olarak akım voltaj karakteristiği doyuma ulaşacaktır. Burada yüklü parçacıklar elektrotlara doğru hareket ederken, çarpışmalarla iyonlaşma yapacak kadar enerjiye sahip değildirler. Başka bir deyişle bu bölgede oluşan akımın sebebi tüp içinde zaten var olan yüklerin uygulanan elektrik alan ile elektrotlara toplanmasıdır. Buraya kadardeşarj tüpü içindeki tüm yükler doğal yollarla üretildiği için, (AB) bölgesi doğal radyasyon ile iyonizasyon bölgesi olarak adlandırılır. (B) noktasından sonradeşarj cihazı üzerine uygulanan voltaj arttırılsa dahi, akımın artmayıp sabit kaldığı satürasyon bölgesi (BC) oluşur. Bu bölgede tüp içinde hala doğal olarak üretilen yükler vardır. Ancak birim zamanda birim kesitten geçen yük miktarı sabit kaldığından akım da değişmemektedir. Satürasyon rejiminde anot ile katot arasına uygulanan voltaj arttırılmaya devam ettikçe akım artmaz ancakdeşarj içindeki yüklü parçacıklar giderek daha fazla enerji kazanırlar. Tam (C) noktasında, elektronlar artık gaz atomlarını iyonlaştıracak kadar enerji kazanmışlardır vedeşarj tüpü içindeki yüklü parçacık sayısı aşağıdaki reaksiyonla giderek artacaktır. İyonizasyon, gazdeşarj plazmalarında yüklü parçacıkların üretilmesindeki en önemli olaydır ve iyonizasyon reaksiyonu;



şeklindedir. Burada e ; elektron, A ; nötral gaz atomu ve A^+ ; A atomunun iyonudur. Böyle bir çarpışma reaksiyonunda; yüksek enerjili elektron (en az A atomunun iyonlaşma enerjisinde enerjiye sahip olan elektron), nötral A atomuna çarpar ve bu atomun bir elektronunu koparır ve pozitif iyon haline getirir. İyonizasyon reaksiyonundan görüldüğü gibi nötral atoma çarpan bir yüksek enerjili elektron, yeni bir elektron-iyon çifti oluşturmuştur. Her yüksek enerjili elektron benzer reaksiyonu yapabilir ve böylece zincirleme yük artışı gerçekleşir. Yük artışına yukarıdaki denklemden farklı olarak sebep olan başka plazma içi reaksiyonları da vardır.

Örneğin plazma içinde üretilen fotonlarla ya da başka türde parçacıklarla nötral atomların çarpışmasıyla iyonlaşmalar gerçekleşir. Bu artış Townsend' in birinci iyonizasyon katsayısından hesaplandığında exponansiyel bir artış olarak bulunur. Bu nedenle karakteristik üzerinde (CE) arasındaki bölge exponansiyel artan bölgedir. Bu artış (E) noktasında kritik bir değere ulaşır ve bu noktaya karşılık gelen voltaj V_B ; “Ateşlenme (Breakdown) Voltajı” olarak adlandırılır. Breakdown voltajından sonra deşarj üzerindeki voltaj birden azalarak glow deşarj bölgesine geçilir. Glow deşarj bölgesi; glow deşarja geçiş bölgesi (EF), normal glow deşarj bölgesi (FG) ve anormal glow deşarj bölgesi (GH) olarak üçe ayrılır. Normal glow deşarj ileride detaylı olarak incelenecektir.

Elektrotların yapısına göre kritik değere ulaşılan bu bölge yani breakdown voltajına karşılık gelen bu nokta da farklı bir durum gözlenebilir. Eğer elektrotlar üzerinde sivri ya da keskin uçlar varsa, uygulanan voltaj nedeniyle bu sivri ve keskin bölgelerdeki elektrik alan çok yüksek olacağından, alan elektron emisyonu nedeniyle korona deşarj oluşur (Roth, 1995). Bu nedenle breakdown voltajı değeri daha yüksek bir değere çıkabilir (E'). Korona deşarjlar, pozitif ve negatif korona olarak ikiye ayrılır ve ozon üretiminde sıklıkla kullanılır. Satürasyon rejimi ile breakdown voltajı arasında kalan bölge Townsend rejimi olarak adlandırılır.

Buraya kadar gaz içinden akım geçişinin anot ile katot arasındaki uzayda, dış kaynaklar nedeniyle üretilen iyonlara bağlı olduğu görülmektedir. Bu nedenle (A) noktası ile breakdown voltajı arasındaki bölgeler kendini sağlamayan deşarj bölgeleri olarak adlandırılır. Aynı zamanda bu bölgede korona hariç hiçbir deşarj, görünür bölge dalga boyunda radyasyon (ışık) yayınlamayamaz. Bu nedenle bu bölge, karanlık deşarj olarak da adlandırılır. Breakdown voltajından sonra yani karakteristik üzerinde (E) noktasından veya korona deşarjın olduğu özel durumda (E') noktasından sonra deşarj üzerine uygulanan voltaj birden azalır ve akım çok hızlı bir şekilde artar. Bu, deşarj içindeki yüklü parçacık sayısının çok hızlı bir şekilde artmasından dolayıdır. Bu artış, plazma içinde oluşan pozitif iyonların katota

vurarak, katottan ikincil elektron emisyonu yapması nedeniyledir. Breakdown voltajından sonra deşarj, ihtiyaç duyduğu yüklü parçacıkları artık kendisi üretmeye başladığı için bundan sonraki karakteristik üzerindeki bölgeler, kendini sağlayan deşarjlar olarak tanımlanır.

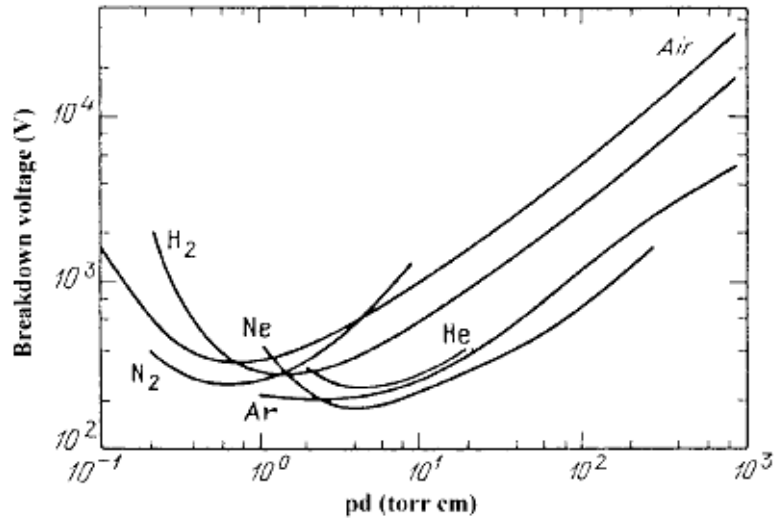
Breakdown voltajı; bir deşarj tüpünde glow deşarj oluşturmak için elektrotlar arasına uygulanması gereken minimum voltaj değeridir (Lieberman and Lichtenberg, 1994). Bir deşarj tüpünde karanlık deşarj, korona deşarj gibi deşarjlar üretilse de bugün teknolojiye sıkça kullanılan ve gaz deşarj olarak çoğu kez kullanılan aslında glow deşarjlardır. Bu nedenle breakdown voltajı ya da breakdown koşulları aslında glow deşarj oluşturma şartıdır. Breakdown öncesi, elektrotlar arası potansiyel dağılımı doğrusal dağılımdır ve elektrik alan E sabittir ve $E=V/d$ eşitliği ile verilir. Bu elektrik alan ile elektronlar anoda, pozitif iyonlar da katoda doğru hareket ederek deşarj içinden doğru akım geçişini sağlarlar. Bu sırada katoda gelen başka bir deyişle katoda vuran pozitif iyonlar ikincil elektron üretecektir (Gill, 1993). Bu yük üretim işlemi, eş zamanlı oluşan iki olayla sonuçlanır. Bunlar; 1-) Katoda gelen hızlı iyonlar elektronlar üretirler. 2-) Üretilen elektronlar hızlandırılırlar ve katoda doğru hızlanan iyonlar üretirler. Her iki işlem de, elektrotlar arası uzayın dışındaki elektron ve iyon kayıplarını karşılamak için, belirli bir oranda olmak zorundadır. Bu kayıpların karşılanması için gerekli voltajın minimum değeri “breakdown voltajı” olarak adlandırılır.

Gazın ateşlenmesinden (breakdown) sonra yani glow deşarj oluştuktan sonra elektrotlar arası potansiyel dağılımı tamamıyla değişir ve elektrotlar arasına uygulanan voltaj azalır ve üç parçaya ayrılır. Bu parçalardan katoda yakın olan voltaj düşümü; katot düşümü, anoda yakın olan voltaj düşümü; anot düşümü, ikisi arasındaki voltaj düşümü de plazma potansiyeli olarak adlandırılır. Katot düşümü glow deşarjın kendisini devam ettirmesi için yukarıda sözü edilen kayıpları karşıladığı için diğer potansiyel düşümlerinden daha yüksektir. Bu potansiyel dağılımı, glow deşarj detaylı olarak açıklanırken incelenecektir.

Breakdown voltajı; kelime anlamı olarak iletken olmayan bir materyalin iletken hale geçmesi için minimum uygulanması gereken voltaj değeri olarak da tanımlanır. Glow deşarjlar için Breakdown voltajının değeri,

$$V_B = \frac{A_1 (pd)}{A_2 + \ln(pd)} \quad (3.2)$$

ile verilir. Burada A_1 ve A_2 deneysel olarak elde edilen birer sabit, p ; gaz basıncı ve d ; elektrotlar arası uzaklıktır. Breakdown voltajı yalnızca gazın basıncı ve elektrotlar arası uzaklığın çarpımına ($p.d$) bağlıdır. Bu bağımlılık Paschen yasası olarak tanımlanır (Akan, 2003). Farklı gazlar için breakdown voltajının düşük basınçlarda deneysel olarak elde edilmiş ($p.d$) bağımlılığı Şekil 3.2.' de verilmiştir ve bu eğride, breakdown voltajı; ($p.d$) çarpımına bağlıdır, ayrı ayrı p ' ye ya da d ' ye bağlı değildir.

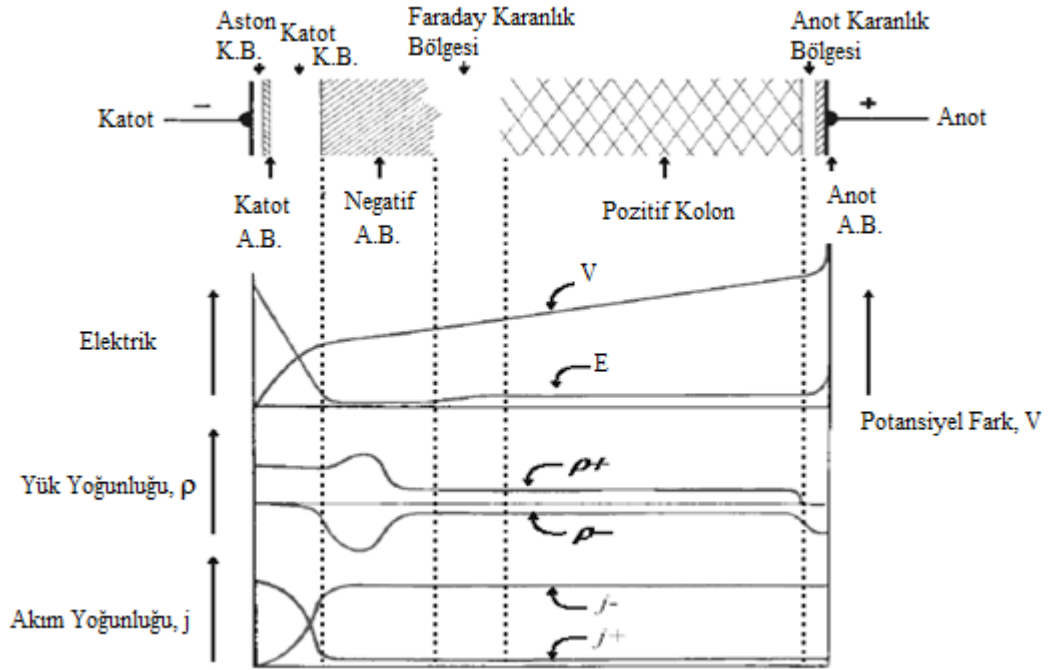


Şekil 3.2. Farklı gazlar için Paschen eğrileri (Raizer, 1991).

Şekil 3.2.' den görüldüğü gibi büyük p.d (yüksek basınç ve büyük elektrotlar arası uzaklık) için breakdown voltajı p.d ile neredeyse doğru orantılı olarak artmaktadır. Eğrinin sol kısmında yani düşük p.d (düşük basınç, düşük elektrotlar arası uzaklık) bölgesinde de, p.d çarpımı azalırken breakdown voltajının arttığı görülmektedir. Bundan dolayı bu grafikte Paschen minimumu olarak adlandırılan bir minimum oluşur. Bu grafiğin bu şekilde çıkmasının nedeni iyonlaşma olasılığı ile ilgilidir. Bu minimumda, bir elektronun iyonlaştırıcı çarpışma olasılığı maksimumdur. Başka bir deyişle minimum civarında breakdown koşullarının, yük artışı için koşulların optimum olması nedeniyle en elverişli bölge olduğu söylenebilir. Paschen eğrisi uygulamalarda çok önemlidir. Ticari deşarj tüpleri imal edilirken gerekli yüksek voltaj değerlerini düşürmek için Paschen minimum aralığı seçilir. Paschen minimumundaki değerler, V_{min} ve $(p.d)_{min}$, kullanılan gaz ve elektrotlar cinsine bağlıdır ve aynı gaz ve katot için sabittir. $p.d=sabit$, Scaling yasası olarak bilinir. Buradan atmosferik basınçta bir glow deşarj oluşturmak için μm mertebesinde elektrotlar arası uzaklık gerektiği kolayca anlaşılabılır.

Buraya kadar Şekil 3.1.' de verilen karakteristikle paralel olarak, düşük basınçtaki bir gaz içinden elektrik akımı geçirilerek üretilen glow deşarj oluşumu detaylı bir şekilde anlatılmıştır. Burada glow deşarj detaylı olarak incelenecektir. Glow deşarj olumu kısaca özetlenecek olursa; bir gaz deşarj tüpünün elektrotları arasına bir potansiyel farkı uygulanırsa öncelikle gaz, elektron ve pozitif iyonlara ayrışacaktır. Elektronlar anoda doğru, pozitif iyonlar da bu potansiyel farkı ile katoda doğru hızlanacak ve katottan ikincil elektron emisyonu yapacaktır. Katottan yayınlanan ikincil elektronlar tekrar gaz içine girecek ve gaz atomları ile çok sayıda çarpışmalar yapacaktır. Bu yeni çarpışmalar sonucu yeni iyonizasyonlar ve foton yayınlayıcı uyarılmalar oluşur. Bu şekilde deşarj içinden sürekli bir doğru akımı geçişi olur ve doğru akım DC glow deşarj oluşur. Glow deşarj oluşması için elektrotlar arasına uygulanan potansiyel farkı, deşarj oluştuktan sonra anot ile katot arasında eşit olarak dağılmaz (Şekil 3.3.), üç parçaya ayrılır fakat büyük bir kısmı katodun birkaç milimetre önüne düşer. Çok güçlü bir elektrik alan ile karakterize

edilen katoda bitişik olan bu bölge “katot karanlık bölgesi-katot düşümü” olarak veya “kılıf (sheath)” olarak adlandırılır. “Negatif glow” olarak adlandırılan deşarjın uzun parçasında potansiyel, neredeyse sabit çok küçük bir pozitif eğime sahiptir ve dolayısıyla düşük elektrik alan vardır ve plazma potansiyeli olarak adlandırılır. Diğer bölge anot düşümü olarak adlandırılır. Bu durum elektrotlar arası kısa ve/veya düşük basınçlarda daha net gözlenir. Katot-anot arası uzaklık büyük olduğunda (örneğin 100 Pascal argon gazında 1-10 cm de) elektrotlar arasında ortaya çıkan ışık yayımlayan ve yayınlamayan bölge sayısı ve potansiyel ve elektrik alan dağılımı Şekil 3.3.’deki gibi olacaktır.



Şekil 3.3. DC glow deşarjda elektrotlar arasındaki elektrik ve potansiyel alan dağılımı ile yük ve akım yoğunlukları değişimi (Remy, 2003). ρ^+ :birim hacimdeki pozitif yüklü parçacık sayısı ρ^- :birim hacimdeki negatif yüklü parçacık sayısı

Katot civarındaki yüksek potansiyel düşümü yani “katot düşümü” deşarjı sağlamak için gereklidir. Şekil 3.3.’ ten görüldüğü gibi, katot civarındaki potansiyel düşümü yani katot düşümü negatif glow’un bitiminden başlar. Katot düşümünde yüklü parçacıklar ivmelendirilir ve bu yüklü parçacıklar bu potansiyel düşümünde oldukça yüksek enerji kazanırlar. n_e , elektron yoğunluğu; n_i , iyon yoğunluğu; v_e , elektronların hızı ve v_i , iyonların hızı olmak üzere akım yoğunluğu;

$$\mathbf{j} = \mathbf{j}_e + \mathbf{j}_p = en_e \mathbf{v}_e + en_i \mathbf{v}_i \quad (3.3)$$

ilişkisi ile verilir ve toplam deşarj akımı sabit bir değerde kalır. Katot düşümü bölgesinde daha düşük yük yoğunluklarında dahi toplam deşarj akımı korunacaktır. Yük yoğunluklarının daha küçük değerleri, katot düşümündeki iyon (v_i) ve elektronların hızlarının (v_e) artmasıyla karşılanacaktır. Katot düşümü bölgesinde lokal termodinamik dengenin (LTD) olduğunu kabul edemeyiz. Sonuç olarak klasik diagnostik metotlarını kullanmak güçtür. Ayrıca bu bölge için elektron sıcaklığı bir parametre olarak düşünülmemelidir (Musa et al., 2000).

Gerçek bir plazma hali olan “pozitif kolon” bölgesinde plazma yoğunluğu oldukça yüksektir. Bu sebepten iletkenlik yüksektir ve negatif ve pozitif iyon yoğunluğu hemen hemen eşit olduğu için böyle bir plazma boyunca potansiyel düşümü düşüktür. Ayrıca, plazma yoğunluğu yüksek olduğu için, iyonizasyon oranı, düşük alanlarda dahi kayıpları karşılayabilecek ve plazma yoğunluğunu koruyacak kadar yüksektir. Bu bize pozitif kolon boyunca neden yaklaşık olarak sabit bir voltaj ve küçük bir elektrik alanı değerine sahip olduğumuzu açıklamaktadır.

Anottaki potansiyel düşümü, katotta meydana gelen işlemler nedeniyle elde edilen seviyede deşarj akımını korumak için kendini ayarlayan potansiyel düşümüdür. Yani toplam deşarj akımının korunması için zaman içinde değişen potansiyel değeridir.

Şekil 3.3.' de görüldüğü gibi glow deşarj üretildiğinde birçok karanlık bölge ve aydınlık bölge anot ile katot arasında oluşmaktadır. Gerçekte karanlık bölgeler tamamıyla karanlık değildirler. Sadece civardaki bölgelerden yayınlanan ışık daha yüksek olduğundan karanlık bir bölge gibi görünürler.

“Aston Karanlık Bölgesi” olarak adlandırılan ilk bölge basitçe “katot glow”a kadar olan bölge olarak açıklanabilir. Bu bölgede elektronların enerjisi (elektronlar bu enerjiyi katot düşümünün elektrik alanı ile hızlandırılmasıyla kazanırlar) deşarj tüpünün içini dolduran gazın atomlarını uyarmaya yetmez. Katot glow sınırı açıkça görünürdür ve gaz atomlarının uyarılma enerjisine karşılık gelir. Katota gelen iyonlar nedeniyle katottan yayınlanan ikincil elektronlar düşük enerjiye sahiptirler. Bu nedenle uyarma veya iyonlaşma yapamazlar ve bu Aston karanlık bölgesi oluşur. Katot’tan, katot glowa kadar olan uzaklık, katot düşümü nedeniyle hızlanarak enerji kazanmak için elektronlar için gerekli uzaklığa karşılık gelir.

“Katot glow” gaz atomlarının uyarılma enerjisine karşılık gelir. Bu bölge dardır. Çünkü uyarma için enerjilerini kaybeden bu elektronlar daha fazla uyarma yapmak için enerjiye sahip olamazlar. Diğer taraftan, elastik olmayan çarpışmalara sahip olmayan bu elektronlar, uyarma için gerekli optimum değerden çok daha büyük enerjiyi anot glow’ un sonunda kazanırlar.

“Katot glow” dan sonraki diğer karanlık bölge olan “Katot Karanlık Bölgesi” iki sebepten dolayı oluşur; 1-) İnelastik olarak atomlarla çarpışma yapan elektronlar uyarma enerjisine denk bir enerjiyi kaybettiler ve artık herhangi bir atomu uyarma veya iyonlaştırma işlemi yapamazlar. 2-) Atomları uyarma işlemi yapmamış olan elektronlar biraz daha fazla enerji kazandılar; bu sebepten maksimum uyarma ya da iyonlaşma enerjisini aştılar. Uyarma veya iyonlaşma olasılığı maksimum değerlerden daha yüksek enerji değerlerinde aniden düşer.

“Negatif Glow” katot tarafında keskin bir sınıra sahiptir ve katot düşümü alanında hızlandırılan elektronların gaz atomlarını iyonlaştırmak için yeterli enerjiyi kazandığı nokta olarak ifade edilir. Negatif glow bölgesinde iki ilginç durum vardır. Bunlar; 1-) Bu bölgedeki elektrik alan neredeyse sıfır olacak kadar düşüktür ve ayrıca bu bölgede, iki grup elektron vardır. Bunlar katottan ikincil elektron emisyonu ile kopan elektronlar ve iyonlaşma ile oluşan elektronlardır. 2-) Bu bölgedeki nötralite sağlanmamıştır. Negatif glow her zaman negatif yük fazlalığına sahiptir. Bu bölge en yüksek şiddetli ışık yayınlayan deşarj bölgesidir. Burada yayınlanan ışıklar, çoğu elektron-iyon birleşmesiyle sonuçlanan uyarılmış atomların tekrar uyarılmadan önceki durumlarına dönerken yayınlanan ışıktır (Musa et al., 2000).

Negatif glow bölgesinden sonra, düşük bir ışığa sahip “Faraday Karanlık bölgesi” oluşur. Negatif glow bölgesinde elastik olmayan çarpışmalarla enerjilerini kaybetmiş elektronlar, yeniden iyonlaştırma yapmak için Faraday karanlık bölgesinde hızlanırlar. Yani karanlık uzayda enerji kazanırlar. Ayrıca elektronlar Faraday karanlık uzayında pozitif kolonun içine girmek için fazla enerji kazanırlar ve gaz atomlarını iyonlaştırmaya veya uyarmaya başlarlar.

“Pozitif Kolon” kısmında plazmanın yoğunluğu oldukça yüksektir ve elektrik alan düşüktür. Uzun mesafeli Coulomb etkileşimleri nedeniyle güçlü etkileşimler elektronların enerjisini Maxwell dağılımlı bir gaz oluşturacak şekilde enerjilerini ve elektron sıcaklığını eşitler. Hareketler küçük sürüklenme tipidir ve herhangi bir uniformsuzluk, difüzyon işlemleri ile aniden telafi edilir (ambipolar difüzyon). Maxwell dağılımında iyonizasyonlar, uyarılmalar ve elektronlar lokal termodinamik dengededir. Sistemden sadece elektromanyetik radyasyon kaybı vardır.

Pozitif kolonun anot ucunda, anoda yük kayıplarından dolayı, “Anot Karanlık Bölgesi” diye adlandırılan bir karanlık bölge daha belirir. Burada hem elektronların hem de iyonların yoğunluğu azalır. Bu sebepten, deşarj akımını korumak için ($j = nv$

eşitliğinden sabit j için, n azalırsa v artar) hızlanan elektron doğrudan anoda düşer. Bu hızlandırıcı alan nedeniyle elektronlar enerji kazanırlar ve gaz atomlarını iyonlaştırırlar. Bu sebepten anot yüzeyinde “Anot Glow” olarak adlandırılan bir ışıltama gözleriz.

Bu belirtilen bölgeler 10^{-1} - 10^{-2} torr’ luk gaz basınçlarında ancak tam olarak görülebilir. Bütün bu bölgelerin kalınlıkları gaz basıncının azalmasıyla artar, basıncın artmasıyla da azalır. Sonuç olarak 1 torr’ dan daha yüksek basınçlarda deşarj tüpü tümüyle pozitif kolonla doldurulur. Katot düşümü bölgesi deşarjı muhafaza edilmesi için önemlidir. Anodu, katot doğrultusunda hareket ettirebilirsek deşarj, anot negatif ışıltamanın sonuna gelinceye kadar kararlı kalır. Bu mesafe azaltılırsa, ikincil elektron üretmek zorunda olan iyonları üretecek dar bir uzay olmadığı için deşarj söner (Musa et al, 2000).

Glow deşarj oluştuktan sonra anot ile katot arasına uygulanan voltaj arttırılmaya devam edilirse Şekil 3.1.’ de verilen karakteristik üzerindeki (G) noktasından sonra anormal glow deşarj başlar ve (H) noktasına kadar sürer. Bu bölgede (G) noktasından sonra ikincil elektron emisyonu ile akımın artışı, yavaş yavaş doyuma ulaşmaya başlar. Bu nedenle deşarj içindeki pozitif iyonlar katoda vurarak ikincil elektron üretmekle birlikte, katodun aşırı ısınmasına neden olurlar ve voltaj giderek yükselmeye başlar. Katodun yeterince ısınması sebebiyle (H) noktasında artık termoelektronik emisyon başlar. Deşarj içindeki termoelektronik emisyon nedeni ile yüklü parçacık sayısı arttığı için deşarj üzerindeki voltaj yeniden düşmeye başlar. Böylece glow deşarjdan ark deşarja geçiş (HI) başlar. Glow deşarjdan elektriksel arka geçiş, yüksek erime noktalı ve anormal glow deşarj tarafından yüksek sıcaklıklara ısıtılabilen materyaller için düz ya da yavaşça değişen bir geçiş olabilir (HH’). Bu durum soğuk katot ark durumunda gözlenir. Dışarıdan ısıtılan katot ile ark deşarj durumunda ise glow deşarj bölgesi oluşmadan ark deşarja geçiş olur (AH’). Genelde ark deşarj, sıcak katot ark deşarj bölgesi (IK) şeklinde oluşur. Voltaj değeri, dc güç kaynağının iç direncine bağlı olarak bir (K) noktasına

kadar önce azalır sonra yavaş yavaş artmaya başlar. (I) ile (K) arasında (J) noktasındaki yüksek akımlara ulaşmaya kadar voltaj azalırken akım artar ancak (J) noktasından sonra voltaj, akımın artmasıyla yavaşça artar. Bu değişim yine elektron emisyon mekanizmasının değişmesi sebebiyledir. (J) bölgesine kadar elektronlar termiyonik emisyon ile üretilirken, (J) noktasından sonra alan emisyonu ile üretilirler. Tungsten, molibden gibi erime sıcaklıkları yüksek ve zor eriyen metaller (refractory metals) olarak adlandırılan materyaller için ark akımı katot üzerindeki çok sayıdaki spot tarafından sağlanır. (I) ile (J) arasındaki artan akımla voltajın azaldığı bölge, elektron iyon ve gazın sıcaklığının eşit olmadığı termal olmayan ark (non-thermal arc) rejimi, (J) ile (K) arasındaki pozitif eğimli bölge termal ark (thermal arc) rejimidir ve tüm türlerin sıcaklıklarının eşit olduğu termal denge halindeki plazmadır (Akan, 2003).

BÖLÜM 4

ATMOSFERİK BASINÇ SOĞUK PLAZMA JETLERİ

Elektriksel gaz deşarjlar teknolojide oldukça fazla uygulama alanına sahiptir. Genelde kapalı bir kap içinde üretilen elektriksel gaz deşarjlar, uygulama alanlarını bu kap içinde sınırlı tutmaktadır. Örneğin; kaplama uygulaması yapılacak numunenin kapalı kap içinde üretilen plazma ortamına sokulması gerekmektedir. Bu durumda ‘in situ’ olarak adlandırılan yerinde uygulama yapmak yani üretilen plazmayı numune üzerine uygulamak mümkün değildir. Plazma jet; elektrotlar arasında üretilen plazmanın atmosfer ortamına çıkarıldığı zaman kullanılan bir ifadedir. Başka bir deyişle, üretildiği deşarj odasından atmosferik basınca akabilen plazmalara “jet” denilmektedir. Plazma jetler; plazmanın üretildiği kaptan dışarıya çıkarılabildiği elektriksel deşarj sistemleridir. Akan plazmalardan farkı; akan plazmalar vakum ortamında da akıtılabilmektedir. Plazma jetler gündelik hayatta kullanım açısından da çok önemli avantajlara sahiptir. Örneğin; sterilizasyon uygulamalarında plazma jetler sterilizasyonun yapılacağı ortama getirilerek istenilen bölgenin sterilizasyonu yapılabilir. Ayrıca atmosferik basınçlarda çalışıldığı için vakum pompası, basınç ölçüm cihazları gibi cihazların da kullanımına gereksinim olmayacaktır. Bu hem sistemi üretimi açısından basitleştirmekte hem de maliyetini düşürmektedir.

Atmosferik basınçlarda ilk üretilen plazma jetler, “plazma torch” olarak adlandırılmıştır. Bu sistemler kullanılan gazın plazmasını ark plazması yapmaktadır. Bu nedenle son derece yüksek sıcaklıkta plazma üreten bir jet türüdürler. Kaplama, kesme, kaynak gibi birçok uygulama alanında kullanılmaktadır. Atmosferik basınç ortamında soğuk plazma jet üretmek aslında insanlık tarihini değiştirecek bir yeniliktir. İnsanoğlu ateşi icat ettiği günden bu yana toprağı pişirmeden sterilizasyon ve uzay teknolojisine kadar çeşitli uygulamalarda kullanmıştır. Ancak ilk kez soğuk ateş diye adlandırabileceğimiz bir madde türü üretilmektedir. Atmosferik basınç

soğuk plazma jetleri için günlük hayatımıza giren soğuk ateş tabirini kullanabiliriz. Ateşin yakıcı etkisinden ziyade kimyasal değişim üreten mekanizma günlük hayatımızda yenilikler getirmiştir. Örneğin damarların tıkanık bölgelerini tarayan mikro kameralar bir insanda kullanıldıktan sonra başka bir insan da kullanılmadan önce steril edilmelidir. Ancak bu kameralar çok hassas polimer bazlı ürünler olduğu için sıcaklık etkisi ile steril edilmeleri mümkün değildir. Bu nedenle bu şekilde hassas maddelere soğuk plazma jetleri uygulanabilir. Soğuk plazma jetler hassas materyal işlemede kullanılabileceği gibi canlılar üzerinde de uygulanması söz konusu olabilecektir. Bu nedenle atmosferik basınçta özellikle soğuk plazma üretmek aslında insanlık tarihi açısından önemli bir noktadır. Çünkü evrenin % 99' unu oluşturan plazma ilk defa insan tenine dokunacaktır. Böylece soğuk plazma ile canlılar üzerinde uygulamalar yapılabilecektir. Şimdiye kadar atmosferik basınç plazmaları sterilizasyon, diş çürüğü tedavisi, mantar tedavisi, bit öldürülmesi, akne tedavisi, kanser tedavisi gibi birçok uygulamada kullanılmıştır.

Atmosferik basınçta soğuk plazma jet üretimi çok farklı tekniklerde yapılmaktadır. Kullanılan sistem dizaynı, kullanılan gaz, kullanılan güç kaynağı, üretilen plazma türüne göre birçok sınıflandırma yapılabilir. Bu çalışmada atmosferik basınç plazma jetleri kullanılan güç kaynaklarına göre sınıflandırılmıştır. Sonraki bölümlerde kullanılan güç kaynağına göre atmosferik basınç soğuk plazma jetler açıklanmıştır. Son 20 yıl içinde özellikle son 10 yıl içerisinde üretilen sistemler özellikle seçilmiştir.

4.1. Puls DC Plazma Jetler

Atmosferik basınç soğuk plazma jeti üretmek için DC voltaj kullanılabilir. DC elektrik voltajı ile atmosferik basınçta plazma üretmek istendiğinde, yüksek akım çeken aynı zamanda nispeten sıcak plazma olan ark deşarja geçiş söz konusu olabilir. Örneğin; “plazma torchlar” DC voltaj ile atmosferik basınçta ark plazma

üretmektedirler. Aynı zamanda Dudek ve ekibi yalnızca gaz üzerine DC voltaj uygulayarak atmosferik basınç soğuk plazma jeti üretmeye çalışmışlardır. Ancak 26 °C ile 750 °C arasında atmosferik basınç plazma jet üretebilmişlerdir (Bibinov et al., 2007). Atmosferik basınç gibi yüksek basınçlarda bu problemten kurtulmanın yolu, katot elektrotundan ikincil elektron emisyonunu ve termal emisyonu engellemektir. Özellikle ark deşarj gibi plazmalarda elektrotlardan termal elektron emisyonu gerçekleşmesi plazmayı oldukça ısıtmaktadır. Bu nedenle DC elektrik voltajı ile özellikle atmosferik basınçta soğuk plazma üretebilmek için iki çözüm söz konusudur. Uygulanan DC voltaj puls olarak uygulanmalıdır ya da elektrotlardan biri veya ikisi bir dielektrik malzeme ile kaplanmalıdır.

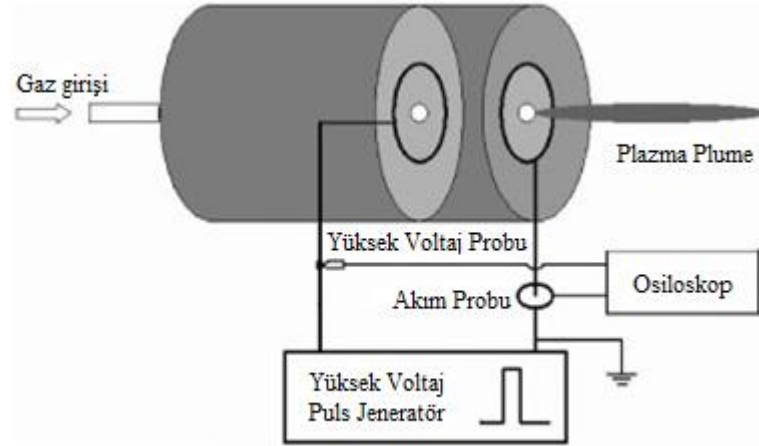
Atmosferik basınçta DC elektrik voltaj yerine puls DC elektrik voltaj uygulanmasının diğer önemli avantajı; plazma soğuk kaldığı halde çarpışma sayısının arttırılabilmesidir. Bilindiği gibi puls voltaj güç kaynağı belirli aralıklarla elektrotlar arasına voltaj uygular. Örneğin bir gaza 200 ns süresince 5.000 V uygulanır daha sonra 100 ns beklenir tekrar 200 ns boyunca 5000 V uygulanır. Ancak DC deşarjda ise gaza sürekli 5.000 V uygulanır. Voltaj sürekli uygulandığında elektronlar ve iyonlar elektrotlara ulaşır. Bundan dolayı bu yüklü parçacıklar ikincil elektron emisyonu ve termal emisyon ile plazmanın yüksek akım çekmesine ve dolayısıyla ısınmasına neden olurlar. Puls voltaj uygulandığında voltajın bekleme sürelerinde yeniden birleşme (re-kombinasyon) işlemleri gerçekleşerek plazma içinde yüklü parçacık sayısı azalır. Bu nedenle plazma yüksek akım çekemez ve dolayısıyla plazma ısınmaz.

Elektrotların dielektrik ile kaplanması da benzer şekilde plazmanın ısınmasını engeller. Bu durumda elektrotlar bir dielektrik malzeme ile kaplı olduğu için katoda gelen pozitif iyonlar katottan ikincil elektron emisyonu ile elektron sökemez. Dolayısıyla dielektrik bariyer deşarj dediğimiz türde plazma oluşur ve plazma yalnızca plazma içindeki çarpışmalardan yüklü parçacık üretebildiği için çok yüksek akım çekemez ve dolayısıyla ısınmaz.

Puls DC voltaj kullanılarak atmosferik basınçta soğuk plazma üreten sistemler, elektrotlar dizaynı değiştirilerek farklı sistemler olarak karşımıza çıkmaktadırlar. Aşağıda, literatürlerde karşılaşılan farklı elektrot dizaynlarına sahip puls DC jetler kısaca verilmiştir. Burada kullanılan sistemlerin hepsi atmosferik şartlarda üretildiği için üretilen plazmalar, gönderilen gazın ve atmosfer içinde bulunan moleküllerin plazması olmaktadır. Bununla birlikte üretilen plazmanın özelliği uygulanan voltajın şiddeti, gönderilen gazın cinsi ve gaz akış hızı, elektrotlar arası mesafe gibi cihaz parametreleri ile ayarlanabilmektedir.

4.1.1. Dielektrik Kaplı Yüzük Elektrotlar

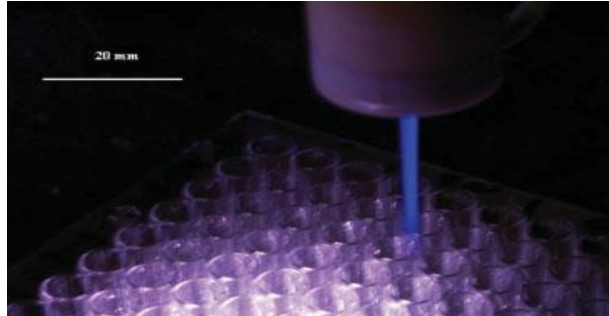
Mounir Laroussi tarafından üretilen ve ‘plasma pencil’ olarak adlandırılan sistemde; ince, yüzük şeklinde iki bakır elektrot, alümina (Al_2O_3) disk ile kaplanmıştır. Şekil 4.1.’de sistem şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 4.1. Laroussi ve Lu tarafından geliştirilen plazma jetin şematik gösterimi (Laroussi and Lu, 2005).

Sistemde kullanılan alümina diskler 2.5 cm çapındadırlar ve merkezlerinde 3 mm çaplı iki delik vardır. İçlerinde bakır elektrotlar bulunan bu alümina diskler, uzunca bir seramik borunun içerisine karşılıklı olarak yerleştirilmiştir. Bu 3 mm çaplı deliklerin birisinden plazması üretilecek gaz girerken, diğerinden plazma çıkmaktadır. Şekil 4.1.' de görüldüğü gibi voltajın uygulandığı elektrotların çapı, alümina diskin çapından küçük ancak merkezdeki deliklerin çapından büyüktür. Genelde bu alümina kaplı elektrotlar arası mesafe 0.3 cm ile 1 cm arası değişmektedir. Bu sistemde elektrotlar arasına uygulanan puls voltaj 0-10 kV arası değişirken, puls genişliği 200 ns ile dc (sürekli) arası değişmektedir. Frekans, 10 kHz' e kadar çıkmaktadır. Puls voltajın yükseliş ve düşüş zamanları ise 60 ns' dir. Şekil 4.3. de sistem için kullanılan puls voltajın osiloskop çıktısı verilmiştir (Laroussi and Lu, 2005).

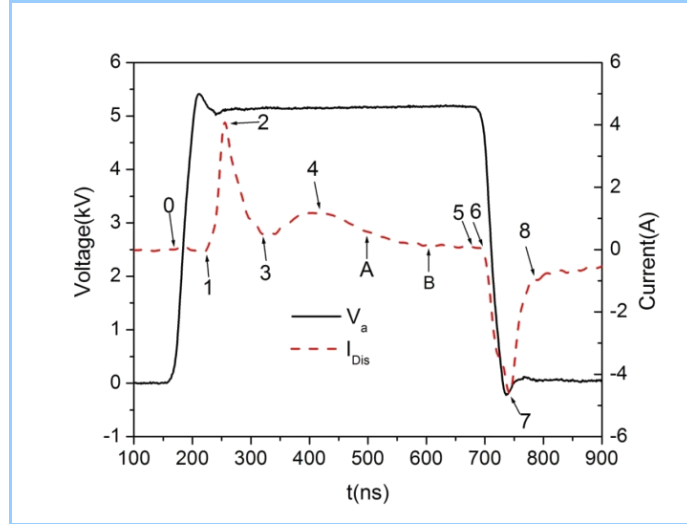
Şekil 4.1.' de görüldüğü gibi elektrotların yerleştirildiği 10-15 cm uzunluğundaki seramik borunun giriş kısmından He, Ar, O₂ ve hava gibi gazlar gönderildikten sonra elektrotlara 5-10 kV puls DC voltaj uygulandığı zaman elektrotlar arasında puls DC plazma oluşur. Dışarıdan gönderilen gaz sürekli aktığı için elektrotlar arasında üretilen plazma, uçtaki delikten dışarıya yani atmosferik oda koşullarına çıkar. Şekil 4.2.' de bu şekilde üretilen plazmanın fotoğrafı görülmektedir.



Şekil 4.2. Bir uygulama esnasında dielektrik kaplı yüzük elektrot kullanan plazma jet sistemi (Plasma Pencil) (Laroussi et al., 2006).

Elektrotlar arası uzaydan atmosferik oda koşullarına çıkan plazma (plasma plume), 3 mm çapındaki elektrotların merkezindeki deliğin çapına yakın kalınlıktadır ve uzunluğu 5 cm' e kadar ulaşabilmektedir. Elektrotlar arasından dışarı çıkan plazmanın sıcaklığı 290 K yani yaklaşık 17 °C civarında ölçülmüştür (Laroussi and Lu, 2005).

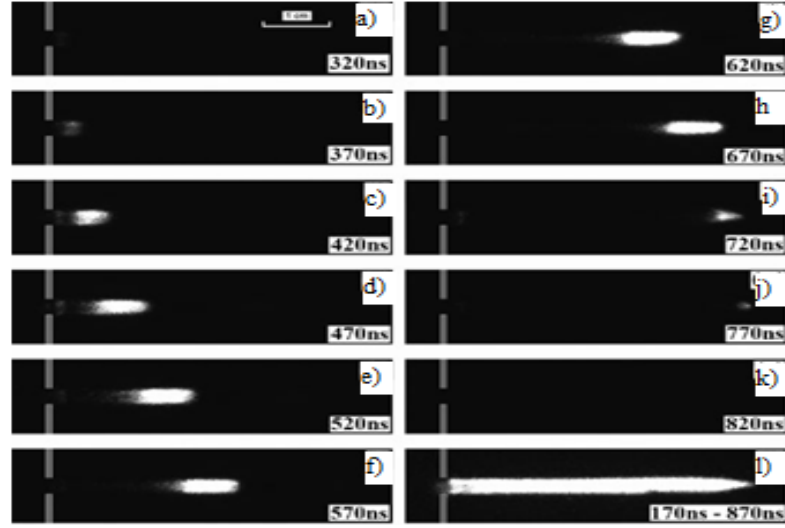
Şekil 4.3.' de sistem için kullanılan puls voltajın osiloskop çıktısı ile birlikte üretilen plazmanın akım – voltaj karakteristiği de verilmiştir.



Şekil 4.3. Yüzük elektrot kullanan atmosferik basınç puls plazma jeti üretmek için kullanılan puls voltaj ve üretilen plazmanın akım – voltaj karakteristiği (Lu and Laroussi, 2006).

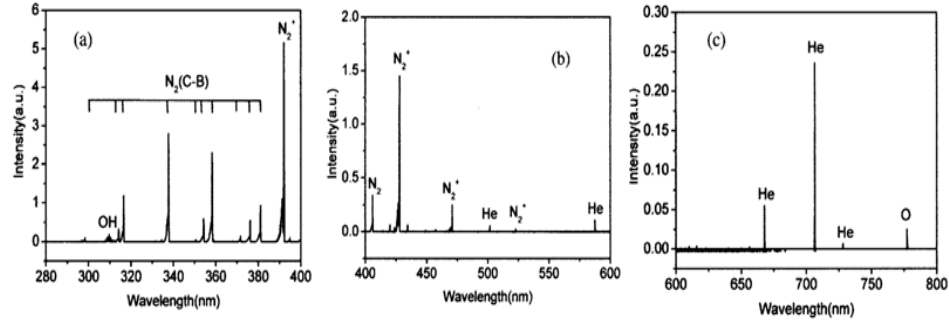
Şekil 4.3.' ten görüldüğü gibi tek voltaj pulsuna karşılık gelen üç adet akım vardır. Bu üç akım piklerinin birincisi pulsun uygulanması ve plazmanın oluşumuyla, ikincisi plazmanın dışarıya çıkmasıyla, negatif yöndeki üçüncü ise voltajın düşmesi yani plazmanın sönmelenmesi ile ilişkilidir. Bu sistemde elektrotlar arasında üretilip atmosferik oda koşullarına çıkan plazma çok farklı bir plazma

türüdür. Şekil 4.4.' te çok yüksek hızda çekim yapabilen fotoğraf makinesi (ICCD kamera) ile bu plazmanın fotoğrafı verilmiştir.



Şekil 4.4. Yüzük elektrot kullanan atmosferik puls plazma jeti tarafından üretilen plazma atmaları (Lu and Laroussi, 2006).

Şekil 4.4.' ten görüldüğü gibi atmosferik ortama çıkan plazma (Şekil 4.4.1) aslında hızları saniyede 100 km' yi bulan plazma atmalarının (Şekil 4.4.a-j) bir bileşkesidir. Burada elektrotlar arasından çıkan plazmanın, önüne gelen hava ortamını gücü yettiği kadar iyonlaştırdığı düşünülmektedir. Yani, atmosferik ortama çıkan yaklaşık 5 cm uzunluğundaki plazma aslında, elektrotlar arasında üretilen plazmanın gönderilen gazla itilmesi sonucu değil, çıkan her bir plazma atmasının önündeki hava ortamını iyonlaştırarak yeniden bir plazma üretmesi prensibi ile oluşmaktadır. Plazma kalem (Plasma Pencil) ile üretilen yaklaşık 17 °C sıcaklığa sahip atmosferik basınç plazma jeti, bu özelliğinden dolayı bambaşka ve yeni bir plazma türü olarak da karşımıza çıkmaktadır. Oluşan plazma, sürekli bir plazma değil, plazma parçacıklarından oluşan kesikli, yeni bir plazma türüdür. Plazma kaleme ait optik emisyon spektroskopisi Şekil 4.5.' te verilmiştir.



Şekil. 4.5. Plazma kalemin optik emisyon spektroskopisi (Laroussi and Lu, 2005).

Şekil 4.5.' ten görüldüğü gibi plazmanın üretilmesi için kullanılan He gazının yanında havanın bileşenleri olan gazlar da plazma içinde bulunmaktadır.

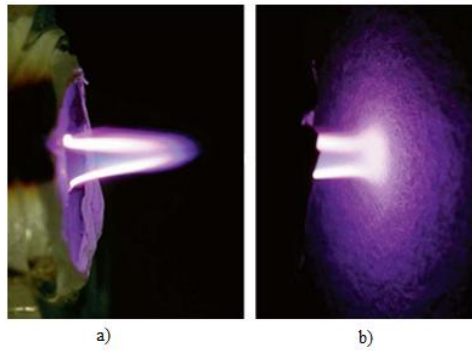
4.1.2. Çift Metal Elektrot

Yixiang Duan ve ekibi atmosferik basınçta DC güç kaynağı kullanarak glow deşarj üreten 'plasma brush' olarak adlandırılan bir cihaz tasarladılar ve bunu geliştirdiler. Bu dizaynda deşarj odası olarak ufak çaplı bir teflon tüp kullanılmış, düzlemsel iki elektrot yüz yüze bakacak şekilde bu teflon tüpün içine yerleştirilmiştir. Bu iki elektrotta, hem sürekli hem puls modda DC elektrik alan uygulanarak glow deşarj oluşturulmuştur. Katodik bölgede elektrik alan dalgalanmalarını/değişimlerini ve deşarj içinden geçen elektrik akımını kontrol etmek yani plazmanın arka dönüşmesini engellemek için balast direnç kullanılmıştır. Ayrıca kullanılan gazların gaz akış hızları kontrol edilebilmektedir. Bu sistemle argon, helyum, nitrojen hatta hava kullanılarak deşarj odası içerisinde puls DC glow deşarj üretilmiştir. Şekil 4.6.' da deşarj odası içerisinde oluşan argon glow deşarj plazması görülmektedir.



Şekil 4.6. Deşarj odası içerisinde üretilen argon glow deşarj (Duan et al., 2005).

Deşarj odası içerisinde geçen yüksek gaz akışı deşarj içindeki enerji iletimleri nedeniyle oluşan termal kararsızlıkları da gidermekte/sönümlemektedir. Bu sistem ile elektrotlar arasından atmosferik koşullara çıkarılan plazma, ‘‘Plasma Brush’’ olarak adlandırılmıştır. Sistemden dışarı çıkan plazma boyutları; gaz akış hızı, DC güç girişi ve deşarj odası dizaynı ile değiştirilebilir. Şekil 4.7.’ de puls DC argon plazmasının görüntüsü (a) ve bir obje ile temas hali (b) verilmiştir. Burada üretilen plazma: 1500 sccm argon, 1500 V puls DC voltaj ve 11 mA deşarj akımı ile oluşmuştur (Duan et al., 2005).



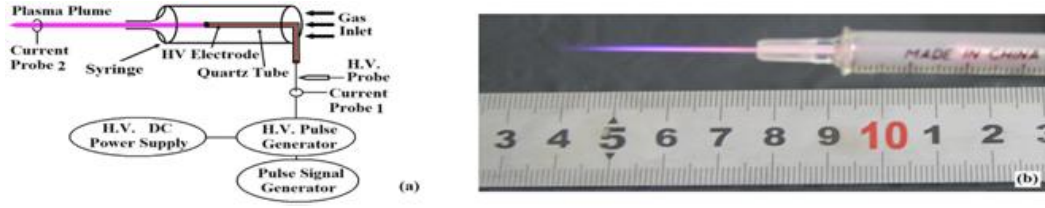
Şekil 4.7. a) DC argon ‘‘Plasma Brush’’ görüntüsü. b) argon ‘‘Plasma Brush’’ ın kağıt üzerine temas hali (Duan et al., 2005).

Bu sistemde atmosferik basınçta plazma üretmek için gerekli olan elektrik voltajı 100 volttan 1000 volta kadar değişirken deşarj içinden geçen elektrik akımı yaklaşık olarak mili amper seviyesindedir. Bu nedenle, glow deşarj üretirken harcanan güç birkaç watt' tan onlarca watt' a kadar çıkabilir. Bu plazma sistemindeki güç tüketimi puls mod kullanıldığı takdirde daha aza indirgenebilir ve bu şekilde de kararlı glow deşarj üretilebilir. Bu şekilde, çok düşük güç tüketimli atmosferik plazma kaynakları, taşınabilir ve bireysel uygulamalara izin verdiği için önemli avantajlar sağlamaktadır.

16.5 W elektrik gücünde argon plazmasının sıcaklığı termoçift termometre ile ölçülerek bulunmuştur. 1000 sccm ile 3500 sccm arası değişen argon akış hızı ile plazma jetin gaz sıcaklığı 85 °C'den 40 °C' ye değişmektedir. Bu değerler atmosferik plazma kaynakları için oldukça düşük sıcaklık değerleridir. Gaz akış hızının artmasıyla jetin sıcaklığı düşer ve oda sıcaklığına yaklaşır (Duan et al., 2005).

4.1.3. Dielektrik Kaplı Tek Çubuk Elektrot

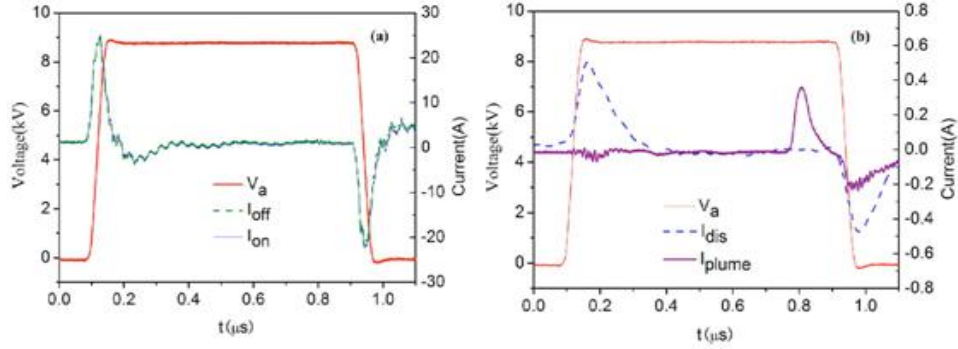
Özel bir dizayna sahip olan tek elektrotlu plazma jet cihazı nano saniye puls DC voltaj kullanılarak XinPei Lu ve ekibi tarafından geliştirilmiştir. Uzunluğu 4 cm' ye kadar çıkabilen plazma termodinamik dengede değildir (non equilibrium). Plazma akımı birkaç yüz mili amper değerinde ölçülmüştür. Şekil 4.8.' de cihazın şematik gösterimi verilmiştir.



Şekil 4.8. a) Şematik deney düzeneği. b) Plazma jetin bir fotoğrafı (Lu et al., 2008).

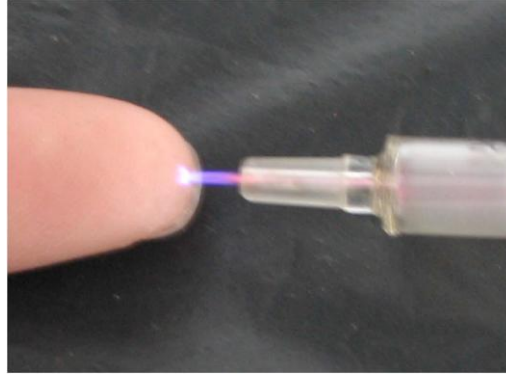
Sistemde uygulanan voltaj 9 kV, frekans 1 kHz ve puls genişliği 800 ns' dir. Şekil 4.8. (a)' da görüldüğü gibi çapı 2 mm olan bakır telden yapılmış yüksek voltaj elektrotu, 4 cm uzunluğundaki bir ucu kapalı kuvars tüpün içine yerleştirilmiştir. Kuvars tüpün iç ve dış çapı sırasıyla 2 ve 4 mm' dir. İçinde yüksek voltaj elektrotu bulunan kuvars tüp, içi boş bir şiringanın çıkışında gömülmüştür. İçi boş çıkış haznesinin çapı 6 mm, şiringa ağzının çapı ise yaklaşık 1.2 mm' dir. Yüksek voltaj elektrotu ve şiringa ağzı arasındaki mesafe 1 cm' dir. Akış hızı 2 dk^{-1} olan helyum boş çıkış haznesinden gönderildiğinde ve 10 kV, 10 kHz frekanslı, puls genişliği 200 ns' den DC' ye kadar değişebilen puls DC voltaj uygulandığında, Şekil 4.8. (b)' de görüldüğü gibi homojen plazma kuvars tüpün ucunda üretilir ve atmosferik koşullara çıkar (Lu et al., 2008). Çıkan plazmanın uzunluğu gaz akış hızı ve uygulanan voltaj (büyüklüğü, frekansı ve puls genişliği) ile ayarlanabilir/değiştirilebilir. Helyumun yanı sıra, argon, nitrojen ve hatta hava bile gaz olarak kullanılabilir.

Cihaz tek elektrota sahip olduğundan deşarj, yüksek voltaj elektrotu ile hava arasında üretilir. Deşarjın akım-voltaj karakteristikleri Şekil 4.9.' da verilmiştir.



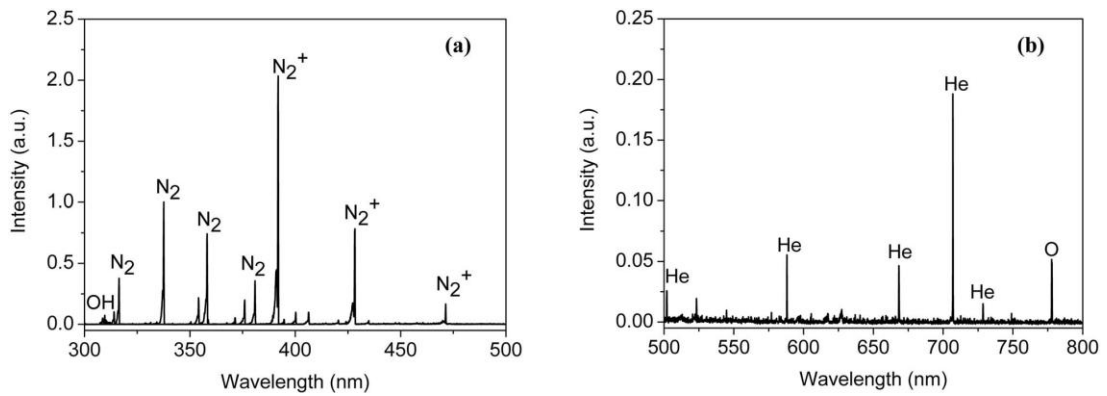
Şekil 4.9. a) Uygulanan voltaj (V_a), toplam akım (I_{on}) ve deplasman akımının (I_{off}) zamana bağlı grafiği b) Uygulanan voltaj (V_a), deşarj akımı (I_{dis}) ve plazma akımının (I_{plume}) zamana bağlı grafiği (Lu et al., 2008).

Şekil 4.9. (a)' da uygulanan voltaj V_a , toplam akım I_{on} (plazma varken) ve deplasman akımı I_{off} (He akışı yok, plazma yokken) gösterilmiştir. Şekil 4.9. (a)' da görüldüğü gibi I_{on} ve I_{off} arasındaki fark çok küçüktür. Şekil 4.9. (b)' de ise uygulanan voltaj V_a ve esas deşarj akımı I_{dis} verilmiştir. Uygulanan puls voltajı başına 2 belirgin deşarj akımı gözlenmiştir. İkinci deşarj, birinci deşarj boyunca kuvars tüpün yüzeyinde birikmiş yükler tarafından oluşturulan voltaj nedeniyle oluşur. Bu davranış, puls DBD deşarjlarda gözlenen davranış ile benzerdir. Bu sistem ile üretilen plazma jetin sıcaklığı neredeyse oda sıcaklığındadır. Bu durum Şekil 4.10.' da görüldüğü gibi jeti bir parmağa dokundurarak kolaylıkla doğrulanabilir. Parmağın hiçbir bölgesinde sıcaklık ya da elektriksel şok hissi meydana gelmemektedir.



Şekil 4.10. İnsan parmağının plazma jet ile kontak hali (Lu et al., 2008).

Plazma jet tarafından üretilen çeşitli reaktif parçacıkları teşhis etmek için optik emisyon spektroskopisi (OES) alınmıştır. Spektrumda dalga boyu ya da bant şekilleri uyarılmış türlerin karakteristiklerini verir. Şekil 4.11.' de 300 nm' den 800 nm' ye kadar emisyon spektroskopisi verilmiştir. Plazma jet içerisindeki uyarılmış O, OH, N₂, N₂⁺ ve He varlığı rahatça görülebilmektedir. Bilindiği gibi O ve OH oldukça aktif türlerdir. Bu türler, termodinamik dengede olmayan atmosferik basınç plazmalarının biyomedikal uygulamalarında oldukça önemli rol oynamaktadırlar.

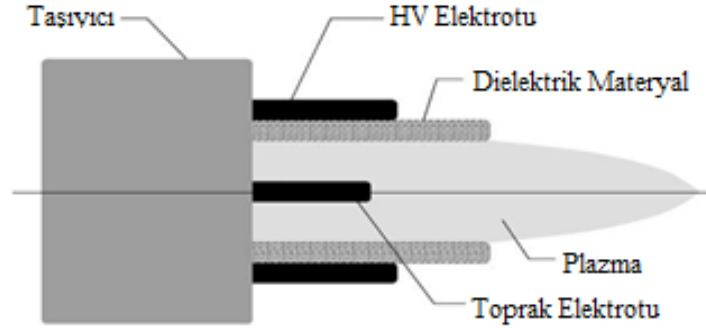


Şekil 4.11. a) 300-500 nm' den b) 500-800 nm' ye plazma jetin emisyon spektroskopisi (Lu et al., 2008).

4.1.4. Çubuk-Yüzük Elektrot

Puls DC voltaj uygulanarak üretilen plazma jetlerde en yaygın elektrot dizaynı; toprak elektrodu olan bir çubuk, bir dielektrik tüp içine başka bir dielektrik malzeme yardımıyla sabitlenmekte ve bu dielektrik tüpün dışına yüzük şeklinde, voltajın uygulandığı metal sarılmaktadır. Bu bölümde dielektrikle kaplanmamış çubuk toprak elektrodu ve yüzük şeklinde puls DC voltajın uygulandığı elektrot dizaynını kullanan sistemler incelenmiştir.

Bir dielektrik tüp içine sabitlenmiş ve bir dielektrikle kaplanmamış çubuk toprak elektrotu ve yüzük şeklinde voltaj elektrotu kullanan sistemlere S. Forster ve ekibinin sistemi örnek verilebilir. S. Förster ve ekibi tarafından geliştirilen sistem şematik olarak Şekil 4.12.' de verilmiştir.

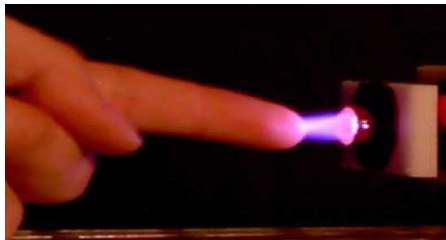


Şekil 4.12. Dielektrikle kaplanmamış çubuk elektrot ve yüzük elektrot kullanan atmosferik basınç plazma jetin şematik gösterimi (Förster et al., 2005).

Bu sistemde çubuk şeklindeki toprak elektrotu dielektrik tüpün tam ortasına yerleştirilmiştir. Yüzük şeklindeki yüksek voltaj elektrotu tüpün dışına sarılmıştır. Elektrotlar pirinçtendir ve 2 mm kalınlığındaki dielektrik tüp silikadan yapılmıştır. Toprak elektrotu ve üzerinde yüksek voltaj elektrotu bulunan dielektrik materyal

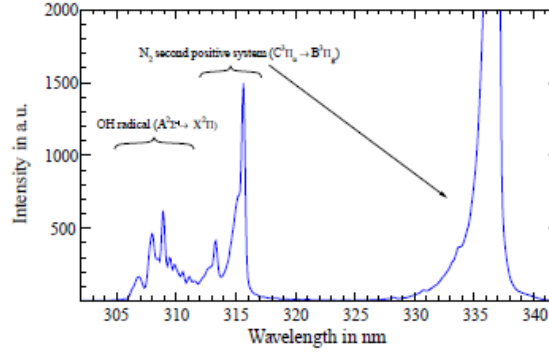
arasındaki uzaklık 0.75 mm' dir. Puls genişliği 600 ns, frekans yaklaşık 25 kHz, uygulanan voltaj 15 kV ve giriş gücü ise 2 W civarındadır. Gaz akış hızı 250 L/h civarındadır (Förster et al., 2005).

Tüp dışına yani atmosfer koşullarına çıkan plazma, elektrotlara uygulanan puls DC yüksek voltaj ile elektrotlar arasında oluşan dielektrik bariyer deşarj plazmasıdır. Bu sistemde kullanılan plazma jeti He, Ar ya da bu gazların farklı gazlarla olan karışımı ve havayı kullanarak üretmek mümkündür. Şekil 4.13.' de görüldüğü gibi üretilen plazma insan parmağına zarar vermeyecek kadar düşük sıcaklıktadır. Burada ayrıca plazmanın taşıdığı akım da düşük değerde olduğu için insan üzerinde bir zararı söz konusu değildir. Plazma akışı tüp dışında yaklaşık 20 mm uzunluğa kadar ulaşmaktadır ve homojen, silindirik bir şekle sahiptir. Maksimum elektron sıcaklığı yaklaşık 1.0 eV (11.600 K) iken gaz sıcaklığı 100 °C' nin altındadır (Förster et al., 2005).



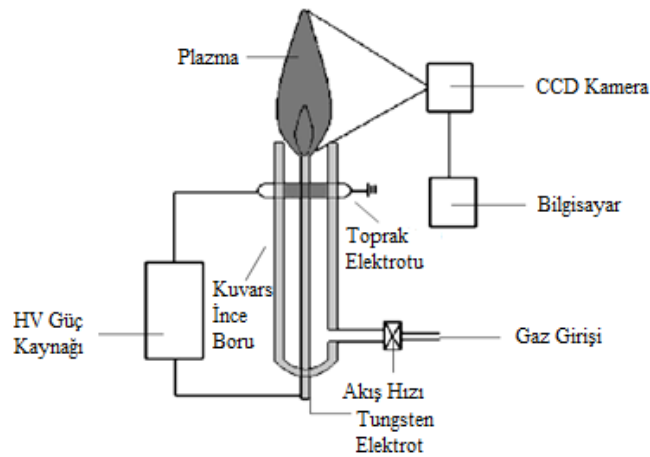
Şekil 4.13. Soğuk ve düşük voltaja sahip plazma jeti (Förster et al., 2005).

Uyarılmış Ar gazının yanı sıra bu sistemde üretilen plazma jeti hava ortamından gelen bileşenleri de içerir. Nitrojenin uyarılmış molekülleri ve OH radikalleri Şekil 4.14.' de görülebilir. Ayrıca kullanılan ölçüm cihazı tarafından ozon da tespit edilmiştir.



Şekil 4.14. Hava ortamından gelen kararsız N_2 ve OH radikalleri bulunan argon plazma jetin spektrumu (Förster et al., 2005).

Yukarıda açıklanan sisteme benzer bir başka cihaz da J. Zhang tarafından üretilmiştir. Bu cihazın S. Förster' in sistemden en önemli farkı içteki çubuk elektrotun yüksek voltaj, dıştaki yüzük elektrotun da toprak elektrotu olarak kullanılmasıdır. Ayrıca dielektrik tüp kuvars ince borudan yapılmış ve içteki elektrot tungsten çubuk elektrottur. Şekil 4.15.' de çubuk-yüzük elektrot kullanılan plazma jet sistemi şematik bir biçimde gösterilmiştir.



Şekil 4.15. Plazma jetin şematik gösterimi (Zhang et al., 2005).

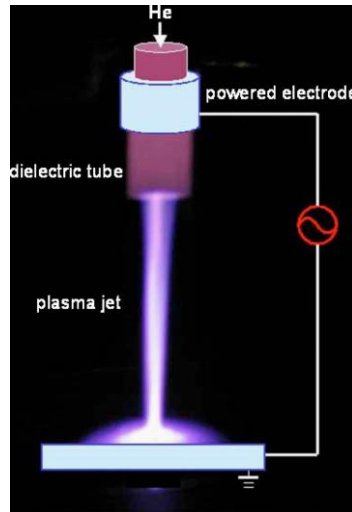
İçte bulunan çubuk elektrot yüksek voltaj kaynağına bağlıdır ve dıştaki yüzük elektrot topraklanmıştır. Cihaz, frekansı 15 kHz' de sabitlenmiş ve voltaj genişliği 1 kV ile 15 kV arası değişebilen yüksek voltaj kaynağına bağlıdır (Zhang et al., 2005). Ar, He ve N₂ jet oluşumunda kullanılacak gazlar olarak seçilmiştir ancak en uzun plazma çıkışı (44 mm) 20 m.s⁻¹ gaz akış hızında helyum kullanıldığında (Şekil 4.16.) elde edilmiştir.



Şekil 4.16. 20 m/s hızında He jet görüntüsü örneği (Zhang et al., 2005).

4.1.5. Ayrık Elektrot

Puls DC voltaj kullanarak atmosferik basınç soğuk plazma üreten diğer bir sistem J. L. Walsh ve ekibi tarafından dizayn edilmiştir. Bu cihaz, etrafı bakır yüzük elektrot ile sarılmış 6 cm uzunluğundaki bir dielektrik tüpten ve bu tüpün gaz çıkış noktasından 3-5 cm uzağa yerleştirilmiş, paslanmaz çelikten yapılmış bir dielektrikle de kaplı olarak kullanılabilen toprak elektrotundan oluşmaktadır. Şekil 4.17.' de ayrık elektrot kullanılan ve puls DC voltaj uygulanarak üretilen plazma jetin elektrot dizaynı verilmiştir.

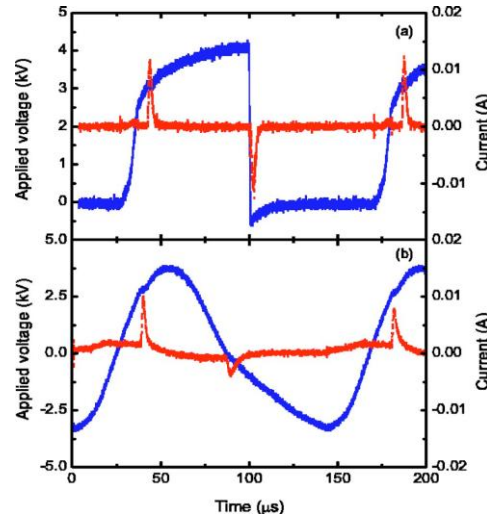


Şekil 4.17. Ayırık elektrot kullanılan atmosferik soğuk plazma jeti (Walsh et al., 2006).

Burada kullanılan sistemde gaz akış hızı 5 slm olan helyum, dielektrik tüp içerisine gönderilmektedir. Bakır elektrota uygulanan yüksek voltaj tarafından toprak elektrotuna kadar uzanan gönderilen gazın atmosferik koşullarda plazması oluşturulur. Oluşan plazma oldukça kararlıdır ve bu kararlılığını saatlerce sürdürebilir.

Bu sistemde kullanılan güç kaynağı değerleri frekansı 1-10 kHz arasında değişebilen genellikle 7 kHz civarında puls voltaj kaynağıdır. Kullanılan voltajın genliği 71 μ s ' dir (Walsh et al., 2006).

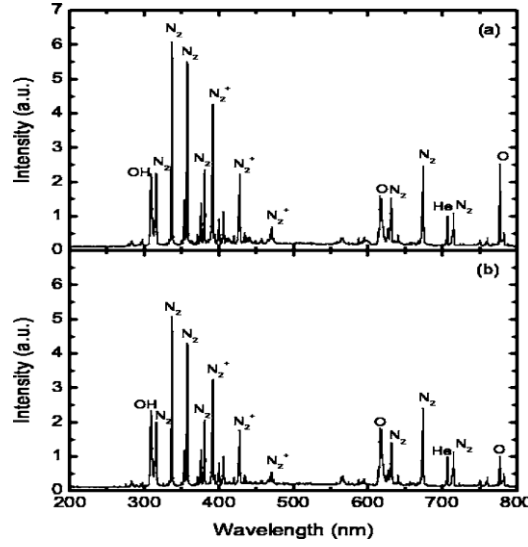
Bu sistem ile üretilen plazma jetin deşarj akım - voltaj karakteristikleri Şekil 4.18.' de verilmiştir.



Şekil 4.18. APGD jetin uygulanan voltaj ve deşarj akımı (Walsh et al., 2006).

Uygulanan Puls voltajın çıkış süresi $30 \mu\text{s}$ ve düşüş süresi 100 ns ' dir. Şekil 4.18.' de görüldüğü gibi voltaj çıkışı sırasında pik akımı 12.1 mA ve voltaj düşümü sırasında 12.9 mA ' dir. Ortalama güç 74 mW civarındadır (Walsh et al., 2006).

Gaz sıcaklığı 290 ile 350 K arasında ölçülmüştür. Plazma içindeki çeşitli uyarılmış türleri tespit etmek amacıyla optik emisyon spektroskopisi (Şekil 4.19.) kullanılmıştır. Genel olarak üretilen plazmada atomik oksijen, OH, çeşitli nitrojen türleri gözlenmiştir.



Şekil 4.19. 200-800 nm arası optik emisyon spektroskopisi a) pulslu çıkış b) sinüzoidal çıkış (Walsh et al., 2006).

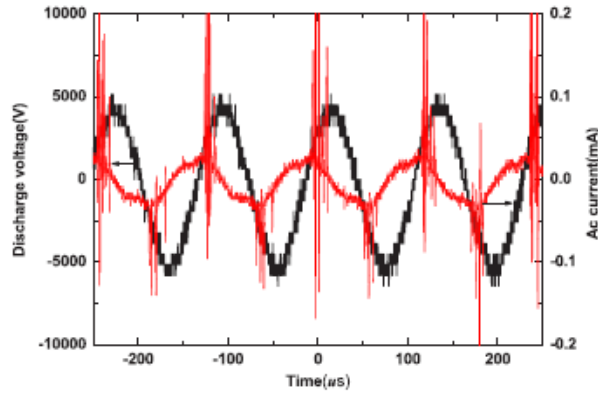
4.2. Düşük Frekans (kHz) AC Plazma Jetler

DC plazma jetlerin hem ekonomi hem de kullanım açısından kolaylıklar sağlamsına rağmen bazı dezavantajları da vardır. Örneğin elektrotlar arasında üretilen plazma parçacıkları, elektrotlarla etkileşim içinde oldukları için plazma içine elektrot materyalleri karışmaktadır. Bu nedenle üretilen plazma, yalnız gönderilen gazın atomlarından oluşmamakta aynı zamanda elektrot materyali atomlarını da içermektedir. Bu süreçte özellikle katoda ulaşan pozitif yüklü yüksek enerjili iyonlar, katottan ikincil elektron emisyonu ve daha sonra saçırma denilen katottan materyal sökümü meydana gelir. Elektrotlardan sökülen bu materyaller plazma içine karıştığında plazmanın saflığı bozulmaktadır ve özellikle hassas uygulama alanlarında sorun çıkmaktadır. Ayrıca sürekli elektrot kaybına uğrayan plazmada kararlılık sorunu olmaktadır. Bu sorunlardan kurtulmanın en pratik yolu, elektrotları bir yalıtkanla kaplamaktır. Ancak bu durumda plazma içinde yüklü parçacıklar elektrotlara akacak yani elektronlar ve negatif yüklü iyonlar anoda doğru, pozitif iyonlar ise katoda doğru uygulanan DC voltajın elektrik alan etkisi ile akacaklardır.

Elektrotlar bir yalıtkan ile kaplı olduğu zaman bu yüklü parçacıklar katoda ve anoda akıp plazma akımını oluşturmamaları için yalıtkan üzerinde birikmeye başlayacaklardır. Bu durumda, elektrotlar arasında belirli bir süre sonra uygulanan DC voltajın oluşturduğu elektrik alana zıt yönde yeni bir elektrik alan oluşacaktır. Yüklü parçacıkların elektrotlarda birikmesiyle oluşturdukları bu yeni elektrik alan, DC elektrik voltajı tarafından üretilen elektrik alana eşit olduğunda elektrotlar arasında toplam elektrik alan sıfır olacaktır. Böylece elektrotlar arasında plazma içindeki yüklü parçacıkları hızlandıracak ve iyonlaştıracak elektrik alan olmadığı için plazma sönecektir. Bu nedenle elektrotları yalıtkanla kaplı bir plazma sisteminde kararlı bir plazma üretmek için ya DC voltaj puls olarak uygulanacak ya da voltaj AC olarak kullanılacaktır. Bilindiği gibi AC güç kaynakları DC güç kaynaklarından farklı olarak voltajı belirli sürelerde elektrotlar arasında yönü ve şiddeti değiştirerek uygular. Bu nedenle AC güç kaynaklarının voltajı uygulama frekansı çok önemlidir. Bu frekans plazma uygulamalarında genelde kHz, MHz, ve GHz mertebelerinde olmaktadır. Bir önceki bölümde puls DC plazma jetler açıklanmıştır. Bu bölümde ise AC plazma jetler açıklanacaktır. AC plazma jetleri kHz mertebesinde olan düşük frekanslı plazma jetler ve MHz – GHz mertebesinde frekansa sahip yüksek frekans plazma jetler olarak iki bölümde incelenecektir. Burada kullanılan güç kaynağının frekansının aynı zamanda üretilen plazma frekansına eşit olduğunun altını çizmeliyiz. Ancak adlandırmalar, kullanılan güç kaynaklarının frekanslarının genel bir kullanım olan elektromanyetik spektrumdaki frekans değerleri ile yapılmaktadır. Örneğin 13.56 MHz civarında frekans kullanan bir güç kaynağı ile üretilen plazma bu frekans aralığı elektromanyetik spektrumda radyo dalgalarına karşılık geldiği için radyo frekans (RF) plazmalar olarak adlandırılır. Bu mikrodalga plazmalar için de böyledir. GHz mertebesindeki frekanslar elektromanyetik spektrumda mikrodalgalar olarak adlandırıldığı için GHz mertebesinde frekansa sahip güç kaynağı kullanılarak üretilen plazmalar da mikrodalga (MW) plazmalar olarak adlandırılır.

Güç kaynağına bağlı, 4 mm çaplı, konik uçlu bakır çubuktan yapılmış iç elektrot, içteki tüpün merkezine yerleştirilmiştir. İç elektrotun konik ucu, plazma oluşumunu sağlamaktadır. İç elektrotun dış yüzeyi ve kuvars tüp arasındaki boşluk 2 mm' dir. Şekil 4.20. (b) atmosferik basınç argon glow deşarjının bir görüntüsüdür. Bu sistemde genel olarak argon akış hızı $0.8 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$ olup güç 45 W' tır. İki elektrot ta maksimum pik voltajı 30 kV ve ayarlanabilir frekansı 8 – 30 kHz olan AC güç kaynağına bağlıdır. Plazma jetin gaz sıcaklığı ise 320 K' den civarındadır (Chen et al., 2006).

Sıvı elektrot sistemi ile üretilen atmosferik basınç glow deşarjın tipik akım – voltaj değerleri Şekil 4.21.' de verilmiştir.

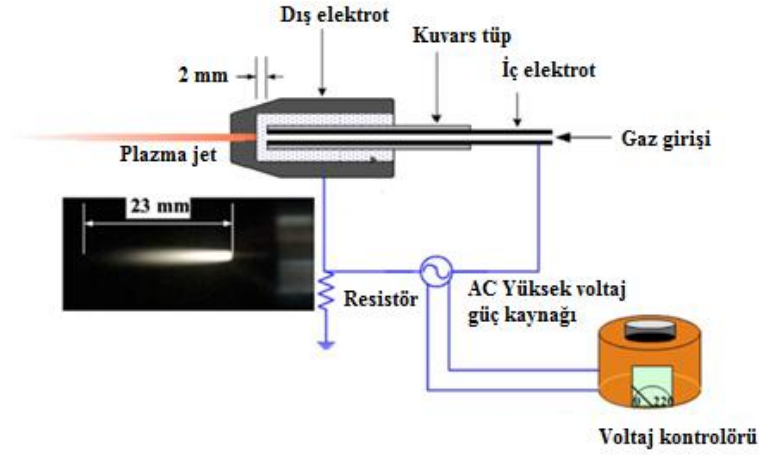


Şekil 4.21. Akış hızı $0.1 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$ olan argon için akım – voltaj karakteristiği (Chen et al., 2006).

4.2.2. Mikroplazma Jetler

Mikroplazma jetler genellikle μm ile mm boyutlarında olan plazma türleridir. Üretilen plazmanın özelliklerinden çok boyutları ile ilgili bir plazma türü

isimlendirmesidir. Koni elektrotlu mikrop plazma jet cihazının şematik sunumu Şekil 4.22.' de verilmiştir.

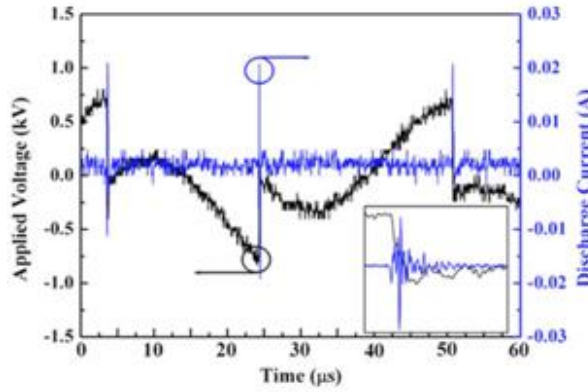


Şekil 4.22. Kalem şeklinde nitrojen mikrop plazma jet cihazının şematik ve gerçek görüntüsü (Hong et al., 2009).

Şekil 4.22.' de görüldüğü gibi AC güç kaynağı içte bulunan iğne şeklinde metal elektrot ve dışta bulunan koni şeklinde metal elektrota bağlıdır. Burada kullanılan AC güç kaynağı 20 kHz AC voltajı ayarlanabilir olarak vermektedir. İç elektrot paslanmaz çelikten yapılmış iç çapı 1.2 mm ve kalınlığı 0.2 mm olan tipik bir enjeksiyon iğnesidir ve dış çapı 3.2 mm olan kuvars tüp ile sıkıca kaplanmıştır. Şekil 4.22.' den de anlaşılabileceği gibi dış elektrot koni biçimindedir. Paslanmaz çelikten yapılmış konik elektrot A ve B olmak üzere 2 bölge olarak adlandırılmıştır. A bölgesinde mikrop plazma jet ateşlenir. B bölgesi kuvars tüp içine gömülü iç elektrotu kapsar. A bölgesi merkezinden delinmiştir ve delik 0.7 mm genişliğindedir. Mikrop plazma jet bu delikten çıkar. İç elektrotu kaplayan kuvars tüpü içeren B bölgesi 3.2 mm iç çapa sahiptir. Kuvars tüpün ucu A bölgesindeki dış elektrot ile kontak halindedir. Deşarj boşluğu yani plazmanın oluştuğu alan, kuvars tüp ve iç elektrot arasındaki mesafe ile ayarlanır. Genellikle yapılan çalışmalarda

deşarj boşluğu 1 mm civarındadır. Bu sistem ile plazma oluşturmak için nitrojen gazı iğneye gönderilir ve daha sonra 0.7 mm çapındaki dış elektrotun deliğinden çıkar. Nitrojen sırayla elektrotların ve dielektrik tüpün deliklerinden geçer ve AC yüksek voltaj uygulandıktan sonra elektrotların arası boşlukta plazma ateşlenir. Bu sistem ile 5 l/dk gaz akış hızında 3.2 cm' ye kadar atmosferik koşullara çıkan plazma oluşturulmuştur (Şekil 4.22.).

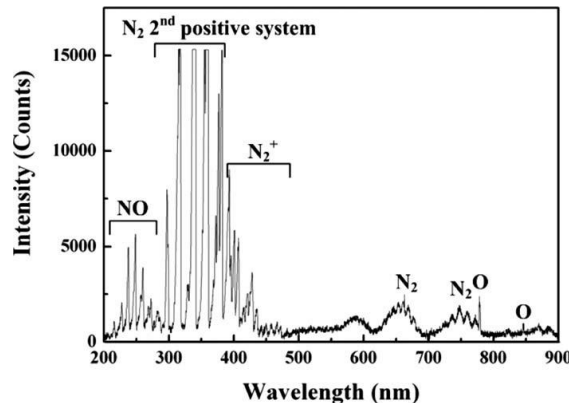
Şekil 4.23.' de $V_{\max} = 1.68$ kV voltaj ve 5 l/dk akış hızında üretilen mikrop plazma jetin akım voltaj karakteristiği verilmiştir. Şekil 4.23.' de görüldüğü gibi akım dalgasının, dielektrik bariyerdeşarjlarda olan her yarım periyotta bir büyük akım pikine dönüştüğü açıkça görülmektedir. Periyottan periyoda ortalama pik akımı 0.0204 A ve iki elektrot arasındaki orta düzlemde akım yoğunluğu 2.1 A/cm^2 dir. Genellikle kullanılan güç kaynağının frekans ise 60 Hz civarındadır (Hong et al., 2008).



Şekil 4.23. Mikrop plazma jetin tipik akım-voltaj karakteristiği (Hong et al., 2008).

Şekil 4.24.' te bu sistem ile üretilen nitrojen plazmasından elde edilen çeşitli uyarılmış plazma türlerini saptayan optik emisyon spektroskopisi verilmiştir. Emisyon spektroskopisinde uyarılmış nitrojen türleri baskındır. Bunlar içinde 300 –

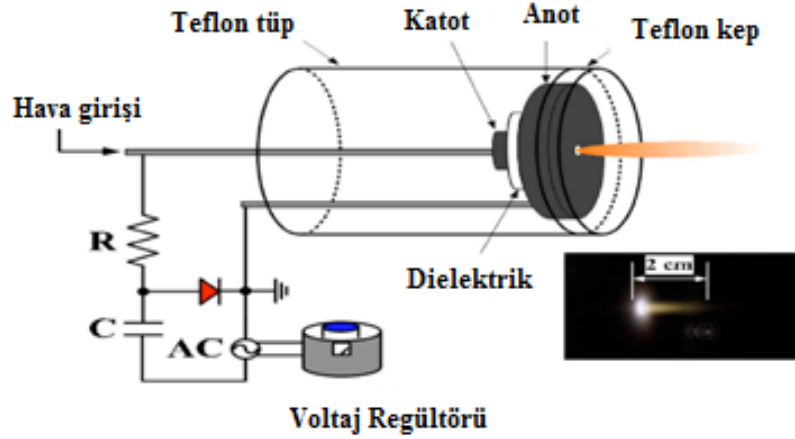
390 nm arası uyarılmış nitrojen molekülleri ve 390 – 480 nm arası iyonlaşmış nitrojen molekülleri de bulunmaktadır. Ek olarak atmosferik koşullarda çalışıldığı için 777 nm ve 884 nm’ de oldukça reaktif atomik oksijen molekülleri ve 220 – 280 nm arasında NO’ nun γ bandı gözlenmiştir.



Şekil 4.24. Mikroplazma jet ile üretilen nitrojen plazmasının optik emisyon spektroskopisi (Hong et al., 2008).

Üretilen plazmanın sıcaklığı 60°C ile 100°C arasında değişmektedir. Bu sistem E. Coli bakterileri üzerine uygulanmış ve 2 sn ile 4 sn arasında bütün bakterilerin öldürüldüğü gözlenmiştir.

Geliştirilen bir başka mikroplazma atmosferik basınç soğuk plazma jeti Şekil 4.25.’ de verilmiştir.

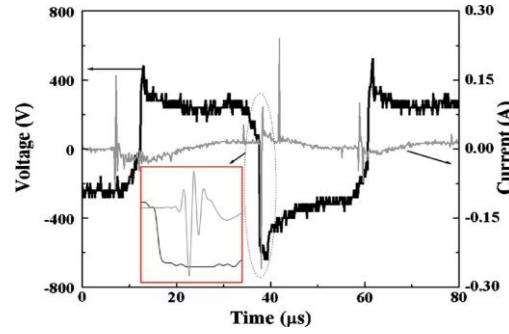


Şekil 4.25. Atmosferik basınçta üretilen mikrop plazma jet (Hong and Uhm, 2007).

Bu sistemde AC güç kaynağı, nitrojenin içinden geçtiği 500 μm genişliğinde deliğe sahip iki elektrota bağlıdır. Her iki elektrot ta 20 mm çaplı ve 3 mm kalınlığındaki alüminyum disklerden yapılmıştır. Bu diskler 1.5 mm kalınlığındaki ortası delinmiş dielektrik diske bağlıdır. Dielektrik diskin ortasındaki delik elektrotlarla aynı çapa sahiptir. Dielektrik disk camdan, kuvarsdan ya da teflondan olabilir. Birleştirilmiş elektrotlar ve dielektrik disk, dielektrik disk ile aynı çapa sahip bir dielektrik gövdeye yerleştirilmiştir. Bir elektriksel şok durumunu ya da kazara elektrotların insan bedenine temasını engellemek amacıyla öndeki elektrot ayrıca bir silindirik dielektrik malzeme ile kaplanmıştır.

Şekil 4.25.' de görülen nitrojen mikrop plazma jetinin sıcaklığı da oda sıcaklığı civarındadır. Termoçift ile yapılan ölçümler sonucu plazma jetin, dielektrik gövdeden 2 cm uzaklıktaki sıcaklığının 300 K' nin altında olduğu ölçülmüştür (Hong et al, 2007).

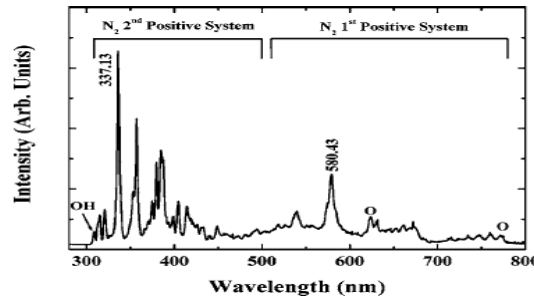
Bu sistem ile üretilen mikrop plazma jetin ölçülen voltaj ve deşarj akım karakteristikleri Şekil 4.26.' da verilmiştir.



Şekil 4.26. N₂ mikroplazma jetin akım – voltaj karakteristikleri (Hong and Uhm, 2006).

Siyah ve gri çizgiler sırasıyla ölçülen voltaj ve deşarj akımını temsil etmektedir. Pikten pike voltaj ve akım 1.92 kV ve 1.02 A ölçülmüştür. Ana dik voltaj gradyentlerinde keskin akım pulsları olduğu Şekil 4.26. üzerinde büyültülmüş kısımdan açıkça görülmektedir. Üretilen jet için ortalama kullanılan güç yaklaşık 10 W, gaz sıcaklığı ise 290 K’ dir (Hong and Uhm, 2006).

Mikroplazma jet tarafından üretilen çeşitli uyarılmış plazma parçacıklarını tanımlamak için 280 – 800 nm dalga boyları arasına optik emisyon spektroskopisi alınmıştır. Şekil 4.27.’ de 6.3 lpm akış hızında enjekte edilen nitrojen gazı ile üretilen mikroplazma jetin optik emisyon spektroskopisi verilmiştir.



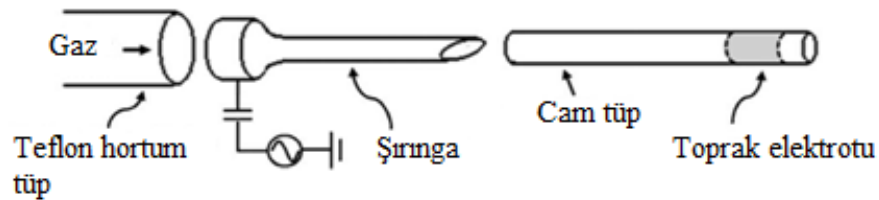
Şekil 4.27. N₂ gazı için optik emisyon spektroskopisi (Hong and Uhm, 2006).

Spektrumdan da görüldüğü gibi uyarılmış nitrojen türleri baskın yapıdadır. Tüm sistemlerde olduğu gibi bu sistem de atmosferik koşullarda üretildiği için oldukça reaktif olan 308.9 nm’ de hidroksil ve 616 ile 777.1 nm’ de atomik oksijen gözlenmiştir. Bu reaktif parçacıklar plazma yüzey uygulamalarında oldukça önemli rol oynamaktadırlar.

Bu sistem ile üretilen mikrop plazma jetin uzunluğu 6.5 cm’ ye kadar ulaşmaktadır.

4.2.3. Şırınga Elektrot

Şekil 4.28.’ de şırınga elektrot kullanılan plazma jetin birleştirilebilir parçaları verilmiştir. Cihazın ana gövdesi sivri uçlu medikal şırıngadır. Sol ucu teflon tüpe bağlı olan şırınga, yüksek voltaj uygulanan elektrottur. Gaz teflon tüp boyunca ilerler ve şırıngaya geçer. Ayrıca şırınganın ucu cam bir tüp içine yerleştirilmiştir.

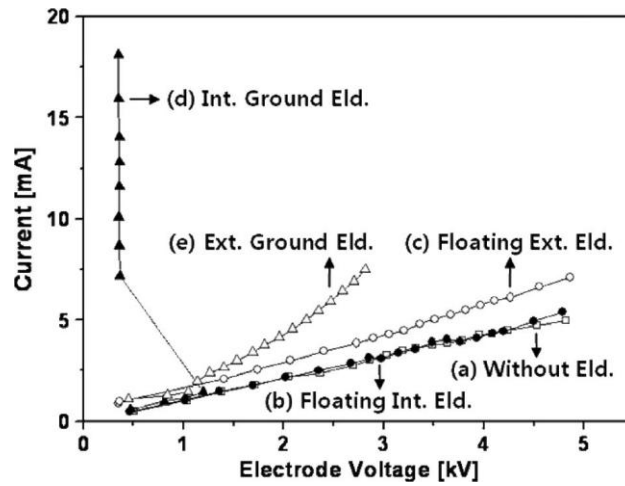


Şekil 4.28. Şırınga elektrot kullanılan plazma jet cihazının parçaları (Cho et al., 2011).

Paslanmaz çelikten yapılan şırınganın ağzının iç çapı 1.3 mm dış çapı ise 1.8 mm olup şırınganın uzunluğu ise 40 mm’ dir. 50 mm uzunluğundaki cam tüpün iç ve dış çapları sırasıyla 2 ve 3 mm’ dir.

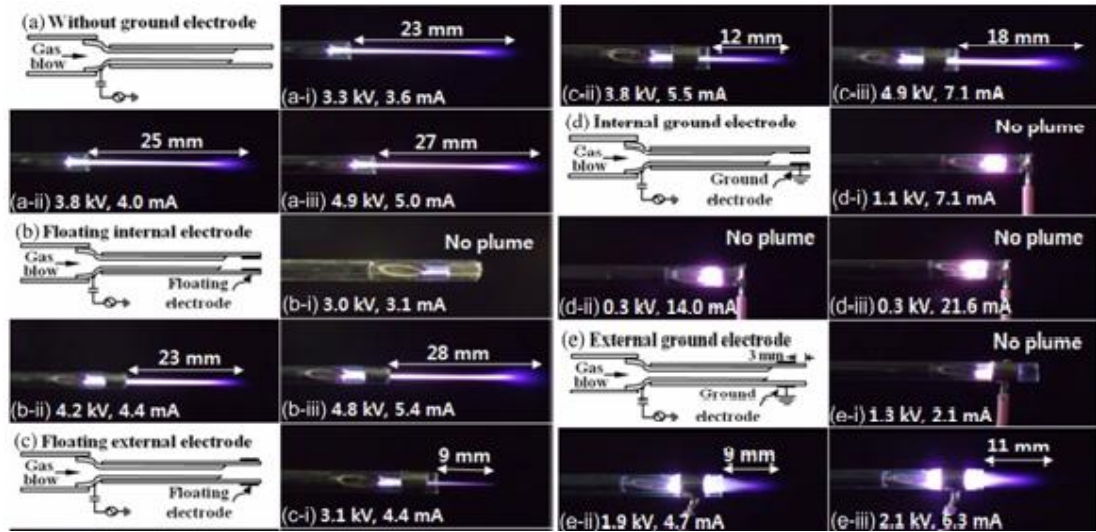
Bu sistemde şırınganın ucu yüksek voltaj AC güç kaynağına bağlı elektrot görevini görmektedir. Güç kaynağı 40 kHz frekanstan DC ye kadar frekansı ayarlanabilen AC güç kaynağıdır. Güç kaynağı voltajı AC de 0 – 5 kV olmaktadır (Cho et al., 2011).

Şekil 4.28.' de belirtildiği gibi toprak elektrotu cam tüpün ucuna yerleştirilmiştir. Plazması elde edilecek olan gaz olarak argon kullanılmaktadır. Diğer tüm jetlerde de olduğu gibi burada da atmosferik koşullara çıkan plazmanın uzunluğu gaz akış hızına ve uygulanan voltajın büyüklüğüne bağlı olarak değişir.



Şekil 4.29. Çeşitli toprak elektrotu tiplerine göre akım – voltaj eğrileri (Cho et al., 2011).

Şekil 4.29.' da görülen akım – voltaj karakteristikleri Şekil 4.30 (a)-(e)' de verilen çeşitli toprak elektrotları tiplerine göre elde edilmiştir.

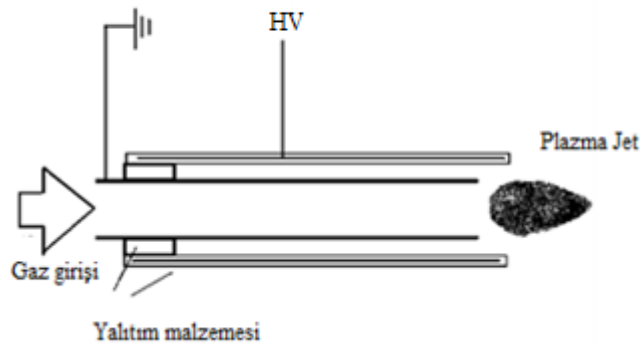


Şekil 4.30. Toprak elektrotu seçimine göre plazma jetin yapısı (Cho et al., 2011).

Plazma jetin resimleri Şekil 4.30(a)-(e) de (i)-(iii) görüntülerinde listelenmiştir. Şekil 4.30(a)' da toprak elektrotu olmayan sistem, (b)' de cam tüpün içinde floating elektrot bulunan sistem, (c)' de cam tüpün dışında floating elektrot bulunan sistem, (d)' de toprak elektrotunun cam tüpün içinde bulunduğu sistem, (e)' de toprak elektrotunun cam tüpün dışında bulunduğu sistem verilmiştir. Toprak elektrotunun bulunmadığı ve bir floating elektrot bulunduğu durumda 3 kV büyüklüğünde ateşleme voltajı altında plazma jetin uzunluğu yaklaşık 10 mm' dir. Bu değer uygulanan voltaj 5 kV' a arttırıldığında 30 mm' ye ulaşmıştır (Cho et al., 2011). Toprak elektrotu cam tüpün içine yerleştirildiğinde ve plazma doğrudan bu elektrot ile kontak halinde olduğunda, tüm plazma akımı toprak elektrota düşene kadar cam tüpün ağzında plazma jet oluşmamıştır. Bir dış toprak elektrotu durumunda ise dielektrik bariyer deşarja benzer şekilde plazma parçacıkları doğrudan toprak elektrotuyla kontak halinde olamazlar. Dış toprak elektrotu ateşleme sırasında uygulanan voltajı 1 kV' a kadar düşürür. Ateşlemeden sonra cam dışına çıkan plazma jetin uzunluğu yaklaşık 1 mm olup 10 mm' ye kadar da ayarlanabilir.

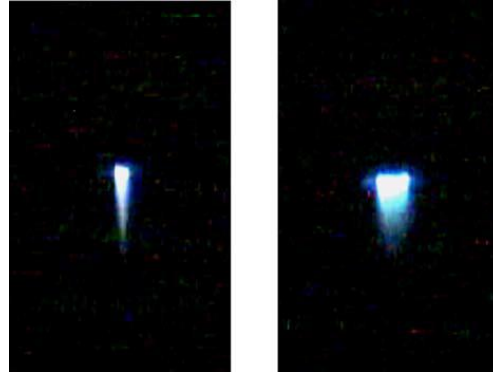
4.2.4. Düzlem Elektrot

Cheng Cheng ve ekibi tarafından dizayn edilen düzlem elektrot kullanılan atmosferik basınç soğuk plazma jetin deneysel düzeneği şematik olarak Şekil 4.31.’ de gösterilmiştir.



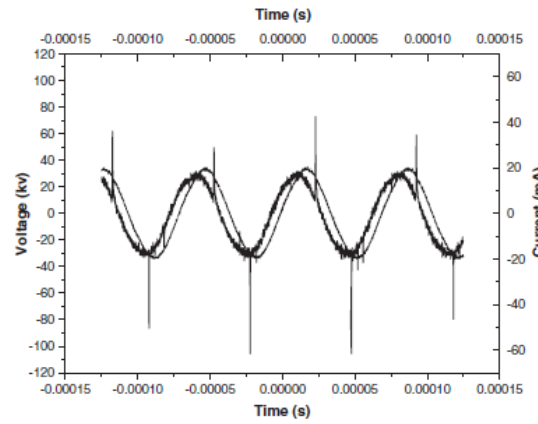
Şekil 4.31. Düzlem elektrot kullanılarak üretilen plazma jet (Cheng et al., 2005).

Bu sistem metal tüp elektrot, teflon ile kaplanmış başka bir metal tüp elektrotun içine yerleştirilmiştir. İç tüp elektrot toprağa, dış tüp elektrot ise düşük frekanslı (6-20 kHz) AC güç kaynağına bağlıdır. 50 – 2500 l/saat gaz akış hızlı argon iç tüpe gönderilir ve tüp çıkışında plazma elde edilir. Kararlı ve homojen plazma, 30 – 80 kV voltaj ile ve 6 – 20 kHz frekansta elde edilmiştir. Bu sistem ile üretilen plazma jetlerin görüntüsü Şekil 4.32.’ de verilmiştir. Deşarj kararlı olduğu durumda plazma sıcaklığı yalnızca 25 °C – 30 °C’ dir (Cheng et al., 2005).



Şekil 4.32. Düzlem elektrot kullanılan, farklı çıkış ağzı çaplarında üretilen plazma jetler (Cheng et al., 2005).

Üretilen atmosferik basınç soğuk plazma jetin tipik akım – voltaj karakteristikleri Şekil 4.33.’ de gösterilmiştir. $V_{\max} = 33.6$ kV ve deşarj akımı 41.6 mA’ dir (Cheng et al., 2005).

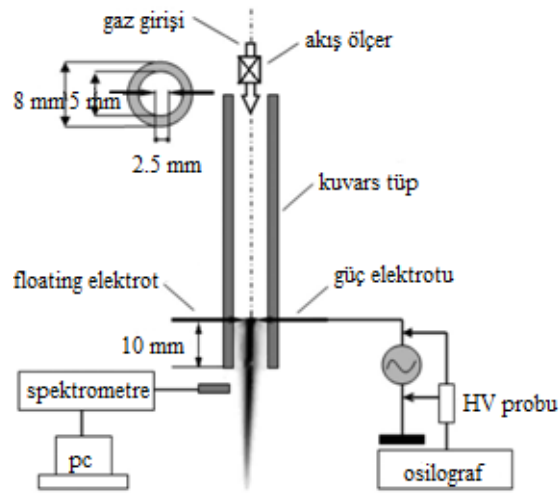


Şekil 4.33. Deşarj akım (koyu renk) ve voltaj (açık renk) karakteristikleri (Cheng et al., 2005).

Bu sistem ile üretilen atmosferik basınç soğuk plazma jetin gücü yaklaşık 14 – 20 W’ ır. Bu da düşük plazma gaz sıcaklığının sebebidir.

4.2.5. İğne Elektrot

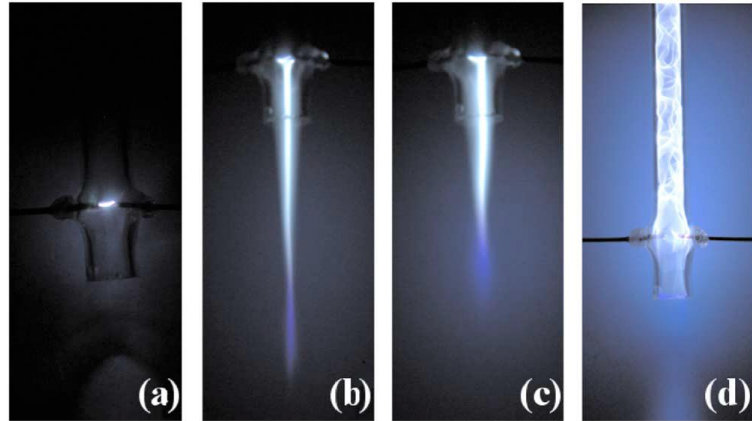
kHz mertebesinde güç kaynağı kullanarak atmosferik basınç plazma jet üretmek için iki iğne kullanılan sistem Şekil 4.34.' de gösterilmiştir.



Şekil 4.34. İğne elektrotlu plazma jet düzeneği (Nie et al., 2008).

Bu sistemde jet üretmek için 48 kHz frekans ve 2 – 6 kV voltaj uygulanmıştır. Elektrotlardan bir tanesi direk hava ortamında bırakılmıştır. Tungstenden yapılmış iki adet iğne tipi elektrot 5.5 mm iç çapı olan kuvars cam tüpün içine yerleştirilmiştir. İğne tipi elektrotlar cam tüpün alt ağzından 10 mm yüksekliğe aynı eksen üzerinde aralarındaki mesafe 2.5 mm olacak şekilde yerleştirilmiştir (Nie et al., 2008). Bu sistemin elektrotlarından birisi güç kaynağına bağlı ilen diğerinin açık havada bırakılması sistemi en orijinal tarafıdır.

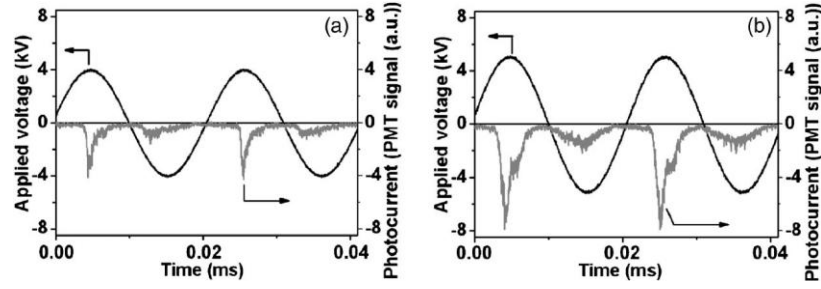
Argon plazma jetin üretimi ve değişimi uygulanan voltaja ve gaz akış hızına bağlıdır. Bu sistem ile üretilen plazma jetin tipik gelişim süreci Şekil 4.35.' de verilmiştir.



Şekil 4.35. Atmosferik basınç Ar plazma jetin çeşitli voltaj değerlerinde ve sabit gaz akış hızında gelişimi (Nie et al., 2008).

Voltaj $V_p = 2.7$ kV civarında olduğunda göz ile görülebilir mikrodeşarj oluşumu gözlenmiştir ancak gözle görülür bir jet akımı oluşmamıştır (Şekil 4.35 (a)). Uygulanan voltaj $V_p = 3.6$ kV değerine getirildiğinde küçük ve kararlı bir jet üretilmiş ve atmosfer koşullarına çıkmıştır. $V_p = 4.4$ kV voltaj uygulandığında ise uzunluğunda önemli ölçüne değişim olmamasına rağmen plazma jet daha aydınlık hale gelmiştir ve kararlılığını korumuştur (Şekil 4.35 (b)). Plazma jet bu formdayken kararlılığını saatlerce koruyabilmektedir. Voltaj $V_p = 4.4$ kV yüksek bir değerde uygulanırsa Şekil 4.35 (c)' de görüldüğü gibi plazma jetin görüntüsü bozulur ve boyu bir parça kısalır. $V_p = 5.6$ kV değerinde ise tüp dışında plazma kaybolur ve düzensiz ışık huzmeleri kuvars tüp içerisinde spiral bir şekilde rastgele olarak görünmeye başlar (Şekil 4.35 (d)) (Nie et al., 2008).

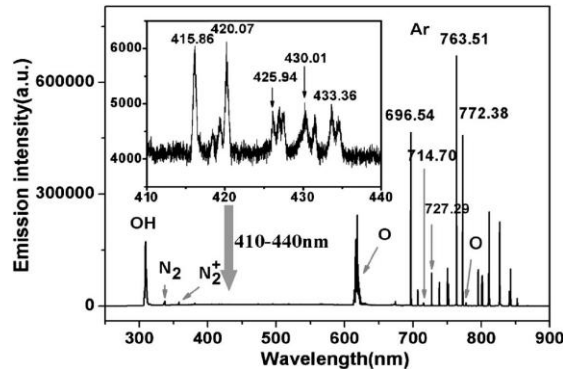
Şekil 4.36.' da plazma jetin kararlı ve kararsız yapısına karşılık gelen elektriksel karakteristikleri verilmiştir.



Şekil 4.36. Kararlı ve kararsız durumlara karşılık gelen deşarj voltajı ve deşarj akımı dalga formlarının karakteristikleri (Nie et al., 2008).

Şekil 4.36. (a)' da görüldüğü gibi kararlı jet için ana deşarj akım pulslarında uygulanan voltajın her yarım periyodunda yalnızca bir tane dominant fotoakım piki vardır. V_p kararsızlık eşiğinin üzerine çıkarıldığında, fotoakım puls genişliği genellikle artar ve mikropikler Şekil 4.36 (b)' de görüldüğü gibi daha belirgin hale gelir.

Fiber termometre kullanılarak ölçülen gaz sıcaklığı, kararlı durumda $0.08 \text{ m}^3/\text{sa} \leq v \leq 0.4 \text{ m}^3/\text{saat}$ gaz akış hızında 18.7°C ile 22.3°C arası değişmektedir (Nie et al., 2008). Bu sistem ile üretilen plazma jetin optik emisyon spektroskopisi Şekil 4.37.' de verilmiştir.



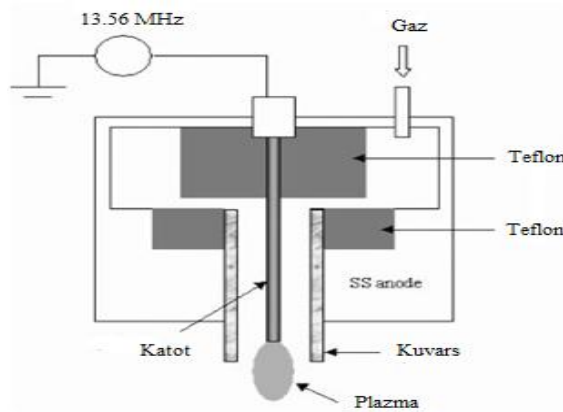
Şekil 4.37. 250 – 900 nm arası optik emisyon spektroskopisi (Nie et al., 2008).

4.3. Yüksek Frekans (MHz, GHz) AC Plazma Jetler

Atmosferik koşullarda soğuk plazma jet üretmek için MHz ve GHz mertebesinde frekanslarda da güç kaynakları kullanılmaktadır. Bir önceki bölümde incelenen kHz mertebesindeki güç kaynaklarına nazaran bu frekanslar yüksek frekans AC plazma jetler olarak incelenmiştir. MHz mertebesindeki güç kaynakları ile üretilen plazmalar radyo frekans (RF) plazmaları, GHz mertebesindekiler ise mikrodalga (MW) plazmaları olarak adlandırılmaktadır.

4.3.1. İğne Katot - Silindirik Anot

Koinuma ve ekibi tarafından ‘mikrobeam plazma jeneratör’ olarak adlandırılan, ilk rapor edilen soğuk plazma jetler arasında olan RF soğuk plazma jetinde 1 mm çaplı tungsten ya da paslanmaz çelikten yapılmış iğne katot elektrot 13.56 MHz frekanslı RF güç kaynağına bağlıdır. Toprağa bağlı silindirik anot ile çevrelenmiş iğne elektrot kuvars tüpün içine yerleştirilmiştir. Şekil 4.38’ de mikrobeam plazma jeneratörünün şematik gösterimi verilmiştir.



Şekil 4.38. Koinuma ve ekibi tarafından geliştirilen plazma jetin şematik gösterimi (Koinuma, 1991).

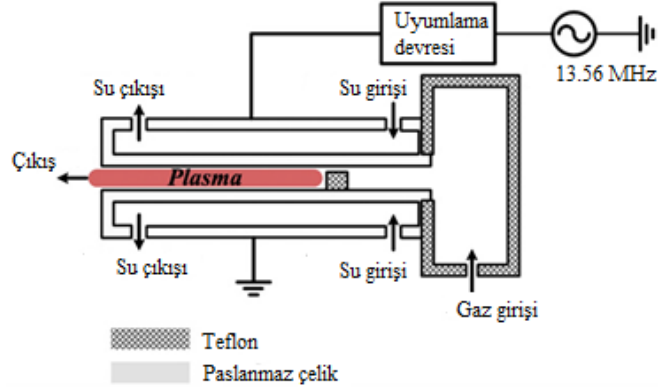
Toprak elektrotu iç çapı 2.5 mm, uzunluğu 15 mm olan, paslanmaz çelikten yapılmış bir silindirdir. 2.5 mm dış çapa, 14 mm uzunluğa ve 0.5 mm kalınlığa sahip kuvars boru sistemi katot ve anot arasına yerleştirilmiştir. Gaz akış hızı 70 sccm olan helyum kullanılarak 2 mm çapında, uzunluğu 5 mm' ye kadar ulaşan plazma jeti üretilmiş ve atmosferik koşullara çıkarılmıştır.

Daha sonraki çalışmalarda Koinuma iğne için farklı materyaller ve bir dielektrik tüp kullanmıştır. Kullanılan materyaller iğne elektrot için platinyum ve dielektrik tüp için alüminadır.

Ekip geliştirilen bu RF plazma jeti çeşitli materyal işleme uygulamalarında kullanmıştır. Çalışmaya bağlı olarak helyum ya da argon çeşitli gazlarla karıştırılmıştır. Bu, farklı karakteristiklerde jet üretilmesine ve özellikle farklı plazma sıcaklıkları elde edilmesine olanak sağlar. Böylece genellikle oda sıcaklığı civarında sıcaklıklara sahip jet, çok yüksek sıcaklıklara da çıkarılabilmektedir (Koinuma, 1991).

4.3.2. Su Soğutmalı Elektrotlar

Şekil 4.39.' da deneysel düzenek şematik olarak verilen sistemde paslanmaz çelikten yapılmış 2 paralel elektrot bulunmaktadır. Her iki elektrot ta dikdörtgen şeklindedir ve soğutucu su ile soğutulmaktadır.



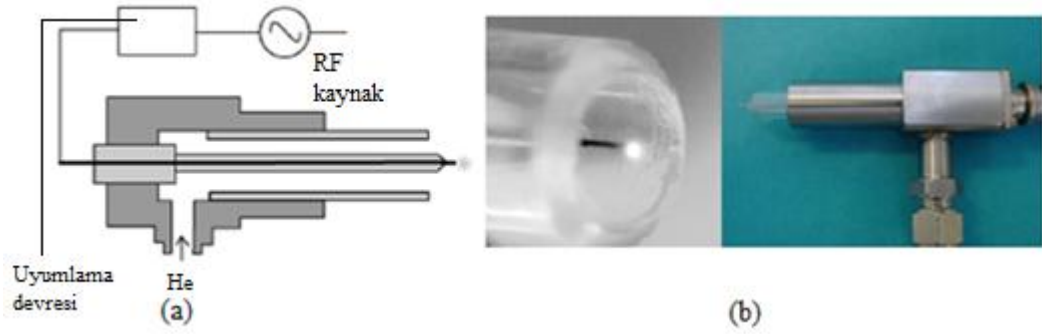
Şekil 4.39. Deney düzeneğinin şematik gösterimi (Li et al., 2011).

Üstte bulunan elektrot 13.56 MHz frekansa sahip RF güç kaynağına bağlıdır. Elektrot çifti arasındaki boşluk 1.6 mm’ dir. 1 mm kalınlığında, 60 mm uzunluğunda ve 2.3 mm genişliğindeki dielektrik şerit, kesit yüzeyi $0.6 \times 60 \text{ mm}^2$ olan bir gaz kanalı oluşturmak için gaz giriş bölgesi yakınındaki alt (toprak) elektrotu üzerine kaplanmıştır. Bu gaz giriş kanalı, atmosferik basınçta bulunan uyarılmış ve kararlı Ar/O₂ plazma deşarjının oksijen-argon oranını % 1.0 ‘ e çıkartmak için önemli ve gerekli olduğu düşünülmüştür. Gaz akış oranı 28 l/dk olarak ayarlanmıştır (Li et al., 2011).

4.3.3. İğne Elektrot

E. Stoffels ve ekibi özellikle biyomedikal uygulamalarda kullanılan ‘Plasma Needle’ olarak adlandırdıkları RF plazma jetini geliştirdiler. Cihazın ilk versiyonunda, 5 cm uzunluğunda ve 1 mm çapa sahip, topraklanmış metal silindir içine yerleştirilen paslanmaz çelikten yapılmış iğneye benzer yapıda bir katot elektrotu içeriyordu. Silindir helyum ile doluydu ancak hava geçirmez bir yapıda değildi. Daha sonraki versiyonunda iğne elektrot bir ucu dışarıda kalacak şekilde cam bir kılıf ile izole edilmiştir. İzole edilmiş iğne eşmerkezli pyrex tüp içine

yerleştirilmiştir. Tüm yapı paslanmaz çelikten yapılmış bir kap içerisine sabitlenmiştir. İğne elektrot 0.3 mm çaplı metal alaşımdır. İğnenin toplam uzunluğu yaklaşık 8 cm iken metal pin paslanmaz çelikten yapılmış kabın 1.5 cm dışarısına çıkartılmıştır. RF güç kaynağı kullanılarak iğne elektrotun ucunda 0.1 mm çapında, uzunluğu 2 mm' ye ulaşan ufak bir plazma jeti elde edilmiştir. Çeşitli deneylerde kullanılan RF frekansları 13.05, 13.56 ve 7.17 MHz iken RF güç 10 ile 300 mW arası değişmektedir (Kieft et al., 2005). Şekil 4.40.' da cihazı şematik ve görsel yapısı görülmektedir.



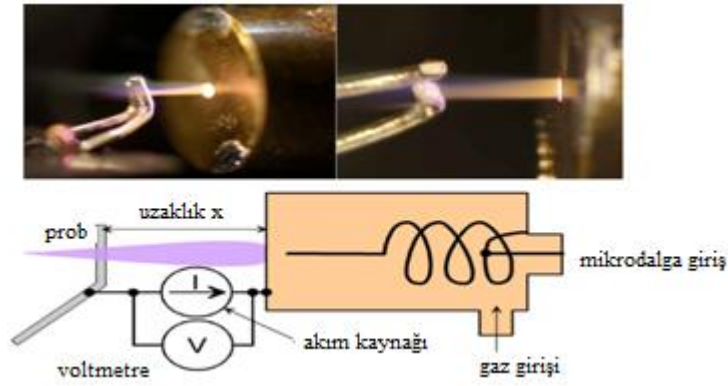
Şekil 4.40. Plazma jet cihazının şematik (a) gösterimi ve fotoğrafı (b) (Kieft et al., 2005).

Optik emisyon spektroskopisi atomik oksijen, hidroksil radikalleri ve N_2^+ iyonlarının varlığını göstermiştir. Ultraviyole radyasyon da 305-390 nm arası güçlü emisyonu sahiptir. Operatör gaz olarak helyum kullanıldığında plazma sıcaklığının oda sıcaklığına yakın ve elektron sıcaklığının 0.2-0.3 eV arasında olduğu görülmüştür (Kieft et al., 2005).

4.3.4. Mikrodalga (MW) Jetler

Bu bölümde plazma jet üretmek için mikrodalga frekans kullanan güç kaynağı ile üretilen iki sistem incelenmiştir.

Eşeksenli rezonatör kullanılan mikrop plazma jeti Şekil 4.41’ de verilmiştir.

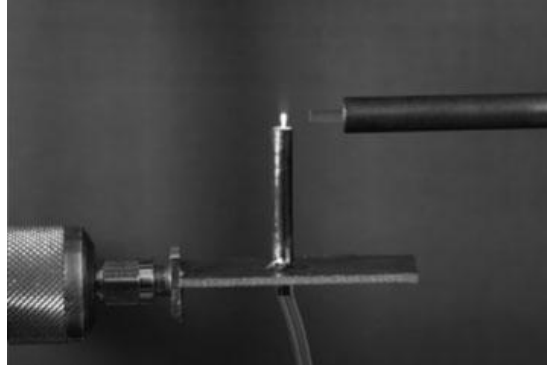


Şekil 4.41. Mikrop plazma kaynağı ve prob elektrotun jet içerisine yerleştirilmesi (Porteanu et al., 2010).

Kablonun ucu ile ön duvar arasında oluşan plazma üretilir. Gaz akışı plazmayı duvar içerisinde deliğe doğru iter/uzatır. Oluşan jet 1 cm uzunluğundadır. 10 W’ a kadar ayarlanabilen 2.45 GHz frekanslı mikrodalga kaynağı kullanılmıştır. Silindirik şeklindeki elektrik prob 0.5 mm çapında platinyum bir kablo içerir. Platinyum kimyasal açıdan etkisizdir ve plazma sıcaklığı nispeten düşüktür. Gaz akış hızı 100 l/h ve giriş gücü 10.7 W’ tır (Porteanu et al., 2010).

Bir başka mikrop plazma jet cihazı Stonies ve ekibi tarafından geliştirilmiştir. Üretilen küçük atmosferik basınç plazma kaynağı 2.45 GHz frekansta 2 W güç kullanılarak elde edilmiştir (Stonies et al., 2004). Plazma, içerisinden gazın geçtiği

açık uçlu ortak eksenli borunun ucunda ateşlenir. Şekil 4.42.' de sistemin fotoğrafı verilmiştir.



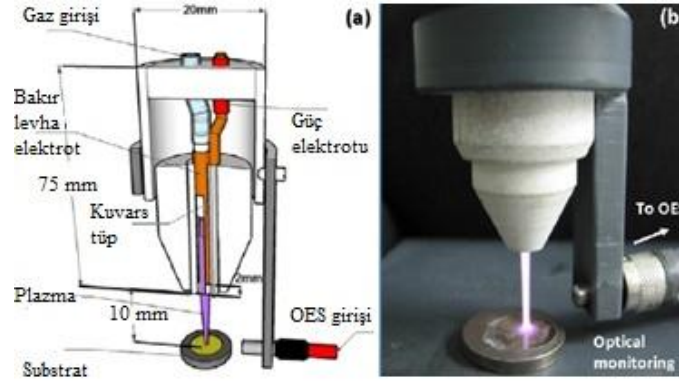
Şekil 4.42. Mikrodalga plazma jetin bir görüntüsü (Stonies et al., 2004).

Bu sistemde 70 mL.min^{-1} akış hızlı argon kullanılmıştır ve uzunluğu 4 mm' ye kadar varan jet üretilmiştir. Helyum da çalışma gazı olarak kullanılmıştır. Bu mikrodalga plazma cihazı gaz halinde bulunan türlerin tespitinde ve gaz kromatografisinde özel element detektörü olarak kullanılabilir (Stonies et al., 2004).

4.4. Yüksek Frekans Puls AC Plazma Jet

Gelişen teknolojiler, güç kaynaklarının da yenilenmesine neden olmaktadır. RF güç kaynakları 13.56 MHz frekansta voltajı salındırırken yeni tip RF güç kaynakları aynı zamanda bu AC voltajı puls olarak uygulayabilmektedir. Burada puls RF güç kaynağı ile üretilmiş bir plazma jet açıklanmıştır.

Bu çalışma için D. L. Bayliss ve ekip arkadaşları elektrik alanın baskın şekilde gaz akış alanına paralel olduğu lineer-alan soğuk atmosferik basınç jeti kullanmışlardır.

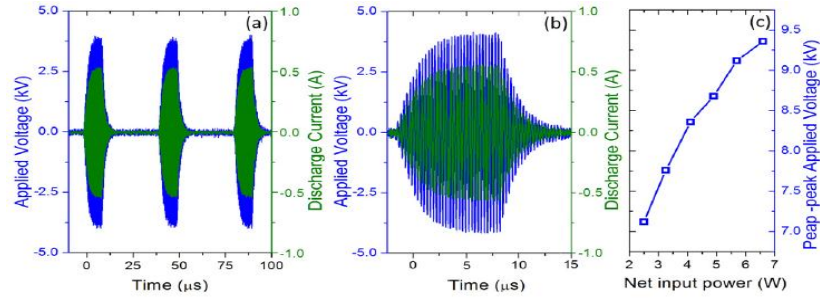


Şekil 4.43. Atmosferik basınç soğuk plazma jetin ana bileşenlerinin verildiği şematik (a) gösterimi ve dijital görüntüsü (b) (Bayliss et al., 2009).

Burada kullanılan plazma jet sistemi 75 mm uzunluğunda, 2 mm iç ve 3 mm dış çapa sahip kuvars tüp içerir. 70 mm genişliğindeki metalik elektrot, tüp ağzından 2 mm uzaklıkta olacak şekilde kuvars tüpün etrafında sıkıca sarılmıştır. 2. topraklanmış metal elektrot ise jetin ağzından 1 cm aşağıya yerleştirilmiştir. Bu elektrot aynı zamanda numune tutucu görevi de görmektedir (Şekil 4.43.(a)). Şekil 4.43. (b)' de deşarj çapının yaklaşık 2 mm ve deşarj hacminin yaklaşık 157 mm^3 olduğu helyum plazma jeti görülmektedir.

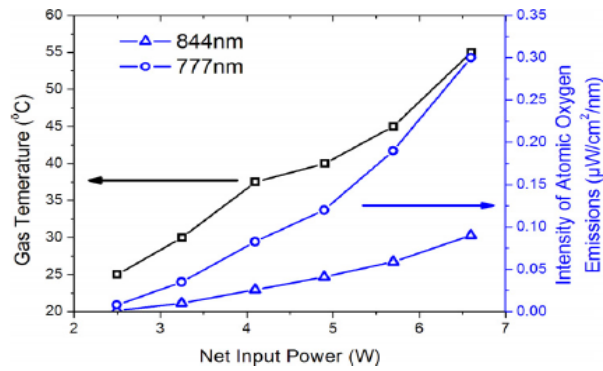
Çıkış frekansının seçimi, plazma jetin dinamikleri ve kinetiklerini ciddi şekilde etkilediği için oldukça önemlidir. Yüksek çıkış frekansları daha kuvvetli plazmalar üretmektedir ancak yüksek frekanslı plazmalar yüksek gaz sıcaklığına sahip olma eğilimindedirler. Bu da onların biyomedikal alanlarda kullanımlarını kısıtlamaktadır. Düşük gaz sıcaklığında kuvvetli plazma elde etmenin bir yolu puls-modulate RF çıkışı kullanmaktır. Bu amaçla ana RF çıkışı 3.9 MHz ve modülasyonu

25 kHz olan kaynak kullanılmıştır. Bu puls RF modülasyonu gaz sıcaklığını 55 °C'ye düşürmektedir.



Şekil 4.44. Puls RF soğuk plazma jetin elektriksel karakteristikleri (Bayliss et al., 2009).

Şekil 4.44. Helyum-oksijen akış hızının 10 slm olduğu (He/O₂) puls RF jetin elektriksel karakteristiklerini vermektedir. Puls modülasyon Şekil 4.44.(a)' da ve power-on / power-off olarak adlandırılan RF çıkışının 2 farklı faza ayrıldığı Şekil 4.44.(b)' de görülmektedir.



Şekil 4.45. Gaz sıcaklığı (siyah) ve 777 ve 845 nm' de optik emisyon yoğunlukları (mavi) (Bayliss et al., 2009).

Şekil 4.45.' de RF gücün sırasıyla gaz sıcaklığına ve 777 ve 84 nm' de iki atomik oksijen yoğunluğuna bağlı grafiği görülmektedir. Gaz sıcaklığı plazmanın numune yüzeyine kontak noktasında termoçift kullanılarak ölçülmüştür. Gaz sıcaklığı genel olarak 55 °C' nin altındadır ve güç 6.6 W' a kadar çıkabilmektedir. Deneyde daha spesifik plazma şartları düşünülmüştür ve RF güç 4 W' ta sabitlenmiştir. Buna bağlı olarak Şekil 4.45.' de verildiği gibi gaz sıcaklığı yaklaşık 37 °C olarak ölçülmüştür (Bayliss et al., 2009).

BÖLÜM 5

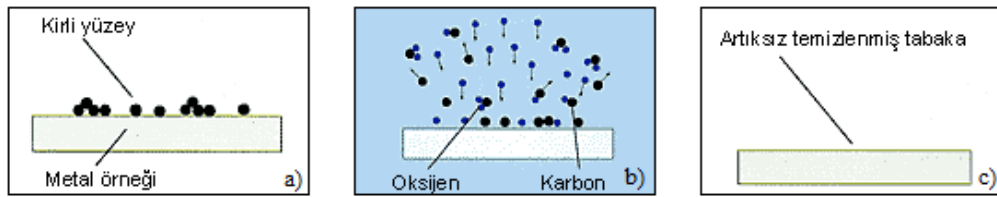
ATMOSFERİK BASINÇ SOĞUK PLAZMA JET UYGULAMALARI

Soğuk plazmaların teknolojiye kullanımının en önemli avantajı uygulama bölgesinde ısı etkisi ile değil plazma içindeki yüklü parçacıkların yüzeyle kimyasal ve elektriksel etkileşim içine girmesidir. Isı etkisi yaratmaması özellikle bugünkü teknolojiye çokça kullanılan polimer tabanlı malzemelerde uygulama alanlarını arttırmıştır. Özellikle hassas elektronik yapıya sahip entegre devrelerden oluşan bir sistemin soğuk plazma ile işlenmesi bugün yepyeni bir teknoloji olarak karşımıza çıkmaktadır. Bununla birlikte soğuk plazmaların atmosferik basınçta ve bir jet olarak üretilmesi birçok önemli avantajı da beraberinde getirmektedir. Bunlardan en önemlisi sistemlerin basit ve ucuz imalatıdır. Diğer önemli avantajı ise atmosferik basınç soğuk plazma jetlerin “in vivo” yani hemen uygulama sahasında kullanılabilir olmasıdır. Bu avantaj bu tip atmosferik basınç soğuk plazma jetlerinin özellikle insan üzerinde uygulamalarını akla getirmektedir. Bu tip cihazların insan üzerinde uygulanabilmesi ateşin keşfinden ve insan hayatında kullanımından bu yana en önemli icattır. Ateşle aynı özelliklere sahip bir yapı, ısı etkisi olmadan insan üzerinde kullanılabilecektir. Bir yaranın iyileştirilmesinden cilt yenilemesi hatta kanser tedavisi bu cihazlarla mümkün olabilmektedir. Bu bölümde özellikle yüksek sıcaklık üreten atmosferik basınç ark jetlerinden farklı olarak atmosferik basınç soğuk plazma jetlerin teknolojiye önemli bazı uygulamaları açıklanmıştır. Burada önemli bir ayrıntının tekrar altını çizmek gerekir. 100 °C ile 1000 °C arasındaki sıcaklıklarda plazma üreten atmosferik basınç soğuk plazma jetleri de mevcuttur. Ancak bu tez çalışmasında özellikle oda sıcaklığı ile 100 °C arasında sıcaklığa sahip atmosferik basınç soğuk plazma jetlerinin uygulamaları incelendi. Soğuk ifadesi, plazma fiziği terminolojisinde aynı moleküller arasındaki nispi sıcaklık farkını değil elektron sıcaklığı ile iyon sıcaklığı arasındaki ($T_e \gg T_i$) ilişkiyi ifade eder.

5.1. Yüzey Temizleme

Atmosferik basınç soğuk plazmalar jetler ile kuru plazma temizliği, malzemelerin hemen işlenmeye devam edebilmesini ve uygulamanın temiz ve ekonomik bir genel süreç olmasını sağlar. Plazmanın yüksek enerji düzeyi sayesinde malzemenin yüzeyindeki kimyasal veya organik maddelerin yapıları seçici olarak kırılabilir. Hassas temizlik sayesinde hassas yüzeyler bile istenmeyen işlem artıklarından tamamen temizlenebilir. Bunun sonucunda sonraki işlemler için en iyi koşullar elde edilir.

Plazma yapı itibarıyla içerisinde birçok iyon içerdiği için materyal yüzeyindeki molekülleri söktürme etkisi ile kaldırıp atar. Bununla birlikte kimyasal süreçle de plazma temizleme gerçekleşir. Örneğin karbon kirliliği içeren bir yüzey, oksijen plazmasına maruz bırakılırsa yüzeydeki karbon atomları oksijen ile CO molekülünü yapar. CO uçucu olduğu için ortamdan çekilebilir. Bu durumda yüzeydeki karbon kirliliği plazmanın ürettiği moleküller/atomlar ile kimyasal etkileşim yoluyla atılır. Bu süreçte yüzeydeki moleküller gaz fazına geçerek yüzeyden ayrılır. Şekil 5.1.' de atmosferik basınçta üretilen soğuk plazma ile yapılan yüzey temizleme işlemi şematik olarak verilmiştir.



Şekil 5.1. Plazma ile yüzey temizleme işlemi a) Kirli metal bir yüzeye plazma uygulanmadan önce b) Kirli partiküller arıtılırken c) Plazma işleminden sonra temizlenmiş metal yüzeyi

Mikro hassasiyetle yapılan plazma ile temizleme işlemi, katkı maddelerinden dolayı materyallerin yüzeylerine sıkıca tutunmuş olan en küçük toz zerrecelerini bile temizleyebilme özelliğine sahiptir. Yüksek kalitede boyaların, örneğin; otomotiv veya mobilya endüstrisinde olduğu gibi, kayıp oranları büyük ölçüde azaltılır. Nano düzeydeki kimyasal- fiziksel tepkime sayesinde kaliteli, hassas olarak tanımlanmış yüzeyler elde edilir. Şekil 5.2.' de soğuk plazma ile elektronik kart temizliği görülmektedir. Bu yöntemle elektronik kartlara zarar vermeden istenmeyen partiküller uzaklaştırılmış olur. Şekil 5.3.' de hassas bir materyal olan plastiğin plazma ile temizlenme işlemi görülmektedir. Bu tip gündelik kullandığımız cihazlarda yüzeyden yağ, kir gibi makro parçacıklar temizlenebileceği gibi ileriki bölümlerde açıklanan biyolojik temizlikte plazma ile sağlanmış olmaktadır.



Şekil 5.2. Plazma ile elektronik kart temizliği (www.plasmatreat.com, 03.06.2013).

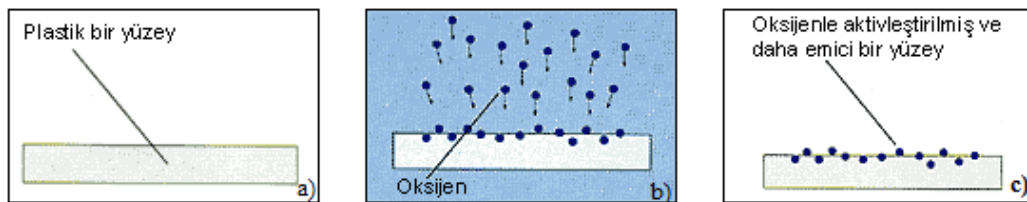


Şekil 5.3. Hassas bir materyal olan plastiğin atmosferik basınçta üretilen soğuk plazma ile temizlenmesi (www.plasmatreat.com, 03.06.2013).

Bu uygulama özellikle yapıştırma işlemlerinde çok önemlidir. Yapıştırılacak iki yüzey eğer plazma ile temizlenirse yapıştırma ömrü çok uzun olmaktadır. Yüzeyler arasındaki kirlilik atomları, yapışma ömrünü azaltmaktadır.

5.2. Yüzey Aktifleştirme

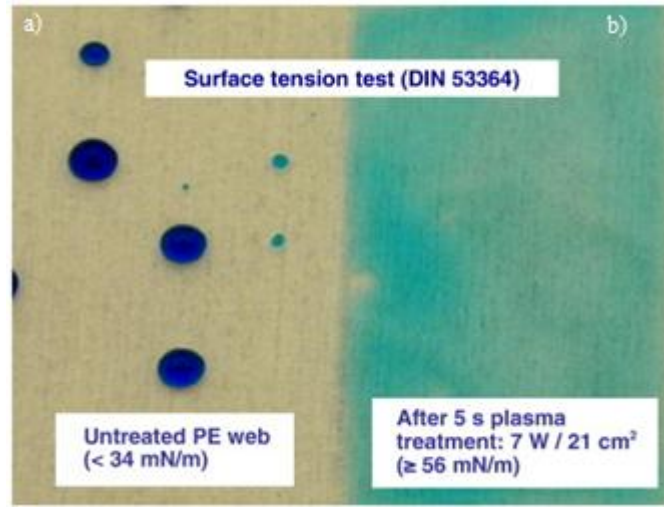
Materyallerin uzun işlem süreçlerinde kaplandığı, boyandığı veya yapıştırıldığı her yerde giriş malzemelerinin seçici yüzey aktivasyonu kaçınılmazdır. Pek çok malzeme, su bazlı mürekkep ile baskı, uçucu organik bileşen (VOC) içermeyen yapıştırıcılarla uzun ömürlü yapıştırma veya kompozit malzeme oluşturma için gerekli olan yüzey gerilimine sahip değildir. Şekil 5.4.' te plazma ile gerçekleştirilen yüzey aktivasyonunun şeması verilmiştir.



Şekil 5.4. Plazma ile yüzey aktivasyonu a) Plastik bir yüzeye plazma uygulanmadan önce b) Plazma işlemi c) Plazma yöntemi uygulandıktan sonra

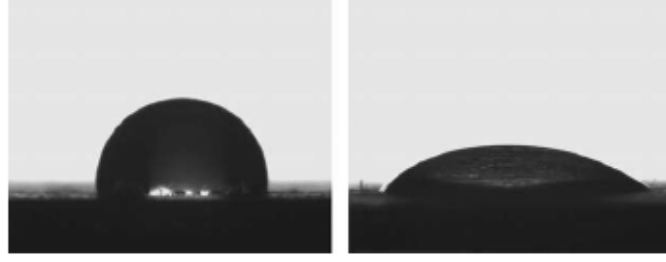
Plazma ile yüzey aktivasyonu uzun polimer zincirlerinden oluşan plastikler gibi apolar malzemelerin işlenmesi gerektiğinde çok etkilidir. Bu tür apolar yüzeyleri yapıştırmak ve kaplamak zordur. Yüzey geriliminin plazma enerjisiyle modifiye edilmesiyle malzemeler daha kolay işlenebilir. Örneğin yapıştırma sürecinde yeni malzeme bileşimleri elde edilebilir. Şekil 5.5.' te plazma ile yapılan yüzey aktivasyonuna bir örnek verilmiştir. Şekilden de anlaşılacağı gibi plazma uygulanan materyal yüzeyinin yüzey gerilimi artırılarak üzerine uygulanan

maddenin yüzeye daha sıkı ve homojen olarak dağılması ve tutunması sağlanmıştır (Şekil 5.5. (a)). Benzer şekilde plazma uygulanmayan yüzeyde ise yüzey gerilimi zayıf kalmış ve uygulanan madde damlacıklar halinde heterojen bir şekilde yüzeye dağılmıştır (Şekil 5.5 (b)).



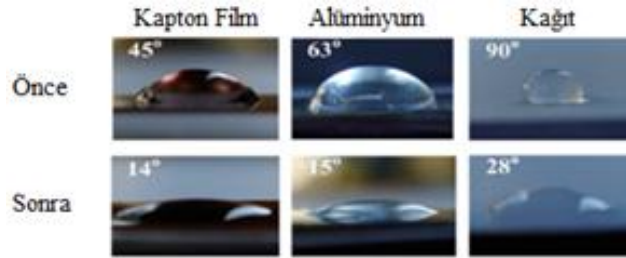
Şekil 5.5. Plazma ile yapılan yüzey aktivasyonu a) Plazma uygulanmış yüzey b) Plazma uygulanmamış yüzey (Bárdos and Baránková, 2010).

Bölüm 4.1.4.' te açıklanan çubuk-yüzük elektrot kullanılan puls DC jetler yüzey aktivasyonunda kullanılmıştır. Çubuk-yüzük elektrot kullanılan plazma jet ile yüzey aktiveleme işlemi Şekil 5.6.' da verilmiştir. Ahşap bir yüzey plazma ile modifiye edildikten sonra damlacık testi uygulanmıştır. Uygulama yapılmayan yüzeyde su damlasının yüzeye açısı 90° iken uygulama yapılan yüzeyde bu açı çok daha küçüktür. Dolayısıyla yapılan uygulama ile wettability (sıvının yüzeye tutunması) arttırılmıştır. Bu uygulama düzgün olmayan, iç bölgeleri bulunan ve ısı hassasiyeti olan materyallere de uygulanabilir.



Şekil 5.6. Ahşap yüzeyin modifikasyonu (sol: plazma uygulama yapılmamış ahşap yüzeyindeki su damlası, sağ: plazma uygulaması sonrası su damlasının durumu) (Förster et al., 2005).

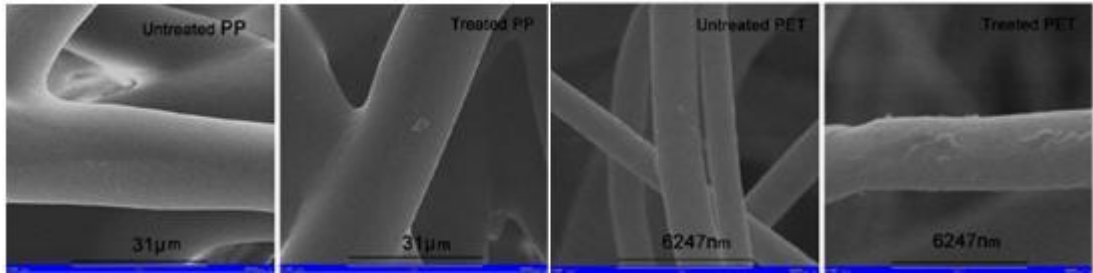
Benzer şekilde Bölüm 4.2.2.’ de bahsedilen mikrop plazma jetleri de yüzey aktivasyonunda kullanılmışlardır. Mikrop plazma jetlerinin uygulandığı çalışmada su damlası kontak açısı testi yapılmıştır.



Şekil 5.7. Çeşitli yüzeylerde su damlalarının plazma uygulama öncesi ve sonrası yüzeye kontak açıları (Hong and Uhm, 2007).

Şekil 5.7.’ de görüldüğü gibi plazma uygulanmayan yüzey üzerine damlatılan su damlacığı daha yüksek kontak açısına sahip iken plazma uygulanan yüzeye damlatılan su damlacığı daha küçük kontak açısına sahiptir. Bu uygulama özellikle boya ve kaplama sanayinde çok önemlidir. Boyanacak veya kapanacak yüzey öncelikli olarak plazma aktivasyon işlemine tabi tutulursa boya ya da kaplama, yüzeyde daha sıkı tutunur.

Bölüm 4.2.4.' te anlatılan soğuk plazma jeti polimer yüzey modifikasyonu için ve su kontak açısını azaltmaya yönelik çalışmalarda kullanılmıştır. PP (polipropilen) ve PET (polietilen tereftalat) dokular üzerine 1 – 120 s arası farklı uygulama sürelerinde atmosferik basınç soğuk plazma jet uygulaması yapılmıştır. Yüzey serbest enerji değişimi, polimerler üzerine bir damla su damlası damlatılarak su kontak açısının hesaplanması sonucu gözlemlenmiştir. Şekil 5.8.' de plazma uygulaması yapılmış PP ve PET dokularının taramalı elektron mikroskobu görüntüleri verilmiştir.



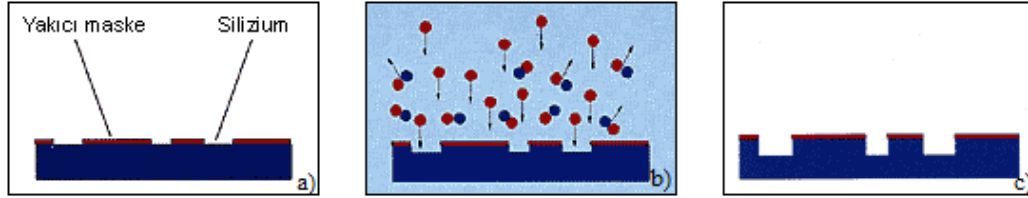
Şekil 5.8. Plazma uygulama yapılmamış (sol) ve plazma uygulaması yapılmış (sağ) PP ve PET dokularının SEM görüntüleri (Cheng et al., 2005).

Görüldüğü gibi dokuların mikro yapıları değişmektedir. Bu uygulama, özellikle tekstil sektöründe çok kullanılmaktadır. Doğal ya da yapay iplikler plazma aktivasyon işlemine tabi tutulduktan sonra renklendirme işlemi sürecine girmektedir. Renklendirme sürecinde boyalar, iplikler üzerine daha sıkı tutunmakta ve dolayısıyla yıkanma sonucu kumaş rengi değişmemektedir.

Bununla birlikte plazma ile aktifleştirilmiş yüzeyler daha sıkı tutunmaya sahip olacağı için yapıştırma uygulamalarında da kullanılmaktadır.

5.3. Yüzey Dağlama (Etching)

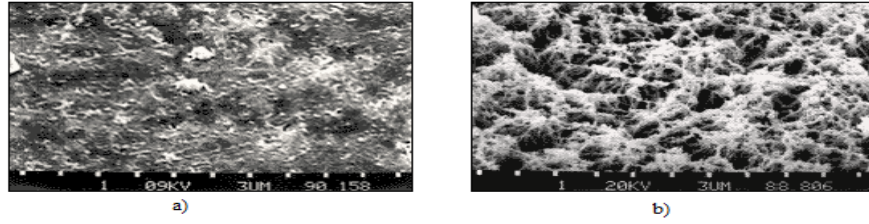
Plazma dağlama yönteminde bir taslak önce kazılır daha sonra boya ve kimyasallarla bu taslak kağıt üzerine aktarılır. Plazma dağlamada kazıma işlemi iyonlar sayesinde yapılır. Bu işlem söktürme (sputtering) işlemine benzerdir. Yüzeyden atomlar yine atomlar ile sökülür. Plazma dağlamanın avantajı bu kazıma işlemini atomik boyutta yapabilmesidir. Böylece nano boyutta entegre devrelerin yani nano çiplerin üretilmesini sağlamaktadır. Şekil 5.9.' da dağlama işleminin şematik resmi verilmiştir.



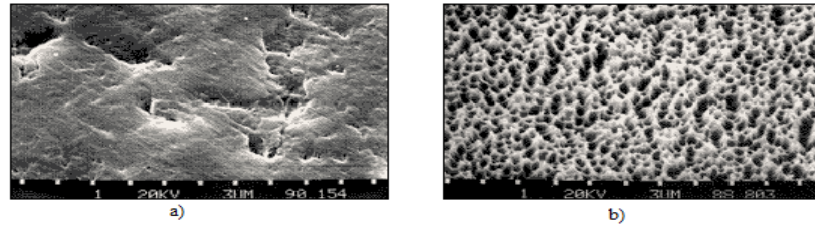
Şekil 5.9. Plazma dağlama uygulaması a) Plazma işlemi öncesi b) Plazma uygulanırken c) Plazma işlemi sonrası

Plazma dağlama genellikle düşük iyon bombardımanı altında, plazma türlerinin kimyasal reaksiyonları kaynaklı dağlama yöntemidir. Plazma dağlama, fiziksel etkilerin göz ardı edildiği şartlar altında gerçekleşir ve genellikle izotropik bir süreçtir. Bu olayda plazmanın rolü kimyasal olarak aktif türlerin üretimidir.

Plazma dağlama işlemlerine örnek olarak silisyum şekillendirme ve sert ve yüksek ısıya dayanıklı olan PTFE (Polytetrafluoroethylene) ve FEP (Fluorinated ethylene propylene) gibi plastik maddelerde yapılan işlemler örnek verilebilir. Şekil 5.10. ve Şekil 5.11.' de dağlama yapılan PTFE ve POM malzemelerinin uygulamadan önceki ve sonraki halleri verilmiştir.



Şekil 5.10. a) POM plazma işlemi öncesi b) Plazma işlemi sonrası (www.plasma.de, 06.06.2013).

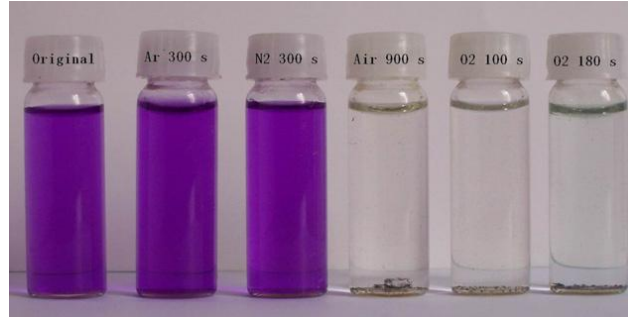


Şekil 5.11. a) PTFE plazma işlemi öncesi b) Plazma işlemi sonra (www.plasma.de, 06.06.2013).

Şekil 5.10. ve 5.11’ de verilen elektron mikroskobu görüntülerinden yüzeyden atomların sökülmesi görülmektedir.

5.4. Plazma İle Arıtma

Atmosferik basınç soğuk plazma jetleri birçok alanda kullanılabildikleri gibi atık arıtma işlemlerinde de kullanılmaktadır. Bölüm 4.2.1.’ de açıklanan sıvı elektrotlu atmosferik basınç soğuk plazma jeti boya sıvı atık arıtma işleminde kullanılmıştır. Şekil 5.12’ de plazma uygulanmadan önceki sıvı resimleri ve plazma uygulandıktan sonraki sıvı resimleri görülmektedir.



Şekil 5.12. Plazma uygulaması yapılan çeşitli sıvıların önceki ve sonraki halleri (Chen et al., 2006).

Bu çalışmada sıvı olarak MV-5 BN kullanılmıştır. Şekil 5.12.' de orijinal sıvı ve Ar (300 sn), N₂ (300 sn), hava 900 sn, O₂ 100 sn, O₂ 180 sn plazma uygulanmıştır (Chen et al., 2006). Hava ve O₂ kullanıldığında sıvının renginde önemli ölçüde değişiklik gözlenmiştir. Bunun hava ve O₂ plazması içindeki radikal O₂ atomlarının etkisiyle olduğu ifade edilmektedir. Bu çalışma aslında sıvı içine plazma uygulaması ile sıvıda değişim olduğunu göstermek için yapılmıştır. Bununla birlikte sıvı arıtılmasından, pH mertebesinin değiştirilmesi ve sıvı içinde bakteri sterilizasyonuna kadar birçok uygulama yapılabilir. İlerleyen yıllarda süt gibi çabuk bozulabilen sıvı gıdaların bu atmosferik basınç soğuk plazma jetler ile steril edilebileceği düşünülmektedir.

5.5. Uygulamalı Plazma Tıp

Fiziksel bilimlerde maddenin dördüncü hali olarak bilinen plazma, tıp ve biyolojide kanın hücresel olmayan sıvı bileşenini tarif etmektedir. İlginç bir şekilde, ilk kez Irving Langmuir tarafından iyonik yapıların karakteristiklerini vurgulamak için kullanılan plazma terimi, tıp ve biyoloji alanında da yaygın bir şekilde benzer anlamda kullanılmaktadır. Bu ilişkiye rağmen yakın tarihlere kadar plazmanın tıp ve

biyomedikal alanlardaki uygulamaları hakkında çok az keşif bulunmaktadır. Ancak bu durum hızla değişmektedir (Fridman et al., 2008).

Plazmanın tıp alanındaki ilk uygulamalarından bazıları temel olarak plazmanın termal etkilerine dayanılarak yapılmıştır. Isı ve yüksek sıcaklık uzun süre doku ayırma, sterilizasyon ve dağlama (kanama durdurma) için kullanılmıştır. Eski zamanlarda savaşçılar açık, kanayan yaraları çok sıcak metallere dağlayarak kanamayı durdurmuşlardır. Daha modern bir teknik olan elektrokoter yöntemi halen daha kullanılmaktadır. Ancak dokunun, dağlama cihazının yüzeyi ile teması genellikle yakılan dokunun metale yapışmasıyla sonuçlanmıştır. Sonrasında metalin dokudan ayrılması sürecinde doku tekrar kanamaya başlamıştır. Son dönemlerde yapılan plazmanın tıp alanındaki çalışmaları, metal kontak elektrokoter yöntemine bir alternatif getirmiştir. Argon plazma koagülasyon yönteminde oldukça iletken plazma, metal kontak yerine kullanılmış ve böylece dokunun yüzeye tutunma problemi ortadan kalkmıştır.

Son zamanlarda plazma tıp alanında yapılan çalışmaları farklı kılan özellik plazmanın non termal etkisidir. Plazmanın non termal etkilerini bu denli ilginç ve umut verici olarak nitelendirilmesinin ana sebebi, non termal plazma etkilerinin genetik transfeksiyon, yara tedavisi gibi subletal amaçlar için ayarlanabilir olmasıdır.

Non termal plazmanın tıp alanındaki etkileri üzerine yapılan birçok araştırma direkt plazma uygulaması ve indirekt plazma uygulaması olarak 2 ana kategoriye ayrılabilir. Direkt plazma uygulamasında canlı doku veya organ plazmayı oluşturan ikinci elektrot görevini görmektedir. Birçok durumda voltaj bu canlı doku elektrotta direkt olarak bağlı olmak zorunda değildir ancak bazı akımlar iletim/iletkenlik akımı, deplasman akımı ya da her ikisi şeklinde doku içerinden akabilir. İletim akımı herhangi bir termal etki ya da kasların elektriksel uyarım durumuna karşı sınırlandırılmalıdır. Direkt plazma uygulaması, atom ve moleküllerin ozon (O₃), NO, OH gibi çeşitli aktif yüksüz türlerinin canlı doku yüzeyine akışına olanak sağlar.

Ancak direkt plazma uygulamasının en ayırt edici özelliği önemli miktar yüklü parçacığın canlı doku yüzeyine ulaşmasıdır. Bu yükler hem elektron hem de pozitif ve negatif iyonları içerebilir. Bununla birlikte doku içine ilaç enjekte etmek ya da doku yapısının değiştirilmesi (kanser tedavisi) gibi uygulamalarda plazmanın elektrostatik özelliklerinden faydalanılmaktadır.

İndirekt plazma uygulamasında ise çoğunlukla plazma içerisinde üretilen yüksüz atom ve moleküller kullanılır. İndirekt uygulamada yüksüz türler yüzeye genellikle plazma bölgesi boyunca akan gaz aracılığı ile ulaşırlar (Fridman et al., 2008).

Soğuk plazmaların tıp alanındaki uygulamaları ilk olarak bakteri sterilizasyonu ile olmuştur. Bakterilerin, kimyasal ve ışın uygulamalarından farklı olarak, ilk kez ısı etkisi olmadan sterilizasyonu gerçekleştirilmiştir. Canlı doku üzerine kimyasal ve ışın sterilizasyon tekniklerinin bazı dezavantajları söz konusudur. Ancak soğuk plazmaların, özellikle belirlenen dozlar uygulandığı takdirde insana zararı söz konusu değildir. Bu da soğuk plazmaları diğer tekniklere nazaran tercih sebebi yapmaktadır. Gelecekte, örneğin UV lambalı küvözlere alternatif olarak plazma küvözleri karşımıza çıkacaktır. Bununla birlikte bütün bir hastanenin ya da okulun soğuk plazma ile hem de insanların bulunduğu zamanlarda, insanlara zarar vermeden sterilizasyonu mümkün olacaktır.

Yenidoğan servislerinde bebek ölümlerine sebep olan, sıvı sabun içerisinde çok kolay üreyebilen bakteriler bulunmaktadır. Hemşireler sıvı sabunlarla ellerini yıkayarak yeni doğmuş bebekleri ellemektedirler. Hemşireden bebeklere geçen bu bakteriler, henüz hiçbir bakteriye karşı savunası olmayan bebeklerin ciğerlerinde su toplanmasına sebep olmakta ve ülkemizde de bir dönem çok yaygın olan yenidoğan bebek ölümlerine sebebiyet vermektedir. Atmosferik basınç soğuk plazma jetleri üzerine yapılan çalışmalar geliştikçe ileriki zamanlarda özellikle hastanelerde bu tarz hayati önem taşıyan durumların önüne kolaylıkla geçilebilecektir.

Atmosferik basınç soğuk plazma jetlerinin insan üzerine kullanılabileceği fikri çok başka uygulamaları da beraberinde getirmiştir. Cilt yenileme, diş tedavisi, sivilce terapisi, yara tedavisi, kanser tedavisi gibi birçok uygulama alanı gelişmiş ve bu uygulamaların bazıları aktif olarak günümüzde kullanılır hale gelmiştir. Bu bölümde en dikkat çekici uygulamalar kısaca açıklanmıştır.

5.1.1. Soğuk Plazma Jetlerin Hücreler Üzerine Etkisi

Mikroorganizmalar en genel olarak prokaryot ve ökaryot hücreler olmak üzere ikiye ayrılırlar. Prokaryot hücreler bir çekirdeğe sahip değilken ökaryot hücreler bir çekirdeğe sahiptirler ve dışarıdan gelen saldırılara karşı bir savunma mekanizması geliştirirler. Bakteriler ve arkealar prokaryot hücreler iken bütün canlı hücreleri ökaryot hücrelerdir. Bu nedenle atmosferik basınç soğuk plazma jetlerinin farklı hücre yapıları üzerine etkisi ayrı ayrı incelenmiştir.

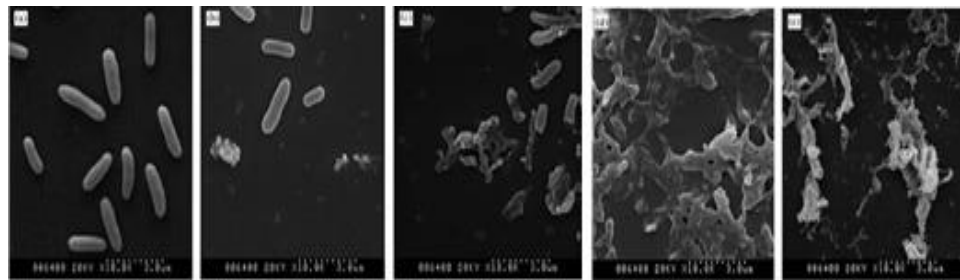
5.1.1.1. Prokaryot Hücreler

Bu kısımda atmosferik basınç soğuk plazma jetlerin prokaryot hücreler üzerine etkisini göstermek için bakteriler üzerinde yapılan çalışmalar açıklanmıştır.

Plazmaların biyolojik hücreler üzerinde etkisi son yıllarda çok daha fazla ilgi görmektedir. Bu çalışmalarda plazma üretmek için audio frekans, radyo frekans ve mikro dalga elektrik alanlar kullanılmaktadır. Ancak bu sinüzoidal elektrik alanlarla düşük sıcaklıklarda özellikle oda sıcaklığında plazmalar üretmek zordur. Puls elektrik alanlar ile üretilen plazma içindeki hızlı enerji taşıyıcısı elektronlar, enerjilerini ağır plazma parçacıklarına aktaramazlar. Bu nedenle çok yüksek enerjili elektronlar üretirler. Bu elektronlar da kimyasal reaksiyonlarla reaktif parçacıklar

üretirler. Bu reaktif türler temasta oldukları yüzeyi örneğin bakterileri aşırı aktive ederler ve öldürürler.

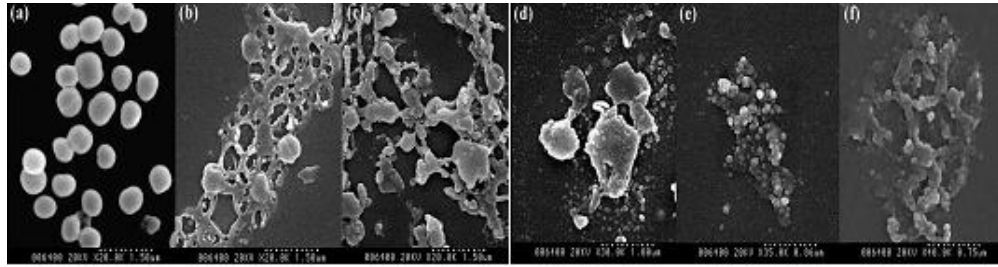
11 kV' luk DC puls elektrik alanlar, 1 mikro-saniye puls aralığı ile atmosferik basınçtaki hava üzerine uygulanarak hava ortamının plazması üretilmiştir. Bu plazmalar doğrudan E.coli prokaryot biyolojik hücreleri üzerine uygulanmıştır. Şekil 5.13.' te, E.coli biyolojik hücreleri üzerine farklı zamanlarda hava plazması uygulandıktan sonra çekilmiş SEM görüntüleri verilmiştir.



Şekil 5.13. Hava plazmasının E.coli bakterileri üzerine a) 0 s, b) 10 s, c) 30 s, d) 50 s e) 70s sürelerle uygulandıktan sonra çekilen SEM görüntüleri (Choi et al. 2006).

Şekil 5.13.' ten görüldüğü gibi plazma ortamına maruz kalan E.coli bakterileri 10 saniye sonra deformasyona uğramaktadır. Daha yüksek zamanlarda hücre zarlarının ve hücrelerin yapılarının fiziksel olarak önemli derecede zarar gördüğü görülmektedir. Bakteriler için benzer çalışma, 1 kW ve 2.45 GHz mikrodalga güç kaynağı ile atmosferik basınçta argon plazması kullanılarak yapıldı. Bu plazmalar daha sonra MRSA hücreleri üzerine uygulandı. Şekil 5.14.a' da, referans yani plazma uygulanmayan hücrenin SEM görüntüsü, diğerleri ise sırasıyla 1,2,3,4,5 saniye sürelerle plazma ortamına maruz bırakılan MRSA hücrelerinin SEM görüntüleridir. Şekil 5.13.' deki gibi hücrelerin fiziksel zarar gördükleri açıkça

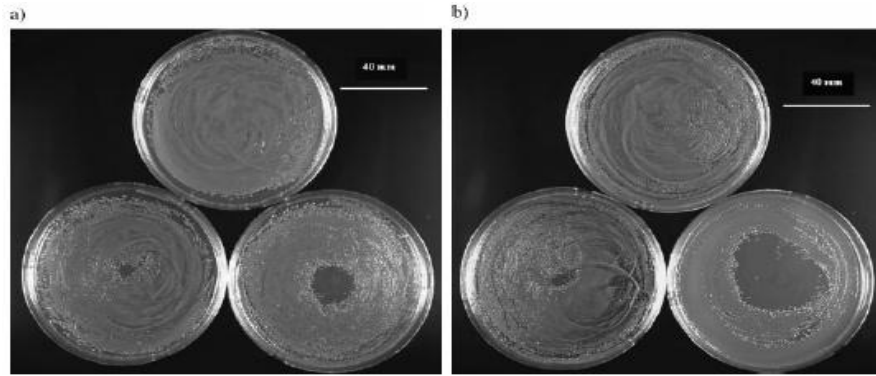
görülmektedir. Burada daha yüksek güç ve daha kısa puls kullanılması bakterilerin daha kısa zamanda etkilenmesine sebep olmaktadır.



Şekil 5.14. MRSA hücreleri üzerine mikrodalga plazmaların etkisi. a) referans, b) 1s, c) 2s, d) 3s, e) 4s, ve f) 5 s plazma ortamına maruz kalan MRSA hücrelerinin SEM görüntüleri (Lee et al., 2005).

Benzer çalışmalar sonucu, plazma ortamında bulunan UV ışınların, O ve OH gibi reaktif parçacıkların ve yüklü parçacıkların bakteriler üzerine öldürücü etkileri ispatlanmıştır.

Atmosferik basınç soğuk plazma jetlerinin bakteri öldürmesinin önemli bir avantajı lokal bir bölgedeki bakteri sterilizasyonu gerçekleştirilebilir olmasıdır. Şekil 5.15.' de bir atmosferik basınç soğuk plazma jeti ile E. coli bakterisi üzerine yapılan çalışma gösterilmiştir. Üstteki petri kapları kontrol kaplarıdır. Soldaki petri kaplarına 30 sn ve sağdaki petri kaplarına ise 120 sn süre ile plazma uygulanmıştır.

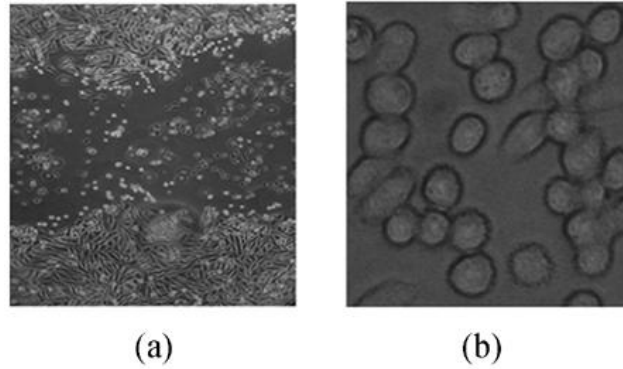


Şekil 5.15. a) Helyum plazması ile yapılan inaktivasyon b) He + % 0.75 O₂ katkılı plazma ile yapılan inaktivasyon (Laroussi et al., 2006)

Şekil 5.15.' ten görüldüğü gibi plazma jetin yalnızca uygulandığı kısımdaki bakteriler öldürülmüştür. Bu özellik tercihi olarak önemli bir avantajdır. Örneğin sivilceye neden olan bakteri insan vücudunda jetin doğrudan sivilcenin üzerine uygulanmasıyla öldürülebilir.

5.5.1.2. Ökaryot Hücreler

Ökaryot hücreler, memeli hücre (mammalian cell) ya da canlı hücre (living cell) olarak da adlandırılmaktadırlar. Canlıların hücre yapıları, çekirdekli ökaryot hücrelerdir. Yapılan çalışmalar düşük sıcaklıklarda soğuk plazmaların ökaryot hücreler üzerine zararlı etkisinin olmadığını göstermiştir (Sosnin et al., 2004). Ancak yüksek dozlarda kullanıldıkları zaman ökaryot hücrenin yapısal değişimine neden olmaktadır. Şekil 5.16' da canlı hücre üzerine soğuk plazma uygulanması sonucu gerçekleşen değişim görülmektedir.



Şekil 5.16. CHO-K1 hücrelerinin plazma uygulanmadan önceki (a) ve sonraki (b) görüntüleri (Sosnin et al., 2004).

Ökaryot hücreler soğuk plazma uygulaması sonucu ayrışma (detachment) ve büyümeye uğramaktadır. Bu değişim, prokaryot hücrelerin soğuk plazmaya maruz kaldığında meydana gelen yapısal bozukluklardan farklıdır. Soğuk plazmalar prokaryot hücrelerin (örneğin bakteriler) ölümüne neden olurken, canlı hücrelerde ölüme değil yapısal değişime neden olmaktadır. Bu durum başlangıçta soğuk plazmaların canlı hücreler üzerine zararlı bir etkisi olarak görülebilir. Ancak yapısal bozukluk belli bir dozdan sonra meydana gelmektedir. Dezavantaj gibi gözüken bu durum aslında önemli bir avantaja dönüştürülmüştür. Örneğin soğuk plazma insan vücudunda yanmış bir bölgeye uygulandığında, yanık bölgenin çok kısa zamanda yenilendiği gözlenmiştir. Bunun sonucunda soğuk plazmaların belli bir doza kadar insana zarar vermediği belli dozlarda ise hücre yenilemesini sağladığı keşfedilmiştir. Canlı hücreler bakteriler gibi ilkel hücreler olmadığı için yapılarındaki değişim ölümle değil farklı dönüşümlerle gerçekleşmektedir.

5.5.2. Diş Temizleme ve Çürük Tedavisi

Diş hekimliğinde dental kaviteler oldukça büyük problemlerdir. Diş içindeki bu kaviteler lazer teknikleriyle veya mekanik diş matkaplarıyla temizlenebilir ancak her iki metotta da ısınma veya titreşim oluşumu hasta için acı verici olabilir.

Dişlerin çürümesine neden olan bakterileri plazma ile ağrısız ve daha verimli bir şekilde yok edecek tedavi yöntemlerinden biri de yakın zamanda geliştirilen atmosferik basınç soğuk plazma jetleridir. Diş çürüklerinin tedavisi normalde dişçi matkabıyla yapılırken, yapılan araştırmalarda, dentin tabakasına (dişin mine tabakasının altında yer alan tabaka) düşük sıcaklıkta plazma göndererek bakteri miktarlarını on binde birine kadar indirilebildiği açıklandı.

Plazma ışınlarını yaygın ağız patojenlerine (*Streptococcus mutans* ve *Lactobacillus casei*) karşı deneyen araştırmacılar, bu bakterilerin diş minesinin üzerinde bir film tabakası oluşturup mineyi aşındırarak dentin tabakasına ulaştıklarını ve çürüklere yol açtıklarını belirtmişlerdir. Araştırmayı gerçekleştirmek için, insan azı dişlerinden elde ettikleri dentin tabakaları dört tür bakteriyle hastalandırılmıştır. Bu bakterilerin oluşturduğu, tedavi edilmediğinde hastanın acı çekilmesine, dişin kaybına ve ciddi diş eti rahatsızlıklarına neden olan çürüklere, 6, 12 ve 18 saniyelik sürelerle plazma ışını yollayan araştırmacılar, süre uzadıkça yok edilen bakteri miktarının arttığını gözlenmiştir. Ortalama 40 °C dolaylarında çalışan soğuk plazmaların dişçilikte kullanılmaya elverişli olduğuna değinen birçok araştırmacı, düşük sıcaklık sayesinde mikropları öldürürken sinir sistemi ve kan dolaşım sistemine bağlı olduğundan sıcaklığa karşı hassas olan dişleri koruyabildiklerini belirtmişlerdir. Matkapla temizlemeye göre daha acısız ve verimli olan plazma ışınlarıyla temizleme yönteminin 3-5 yıl içerisinde kullanılmaya başlayabileceği düşünülmektedir.

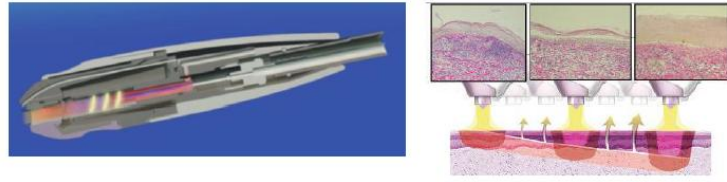
Bölüm 4.3.3.’ te anlatılan Eva Stoffels ve ekibi tarafından geliştirilen, ‘‘Plasma Needle’’ adını verdikleri, iğne elektrotlu RF soğuk plazma jeti bahsi geçen dental uygulamalarda kullanılan atmosferik basınç soğuk plazma jetlere bir örnektir. Şekil 5.17.’ de ‘‘Plasma Needle’’ ile yapılan bir diş uygulaması görülmektedir.



Şekil 5.17. Bir atmosferik basınç soğuk plazma jeti olan ‘‘Plasma Needle’’ uygulaması (<http://www.phys.tue.nl/EPG/stoffels/>, 15.06.2013).

5.5.3. Cilt Yenileme

Plazma cilt yenileme (Plasma Skin Regeneration, PSR) oldukça yeni bir cilt tedavi cihazı olup Amerikan Gıda ve İlaç kurumu tarafından onaylanmış ve 2005 yılında ABD pazarına 2006 yılında ise Avrupa pazarına sunulmuştur. Portrait PSR³ sistemi temel olarak RF soğuk plazma jet sistemidir ve nitrojen gazı ile çalışır. Termal plazma, gaz akışı ile hızlıca soğutulur. Bu sistem dokuya kontrollü bir şekilde uygulandığında minimum derecede zarar verir ve cilt yenileme sektörü için ilham verici bir çalışmadır (Şekil 5.18.).



Şekil 5.18. RF soğuk plazma üreten PSR³ cihazı (sol) ve tedavi sıralaması (sağ) (Fridman et al., 2008).

Dermatolojide yeni bir tedavi yöntemi olan plazma cilt yenileme hem Amerika’ da hem de Avrupa’ da yapılan klinik deneyler ile onaylanmıştır. Bir atmosferik basınç soğuk plazma jeti olan PSR³ cihazının yüksek güçlerde (puls başına 3-4 J) önemli derecede cilt sıkılaşmasına yardımcı olduğu ve dokusal gelişimi desteklediği gösterilmiştir (Fridman et al., 2008).

Cilt gençleştirme ya da yenileme prosedürü basit bir prosedür olup tüm yüz için 15 dakikadan az zaman almaktadır. Kısa süre sonra ciltteki kırışıklıkların azaldığını ve gerginliğin arttığını görmek mümkündür. Atmosferik basınç soğuk plazma jeti ile kırışıklığın azalması, ince kırışıklıkların doldurulması ve cilt yapısının gençleşmesi için doğru ortam yaratılmakta ve büyüme faktörlerinin uyarılması ile yeni kollajen oluşumu sağlamaktadır. Şekil 5.19.’ da PSR³ soğuk plazma jeti ile yapılan leke tedavisi ve Şekil 5.20.’ de ise kırışıklık tedavisi görülmektedir.



Şekil 5.19. Leke tedavisi (Fridman et al., 2008).



Şekil 5.20. Kırışıklık tedavisi (Fridman et al., 2008).

Bazı tedavilerde sadece cilt yüzeyinde iyileşme sağlarken, PSR³ soğuk plazma jet sistemi cilt yüzeyi altındaki yapıları da değişikliğe uğratmakta ve cilt dokusunu iyileştiren, renk değişikliklerini giden, kırışıklıkları yok eden ve devamlı rejenerasyon sağlayan bir durum oluşturmaktadır. Bu kısa işlem süresince plazma ısı enerjisi, deri ile kontak haline geçmeden cilt altında tedavi edilecek alana aktarılmaktadır. Böylece derinin dış yüzeyi, yeni cildin oluşumuna dek koruyucu bir tabaka halinde zarar görmeden kalmaktadır.

Klinik çalışmalarda mükemmel bir güvenlik profili ortaya konulmuştur. Yara izi, hipopigmentasyon (rengin açılması), hiperpigmentasyon (cilt renginin koyulaşması) gibi diğer tedavilerde (lazer veya ışık tedavileri gibi) görülen yan etkiler çok aza indirilmiştir. Hastalar tedavi sırasında yalnızca lokal olarak bir ısınma hissedebilir. Bu his ise lokal anestezi ile ortadan kaldırılabilir.

5.5.4. Yara Tedavisi

Soğuk plazmaların canlı hücreler üzerine etkisinin belirli bir dozdan sonra yapısal değişim yarattığı önceki bölümlerde açıklanmıştı. Bu durum atmosferik basınç soğuk plazma jetlerinin tıpta farklı uygulamalarda kullanımına olanak

sağlamaktadır. Bunlardan biri de yanık ya da herhangi bir yaranın daha hızlı bir şekilde iyileştirilmesi olarak yapılmaktadır. Şekil 5.21.' de ayak bölgesinde bulunan bir kronik ülser yarasının plazma terapisi yapılmadan önceki ve yapıldıktan sonraki görüntüleri verilmiştir. Açık yara yaklaşık 4.5 ay sonra neredeyse kapanmıştır. Benzer şekilde Şekil 5.22' de gözde meydana gelen korneal ülser yarası da plazma terapisiyle çok büyük ölçüde tedavi edilmiştir.



Şekil 5.21. Soğuk plazma ile kronik ülser yarası tedavisi (Fridman et al., 2008).



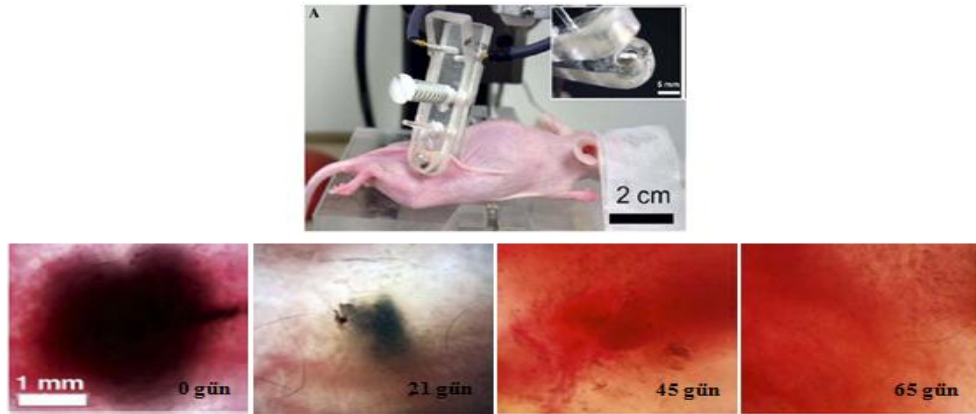
Şekil 5.22. Ağır korneal ülser yaralarının soğuk plazma tedavisi öncesi ve 6 seans plazma tedavisinden sonraki durumu (Fridman et al., 2008).

Atmosferik basınç soğuk plazma jetleri açık ameliyatlarda kan pıhtılaştırmak suretiyle hızlı kanama olan bölgelerde kanamanın durdurulması için de kullanılmaktadır.

5.5.5. Kanser Tedavisi

Elektrik alanların biyolojik hücreler üzerine etkisi bilinen bir uygulamadır. Nano-saniye puls elektrik alanlar, elektroporasyonda kimyasalların ve DNA moleküllerinin hücre içine yerleştirilmesinde kullanılmaktadır (Gothelf et al., 2003). Elektrik alanların biyolojik hücreler üzerine uygulamaları içinde, farklı tip kanser tedavilerinde kullanımı en ilgi çekici uygulamadır. Bunun için kullanılan radyo frekans ve mikrodalga cihazlar, tümörü 43°C den daha fazla sıcaklıklara ısıtarak hücrenin aşırı ısınma (hipertermia) yoluyla ölmesine sebep olmaktadır (Haemmerich and Laeseke, 2005). Son yıllarda nano-saniye elektrik alanlar doğrudan kanser hücreleri üzerine uygulanmaktadır (Buescher and Schoenbach, 2003). Bu çalışmalarda 40 kV/cm kadar yüksek elektrik alanlar, 300 ns pulslar ile melanomlar üzerine uygulandı ve son derece başarılı sonuçlar bulundu (Nuccitelli et al., 2006). Bu çalışmalar ve bulunan bu sonuçlar; aşırı ısınma veya ilaç kullanmadan yepyeni bir elektriksel kanser tedavi metodunu geliştirmektedir.

Nano-saniye puls elektrik alanlarla ilgili en son yapılan başarılı bir çalışma Şekil 5.23.' de verilmiştir. Şekil 5.23.' deki görüntülerin birincisi, puls elektrik alan uygulamasından hemen sonra, diğerleri ise sırasıyla, 21 gün, 45 gün ve 65 gün sonra çekilmiş tümör (Melanom) görüntüleridir. Bu görüntülerden görüldüğü gibi 45 gün sonra neredeyse tümör tamamıyla yok olmaktadır. Burada elektrotlar arasına uygulanan yüksek voltaj, atmosferik havanın mikrop plazmasını üretmektedir.



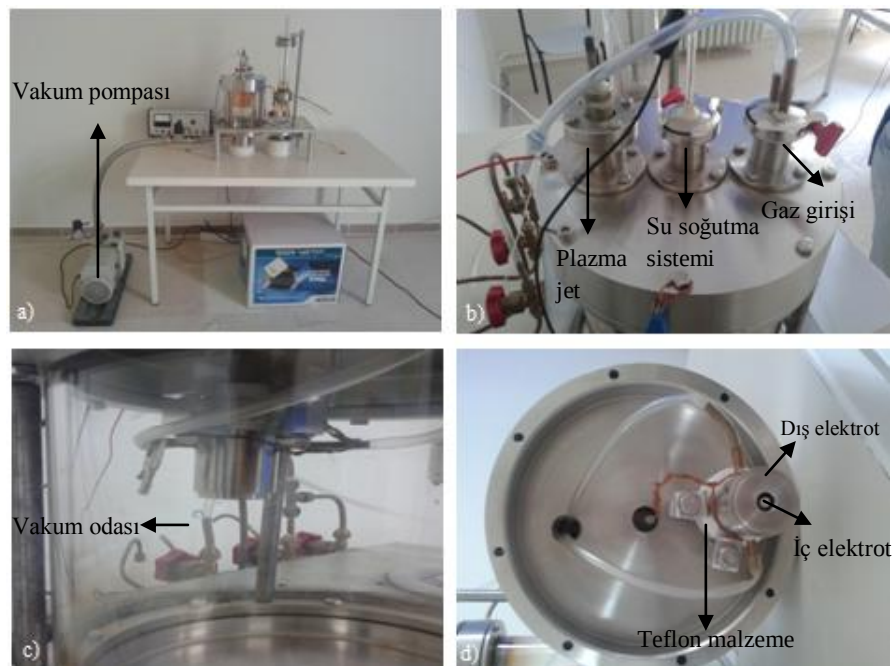
Şekil 5.23. 40 kV/cm elektrik alanının 300 ns puls zamanı ile Melanom üzerine uygulanması. Geçirmeli aydınlatma (Transillumination) görüntüleri, tümörün zaman içinde gerilemesini göstermektedir (Nuccitelli et al., 2006).

Kanserli hücrenin dönüşümüne elektrik alan ile plazmanın etkisi detaylı araştırmalar sonucu ortaya konacaktır. Ancak gelecekte özellikle cilt kanseri tedavisinde atmosferik basınç soğuk plazma jetlerinin doğrudan kullanımı da görülecektir.

BÖLÜM 6

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

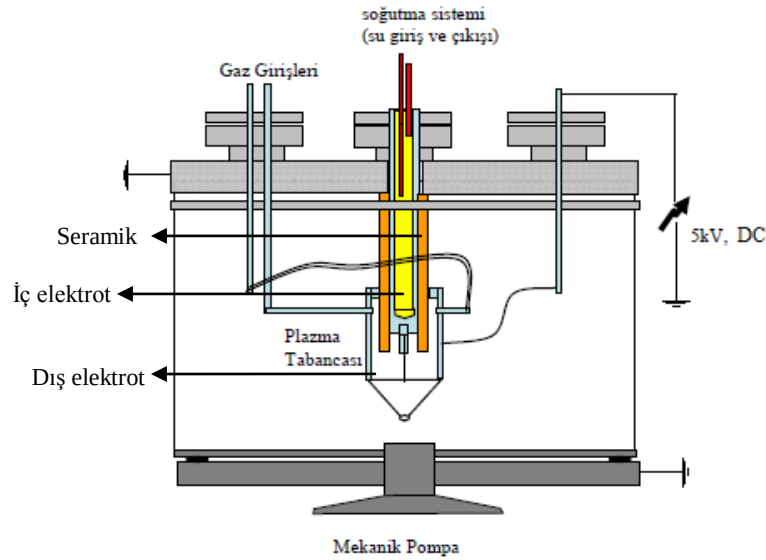
Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Soğuk Plazma Fiziği Laboratuvarı ‘nda geliştirilen DC soğuk plazma jet üretmek için kullanılan sistemin fotoğrafları Şekil 6.1.’ de verilmiştir.



Şekil 6.1. Deneysel düzenek

Şekil 6.1. a)’ da DC plazma jet üretmek için kullanılan sistem verilmiştir. Paslanmaz çelikten yapılmış elektrotlar sistemi bir cam vakum odası (250 mm yüksekliğinde, 200 mm çapında ve 6 mm kalınlığında) içindedir ve vakum pompası ile elektrotlar arasında üretilen plazma vakum odası içine akıtılmaktadır. Elektrotlar aşırı ısınmadan korunmak için su akışı ile soğutulmuştur. Cam vakum odası içine

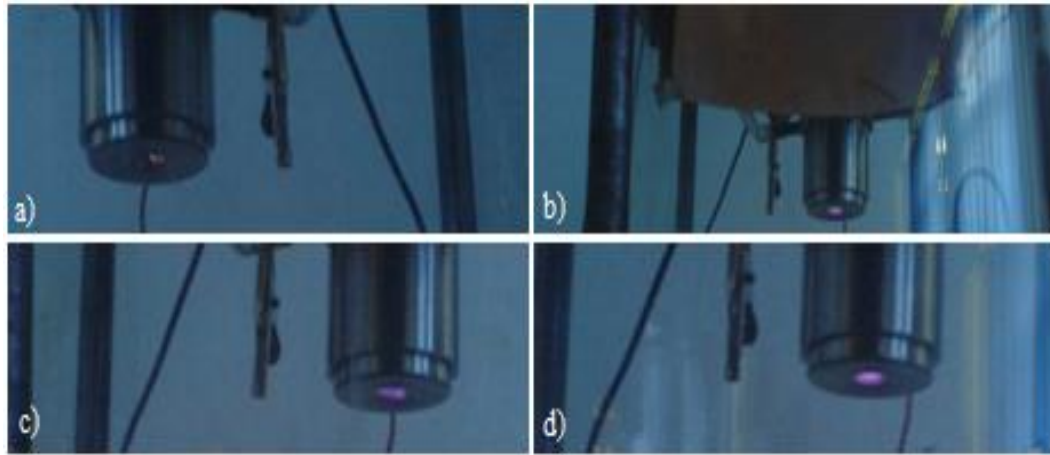
Şekil 6.1. d)' de görülen paslanmaz çelik elektrotlar sistemi yerleştirilmiştir. Dış elektrot (dış çapı 50 mm, iç kısımdaki delik 10 mm) , iç elektrottan (5 mm kalınlığında) ve cam vakum odası kapağından seramik ve teflon yalıtkanlarla yalıtılmıştır. Şekil 6.1. b)' de cam vakum odası kapağının üstten fotoğrafı verilmiştir. Buradan görüldüğü gibi sistemin elektrik bağlantıları ve gaz akış bağlantıları yapılmaktadır. Yine burada elektrot sisteminin su soğutma mekanizması görülmektedir. Şekil 6.1. c)' de cam vakum odası içindeki elektrotlar sisteminin fotoğrafı verilmiştir. Bu cam vakum odası bir mekanik vakum pompasına bağlıdır ve vakum yardımıyla atmosferik hava, sistemin elektrotları arasına çekilmektedir. Vakum pompası çalıştırılıp, elektrotlar arasına 4-5kV DC voltaj uygulandığında sisteme giren hava akışı kontrol edilerek cam vakum odası içinde DC akan plazma üretilmiştir. Şekil 6.2.' de sistemin şematik gösterimi verilmiştir.



Şekil 6.2. Sistemin şematik gösterimi (Cenik, 2008).

Şekil 6.2.'den görüldüğü gibi iç elektrot gövde ile temas halindedir ve doğrudan toprak hattına bağlıdır. Bu şekilde sistemin iç elektrotu negatif

potansiyelde, dış elektrot ise pozitif potansiyelde tutulmuştur. Plazma oluştuğunda güç kaynağından çekilen akımın kontrol altında tutulması için 2 k Ω balast direnç kullanılmıştır. Balast direnç, elektrotlar arasında plazma oluştuktan sonra fazla akım çekilmesini önlemek için kullanılır. Şayet bu yapılmazsa güç kaynağı üretim sınırlarından yüksek akım vermeye zorlanır ve zarar görebilir. Elektrotlar arasındaki mesafe 2-3 mm civarındadır. Dış elektrot çapı 5 mm civarındadır. Şekil 6.3.' de hava akış hızına göre elektrotlar arasında oluşan plazma görüntüleri verilmiştir.



Şekil 6.3. DC plazma görüntüleri

Şekil 6.3.a' da görüldüğü gibi tümüyle elektrotlar arasına hava girdiğinde plazma kıvılcım şeklinde oluşmaktadır. Bu durumda yüksek basınçta elektrotlar arasında elektron çoğalma (avalanche) işlemi ve iyonlaşma gerçekleşirken, yüksek basınçta ortalama serbest yolun kısa olması nedeniyle elektronlar iyonlaştırıcı çarpışmalar yapacak kadar hızlanamaz. Bu nedenle var olan iyonlaşmalar da yeniden birleşme reaksiyonlarıyla azaldığı için hacimsel olarak plazma genişleyemez. Ayrıca elektrotlar arasından sürekli parçacık ve enerji kaybı söz konusu olduğu için çok kısa sürelerde elektrotlar arasında plazma oluşabilir. Ancak

dışarıdan hava girişi azaltılırsa ve pompa havayı çekmeye devam ettiği için elektrotlar arasındaki gaz basıncı azalır ve plazma tümüyle elektrotlar arası bölgeyi kaplar. Bu durumda elektrik alanda hızlanan elektronlar; elektrotlar arasında daha çok iyonlaştırıcı çarpışmalar yapabilecek kadar yüksek ortalama serbest yol ile hareket ederler. Elektrotlar arasını tümüyle kaplayan glow plazma oluştuğunda zaten uygulanan güç kaynağı üzerindeki voltaj 4.000 V' dan 100 V civarına düşmektedir. Yani tamamıyla breakdown gerçekleşmektedir. Ancak burada birçok breakdown'ın gerçekleştiğinin altı çizilmelidir. Çünkü sürekli gaz akış hızı ve dolayısıyla elektrotlar arasındaki basınç 1.10^3 ile 2.10 mBar arasında değiştiği için (p.d) değeri için bir breakdown oluşmaktadır (elektrotlar arası mesafe 2 mm). Breakdown voltajı (p.d)'ye bağlıdır. Burada akıtılan plazma sıcaklığı, gaz akış hızına ve oluşan plazmadan uzaklığa göre değişmektedir. Ancak yapılan çalışmalarda genelde 20-30 derece sıcaklıklarda plazma elde edildi. Bu sıcaklık, k tipi termoçift ile ölçülmüştür. Burada ön çalışmalar çerçevesinde düşük basınçta düşük sıcaklıkta DC akan plazma üretilmiştir. İleriki çalışmalarda akan plazmanın tümüyle atmosfer koşullarına çıkarılması için çalışmalar yapılacaktır.

SONUÇ VE YORUM

İnsanoğlunun yeryüzünde ilk ürettiği plazma ateştir. En basit mum alevi 400°C - 1000°C sıcaklıklardadır. İnsanlık tarihi ateşin keşfi ile önemli adımlar atmıştır. Ateşin ürettiği yüksek sıcaklığı kullanarak madenleri işlemiş ve yeni teknolojiler geliştirmiştir. Uzay teknolojisinden tıp alanında sterilizasyondan yararlanmaya kadar ateşin yüksek sıcaklık etkisi kullanılmıştır.

20. yüzyılda maddenin dördüncü hali plazma tanımlanmaya başlandığında ateşin yapısının maddenin katı, sıvı, gaz hallerinden çok farklı bir hal olduğu fark edilmiştir. Bununla birlikte güneş gibi tüm yıldızların plazmadan oluştuğunun anlaşılmasıyla evrenin hala büyük bir kısmının plazma halinde olduğu ortaya konulmuştur. İlerleyen dönemlerde de insanoğlu iyonosfer, şimşek, kutup ışıkları gibi önceden ne olduklarını bilmedikleri oluşumları plazma olarak tanımlayabilmişlerdir. Bütün bu bilgi birikiminden sonra yeryüzünde farklı metotlarla plazma üretimi denemeleri yapılmıştır. İlk üretilen laboratuvar plazması, iki metal elektrot arasına yüksek voltaj uygulanarak oluşturulan gaz deşarj plazmaları olmuştur. Böylece insanoğlu ateşin içindeki pozitif ve negatif parçacık birlikteliğini kapalı bir hacim içinde üretebilmiş ve bunu kontrol altına alabilmiştir. Yapılan çalışmalar, elektriksel gaz deşarj plazmalarının yapısının yıldızlarda karşılaşılan sıcak plazmalardan farklı olduğunu göstermiştir. Elektriksel gaz deşarj plazmalarında gazın sıcaklığının elektronların sıcaklığından çok çok düşük olduğu hatta oda sıcaklığında olabildiği gözlenmiştir. Bu aslında heyecan verici bir gelişmedir. İnsanoğlu ateşin yapısına benzer bir maddeyi üretebiliyor ve bu elle dokunulabilecek kadar soğuk olabiliyordu. Ancak burada iki önemli sorun vardı. Kapalı hacim içindeki soğuk plazmaya nasıl dokunabilecekti? Üstelik bu plazma 1000-10.000 V civarında voltaj içinde bulunmaktaydı. Yapılması gereken üretilen soğuk plazmanın kapalı hacim içinden ve özellikle elektrotların arasından atmosfer koşullarına çıkarılmasıydı. Bu düşünce karşımıza “ark jetler” olarak çıkmıştır. Ark

jetlerde plazma, kapalı hacim içinden atmosfer koşullarına çıkarılabilmektedir. Bu jetlerde DC voltaj kullanıldığı için elektrotlar arasında deşarj, arka dönüşmekte ve üretilen plazma son derece sıcak olmaktadır. Bu özelliğinden dolayı kesme, kaynak, kaplama gibi birçok teknolojiye kullanılmışlardır. Ancak insanoğlunun ateşe elle dokunabilme hayali gerçekleşmemiştir. Ark jetler atmosfer koşullarına plazmanın çıkmasını sağlamıştır ancak çok sıcaktır (1000 derecenin üzerinde). Atmosfer koşullarına çıkabilen bu plazmaların soğutulmasının çözümü elektrotlar arasında meydana gelen arkı önlemektir. Bunun iki çözümü vardır. Birincisi, DC voltaj yerine AC voltaj uygulamak ya da DC voltajı puls olarak kullanmaktır. İkincisi ise özel elektrot dizaynları geliştirmektir.

Son 20 yıl içinde bu iki çözümü kullanarak elle dokunulabilecek kadar soğuk atmosferik basınç plazma jetleri üretilmiştir. İnsanoğlu artık ateşe elle dokunabilmektedir. Bu, ateşi sıcaklık etkisi olmadan insan hayatında kullanabilmek demektir. Yanmalı araçlarda özellikle uzay araçlarında, ateşin yanıcı özelliği değil içindeki iyonik yapı kullanılarak itme üretilmektedir. Atmosferik basınç soğuk plazma jetleri de bu anlamda insanoğlunun hayatında ateşin sıcaklık etkisi değil iyonik yapısının kullanımına izin vermiştir.

Bu çalışmada son 20 yılda üretilen literatürdeki tüm atmosferik basınç soğuk plazma jetleri incelenmiştir. Plazma teknolojisinde “soğuk” ifadesi nispi sıcaklık farkından çok elektronlarla nötral atom ve iyon sıcaklıkları arasındaki farkı ifade etmektedir. Soğuk plazmalarda gaz yani nötral atom sıcaklığı elektron sıcaklığından çok çok düşüktür. Ancak bu çalışmada bu soğuk plazma kavramının yanında 100 °C ‘nin altında gaz sıcaklığına sahip atmosferik basınç soğuk plazma jetleri incelenmiştir. Bu inceleme soğuk plazma jetlerin gelecekte özellikle insan hayatında çok daha fazla yer edeceği düşünülerek yapılmıştır.

Çalışmada öncelikli olarak literatürdeki tüm atmosferik basınç soğuk plazma jetleri incelenmiştir. İncelemeler sonucunda çoğu atmosferik basınç soğuk plazma

jetinin ark jet olduğu, ark üretmeyen jetlerin ise ortalama 300 °C- 400 °C hatta 1000 °C gaz sıcaklığında plazma ürettiği görülmüştür. Bunlar daha çok materyal teknolojisinde kullanılmaktadır. Ancak inceleme özellikle 100 °C' nin altında sıcaklıklara sahip jetler üzerine yoğunlaştırılmıştır. Bu sıcaklıklarda plazma üretmek için iki çözüm üretildiği görülmüştür. Bunlardan birincisi elektrotların özel dizaynıdır. Bunun için daha çok bir dielektrik ile çevrelenen farklı türde elektrot dizaynları gerçekleştirilmiştir. Ancak elektrot dizaynları bir üst başlık olarak bir grup sınıflandırmasına pek izin vermemektedir. Diğer çözüm plazmanın elektromanyetik yapısının değiştirilmesidir. Bunun için plazmayı üretmek için kullanılan güç kaynağı özel olarak seçilmektedir. Daha çok puls ya da yüksek frekans alternatif voltaj kullanılmaktadır. Bu nedenle atmosferik basınç soğuk plazma jetlerini elektrotlar arasındaki elektromanyetik alan yapısına yani plazma üretmek için kullanılan güç kaynağı cinsine göre sınıflandırma yapmak daha genel bir sınıflandırmaya olanak sağlamaktadır. Aynı zamanda bu sınıflandırma çeşidi ile birçok jeti bir başlık altında toplamak, konuyu daha kolay ve anlaşılır yapmaktadır. Voltaj, DC' de de AC' de de puls olarak kullanılabilir. Puls voltaj, plazma içindeki parçacıkların çarpışmaları arasında bir süre duraksamaya neden olduğu için soğuk plazma üretmek için en ideal yoldur. Burada ayrıca puls voltajın uygulama zamanı ve bekleme zamanı da önemli rol oynamaktadır. MHz mertebesindeki radyo frekans ya da GHz mertebesindeki mikrodalga güç kaynakları da yeterince soğuk plazma üretmek için kullanılmaktadır.

Bu tez çalışması boyunca atmosferik basınç soğuk plazma jetler ile ilgili yapılan çalışmalar sonucu, jet üretmek için geliştirilen her bir sistemde farklı türde plazmalar elde edildiği görülmüştür. Farklı elektromanyetik alan yapısında ve farklı elektrot dizaynlarında geliştiren jetlerde oluşan plazmaların da birbirinden farklı olması beklenen bir sonuçtur. Bu nedenle jetleri, elektrotlar arasında oluşan plazma türüne göre bir üst başlıkta sınıflandırmak mümkündür. Yapılan incelemeler sonucu daha çok glow deşarj, corona deşarj, dielektrik bariyer deşarj gibi plazma türleri jete dönüştürülmüştür. Ancak bu çalışmada jetleri plazma türüne göre üst başlıklar

altında sınıflandırmak, elektrotlar dizanynına göre alt başlıklandırmada karmaşa yarattığı için tercih edilmemiştir. Bununla birlikte, hava kullanılan jetler, oksijen kullanılan jetler, nitrojen kullanılan jetler ve soygaz kullanılan jetler olarak, jetlerin üretildiği gazın cinsine göre de bir sınıflandırma yapılabilir.

Neden atmosferik basınçta soğuk plazma jetlerinin tercih edildiği de önemlidir. Aslında vakum koşullarında da soğuk plazma jetleri üretilmektedir. Ancak bu jetler için bir vakum odası, vakum pompası, vakum ölçün cihazları gerekmektedir. Bu cihazlar üretilen sistemin maliyetini arttırmaktadır. Ayrıca vakum (ya da düşük basınç) soğuk plazma jetlerini mobil olarak kullanmak kolay değildir. İşlenilmesi gereken numunenin, vakum bölgesine taşınması gerekir. Oysaki atmosferik basınç soğuk plazma jetleri mobil olarak kullanılabilir ve uygulamanın yapılacağı sahaya götürülebilir. Atmosferik basınçdaki plazmaların tercih edilmesinin diğer bir önemli avantajı, ortamdaki havanın plazma gazı olarak kullanımına olanak sağlamasıdır. Bu ekonomi açısından bir avantajdır. Atmosferik basınçtaki havanın plazma gazı olarak kullanılmasının diğer önemli bir avantajı da havanın plazmasında karşımıza çıkan O, N ve OH gibi radikal parçacıkları üretmesidir. Bu parçacıklar plazmanın kimyasal etkisini arttırmaktadır. Seçilen birçok atmosferik basınç soğuk plazma jetinin spektroskopik bilgileri de sistemlerin tanıtıldığı Bölüm 4' te verilmiştir. Bu verilerde üretilen plazmaların O, N ve OH gibi parçacıkları içerdiği görülmektedir. Bu aktif parçacıklar uygulanan yüzeyde önemli değişikliklere sebep olmaktadır.

Aslında atmosferik basınçlarda çalışmak önemli bir avantaj olmasına rağmen önemli bir zorluğu da beraberinde getirmektedir. Yüksek basınçlarda plazma yüksek akım taşıdığı için plazma ısınmaktadır. Ama bu sorun güç kaynağı ve elektrot yapısı ile çözülmüştür.

Kullanılan güç kaynağına göre yapılan sınıflandırmada jetler, farklı elektrot dizaynlarına göre alt başlıklarda incelenmiştir. Esasında çok farklı elektrot yapıları

ile karşılaşılmasa da genel olarak 5-10 farklı yapı kullanılmaktadır. Bunların en önemlisi elektrotların hangisinin dielektrikle kaplandığı veya elektrotların hangisinin toprak elektrotu olarak seçildiği ile ilgilidir. Bununla birlikte birçok farklı yapıda elektrot dizaynları karşımıza çıkmaktadır. Bunların içinde en farklı olanları su ya da gaz soğutma sistemleri kullananlardır. Bu şekilde birkaç örnek, çalışmanın içinde yer verilmiştir. Ancak bunun gibi ek sistemler, maliyeti arttırmaktadır.

Yapılan çalışmada bir tek güç kaynağı ile paralel çalışan birçok atmosferik basınç soğuk plazma jetlerinin olduğu da görülmüştür. Bu da maliyeti hem düşüren hem de aynı güç kaynağı ile birçok kullanıcı tarafından kullanılabilen jetler üretilebileceğini göstermektedir. Örneğin bir dışıde tek bir güç kaynağı ile çalışan birçok jet bulunabilir.

Bunun haricinde farklı atmosferik basınç soğuk plazma jetleri ile üretilen plazmaların çarpıştırılması ile ilgili çalışmalar bulunmaktadır. Bu çalışmalar, plazma kimyası ile ilgili molekül yapısının anlaşılması, yeni tür reaksiyonların ortaya konması ve açıklanması ve yeni spektroskopik verilerin ortaya çıkması gibi çok farklı sonuçlar ortaya koyacaktır.

Atmosferik basınç soğuk plazma jetlerin çok farklı kullanım alanları söz konusudur. Bakteri sterilizasyonu en çok tercih edilen kullanımlarından biridir. Neredeyse tüm bakteriler ve hatta bazı virüsler ve mantarlar üzerinde de çalışmalar yapılmıştır. Plazma ile bakteri sterilizasyonu var olan teknolojilere çok önemli avantajlar kazandırmaktadır. 3-5 sn gibi çok kısa zamanlarda sterilizasyon yapılabilmektedir. Isı üreten sterilizasyon tekniklerinde bu süre minimum yarım saat civarındadır. Ayrıca plazma jetler herhangi bir zararlı gaz üretmedikleri için ortamdaki insanlara ve kullanıcıya zarar vermemektedir. Oysa kimyasal yöntemlerle sterilizasyon hem ortamdaki insanlara hem de kullanıcıya ciddi zararlar verebilmektedir. Aynı zamanda kimyasal sterilizasyondan sonra ortamın bir süre kullanılmaması gerekmektedir. Bu da ciddi bir zaman kaybıdır. Bundan dolayı

atmosferik basınç soğuk plazma jetleri ile sterilizasyon, sahip olduğu özellikler nedeniyle tercih sebebi olup gelecekte çok daha fazla günlük hayatın içinde var olacaklardır.

Canlı hücreler üzerine yapılan çalışmalar, belirli dozlara kadar atmosferik basınç soğuk plazma jetlerin canlıya zarar vermediğini göstermektedir. Bu nedenle vücutta oluşan sivilceler gibi bakterilerin neden olduğu birçok rahatsızlığın bu jetler ile tedavi edilebileceği düşünülmektedir. Soğuk plazma jet teknolojisi geliştikçe her insanın yaşadığı boğaz enfeksiyonu gibi rahatsızlıkların da, çeşitli yan etkileri olan ilaçlardan ziyade bu jetler ile tedavisinin mümkün olacağı düşünülmektedir.

Atmosferik basınç soğuk plazma jetlerinin belirli dozlardan sonra canlı hücreyi değişime uğratması, cilt yenileme gibi önemli bir uygulamaya dönüştürülmüştür. Günümüzde yara, yanık, ya da kırıksıklık gibi tıbbi problemler bu jetler yardımıyla kısa sürelerde tedavi edilmektedir. Ayrıca soğuk plazmaların kanı pıhtılaştırma ve yarayı kapatma özelliği olduğu için ilerleyen yıllarda ameliyatlarda klasik dikiş uygulamasını da sonlandırabileceği düşünülebilir.

Materyal teknolojisinde de soğuk plazma jetlerin uygulama alanları vardır. Yüzey temizleme ve yüzey aktifleştirme bunlara örnek olarak verilebilir. Boya, yapıştırma, kaplama, dekorasyon, tekstil, optik ve elektronik gibi daha birçok alanda ilerleyen zamanlarda jetlerin geleneksel yöntemlerin yerini alacağı düşünülmektedir.

Atmosferik basınç soğuk plazma jetler için şimdilik en büyük probleminin kullanılan güç kaynağı olduğunu düşünüyorum. Nispeten ağır olmaları, üretilen cihazların mobil kullanımlarında sıkıntı yaratırken yüksek voltaj kullanılması da kullanıcıları tedirgin edebilir. Ancak bu problemler güç kaynağı teknolojisi geliştikçe ortadan kalkacaktır. Diğer taraftan güç kaynaklarının yüksek fiyatları da bu cihazların üretiminde bir problemdir. 1000-2000 dolara imal edilebilecek bir jetin, güç kaynaklarının yüksek fiyatları sebebiyle maliyeti artmaktadır.

Mevcut teknolojilerle üretilen ve piyasaya sürülen sıradan bir atmosferik basınç soğuk plazma jeti bu günlerde 20.000-30.000 dolara satılmaktadır. Bu fiyatlar özellikle bireysel kullanımlar için çok ciddi rakamlardır. Ancak fiyatların bu denli yüksek olmasının sebebi üretim maliyetinin yanında reklam, nakliye ve dağıtım şirket maliyetleridir. Bu yüksek fiyatlar da ciddi bir mali kayıptır. Gelecekte ülkemizde araştırmacıların kendilerinin geliştirecekleri güç kaynaklarıyla ve yerli üretime geçilmesiyle bu maliyetler oldukça düşecektir.

Bu tez çalışmasında, önemli literatür araştırmasından sonra tümüyle yeni orijinal bir atmosferik basınç soğuk plazma jeti üretmek için ön çalışmalar yapılmıştır. Geliştirilen sistem ile üretilen plazma atmosfer koşullarına çıkarılamamıştır. Ancak bir vakum odası içinde 100 °C' nin altında sıcaklıklarda DC akan plazma üretilebilmiştir. DC güç kaynağı kullanarak atmosfer koşullarında soğuk plazma jeti üretmek akımın çok yükselmesi nedeniyle oldukça zordur. Bu nedenle de literatürde neredeyse hiç karşılaşılmamıştır. Ancak DC güç kaynağı ile üretilen atmosferik basınç soğuk plazma jet yepyeni bir sistem olacaktır. Burada kullanılan sistemin hedeflendiği gibi yalnızca DC güç kaynağı kullanarak 100 °C' nin altında jete dönüştürülmesi için farklı gaz ve gaz akış hızları da denenmelidir. Sistem DC güç kaynağı yerine puls DC ya da yüksek frekans AC güç kaynağı ile çalıştırıldığında ve gaz akışı pompa ile çekilerek değil de yüksek basınç gaz tüplerinden sağlandığında atmosferik basınç soğuk plazma jeti üretileceğini düşünüyorum.

Bütün bunlara rağmen bu sistem çok farklı teknolojik uygulamalarda kullanılabilir. Örneğin vakum odası içine yerleştirilen bakteri gibi farklı mikroorganizmalar akan plazma ile steril edilebilir. Bunun gibi farklı malzeme yüzeyleri üzerinde plazma yüzey işlemleri için kullanılabilir.

KAYNAKLAR DİZİNİ

Akan, T., 2003, Termiyonik vakum ark (TVA)'nın temel özelliklerinin incelenmesi, Doktora tezi, OGÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, 147s.

Akan, T., 2005, Maddenin dördüncü hali plazma ve temel özellikleri, Çağdaş fizik elektronik dergi, sayı 4., <http://nucleus.istanbul.edu.tr/~cfe/dorduncu/mak1/>

Bárdos, L. and Baráneková, H., 2010, Cold atmospheric plasma: sources, processes and applications, Thin solid films, 6705-6713.

Bayliss, D. L., Walsh, J. L., Shama, G., Iza, F. and Kong, M. G., 2009, Reduction and degradation of amyloid aggregates by a pulsed radio-frequency cold atmospheric plasma jet, New Journal of Physics, 11, 115024.

Cenik, M. İ., 2008, Etkileşen düşük sıcaklıklı plazmaların spektroskopisi, Doktora tezi, OGÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, 123s.

Chen, G., Chen, S., Zhou, M., Feng, W., Gu, W. and Yang, S., 2006, The preliminary discharging characterizations of a novel APGD plume and its application in organic contaminant degradation, Plasma Source Science and Technology, 15, 603-608.

Cheng, C., Liye, Z. and Zhan, R., 2005, Surface modification of polymer fibre by the new atmospheric pressure cold plasma jet, Surface and Coating Technology, 200, 6659-6665.

Cho, G., Lim, H., Kim, J. H., Jin, D. J., Kwon, G. C., Choi, E. H. and Uhm, H. S., 2011, Cold plasma jets made of syringe needle covered with a glass tube, IEEE Transactions on Plasma Science, Vol. 39, No. 5, 1234-1238.

Choi J.H., Han I., Baik H.K., Lee M.H., Han D., Park J., Lee I., Song K.M., Lim Y.S., 2006, Analysis of sterilization effect by pulsed dielectric barrier discharge, *Journal of Electrostatics*, 64, 17–22.

Duan, Y., Huang, C. and Qingsong, Y., 2005, Low-temperature direct current glow discharges at atmospheric pressure, *IEEE Transactions on Plasma Science*, Vol. 33, No. 2, 328-329.

Frey W., Gusbeth C., Schwartz T., Volkmann H., Kirchen S., Wuestner R., Straessner R. and Bluhm H., 2006, “Inactivation of Microorganisms by Pulsed Electric Field Treatment”, *Proceedings the 33rd IEEE International Conference on Plasma Science*, June 4-8, Michigan, ABD, 2006.

Fridman, G., Friedman, G., Gutsol, A., Shekhter, A. B., Vasilets, V. N. and Fridman, A., 2008, Applied plasma medicine, *Plasma processes and polymers*, 503-533.

Förster, S., Mohr, C. and Viöl, W., 2005, Investigations of an atmospheric pressure plasma jet by optical emission spectroscopy, *Surface and Coating Technology*, 827-830.

Grill, A., 1993, *Cold Plasma in Materials Fabrication*, IEEE press, New York.

Gothelf A., Mir L.M. and Gehl J., 2003, Electrochemotherapy: results of cancer treatment using enhanced delivery of bleomycin by electroporation, *Cancer Treatment Review*, 29, 371–387.

Goldston, R. J. and Rutherford, P. H., 1995, *Introduction to plasma physics*, IOP Publishing, Bristol and Philadelphia, 491p.

Haemmerich D. and Laeseke P.F., 2005, Thermal tumour ablation: devices, clinical applications and future directions”, *International. Journal of Hyperthermia*, 21, 755–760.

Hong, Y. C. and Uhm, H. S., 2006, Microplasma jet at atmospheric pressure, *Applied Physics Letter*, 89, 221504.

Hong, Y. C. and Uhm, H. S., 2007, Air plasma jet with hollow electrodes at atmospheric pressure, *Physics of Plasmas*, 14, 053503.

Hong, Y. C., Uhm, H. S. and Yi, W. J., 2008, Atmospheric pressure nitrogen plasma jet: Observation of striated multilayer discharge patterns, *Applied Physics Letters*, 93, 051504.

Hong, Y. C., Kang, W. S., Hong, Y. B., Yi, W. J. and Uhm, H. S., 2009, Atmospheric pressure air-plasma jet evolved from microdischarges: Eradication of *E. coli* with the jet, *Physics of Plasmas*, 16, 123502.

Kieft, I. E., Darios, D., Roks, A. J. M. and Stoffels, E., 2005, Plasma treatment of mammalian vascular cells: A quantitative description, *IEEE Transactions on Plasma Science*, Vol. 33, No. 2, 771-775.

Kral, N. A. and Trivelpiece, A. W., 1973, *Principles of plasma physics*, McGraw-Hill book comp., 674p.

Kunkel, W. B., 1966, *Plasma physics in theory and application*, McGraw-Hill book comp., New York, 496p.

Laroussi, M. and Lu, X., 2005, Room-temperature atmospheric pressure plasma plume for biomedical applications, *Applied Physics Letters*, 87, 113902.

Laroussi, M., Tendero, C., Lu, X., Alla, S. and Hynes, W. L., 2006, Inactivation of bacteria by the plasma pencil, *Plasma Processes and Polymers*, 470-473.

Laroussi, M., 2009, Low temperature plasmas form edicine, *IEEE Transactions on plazma science*, Vol. 37, No. 6, 714-725.

Lee K. Y., Park B. J., Lee D. H., Lee I., Hyun S., Chung K., Park J., 2005, Sterilization of E. coli and MRSA using microwave-induced argon plasma at atmospheric pressure, *Surface & Coating Technology*, 193, 35–38.

Li, S. Z., Wu, Q., Zhang, J., Wang, D. and Uhm, H. S., 2011, Discharge characteristics of radio-frequency capacitively coupled Ar/O₂ glow discharge at atmospheric pressure, *Thin Solid Films*, 6990-6993.

Lieberman, M. A. and Lichtenberg, A. J., *Principles of Plasma Discharges and Materials Processing*, Wiley, New York, (1994).

Lu, X. and Laroussi, M., 2006, Dynamics of an atmospheric pressure plasma plume generated submicrosecond voltage pulses, *Journal of Applied Physics*, 100, 063302.

Lu, X., Jiang, Z., Xiong, Q., Tang, Z. and Pan, Y., 2008, A single electrode room-temperature plasma jet device for biomedical applications, *Applied Physics Letters*, 92, 151504.

Muraoka, K. and Maeda, M., 2001, *Laser-aided diagnostics of plasma and gases*, IOP Publishing, Bristol and Philedelphia, 295p.

Musa, G., Ekem, N., Akan, T., 2000, *Plazma Fiziği Ders Notları*, Osmangazi Üniversitesi.

Nie, Q. Y., Ren, C. S., Wang, D. Z. and Zhang, J. L., 2008, A simple cold Ar plasma jet generated with a floating electrode at atmospheric pressure, *Applied Physics Letters*, 93, 011503.

Nuccitelli R., Pliquett U., Chen X., Ford W., Swanson R.J., Beebe S.J., Kolb J. F. and Schoenbach K.H., 2006, Nanosecond pulsed electric fields cause melanomas to self-destruct, *Biochemical and Biophysical Research Communications*, 351–360.

Raizer, Y. P., 1991, *Gas Discharge Physics*, Springer-Verlag, USSR.

Remy, J., Biennier, L., Salama, F., Plasma Structure in a Pulsed Discharge Environment, *Plasma Sources Science and Technology*, Vol. 12, 295-301, (2003).

Porteanu, H. E., K  ln, S. and Gesche, R., 2010, Electric probe investigations of microwave generated atmospheric pressure plasma jets, *Journal of Applied Physics*, 108, 013301.

Roth, J. R., 1995, *Industrial Plasma Engineering*, volume I, IOP publishing, Philadelphia.

Sossin, E. A., Stoffels, E., Erofeev, M. V., Kief, I.E. and Kunts, S. E., 2004, The effect of UV irradiation and gas plasma treatment on living mammalian cells and bacteria: a comparative approach, *IEEE Transactions on plasma science*, Vol. 32, No. 4, 1544-1550.

Tanenbaum, B. S., 1967, *Plasma physics*, McGraw Hill Book Comp., New York, 360p.

Tonks, L. And Langmuir, I., 1929, Oscillations in ionized gases, Pyhsics Review., Vol. 33, 195.

Walsh, J. L., Shi, J. J. and Kong, M. G., 2006, Contrasting characteristics of pulsed and sinusoidal cold atmospheric plasma jets, Applied Physics Letters, 88, 171501.

Zhang, J., Sun, J., Wang, D. and Wang, X., 2005, A novel cold plasma jet generated by atmospheric dielectric barrier capillary discharge, Thin Solid Films, 404-408.

www.environment.nationalgeographic.com, Eriřim tarihi: 15.06.2013

www.en.wikipedia.org, Eriřim tarihi: 15.06.2013

www.gordonenglan.co.uk, Eriřim tarihi: 08.06.2013

www.insidescience.org, Eriřim tarihi: 19.06.2013

www.intechopen.com, Eriřim tarihi: 11.04.2013

www.plasmatreat.com, Eriřim tarihi: 03.06.2013

www.plasma.de, Eriřim tarihi: 06.06.2013

www.phys.tue.nl/EPG/stoffels/, Eriřim tarihi: 15.06.2013