

Düşük Basınç ve Düşük Sıcaklıkta Havanın DC Post-Deşarj Plazmasının Bakteriler
Üzerine Uygulanması

Kerem Kolbay

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Fizik Anabilim Dalı

Ocak 2014

Application On Bacteria Of Air DC Post-Discharge Plasma At Low Pressure And
Temperature

Kerem Kolbay

MASTER OF SCIENCE THESIS

Department of Physics

January 2014

Düşük Basınç ve Düşük Sıcaklıkta Havanın DC Post-Deşarj Plazmasının Bakteriler Üzerine
Uygulanması

Kerem Kolbay

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

Ocak 2014

ONAY

Fizik Anabilim Dalı Yüksek Lisans öğrencisi Kerem Kolbay'ın YÜKSEK LİSANS tezi olarak hazırladığı “Düşük Basınç ve Düşük Sıcaklıkta Havanın DC Post-Deşarj Plazmasının Bakteriler Üzerine Uygulanması ” 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. Ferhunde Atay

Üye : Prof. Dr. Murat Tanışlı

Üye : Doç. Dr. Tamer Akan

Üye : Doç. Dr. Ahmet Çabuk

Üye : Yrd. Doç. Dr. Mehmet Peker

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

Prof. Dr. Nimetullah BURNAK

Enstitü Müdürü

ÖZET

Düşük basınç ve sıcaklıkta üretilen “Akan Havanın DC Deşarjının Post-Deşarjı” *Staphylococcus aureus*, *Escherichia coli*, *Bacillus subtilis*, *Bacillus cereus* ve *Pseudomonas aeruginosa* bakterileri üzerine uygulanmıştır. Akan havanın DC deşarjı (plazma); silindirik paslanmaz çelik iki eş eksenli elektrot arasında üretilmiştir. “Plazma Jet” sistemi olarak adlandırılan bu iki elektrottan oluşan plazma üretim sistemi, bir cam vakum odası üzerine monte edilmiştir. Elektrotlar arasına atmosferik havayı akıtmak ve elektrotlar arasından deşarjı (plazma) çıkarmak için cam vakum odasının alt kısmına bağlı bir mekanik vakum pompası kullanılmıştır. Elektrotlar arasında akan havanın deşarjını üretmek için bir DC güç kaynağı ile elektrotlar arasına 4-5 kV uygulanmıştır. Mekanik pompa yardımıyla cam post deşarj odası içinde, 4-5 mm uzunluğunda akan havanın DC deşarjının post deşarjı üretilmiştir. Üretilen post deşarjın sıcaklığı termoçift ile ölçülmüş ve 20-30°C sıcaklıklarda olduğu bulunmuştur. Cam vakum odası içine yerleştirilen paslanmaz çelik numune tutucu üzerine *Staphylococcus aureus*, *Escherichia coli*, *Bacillus subtilis*, *Bacillus cereus* ve *Pseudomonas aeruginosa* bakteri kültürleri yerleştirilmiştir. Akan Havanın DC deşarjının post-deşarjına farklı zamanlarda maruz bırakılan bakterilerin üzerinde öldürücü etkisi gözlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Soğuk Akan Plazma, Post-Deşarj Plazma, Bakteri, Sterilizasyon

SUMMARY

The post discharge of the flowing air DC discharge at low pressure and temperature is exposed on to *Staphylococcus aureus*, *Escherichia coli*, *Bacillus subtilis*, *Bacillus cereus* ve *Pseudomonas aeruginosa* bacteria. The DC discharge (plasma) of flowing air is ignited between two stainless steel co-axial cylindrical electrodes. Plasma generation system, which is these two electrodes, as called “Plasma Jet” system is mounted on a glass vacuum chamber. A mechanical vacuum pump, which is connected to bottom of glass vacuum chamber, is used to flow the atmospheric air to inter-electrode space and to pull the discharge (plasma) ignited between electrodes. 4-5 kV is applied between electrodes using a DC power supply in order to generate the flowing air discharge. The post discharge of the flowing air DC discharge with length of 4-5 mm is established using a mechanical pump in the glass of post discharge chamber. The temperature of the post-discharge is measured by a thermocouple and it is found as 20-30°C. *Staphylococcus aureus*, *Escherichia coli*, *Bacillus subtilis*, *Bacillus cereus* ve *Pseudomonas aeruginosa* bacteria are put on a stainless steel sample holder inserted into the glass vacuum chamber. Killing ratio of the bacteria exposed to the post discharge of the flowing air DC discharge at various times is found.

Keywords: Cold Flowing Plasma, Post-Discharge Plasma, Bacteria, Sterilization

TEŞEKKÜR

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fizik Bölümü, Plazma Fiziği Laboratuvarının kurulmasını sağlayan, Yüksek lisans çalışmalarım boyunca karşılaştığım her türlü sorunlarıma çözüm önerisi getiren, hocalık kimliğinden öte benimle bir abi kardeş ilişkisi kurarak hayat konusunda bana tecrübesini aktaran ve bu tez çalışmalarında, bana danışmanlık ederek, beni yönlendiren ve hiçbir yardımını esirgemeyen danışmanım Doç.Dr Tamer Akan'a teşekkürlerimi sunarım.

Hayatımın bu noktasına kadar her daim yanımda olan, aldığım her kararda bana destek veren, beni bu günlere getirirken sevgisini, ilgisini hiçbir zaman eksik etmeyen hayatımın en değerli varlığım ailem, sevgili anneciğim Behiye Kolbay, sevgili babacığim Vecdi Kolbay, ve ablam Ceren Kolbay'a sonsuz teşekkürlerimi bir borç bilirim. Ayrıca tezimin baskısıyla uğraşan, Eskişehir'de kaldığım yıllar içinde benim yanımda olan sevgili kardeşim Toyan Erdoğan'a ve ailesine teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Bu tez çalışmalarında bana yardımını esirgemeyen sayın Doç.Dr Ahmet Çabuk ve Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Biyoloji Bölümü, Biyoteknoloji Laboratuvarında hazırlanan bakteriler için sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca sevgili arkadaşım, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen-Edebiyat Fakültesi, Fizik Bölümü Arş.Gör. Erkan İlik'in ve sevgili kuzenim Mak. Müh. Timuçin Kolbay'm verdikleri destek için teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	v
SUMMARY	vi
TEŞEKKÜR.....	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	x
TABLolar DİZİNİ	xii
KISALTMALAR DİZİNİ.....	xiii
1. GİRİŞ	1
2. PLAZMANIN TANIMI VE DC GAZ DEŞARJ	4
2.1 Plazmanın Tanımı	4
2.2 DC Gaz Deşarj	5
3. POST DEŞARJ (PLAZMA JET) PLAZMALAR	13
3.1 Post Deşarj Plazmalar (Plazma Jetlerin)'in Genel Uygulamaları	19
3.2 Post Deşarj Plazmalar (Plazma Jetlerin)'in Bakteriler Üzerine Uygulanması.....	23
4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	27
4.1 Sistemin Tanıtılması	27
4.2 Biyolojik Hücreler Üzerine Uygulamalar	35
5. SONUÇ VE YORUM	44
KAYNAKLAR DİZİNİ	46

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
2.1	DC elektriksel gaz deşarjın akım voltaj karakteristiği. 6
2.2	Farklı gazlar için Paschen eğrileri. 11
3.1	Elektrotlar arasına yüksek basınç gaz gönderildiğinde post deşarjın atmosfer ortamına çıkışı 14
3.2	Elektrotlar arasına yüksek basınç gaz gönderildiğinde post deşarjın kapalı bir hacime çıkışı 15
3.3	Düşük basınçta post-deşarj plazmanın post deşarj odası içinde üretimi 16
3.4	Düşük basınçta post-deşarj plazmanın ayrı bir odada üretimi..... 17
3.5	Puls Plazma jet tarafından üretilen plazma atmaları 18
3.6	Sıcak ark plazma jetleri 19
3.7	Elle dokunulabilecek kadar soğuk atmosferik basınç plazma jeti 20
3.8	Argon ‘Plasma Jet’i kağıt üzerine temas hali 20
3.9	Plazma jet ile elektronik kart temizliği..... 21
3.10	Hassas bir materyal olan plastiğin atmosferik basınçta üretilen soğuk plazma ile temizlenmesi 21
3.11	Bir atmosferik basınç soğuk plazma jeti olan ‘‘Plazma Needle’’ ile dış uygulaması..... 21
3.12	Basınç Plazma Jet İle kırışıklık tedavisi uygulaması 22
3.13	Soğuk plazma ile yanık tedavisi. 22
3.14	Plazma jet ile sıvı bakteri üzerine uygulama. 24
3.15	a) Helyum plazma jet ile yapılan inaktivasyon b) He + % 0.75 O ₂ katkılı plazma jet ile yapılan bakteri inaktivasyon 24
3.16	Post deşarj odası kullanan atmosferik basınç post-deşarj sistemi. 25
3.17	Farklı uygulama zamanlarında agar içindeki <i>E. coli</i> bakterilerinin zaman içinde azalma resimleri 26
4.1	Deneysel sistemin fotoğrafı 27
4.2	a) Cam vakum odası (Post deşarj odası)’nın fotoğrafı, b) Post-deşarj odasının alt filanşın fotoğrafı 28

ŞEKİLLER DİZİNİ (Devam Ediyor)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
4.3	Post-deşarj odasının üst flanşın üstten çekilmiş fotoğrafı. 29
4.4	Post-deşarj odasının üst flanşın içten çekilmiş fotoğrafı. 30
4.5	Deneysel sistemin şematik gösterimi. 31
4.6	Sisteme monte edilmiş plazma üretim sisteminin şematik gösterimi..... 32
4.7	Havanın akan DC post deşarj/plazma jet plazması. 34
4.8	a) Bakteri kültürleri. b) Lam üzerine damlatılan bakteri. 36
4.9	a) <i>B.cereus</i> üzerine post deşarj uygulamasının şematik gösterimi. b) <i>B.cereus</i> üzerine akan havanın DC post deşarj uygulamasının fotoğrafı 37
4.10	Petri kabına damlatılan bakteriler 38
4.11	Petri kabındaki bakterilere akan havanın DC post-deşarj plazma uygulanması 39
4.12	Yalnızca akan hava gönderilen kontrol <i>Bacillus cereus</i> bakterilerinin petri kabındaki fotoğrafı 41
4.13	1 dakika akan havanın DC post deşarj plazması uygulandıktan sonra bakteri fotoğrafı 41
4.14	2 dakika akan havanın DC post deşarj plazması uygulandıktan sonra bakteri fotoğrafı 42
4.15	3 dakika akan havanın DC post deşarj plazması uygulandıktan sonra bakteri fotoğrafı 42
4.16	5 dakika akan havanın DC post deşarj plazması uygulandıktan sonra bakteri fotoğrafı 43

TABLULAR DİZİNİ

<u>Tablo</u>		<u>Sayfa</u>
4.1	<i>Bacillus subtilis</i> , <i>Bacillus cereus</i> ve <i>Pseudomonas aeruginosa</i> Akan Havanın soğuk post-deşarj plazması uygulandığında ki sayısal değişim...	40

KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Kısaltmalar</u>	<u>Açıklama</u>
DC	Doğru akım
AC	Alternatif Akım
RF	Radyo Frekansı
MW	Mikro Dalga
DBD	Dielektrik Bariyer Deşarj
ICCD	Yüksek Hızda Çekim Yapabilen Fotoğraf Makinesi
kHz	Kilo Hertz
GHz	Giga Hertz
NRRL	Bakteri Kültür Koleksiyonu
CFU	Koloni Oluşturma Birimi
ml	Mikro Litre
VB	Breakdown Voltajı
VUV	Vakum Ultraviyole
V	Volt

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Plazma, bir maddenin atom ve moleküllerinin iyonlaştırıldığı halidir. Bu nedenle bir plazma içinde çok sayıda elektronlar ve pozitif/negatif iyonlar bulunur. Bununla birlikte bir plazma içinde nötr atom ve moleküller, radikal parçacıklar, uyarılmış atom ve moleküller ve fotonlar da bulunur. Plazma içindeki tüm bu parçacıklar birbiriyle sürekli etkileşim halindedirler (Akan, 2005).

Laboratuar koşullarında maddenin dördüncü hali olan plazmayı üretmek için kolay ve ekonomik yöntem; bir gazı iyonlaştırmaktır. Bir gazı iyonlaştırmak için gaza; ısı enerjisi, elektrik enerjisi, kimyasal enerji, nükleer enerji verilebildiği gibi gaz; yüksek enerjili parçacıklarla bombardıman edilerek de iyonlaştırılabilir. İki metal elektrot arasına yerleştirilen bir gaza elektrik enerjisi vermek, gazı iyonlaştırmak için en çok kullanılan yöntemdir. Bunun için bir gaz içinden doğru akım (DC) ya da alternatif elektrik akımı (AC) geçirmek, radyo frekans (RF), mikrodalga (MW) gibi elektromanyetik dalgalarla gazın indüklenmesi, yüksek pulslu çok kısa elektromanyetik alanlar kullanmak (Puls voltaj), alternatif akımı bir dielektrik üzerinden gaza aktarmak, gazı elektrik enerjisi ile iyonlaştırmak için kullanılan yöntemlerdir. Bu yöntemlerden herhangi birisi ile gazın iyonlaştırılarak plazma haline getirilmesi genelde “Gaz Deşarj” olarak isimlendirilir ve üretim yöntemine göre DC deşarj, AC deşarj, Puls deşarj, Korona deşarj, RF deşarj, MW deşarj, Dielektrik Bariyer Deşarj (DBD) gibi farklı isimlerle anılır. Gaz deşarjlar, plazmanın ilk üretim tekniklerinden biri olması, kolay ve ucuz bir plazma üretim tekniği olması ve bazı önemli avantajları nedeniyle bugün teknolojiye birçok uygulama alanı bulmuştur. Hemen hemen her ev ve işyerinde bulunan flüoresans lambalar, farklı basınçlarda civa 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, tıp ve 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 (Akan, 2003).

Gaz deşarj plazmalar; atmosfer basıncında ve/veya daha yüksek basınçlarda ve düşük basınçlarda üretilmektedir. Gaz olarak atmosferik basınçta hava kullanılabilirliği gibi daha çok soy gazlar tercih edilmektedir. Bununla birlikte üretilen plazma, düşük sıcaklıklarda ya da yüksek sıcaklıklarda olabilmektedir. Kullanılan güç kaynağı, kullanılan gaz, gaz basıncı, gaz akış hızı, elektrotlar dizaynı gibi parametreler, üretilen plazmanın tüm özelliklerini belirlemektedir. Hiç elektrotsuz gaz deşarj plazması üretilmediği gibi genelde iki metal elektrot arasında gaz deşarj plazması üretilmektedir. Deşarj, elektrotlar arasında bir bütün olarak durabildiği gibi elektrotlar arasında akabilir. Bu durumda üretilen plazmalara “Akan Deşarj” denir. Elektrotlar arasında akan plazmalar, elektrotlar arasından çıkartılabilir. Elektrotlar arasından çıkarılarak uzaklaşan plazmalara “Post-deşarj Plazmalar” , “Afterglow Deşarj” , “Uzaklaşan Plazma” gibi isimler verilmektedir. Bu isimlerle anılan plazmalar, elektrotlar arasından uzaklaştırıldıktan sonra akmaya devam ederlerse “Akan Post-deşarj Plazmalar” , “Akan Afterglow Deşarj” , “Akan Uzaklaşan Plazma” ya da “Akan Plazma Jet” olarak adlandırılırlar. Ancak genelde Post Deşarj ya da Plazma Jet kavramı kullanılmaktadır (Dallı, 2013).

Bu şekilde üretilen plazmalar, elektrotlar arasından uzaklaştırıldığından plazmayı üretmek için kullanılan yüksek elektrik alandan da uzaklaştırılmış olur. Bu nedenle bu tip plazmalar, kullanıldığı yerde yüksek elektrik alanla materyalin etkileşmesini önler. Kullanıcı da bu yüksek elektrik alandan korunmuş olur. Bununla birlikte uygulanacak yüzeye zarar verebilecek yüksek enerjili iyonlar ve radikal parçacıklar da kontrol altına alınabilir. Örneğin bir uygulamada pozitif iyonlar, uygulanan yüzeye zarar verirken radikal parçacıklar istenilen reaksiyonu yapabilir. Bu durumda uygulanan numune Post Deşarj/Plazma Jet’in elektrotlar arasından daha uzağa konur. Ters durumda ise daha yakına konur. Böylece plazma içinde üretilen parçacık türlerinden hangisi uygulamada etkin role sahipse ondan faydalanmış olunur. Plazma içindeki parçacıkların yaşam ömrü (life time) bilinerek bu kolayca yapılabilir. Ancak elektrotlar arasındaki plazma ile uygulama yapıldığında elektrotlar arasındaki yüksek

elektrik alan ve tüm plazma parçacıkları uygulamaya katılır. Bununla birlikte elektrotlar arasından çıkarılan plazmalar uygulama sahasına götürülebilir. Örneğin böyle bir plazma ile insan yüzünde sivilce tedavisi hatta diş çürüğü tedavisi yapılabilir. Bu sistemler taşınabilir ve hareket edebilir oldukları için bir numunenin her bölgesine uygulama yapılabilir. Aynı zamanda elektrik alandan uzaklaştırılmış plazmanın analiz edilmesi de kolaylaşmış olur. Bu durumda plazma, parçacıkları elektrik alan içinden çıktığı için birbirleriyle etkileşimleri nispeten azalmıştır ve plazma içi reaksiyonları anlamak daha kolay olmaktadır (Dallı, 2013).

Bu çalışmada; cam bir vakum odasına (post-deşarj odası) monte edilmiş, “Plazma Üretim Sistemi” incelenerek bakteriler üzerine uygulaması yapılmıştır. Bu sistem ile elektrotlar arasında üretilen havanın DC gazdeşarj plazması, elektrotlar arasından bir vakum pompası yardımıyla çıkartılmış ve bir cam vakum odası içine akıtılmıştır. Bu nedenle burada üretilen plazma düşük basınçta olmaktadır. Aynı zamanda üretilen havanın DC post-deşarj plazması 20-30°C sıcaklıklarda olduğu için soğuk plazmadır. Bu nedenle bu sistem ile üretilen plazma tam olarak “Düşük Basınçta ve Düşük Sıcaklıkta Akan Havanın DC Gaz Deşarj Plazmasının Akan Post-Deşarj Plazması” olarak adlandırılır. Üretilen havanın akan DC post-deşarj plazması cam vakum odası içine yerleştirilen *Staphylococcus aureus*, *Escherichia coli*, *Bacillus subtilis*, *Bacillus cereus* ve *Pseudomonas aeruginosa* bakterileri üzerine uygulanmıştır. Farklı zamanlarda plazmaya maruz bırakılan bakterilerde sayıca azalmalar gözlemlenmiştir.

Tezin birinci bölümünde bir giriş yapıldıktan sonra, ikinci bölümde kısaca plazma tanımlanarak elektrotlar arasında bir DC gazdeşarj üretimi açıklanmıştır. Üçüncü bölümde elektrotlar arasından çıkarılan postdeşarj plazmalar ve bazı uygulamaları açıklanmıştır. Dördüncü bölümde tamamıyla orijinal ve ESOGU Plazma Laboratuvarında üretilen deneysel düzenek tanıtılmış ve deneysel çalışmalar verilmiştir. Son olarak sonuç ve yorum verilmiştir.

BÖLÜM 2

PLAZMANIN TANIMI VE DC GAZ DEŞARJ

2.1. Plazmanın Tanımı:

Plazma; elektriksel olarak nötr olan ve rastgele doğrultularda birlikte hareket eden, hemen hemen eşit yoğunluktaki pozitif ve negatif yüklü parçacıklar topluluğudur. Bilindiği gibi termal dengedeki katı bir madde, genelde sabit bir basınçta sıcaklığının artırılması 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. Plazma içinde aynı zamanda negatif iyonlar, fotonlar, uyarılmış atomlar, ayrılmış atomlar, radikaller, metastable atomlar, nötral atomlar da vardır (Tanenbaum, 1967).

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 (Krall and Trivelpiece, 1973). 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).

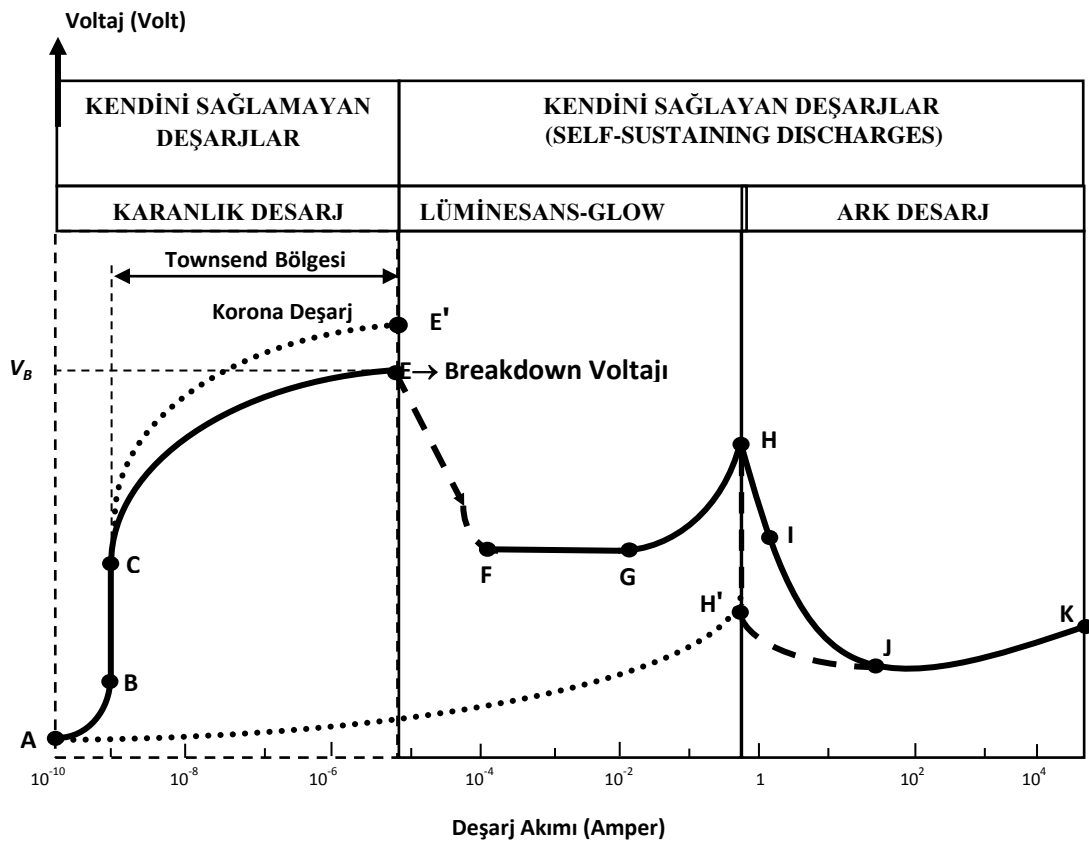
Plazmalar arasında; plazma içindeki parçacıkların sıcaklığı referans alınarak “Sıcak Plazmalar (termal dengede olan plazmalar)” ve “Soğuk Plazmalar (termal dengede olmayan plazmalar)” şeklinde bir sınıflandırma yapılabilir.

Termal denge; plazma içindeki tüm parçacıkların (iyonlar, elektronlar, nötral parçacıklar ve diğerleri) sıcaklıklarının eşit olmasıdır. Bu, örneğin yıldızlarda ve füzyon plazmalarında gerçekleşir. Termal dengede olan plazmalar (Sıcak Plazmalar) çok yüksek elektron ve ağır parçacık sıcaklıkları ile karakterize edilir ve neredeyse %100 iyonlaşmışlardır (Essam and Wiley, 1971). Laboratuvar koşullarında üretilen elektriksel arklar, ark plazma jetleri ve termonükleer füzyon reaksiyonları termal dengede olan (sıcak) plazmalara örnek olarak verilebilir. Plazma içindeki farklı parçacık türlerinin sıcaklıklarının eşit olmaması özellikle 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 olmayan plazmalar çok yüksek sıcaklıklı elektronlar ve buna nazaran çok düşük sıcaklıklı ağır parçacıklardan oluşmuştur ve iyonlaşma dereceleri 0,00001 ile %10 arasında oldukça düşüktür ve soğuk plazmalar olarak da adlandırılırlar. Daha çok sıcak plazmalar yüksek basınçlarda üretilirken soğuk plazmalar yüksek basınçta da düşük basınçta da üretilebilir. Ark deşarj dönüşmeyen elektriksel gaz deşarj plazmaları çoğunlukla “Soğuk Plazmalar” yani “Termal Dengede Olmayan Plazmalar” olarak adlandırılır (Akan, 2005). Plazma iyonizasyon derecesi, plazma yoğunluğu, debye uzunluğu, plazma sıcaklığı ve plazma frekansı gibi parametreler plazmaları karakterize eder. Tüm bu parametreler plazma üretim koşulları ile değiştirilebilir ve/veya kontrol edilebilir (Akan, 2003).

2.2. DC Gaz Deşarj

Laboratuvar koşullarında en yaygın plazma üretimi, maddeye özellikle bir gaza elektrik enerjisi verilerek yapılmaktadır. Bu durumda üretilen plazma “elektriksel gaz deşarj plazması” olarak isimlendirilmektedir. Gazlarda elektriksel deşarj oluşturmak için iki metal elektrot arasında bulunan gaza elektrik voltajı uygulanır. Elektrik voltajı sürekli DC veya puls DC olabildiği gibi düşük frekans AC (kHz), yüksek frekans AC (RF) veya çok yüksek frekans AC (GHz) olabilir. Bu çalışmada DC deşarj plazması üretildiği için burada sadece DC gaz deşarj plazma üretimi açıklanmıştır. Elektriksel

gaz deşarj üretmek için elektrotlar arasına yüksek basınçta veya düşük basınçta gaz yerleştirilir. Gaz olarak atmosferik hava ve/veya reaktif gaz ya da gaz karışımları kullanılır. Düşük basınçtaki gazlarda plazma üretmek için bir vakum odası, vakum pompası ve vakum ölçüm cihazları kullanılır. Elektrotlar arasında üretilen plazmanın yüksek akımlar çekerek güç kaynağına zarar vermemesi için bir akım ayarlayıcı direnç de kullanılır. Deşarj akımının ölçülmesi için bir ampermetre ve deşarj üzerinde potansiyel düşümünün ölçülmesi için de bir voltmetre kullanılır. Daha çok düşük basınçta iki metal elektrot arasına DC voltaj güç kaynağı ile yüksek voltaj uygulandıktan sonra deşarj akımının ve deşarj üzerindeki voltajın ölçülmesi ile elde edilen akım-voltaj karakteristiği Şekil 2.1'de verilen grafiğe benzer olur (Akan, 2003). Grafik üzerindeki değerler, kullanılan gazın cinsine ve basıncına, elektrotlar arası uzaklığa, elektrotların cinsine ve yapısına göre farklılıklar gösterebilir.

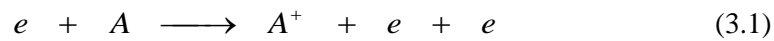


Şekil 2.1. DC elektriksel gaz deşarjın akım voltaj karakteristiği (Akan, 2003).

Şekil 2.1'den görüldüğü gibi akım-voltaj karakteristiği çok farklı davranışlar göstermektedir. Bu, elektrotlar arasındaki yüklü parçacık sayısındaki artışa neden olan kaynakların değişmesinden dolayıdır. Bu nedenle bu karakteristik üzerinde farklı bölgeler oluşmaktadır. Elektrotlar arasındaki 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. 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 ışıldama meydana gelir. Bu nedenle lüminesans veya diğer adı ile glow deşarj bölgesi olarak adlandırılır.

Bir gaz içinden DC elektrik akımının geçişi ve böylece Şekil 2.1'de verilen akım-voltaj karakteristiği deşarj akımı değişimi takip edilerek açıklanabilir. Elektrotlar arasına DC voltaj uygulanmadan önce, elektrotlar arasında bulunan 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 malzemenin kendisi de radyoaktif yayınlama yapabilir. Elektrotlar arasına uygulanan voltaj yavaş yavaş artırılırsa, 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 doyumuna ulaşacaktır. Burada yüklü parçacıklar elektrotlara doğru hareket ederken, çarpışmalarla iyonlaşma yapacak kadar enerjiye sahip değildirlir. Başka bir deyişle bu bölgede oluşan akımın sebebi elektrotlar arasında zaten var olan yüklerin, uygulanan elektrik alan ile elektrotlara toplanmasıdır. Buraya kadar elektrotlar arasındaki tüm yükler doğal yollarla üretildiği için, (AB) bölgesi doğal radyasyon ile iyonizasyon bölgesi olarak adlandırılır. (B) noktasından sonra deşarj cihazı üzerine uygulanan voltaj artırılrsa dahi, akımın artmayıp sabit kaldığı satürasyon bölgesi (BC) oluşur. Bu bölgede elektrotlar arasında 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 ancak deşarj içindeki yüklü parçacıklar giderek daha fazla enerji kazanırlar. Tam (C) noktasında, elektronlar artık gaz atomlarını iyonlaştıracak kadar enerji kazanmışlardır ve elektrotlar arasındaki yüklü parçacık sayısı aşağıdaki reaksiyonla giderek artacaktır. İyonizasyon, gaz deşarj plazmalarında yüklü parçacıkların üretilmesindeki en önemli olaydır ve iyonizasyon reaksiyonu;



şeklinde dir. 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 (üstel) bir artış olarak bulunur. Bu nedenle karakteristik üzerinde (CE) arasındaki bölge üstel artan bölgedir. Bu artış (E) noktasında kritik bir değere ulaşır ve bu noktaya karşılık gelen voltaj V_B ; “Ateşlenme (Breakdown) Voltajı” olarak adlandırılır. Ateşlenme 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.

Elektrotların yapısına göre kritik değere ulaşılan bu bölge yani ateşlenme 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 ateşlenme 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 ateşlenme 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 ateşlenme voltajı arasındaki bölgeler kendini sağlamayan deşarj bölgeleri olarak adlandırılır. Aynı zamanda bu bölgede korona hariç hiçbir deşarj, görünür bölge dalga boyunda radyasyon (ışık) yayınlamamaz. Bu nedenle bu bölge, karanlık deşarj olarak da adlandırılır. Ateşlenme voltajından sonra yani karakteristik üzerinde (E) noktasından veya korona deşarjın oluştuğu 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. Ateşlenme voltajından sonra deşarj, ihtiyaç duyduğu yüklü parçacıkları artık kendisi üretmeye başladığı için bundan sonraki karakteristik üzerindeki bölgeler, kendini sağlayan deşarjlar olarak tanımlanır.

Ateşlenme voltajı; bir deşarj tüpünde glow deşarj oluşturmak için elektrotlar arasına uygulanması gereken minimum voltaj değeridir (Lieberman and Lichtenberg, 1994). Bir deşarj tüpünde veya atmosferik basınçta iki elektrot arasında karanlık deşarj, korona deşarj gibi deşarjlar üretilse de bugün teknolojjide sıkça kullanılan ve gaz deşarj olarak çoğu kez kullanılan aslında glow deşarjlardır. Bu nedenle ateşlenme

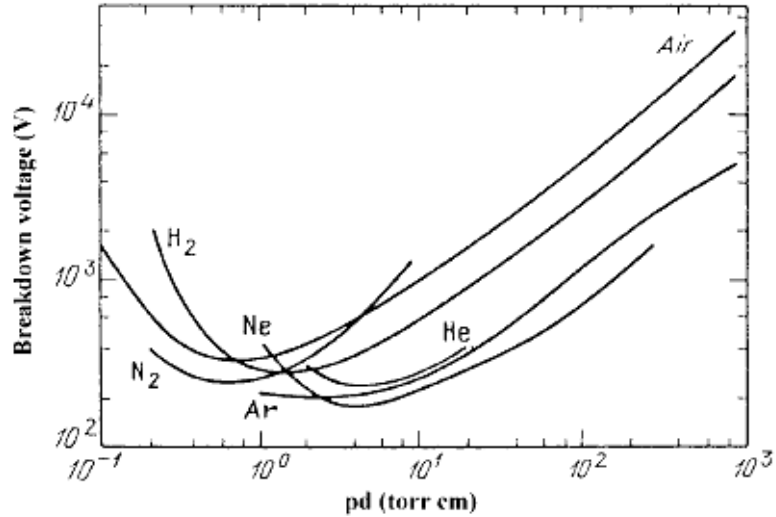
voltajı ya da ateşlenme koşulları aslında glow deşarj oluşturma şartıdır. Ateşlenme öncesi, elektrotlar arası potansiyel dağılımı doğrusal dağılımdır ve elektrik alan E sabittir ve $E=V/d$ eşitliği ile verilir. Bu elektrik alan ile elektronlar anoda, pozitif iyonlar da katoda doğru hareket ederek deşarj içinden doğru akım geçişini sağlarlar. Bu sırada katoda gelen başka bir deyişle katoda vuran pozitif iyonlar ikincil elektron üretecektir (Grill, 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 “ateşlenme (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.

Glow deşarjlar için ateşlenme 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. Ateşlenme voltajı yalnızca gazın basıncı ve elektrotlar arası uzaklığın çarpımına ($p.d$) bağlıdır. Bu bağımlılık Paschen yasası olarak tanımlanır (Akan, 2003). Farklı gazlar için ateşlenme voltajının düşük basınçlarda deneysel olarak elde edilmiş ($p.d$) bağımlılığı Şekil 2.2’de verilmiştir ve bu eğride, ateşlenme voltajı; ($p.d$) çarpımına bağlıdır, ayrı ayrı p ’ ye ya da d ’ ye bağlı değildir.



Şekil 2.2. Farklı gazlar için Paschen eğrileri (Raizer, 1991).

Glow deşarj oluştuktan sonra anot ile katot arasında uygulanan voltaj arttırılmaya devam edilirse Şekil 2.1’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 katota vurarak ikincil elektron üretmekle birlikte, katotun aşırı ısınmasına neden olurlar ve voltaj giderek yükselmeye başlar. Katotun 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).

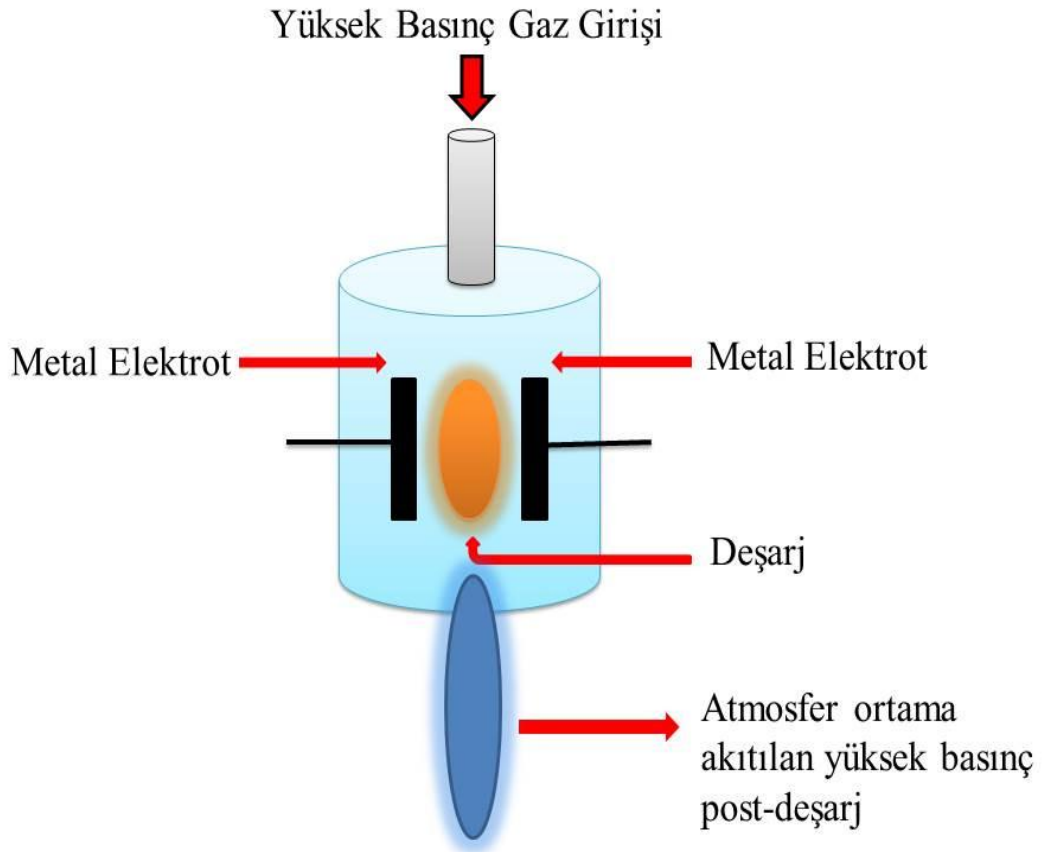
Bu bölümde sadece elektrotlar arasında doğrudan bir DC deşarjın nasıl oluştuğu açıklanmıştır. Bölüm 3'te bu şekilde elektrotlar arasında üretilen deşarjın nasıl elektrotlar arasından çıkarıldığı başka bir deyişle nasıl post-deşarjların üretildiği açıklanacaktır.

BÖLÜM 3

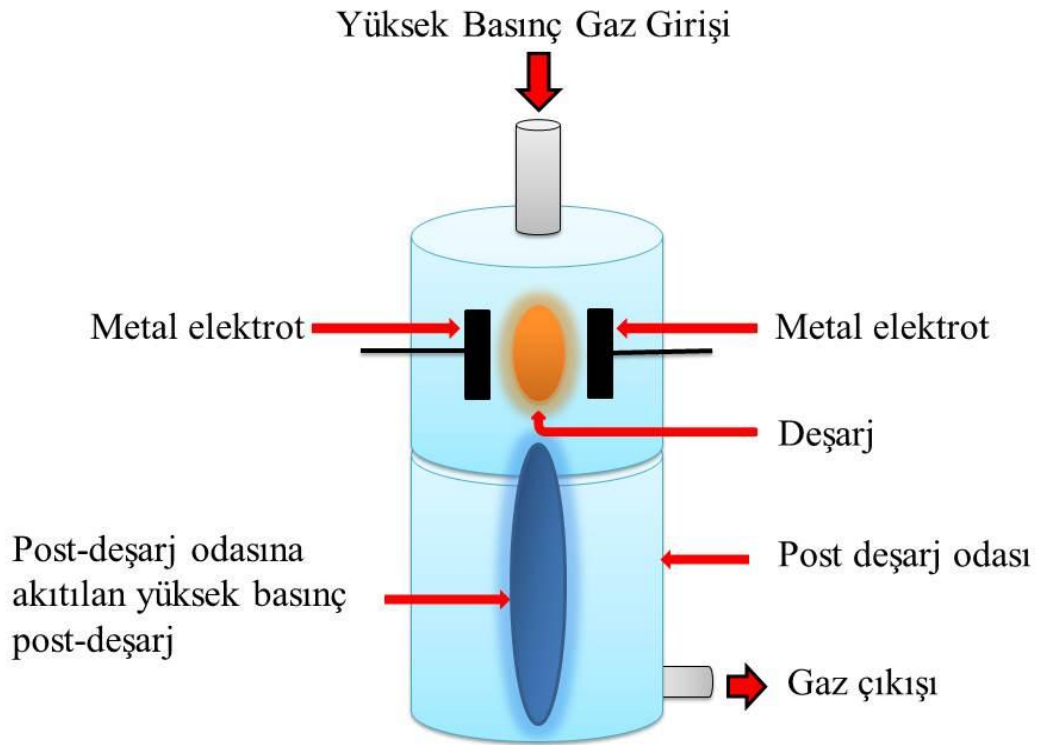
POST DEŞARJ (PLAZMA JET) PLAZMALAR

Son yıllarda özellikle kullanım alanına doğrudan uygulama olanağı sağladığı için plazmalar elektrotlar arasından taşınmaktadır. Elektrotlar arasından çıkarılarak uzaklaşan plazmalara “Post-deşarj Plazmalar” , “Afterglow Plazma” “Uzaklaşan Plazma” gibi isimler verilmektedir (Dallı, 2013). Bu isimlerle anılan plazmalar elektrotlar arasından uzaklaştırıldıktan sonra akmaya devam ederlerse “Akan Post-deşarj plazmalar” , “ Akan Afterglow Plazma” “Akan Uzaklaşan Plazma” ya da “Plazma Jet” olarak adlandırılırlar (Dallı, 2013).

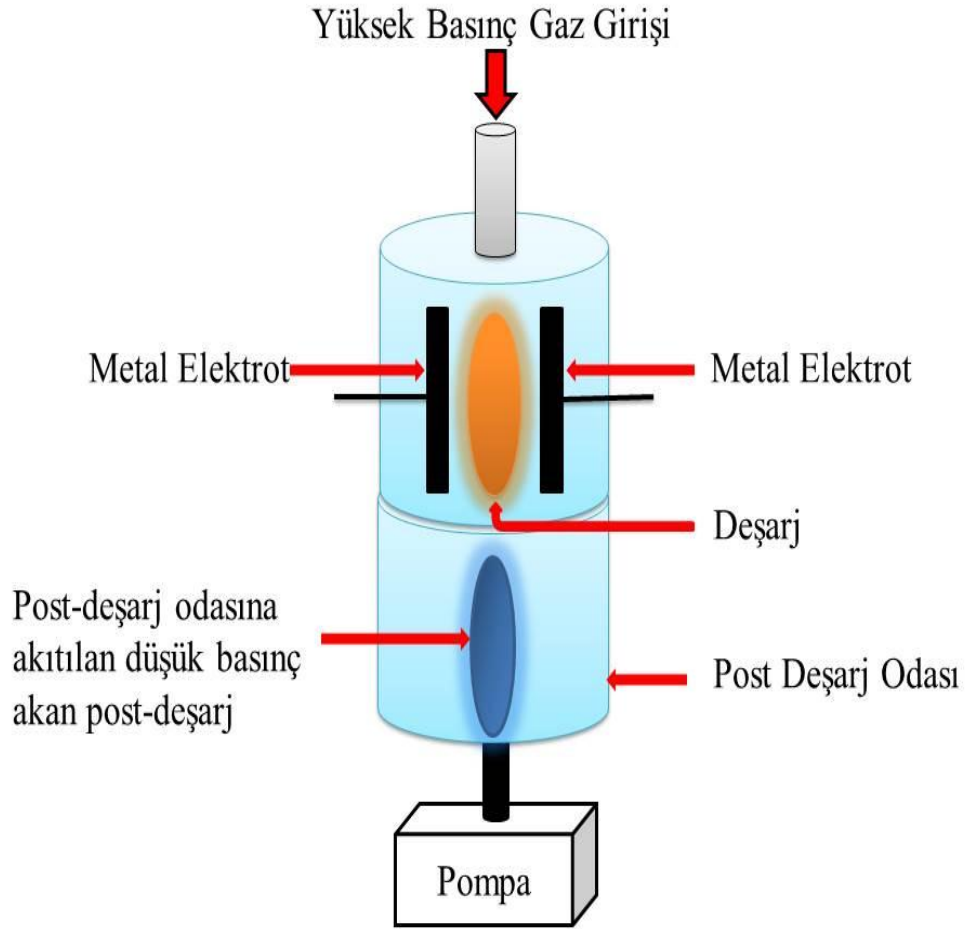
Elektrotlar arasından plazmanın uzaklaştırılması için iki yöntem kullanılmaktadır. Birincisi; elektrotlar arasına yüksek basınç gaz göndermektir (Şekil 3.1 ve Şekil 3.2). Bu durumda elektrotlar arasında üretilen yüksek basınçtakideşarj/plazma, bir vakum odasına ya da atmosfere akıtılabilir. Genelde atmosferik basınçlarda post-deşarj/plazma jet üretmek için bu yöntem kullanılır (Moisan, et al., 2002). İkincisi; elektrotlar arasına gönderilen gaz bir vakum pompası ile çekilir. Bu durumda “Post-deşarj Odası” denilen bir hacim kullanılır. Elektrotlar arasında oluşturulandeşarj/plazma; vakum pompası yardımıyla post-deşarj odası içine çekilir. Plazma/Deşarj üretim sistemi (elektrotlar sistemi); postdeşarj odası içine monte edilebileceği gibi (Şekil 3.3), plazma/deşarj; ayrı bir odada üretilip diğer bir odaya (postdeşarj odası) akıtılabilir (Şekil 3.4).



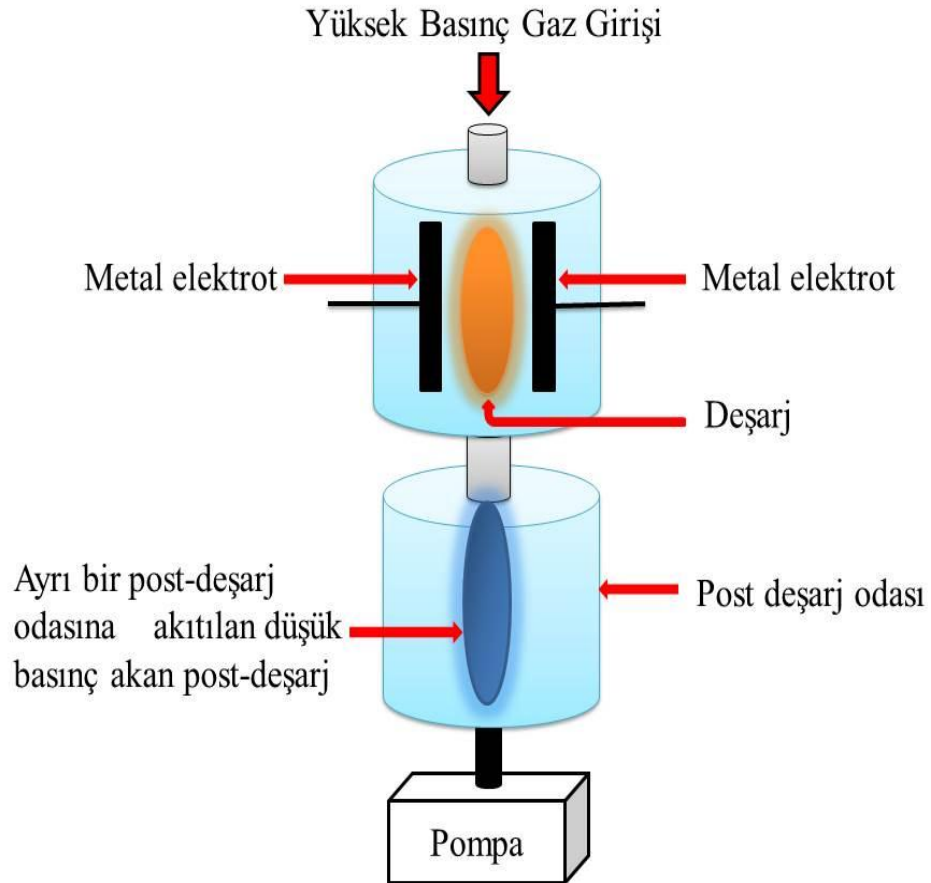
Şekil 3.1. Elektrotlar arasına yüksek basınç gaz gönderildiğinde post deşarjın atmosfer ortamına çıkışı.



Şekil 3.2. Elektrotlar arasına yüksek basınç gaz gönderildiğinde post deşarjın kapalı bir hacime çıkışı.



Şekil 3.3. Düşük basınçta post-deşarj plazmanın post deşarj odası içinde üretimi.



Şekil 3.4. Düşük basınçta post-deşarj plazmanın ayrı bir odada üretimi.

Her iki üretim yönteminde de elektrotlar arasındaki plazma aktığı için elektrotlar arasında üretilen plazma aynı zamanda “Akan Plazma” ve elektrotlar arasından uzaklaştırılan plazma “Akan Post Deşarj/Plazma Jet” olarak adlandırılır. Yukarıda şematik olarak verilen dört yöntemde de farklı güç kaynakları, farklı elektrot dizaynları, farklı gaz ve gaz akış oranları kullanarak sıcak ya da soğuk akan plazma jet/post-deşarj üretmek mümkündür. Bu şekilde oluşan plazmalar üretim yöntemine göre 5-10 mm uzunluğunda olabildikleri gibi 10-20 cm kadar uzun olabilmektedirler. Çok daha büyük hacimlerde oluşturulmaları gelecekte önemli uygulamalara sahip olacaktır.

Post deşarj/Plazma Jet sistemlerinde plazma/deşarj; elektrotlar arasındaki elektrik alandan çıktıkları için oluşum mekanizmaları Bölüm 2’de açıklanan gaz deşarj oluşumundan çok farklı olmaktadır. Elektrotlar arasında plazma/deşarj; elektrik alanda hızlanan yüklü parçacıkların çarpışmaları ile olurken, Post deşarj/Plazma Jet plazmaları; çoğalma (avalanche) mekanizması ile kendi kendini oluşturmaktadır. Bu durumda elektrotlar arasından çıkan yüklü parçacıklar sahip oldukları enerji ile hemen karşılına çıkan gazı iyonlaştırırlar. Yeni iyonlaşan parçacıklar da iyonlaşma işlemi yaparak zincirleme çoğalma işlemi meydana gelir. Burada hızlandırıcı bir elektrik alan olmadığından dolayı parçacıklar kolayca enerjilerini kaybederler ve belirli bir mesafeden sonra plazma söner. Ancak bu sönme noktasının dışında hala uzun yaşama ömrüne sahip plazma parçacıkları (örneğin metastable atomlar) bulunmaya devam ettiği için tam olarak plazma jet/post deşarj plazmasının sınırlarını belirlemek kolay değildir.

Şekil 3.5’de çok yüksek hızda çekim yapabilen fotoğraf makinesi (ICCD kamera) ile bir Plazma Jet’in farklı zamanlarda (nano saniye) çekilmiş fotoğrafı verilmiştir. Görüldüğü gibi 320-370 nano saniye sonra elektrotlar ağzından çıkan çok küçük plazma, 770-820 nano saniye sonra son bulmaktadır. Fakat insan gözünün ayırma gücü yetmediği için ancak Şekil 3.5’deki gibi plazma jetin tümü görülmektedir.



Şekil 3.5. Puls Plazma jet tarafından üretilen plazma atmaları (Lu and Laroussi, 2006).

Bu çalışmada; Şekil 3.3'teki gibi bir post deşarj odasına yerleştirilmiş plazma üretim sistemi (elektrotlar sistemi) ile post deşarj üretilmiştir. Ancak bu sistem ile Şekil 3.1, Şekil 3.2, Şekil 3.4'deki gibi post deşarj plazmaları da üretilir. Sistem ile bakteri uygulaması yapıldığı için ve bakterilerin laboratuvar ortamında yayılımını kontrol altında tutabilmek için bu yöntem tercih edilmiştir.

3.1. Post Deşarj Plazmalar (Plazma Jetlerin)'in Genel Uygulamaları

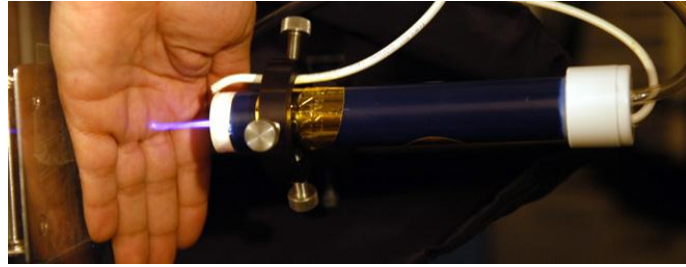
Post-deşarj/Plazma Jet'ler farklı güç kaynakları ve farklı elektrot dizaynları ile üretildiğinde farklı isimlerle anılabilir. Bu parametreler değiştiğinde üretilen post-deşarj/plazma jet'in sıcaklığı değiştiği gibi elektrotlar arasındaki plazmanın yapısı da değişir. Şimdiye kadar DC atmosferik basınç plazma jetleri (plazma torch olarak da bilinir); Şekil 3.6'da gösterildiği gibi kesme, kaynak, kaplama, yeni materyal üretimi gibi birçok teknolojiye kullanılmıştır. Bu tip plazma jetlerde elektrotlar arasında ark plazması üretilir ve üretilen post-deşarj/plazma jet 1000-2000 derece sıcaklıklarda ve daha yüksek sıcaklıklarda olabilmektedir. Bu sistemlerde yüksek sıcaklıktaki post-deşarj/plazma jet, materyal ile etkileşmektedir.



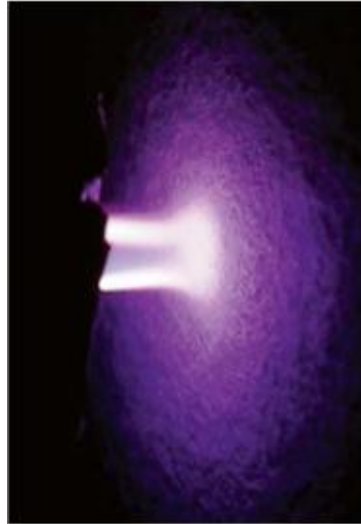
Şekil 3.6. Sıcak ark plazma jetleri (www.gordonenglan.co.uk, 08.06.2013).

Bununla birlikte oda sıcaklığı kadar soğuk post-deşarj/plazma jet plazmaları, sterilizasyon, polimer uygulamaları, diş çürüğü tedavisi, sivilce tedavisi, mantar

tedavisi, yüzey temizleme, kaplama ve aktivasyon işlemleri ile elektronik, optik, tekstil gibi birçok endüstriyel uygulamada özellikle ısıya hassas bölgelerde kullanılmıştır. Şekil 3.7 - Şekil 3.13’de farklı uygulamalarda kullanılan atmosferik basınç soğuk plazma jet resimleri verilmiştir.



Şekil 3.7. Elle dokunulabilecek kadar soğuk atmosferik basınç plazma jeti (<http://www.insidescience.org>, 19.06.2013).



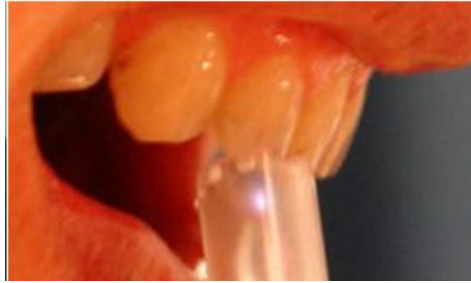
Şekil 3.8. Argon ‘‘Plasma Jet’’i kağıt üzerine temas hali (Duan, et al., 2005).



Şekil 3.9. Plazma jet ile elektronik kart temizliği (www.plasmatreat.com, 03.06.2013).



Şekil 3.10. Hassas bir materyal olan plastiğin atmosferik basınçta üretilen soğuk plazma ile temizlenmesi (www.plasmatreat.com, 03.06.2013).



Şekil 3.11. Bir atmosferik basınç soğuk plazma jeti olan “Plazma Needle” ile diş uygulaması (<http://www.phys.tue.nl/EPG/stoffels/>, 15.06.2013).



Şekil 3.12. Atmosferik Basınç Plazma Jet İle katarakt tedavisi uygulaması (Emmert, et al.,2013).



Şekil 3.13. Soğuk plazma ile yanık tedavisi (Fridman, et al., 2008)

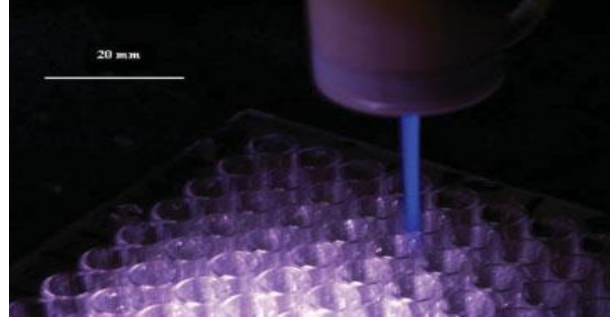
Şekil 3.6 - Şekil 3.13'de, daha çok yüksek basınçta ve atmosferik basınçta üretilen sıcak ve soğuk plazma jetlerinin uygulamaları verilmiştir. Bir vakum pompası, vakum odası ve vakum ölçüm cihazları kullanılmadığı için bu sistemler maliyeti düşürdükleri için ve istenilen uygulama alanına taşınabildikleri için çokça tercih edilmektedir. Ancak bu sistemlerin önemli dezavantajı küçük hacimde post-deşarj ya da plazma jet üretmeleridir. Bununla birlikte üretilen plazma, atmosfer ortamına taşındığı için atmosferik havanın içindeki gazın da plazması üretilmektedir. Daha büyük hacimlerde ve sadece istenilen gazın post-deşarj/plazma jetini üretmek için post deşarj odaları ve vakum pompası kullanılmaktadır. Post deşarj odalarına plazmayı

akıtmak için yüksek basınç gaz veya elektrotlar arasında üretilen plazmayı postdeşarj odasına akıtmak için bir mekanik pompa kullanılmaktadır. Bu durumda plazma yüksek basınçta kalabildiği gibi daha çok düşük basınçta da üretilmektedir. Postdeşarj odalarına akıtılan plazmalar genelde yüzey uygulamalarında görülse de daha çok biyolojik uygulamalarda karşımıza çıkmaktadırlar.

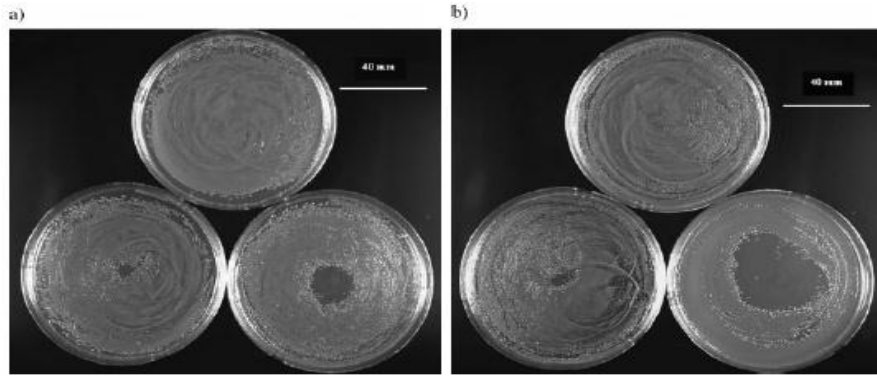
3.2. Post Deşarj Plazmalar (Plazma Jetleri)'in Bakteriler Üzerine Uygulanması

Soğuk plazmaların tıp alanındaki uygulamaları ilk olarak plazmaların bakteriler üzerine uygulamaları ile olmuştur. Bakterilerin, kimyasal ve ışın uygulamalarından farklı olarak, ilk kez ısı etkisi olmadan sterilizasyonu soğuk plazmalar ile 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 kuvözlere alternatif olarak plazma kuvözleri karşımıza çıkabilecektir. Bununla birlikte, bütün bir hastanenin ya da okulun soğuk plazma ile insanların bulunduğu zamanlarda dahi, insanlara zarar vermeden sterilizasyonu mümkün olacaktır. Soğuk plazma jetleri ile bakterilerin bulunduğu bölgenin tümüyle sterilizasyonu mümkündür. Hatta insan üzerinde bulunan bakteriler soğuk plazma jetleri ile steril edilebilir.

Atmosferik basınç soğuk plazma jetlerinin bakteri öldürmesinin önemli bir avantajı lokal bir bölgedeki bakteri sterilizasyonu gerçekleştirilebilir olmasıdır. Şekil 3.15'de, Şekil 3.14'de verilen atmosferik basınç soğuk plazma jeti ile *Escherichia coli* bakterisi üzerine yapılan çalışma verilmiştir. Şekil 3.15'de üstteki petri kapları kontrol kaplarıdır. Soldaki petri kaplarına 30 s ve sağdaki petri kaplarına ise 120 s süre ile plazma uygulanmıştır.



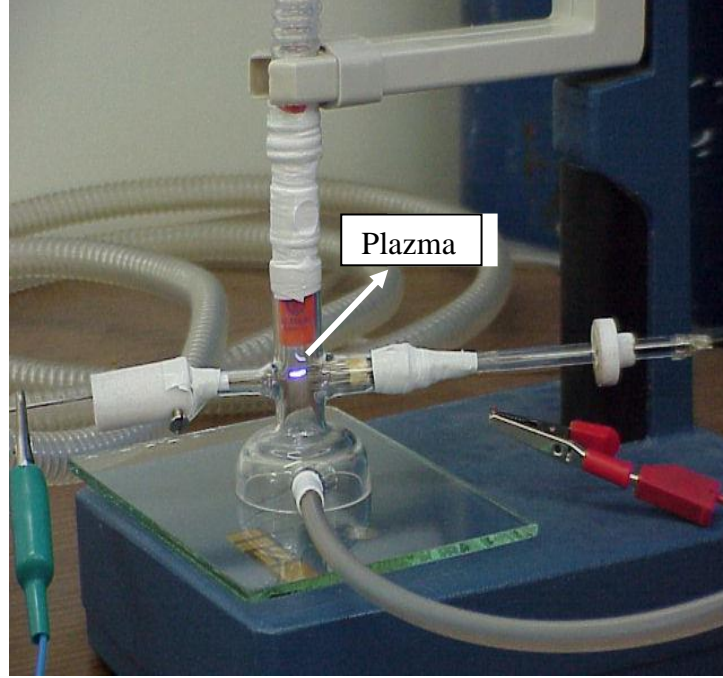
Şekil 3.14. Plazma Jet ile sıvı bakteri üzerine uygulama(Laroussi, et al., 2006).



Şekil 3.15. a) Helyum plazma jet ile yapılan inaktivasyon b) He + % 0.75 O₂ katkılı plazma jet ile yapılan bakteri inaktivasyon (Laroussi, et al., 2006).

Şekil 3.15'den görüldüğü gibi plazma jetin yalnızca uygulandığı kısımdaki bakteriler öldürülmüştür. Bu özellik önemli bir avantajdır. Örneğin sivilceye neden olan bakteri, insan vücudunda plazma jetin sadece sivilce üzerine uygulanmasıyla yok edilebilir.

Şekil 3.16'da atmosferik basınçta bir post-deşarj odası kullanan post-deşarj sistemi verilmiştir. Bu sistemler lokal uygulamalardan çok daha büyük hacimlerde uygulama yapmak için kullanılmaktadır.

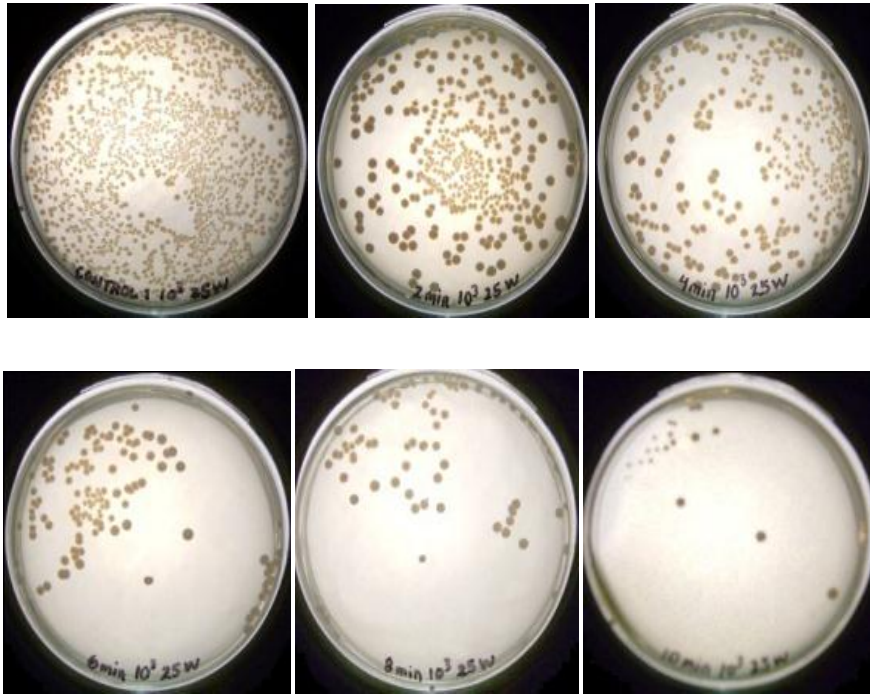


Şekil 3.16. Post deşarj odası kullanan atmosferik basınç post-deşarj sistemi (Ekem, et al., 2006).

Son yıllarda bir vakum odası (post-deşarj odası) içine bir vakum pompası kullanılarak akıtılan plazma jet uygulamaları bazı önemli avantajları nedeniyle daha çok kullanılmaktadır. Bu sistemler vakum pompası nedeniyle nispeten düşük basınç sistemleri olmaktadır. Bu durumda daha geniş hacimlerde bakteri sterilizasyonu yapmak mümkün olabilmektedir. Bu durumda iki metot kullanılmaktadır. Birincisi Şekil 3.3’de verildiği gibi plazma üretimi, vakum odası (post deşarj odası) içinde yapılmaktadır. İkinci olarak da plazma ayrı bir üniteye üretilip Şekil 3.4’de verildiği gibi diğer bir post-deşarj odasına akıtılmaktadır.

Şekil 3.3’de verilen sistem ve benzeri sistemler biyolojik uygulamalarda kullanılmıştır. Bu sistemler steril edilmek istenen numunenin her bölgesine nüfuz ettiğinden özellikle iç bölgeleri olan numunelerin (örneğin boru şeklinde numune)

sterilizasyonunda tercih edilmektedir. Şekil 3.17’de; böyle bir sistem içine yerleştirilmiş *Escherichia coli* bakterilerinin post-deşarj uygulamadan önce ve post-deşarj uyguladıktan sonraki fotoğrafları verilmiştir. Post-deşarj uygulama zamanı arttıkça bakteri ölüm oranının arttığı görülmektedir.



Şekil 3.17. Farklı uygulama zamanlarında agar içindeki *Escherichia coli* bakterilerinin zaman içinde azalma resimleri (Klaus, et al., 2010).

Şekil 3.4’de başka bir bölgede üretilip daha sonra vakum odası (post deşarj odası) içine akıtılan plazma üretimi için genellikle kullanılan sistem şematik olarak verilmiştir. Bu tip sistemler ile post deşarj odası tümüyle plazma üretim bölgesinden uzaklaştırılmaktadı. Bu tür sistemler ile de birçok biyolojik uygulama gerçekleştirilmiştir (Chau, et al., 1996).

BÖLÜM 4

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

4.1. Sistemin Tanıtılması

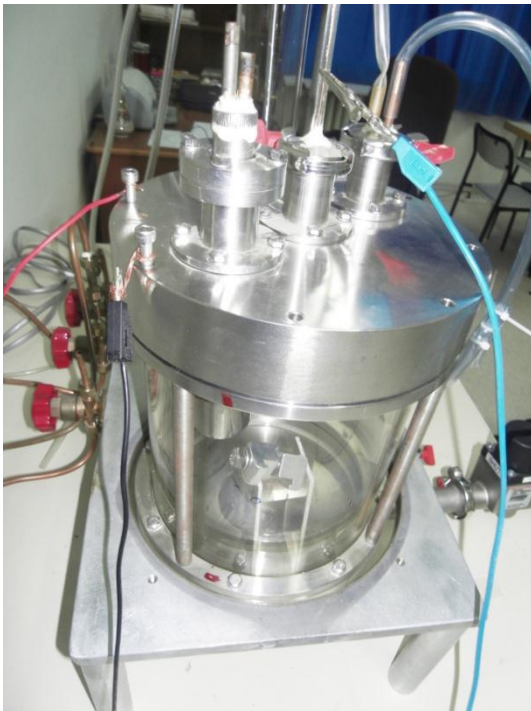
Bu çalışmada kullanılan deneysel sistemin fotoğrafı Şekil 4.1’de verilmiştir.



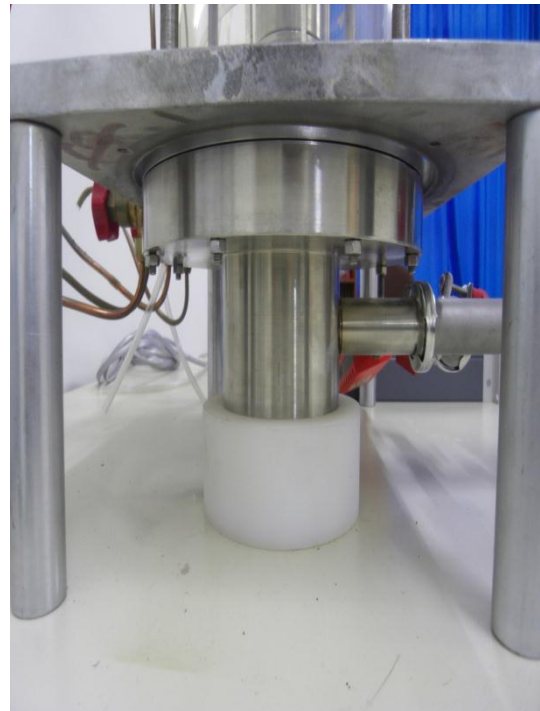
Şekil 4.1. Deneysel sistemin fotoğrafı (ESOGU BAP, no:200319009).

Sistem; vakum pompası ve vakum ölçüm cihazı, cam vakum odası (post deşarj odası), vakum odasına monte edilmiş plazma jet sistemi ve 5 kV’luk DC güç

kaynağından oluşmaktadır. Bu sistem ile düşük basınçta ve düşük sıcaklıkta “plazma üretim sistemi” ile üretilen post-deşarj, bir cam vakum odası içine akıtılmaktadır. “Plazma üretim sistemi” nin elektrotları arasında üretilen DC plazma, vakum pompası ile cam vakum odası içine çekilmektedir. Aynı zamanda sistemin basıncı bir basınç ölçüm cihazı ile kontrol edilmektedir. Şekil 4.2’de “plazma üretim sistemi” nin monte edildiği cam vakum odası (post deşarj odası) ve vakum pompasına bağlandığı alt flanş verilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 4.2. (a) Cam vakum (post deşarj) odasının fotoğrafı. (b) Post-deşarj odasının alt flanşın fotoğrafı.

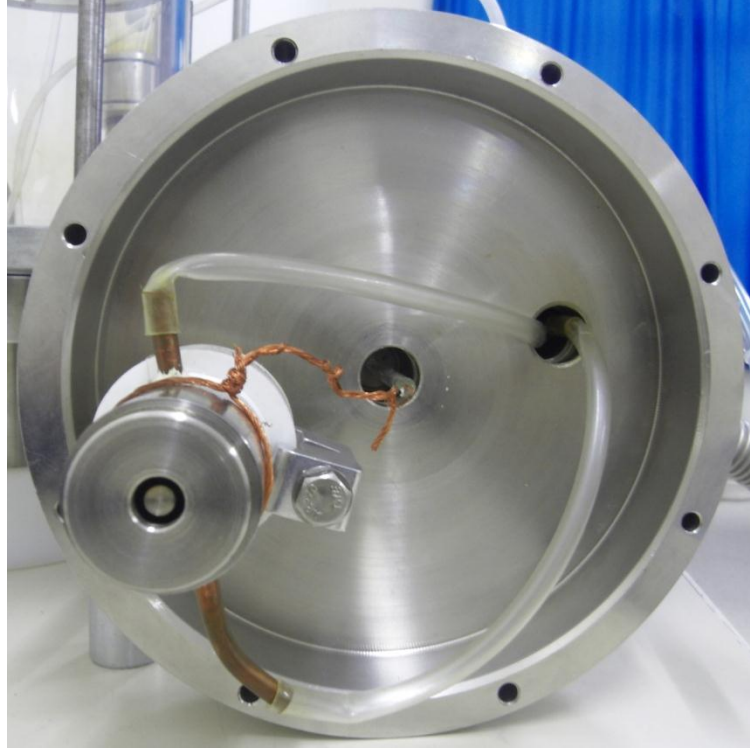
Cam vakum odası, 250 mm yüksekliğinde, 200 mm çapında 6 mm kalınlığında Pyrex bir cam silindirdir. Cam vakum odasının üstünde ve altında iki adet paslanmaz çelik flanş bulunmaktadır. Alt flanş; Edwards marka 1,027 lt/s pompalama hızına sahip vakum pompasına ve Edwards marka düşük basınç ölçen vakum ölçüm cihazına bağlıdır. Bu alt flanş bir teflon malzemenin içine sokulmuştur. Diğer teflon malzemeler ile cam vakum odası güvenli bir şekilde bir masaya tutturulmuştur. Üst

flanş üzerinde ise 3 adet küçük flanşlar bulunmaktadır. Bu küçük flanşlardan birisine “plazma üretim sistemi”, diğerine “plazma üretim sistemi” nin elektrik bağlantı kablosu, üçüncüsüne ise “plazma üretim sistemi” nin elektrotlarının arasına gönderilecek gazın girişi bağlıdır. Şekil 4.3’de üst flanşın üstten çekilmiş fotoğrafı verilmiştir.



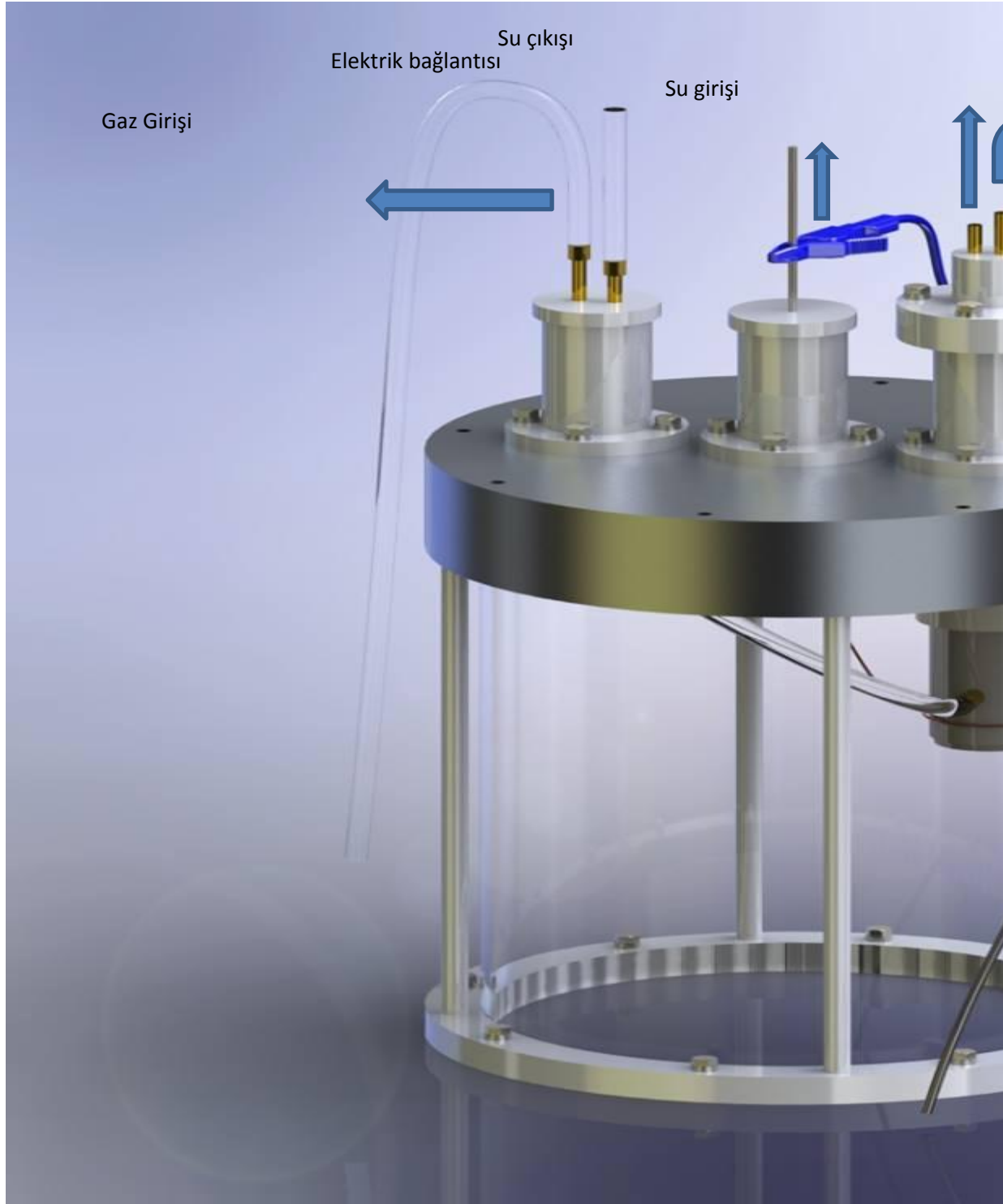
Şekil 4.3. Post-deşarj odasının üst flanşın üstten çekilmiş fotoğrafı.

Şekil 4.3’den görüldüğü gibi üst flanş üzerindeki üç küçük flanş cam vakum odası içinde plazma üretimi için gerekli sistemin monte işlemi için kullanılmıştır. Şekil 4.4’de ise üst flanşın içten çekilmiş fotoğrafı verilmiştir.



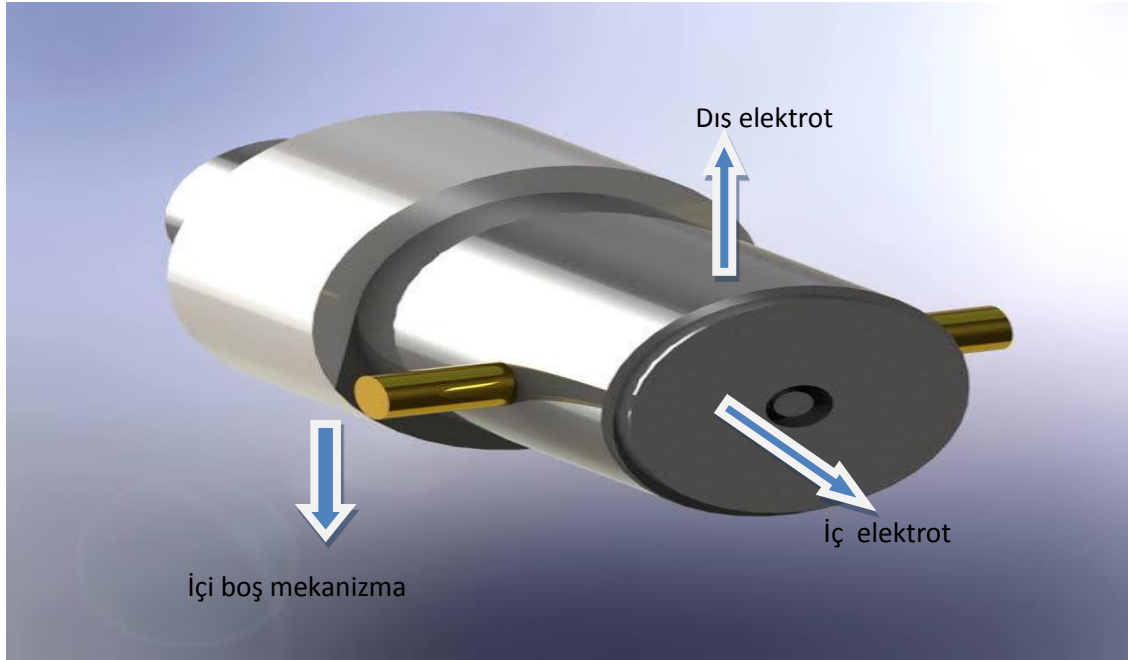
Şekil 4.4. Post-deşarj odasının üst flanşın içten çekilmiş fotoğrafı.

Şekil 4.4’de “plazma üretim sistemi” nin silindirik elektrotları, elektrik bağlantı kablo girişi ve gaz giriş boruları çok net bir şekilde görülmektedir. Şekil 4.5’de deneysel sistemin şematik çizimi verilmiştir.



Şekil 4.5. Deneysel sistemin şematik gösterimi.

Şekil 4.6’da ise, sisteme monte edilen yalnızca “**plazma üretim sistemi**” nin şematik gösterimi verilmiştir.



Şekil 4.6. Sisteme monte edilmiş plazma üretim sisteminin şematik gösterimi.

Şekil 4.6’dan görüldüğü gibi “plazma üretim sistemi” iki eş eksenli silindirden oluşmaktadır. Bunlar iç elektrot ve dış elektrot olarak adlandırılmaktadır. İç elektrot 6 mm kalınlığında paslanmaz çelikten bir çubuktur. Bu çubuk içinde 2 mm kalınlığında iki adet su devir daim kanalı vardır. Bu su devir daim kanalı yardımıyla iç elektrot soğutulabilmektedir. Böylece plazma jet sistemi ile üretilen dc plazmanın yüksek voltajlarda ark deşarja geçişi engellenmektedir. Dış elektrot ise 40 mm çapında uç kısmında 10 mm çapında bir delik bulunan silindir. Dış elektrotun delik bulunan bu uç kısmı vidalı mekanizmaya sahiptir. Bu mekanizma yardımıyla elektrotlar arasındaki mesafe değiştirilebilmektedir. Elektrotlar arasındaki mesafe aynı zamanda iç elektrotu üst flanşdan yukarı veya aşağıya doğru hareket ettirilmesiyle de değiştirilebilmektedir. Dış elektrot teflon malzemeler yardımıyla 30 mm çapındaki seramik boruya tutturulmuştur. Seramik boru torr-seal ile üst flanşa yapıştırılmıştır. Torr-seal sıvı seramiktir. Kurduğunda çok sert bir yapıya döndüğü gibi içinden gaz sızıntısına izin

vermemektedir. Bu seramik boru yardımıyla dış elektrot, toprak hattına bağlanacak olan üst flanştan yalıtılmış olmaktadır. Üst flanşın ikinci küçük flanşından gelen elektrik kablosu dış elektroda bağlıdır. Bu elektrik kablosu 5mm çapında bir cam boru içine sokulmuştur. Bu cam boru içine elektrik kablosu torr seal ile hiç hava sızdırmayacak şekilde yapıştırılmıştır. Bununla birlikte cam boru da üst flanşın küçük flanşına torr seal ile hiç hava sızdırmayacak şekilde yapıştırılmıştır. Bu şekilde dış elektroda, tümüyle sistemden yalıtılmış bir şekilde dışarıdan elektrik enerjisi uygulanabilmektedir. İç elektrot ise, üst flanştan izole edilmemiştir. Üst flanş da toprak hattına bağlı olduğu için iç elektrot toprak potansiyelinde tutulmuş olmaktadır. Aynı zamanda güç kaynağının negatif kutbu da üst flanşa bağlanmaktadır. Bu şekilde “plazma üretim sistemi” nin elektrik bağlantısı tanımlanmış olmaktadır. Üst flanşın üçüncü küçük flanşından iki adet gaz girişi bulunmaktadır. Bu gaz giriş boruları da torr seal ile hiç hava sızdırmayacak şekilde üçüncü flanşa yapıştırılmıştır. Gaz giriş borularının birinden torr-seal ile yalıtılmış termoçift sokulmuştur. Bu termoçift ile post-deşarj odası içindeki farklı bölgelerin sıcaklığı ölçülmektedir. Bu çalışmada gaz olarak atmosferik hava kullanılmıştır. Mekanik pompa çalıştığı zaman cam vakum odasının içinde ki havayı çekmektedir. Cam vakum odası içindeki basınç düştükçe gaz giriş borusundan atmosferik hava, elektrotlar arasına girmeye başlamaktadır. Bu şekilde “plazma üretim sistemi” nin elektrotları arasına hava akışı sağlanmaktadır. Bu nedenle “plazma üretim sistemi” elektrotları arasına yüksek voltaj uygulandığında, elektrotlar arasında oluşan plazma; akan plazma olmaktadır.

“Plazma üretim sistemi” nin elektrotları arasında akan plazma, DC voltaj güç kaynağı ile elde edilmiştir. Yalnızca pozitif voltaja bağlanmış dış elektrot ile toprak hattına bağlanmış iç elektrot arasına yüksek voltaj güç kaynağı ile yavaş yavaş voltaj uygulanmaya başlandığında elektrotlar arası uzaklığa göre yaklaşık 1000-3000 V arasında havanın akan plazması oluşur. Güç kaynağının pozitif voltaj çıkışına 2 k Ω akım kontrol direnci vardır. Elektrotlar arasında plazma oluştuğunda, güç kaynağı üzerindeki voltaj göstergesi 400-500 V civarına ani düşüşü gözlenir. Bu durumda ateşlenme (breakdown) gerçekleşmiştir. Elektrotlar arasında parlak, pembe-eflatuna yakın havanın plazması göz ile görülür hale gelir. Bölüm 2’de anlatıldığı gibi

elektrotlar arasında yüklü parçacık artışı ile “Glow Deşarj” oluşmuş olur. İç elektrot su ile soğutulduğunda Glow Deşarj, Ark Deşarja geçemez ve plazma soğuk kalır.

Elektrotlar arasında glow deşarj oluştuktan sonra vakum pompası hala çalışmaya devam ettiği için elektrot arasında oluşan havanın akan plazması (glow deşarj) post deşarj odası olarak adlandırdığımız cam vakum odası içine çekilmektedir. Yapılan çalışmalarda 3-4 mm uzunlukta havanın akan post deşarj plazması üretilmiştir. Şekil 4.7’de üretilen akan havanın DC post deşarj plazma fotoğrafı verilmiştir.



Şekil 4.7. Havanın akan DC post deşarj/plazma jet plazması.

Oluşan plazma jet daha önce söz edildiği gibi elektrotlar arasında var olan elektrik alandan uzaklaşmıştır. Bu bölgede elektrik alan bulunmamaktadır. Ancak burada bu sisteme özgü bir durum söz konusudur. Üst flanş ile alt flanş yaklaşık 20 cm uzunluğunda 15 mm kalınlığında 4 adet paslanmaz çelik ile birbirine tutturulmuştur. Üst flanş toprak hattına bağlı olduğu için ve üst ile alt flanş 4 adet paslanmaz çelik çubuk ile birbirine bağlandığı için alt flanş da toprak hattına bağlanmış demektir. Bu

durumda “plazma üretim sistemi” nin pozitif voltaj uygulanan dış silindir elektrotu ile alt flanş arasında da yeni bir elektrik alan oluşmaktadır. Bu bizim sistemimizin orijinal tarafıdır ve uygulamalarda önemli avantajlar sağlamaktadır. Bu oluşan elektrik alan post deşarj plazması içindeki pozitif iyonlar alt flanşa doğru hızlandırılmış olmaktadır. Eğer alt flanş üzerine metal numune tutucu kullanılırsa numunenin olduğu bölgeye kadar bu elektrik alan söz konusu olur. Bu çalışmada alt flanş üzerine yaklaşık 20 cm uzunluğunda paslanmaz çelikten yapılmış bir numune altlığı kullanıldı. Dış elektrot ile numune arasındaki mesafe 2 - 5 cm civarında tutulmuştur.

Bu çalışmada numune olarak *Staphylococcus aureus*, *Escherichia coli*, *Bacillus subtilis*, *Bacillus cereus* ve *Pseudomonas aeruginosa* bakterileri kullanılmıştır. Bu bakterilerin numune altlığının üzerine konulduğunda ve “plazma üretim sistemi” çalıştırılıp post deşarj odası içinde 4 - 5 mm’lik post deşarj plazma üretildiğinde bakterilerin tam bu post deşarjın altına gelmesi sağlanmıştır. Böylece post deşarj plazma içindeki pozitif iyonlar, negatif iyonlar, radikal ve diğer parçacıklar; doğrudan bakteriler üzerine gitmiştir. Aynı zamanda pozitif iyonların dış elektrot ile numune tutucu arasındaki elektrik alanla bakteriler üzerine hızlandığı yukarıda açıklanmıştır.

Ayrıca gaz girişinin olduğu üçüncü küçük flanştaki bir termoçift ile bakterilerin bulunduğu bölgenin sıcaklığı ölçülmüştür. Sıcaklık değeri 20 - 30°C arasında değişmiştir. Bakteriler nerede ise oda sıcaklığı seviyesinde soğuk akan havanın DC post- deşarj plazmalarına maruz tutulmuştur.

4.2. Biyolojik Hücreler Üzerine Uygulama

Bu çalışmada; düşük basınç ve düşük sıcaklıkta havanın DC post-deşarj plazmasının bakteriler üzerine uygulaması yapılmıştır. Bakteri olarak *Staphylococcus aureus*, *Escherichia coli*, *Bacillus subtilis*, *Bacillus cereus* ve *Pseudomonas aeruginosa* kültürleri kullanılmıştır. Bakteri kültürleri ESOGÜ Biyoloji Bölümü Biyoteknoloji Laboratuvar ortamında hazırlanmıştır.

Tez çalışması kapsamında model olarak seçilen bir bakteri olan *Bacillus cereus* NRRL B-3711 suşunun 24 saatlik aktif sıvı kültüründen başlangıç konsantrasyonu 1.5×10^8 cfu/ml olacak şekilde aseptik koşullarda lam üzerine 100 μ l damlatılmıştır. Lam üzerindeki sıvı kültür, farklı sürelerde (1, 2, 3, 5 ve 10 dakika) aynı basınç (3×10^{-1} mbar) ve voltaj (500 V) altında soğuk plazmaya tabi tutulmuştur. Kontrol olarak yine bir lam üzerine aynı organizmadan 100 μ l damlatıp plazma yerine aynı platform ve şartlar altında hava uygulanmıştır. Sonrasında farklı sürelerde plazma ve kontrol olarak hava ile muamele edilen sıvı kültürler nutrient agar katı besi ortamına aseptik koşullarda transfer edilmiş ve 37°C’ de inkübasyona bırakılmıştır. 24 saat sonunda katı besi ortamı üzerinde üreyen koloniler sayılmış ve plazma uygulamasında sürenin etkisi gözlemlenmiştir. Sıvı olarak hazırlanan bakteriler lam üzerine damlatılarak post-deşarj odası içine yerleştirilmiştir (Şekil 4.8).



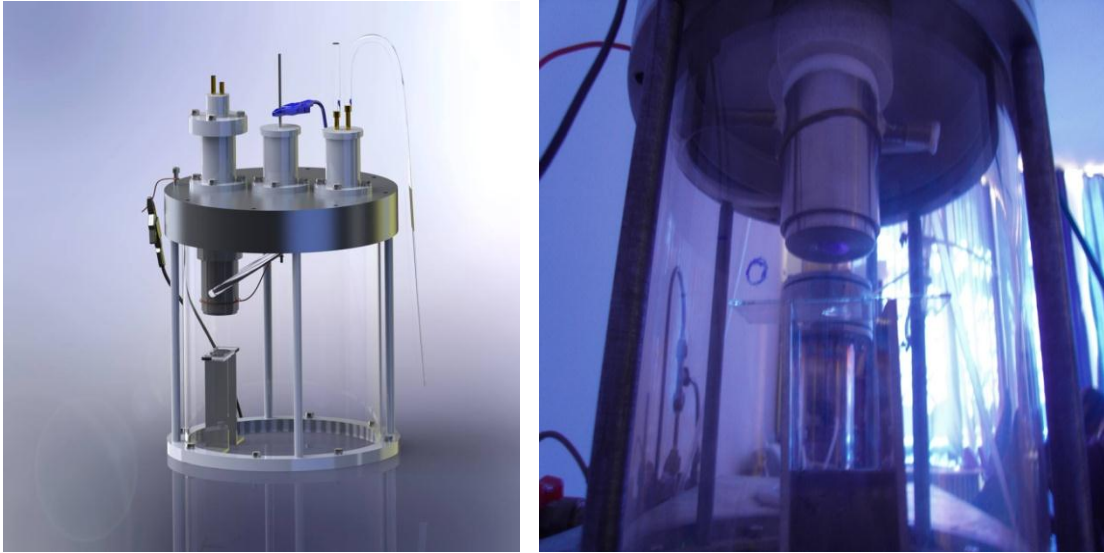
(a)



(b)

Şekil 4.8. a) Bakteri kültürleri, b) Lam üzerine damlatılan bakteri.

Hazırlanan bakteri kültürü Şekil 4.9 (a)'da şematik olarak gösterildiği gibi sistemin içine yerleştirilmiştir. Şekil 4.9 (b)'de post deşarj plazma uygulama sırasında çekilen fotoğraf verilmiştir.



(a)

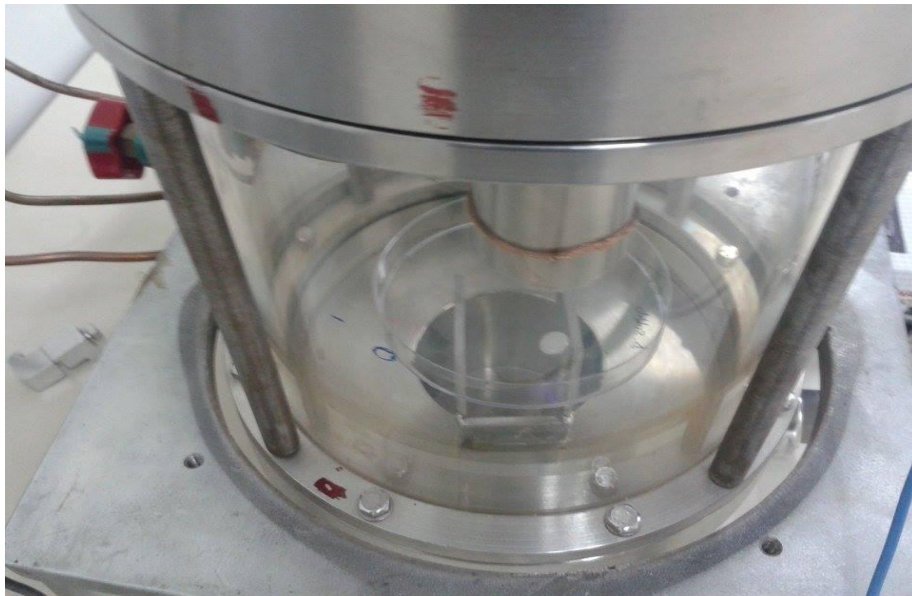
(b)

Şekil 4.9. a) *B.cereus* üzerine post deşarj uygulamasının şematik gösterimi, b) *B.cereus* üzerine akan havanın DC post deşarj uygulamasının fotoğrafı.

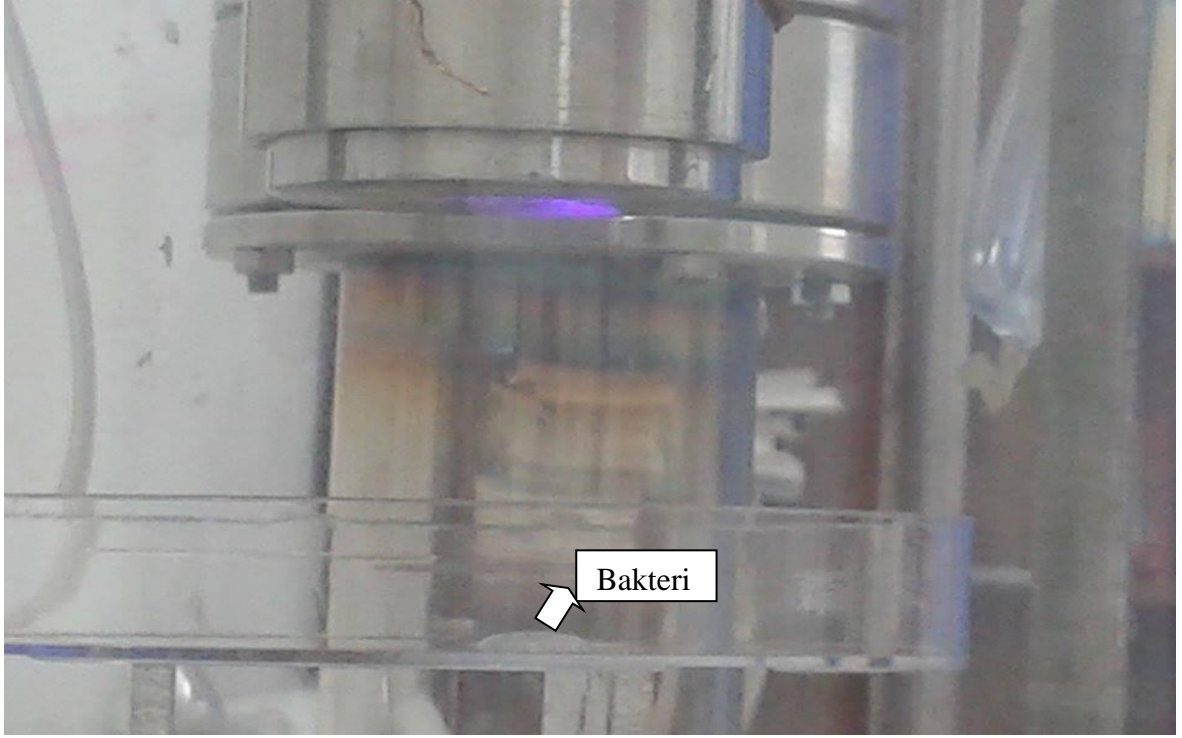
İlk çalışmalarda düşük basınç ve düşük sıcaklıkta havanın DC post-deşarj plazması bakteriler üzerine uygulanırken bakteriler ile silindirik dış elektrot arasındaki mesafe 2 - 5 mm seçilmiştir. Post deşarj plazma içinde üretilen plazma parçacıklarının daha fazla bakteriler üzerine nüfuz etmesi için bu mesafe neredeyse post-deşarj mesafesinde tutulmuştur. Bu mesafenin değişmesi bakterilerin ölüm oranında ve/veya plazmaya maruz bırakılmış bakterilerin yapısal deformasyonunda en önemli parametrelerdendir. Post-deşarj üretilirken elektrotlar arası mesafe 3 mm olarak ayarlanmıştır. Elektrotlar arası mesafe; havanın DC deşarjının ve post-deşarjının özelliklerini belirleyen parametrelerden biridir. Bununla birlikte, tüm deneylerde gaz olarak atmosferik hava kullanılmıştır. Uygulama sırasında cam vakum odasında basınç 3 mbar'da sabit tutulmuştur. Elektrotlar arasında havanın deşarjını üretmek için 3.000-

3.500 volt DC voltaj uygulanmıştır. Elektrotlar arasında havanın DC deşarjı oluştuktan sonra voltaj 450-500 V'a düşmüştür ve uygulama süresince bu aralıkta hemen hemen sabit kalmıştır. İç elektrotun aşırı ısınması engellemek için su soğutma işlemi plazma uygulama süresince yapılmıştır.

Yukarıda belirtilen koşullarda yapılan çalışmalarda akan havanın DC post-deşarj plazma ortamına maruz bırakılan olarak *Staphylococcus aureus*, *Escherichia coli*, *Bacillus subtilis* ve bakteri sayısında % 20'ye varan azalma görülmüştür. Ancak hiç plazma uygulanmayan sadece üzerine atmosferik hava gönderilen kontrol numunesi bakterilerinde de %10'a varan bakteri ölümleri gerçekleştiği görülmüştür. Bu durum uygulama sırasında sisteme gönderilen atmosferik havanın lam üzerindeki bakterilere hızla vurarak onların mekanik pompanın içine kaçması nedeniyle olmaktadır. Bununla birlikte vakum ultraviyole ışınları düşük basınçta oldukça etkin olmaktadır. Bu nedenle düşük basınç uygulamalarında vakum ultraviyole ışınları bakterilerin ölümüne neden olmaktadır. Sisteme gönderilen atmosferik basınç havanın sıvı bakterileri pompaya itmesini engellemek için lam yerine petri kabı kullanıldı. Şekil 4.10'da petri kabına damlatılmış bakteriler ve Şekil 4.11'de uygulama sırasında çekilen fotoğrafları verilmiştir.



Şekil 4.10. Petri kabına damlatılan bakteriler.



Şekil 4.11. Petri kabındaki bakterilere akan havanın DC post-deşarj plazma uygulanması.

Ancak bu uygulamada da benzer sorunla karşılaşıldı. Plazma uygulamadan sadece atmosferik hava uygulanan kontrol bakterilerinde %10'a varan azalma olurken plazma uygulama sırasında %20'ye varan bakteri ölümleri gerçekleşmiştir. Atmosferik havanın fazlaca bakteriyi mekanik pompaya ittiği görülmektedir. Bu nedenle aynı çalışma bakterileri plazma üretim sisteminden daha uzağı konarak tekrarlandı. Bu durumda *Bacillus subtilis*, *Bacillus cereus* ve *Pseudomonas aeruginosa* bakterileri için elde edilen sonuçlar Tablo 4.1'de verilmiştir.

Tablo 4.1. *Bacillus subtilis*, *Bacillus cereus* ve *Pseudomonas aeruginosa* Akan havanın soğuk post-deşarj plazması uygulandığında ki sayısal değişim.

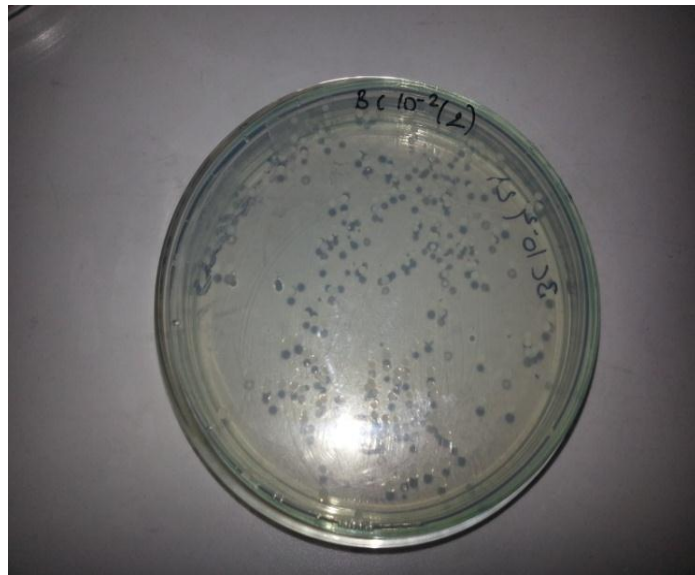
Seyreltme(dilüsyon)	10 ⁻¹	10 ⁻²	10 ⁻³	10 ⁻⁴	10 ⁻⁵	10 ⁻⁶
<i>B. cereus</i> Kontrol (sadece hava ve koloni sayıları) (10 dk)	>300 cfu/ml	>300 cfu/ml	>300 cfu/ml	>300 cfu/ml	10 cfu/ml	5 cfu/ml
<i>P. aeruginosa</i> Kontrol (sadece hava ve koloni sayıları) (10 dk)	>300 cfu/ml	196 cfu/ml	16 cfu/ml	3 cfu/ml	0	0
<i>B. subtilis</i> Kontrol (sadece hava ve koloni sayıları) (10 dk)	>300 cfu/ml	231 cfu/ml	3 cfu/ml	0	0	0
<i>B. cereus</i> (yaş biyokütle ve koloni sayıları) Plazma (12 dk)	>300 cfu/ml	>300 cfu/ml	12 cfu/ml	1 cfu/ml		
<i>P. aeruginosa</i> (yaş biyokütle ve koloni sayıları) Plazma (12 dk)	215 cfu/ml	23 cfu/ml	4 cfu/ml	0		
<i>B. subtilis</i> (yaş biyokütle ve koloni sayıları) Plazma (12 dk)	155 cfu/ml	15 cfu/ml	0	0		
<i>B. cereus</i> (kuru biyokütle ve koloni sayıları) Plazma (12 dk)	>300 cfu/ml	>300 cfu/ml	226 cfu/ml	200 cfu/ml	183 cfu/ml	96 cfu/ml
<i>P. aeruginosa</i> (kuru biyokütle ve koloni sayıları) Plazma (12 dk)	>300 cfu/ml	79 cfu/ml	13 cfu/ml	5 cfu/ml	1 cfu/ml	0
<i>B. subtilis</i> (kuru biyokütle ve koloni sayıları) Plazma (12 dk)	>300 cfu/ml	149 cfu/ml	31 cfu/ml	1 cfu/ml	0	0

Tablo 4.1'den görüldüğü gibi plazma uygulama sırasında önemli ölümler gerçekleşmektedir. Ancak kontrol bakterilerinin çok fazla vakum pompasına kaçtığı ve vakum ultraviyole ışınlarının çok fazla bakteri ölümüne sebep olduğu görülmektedir.

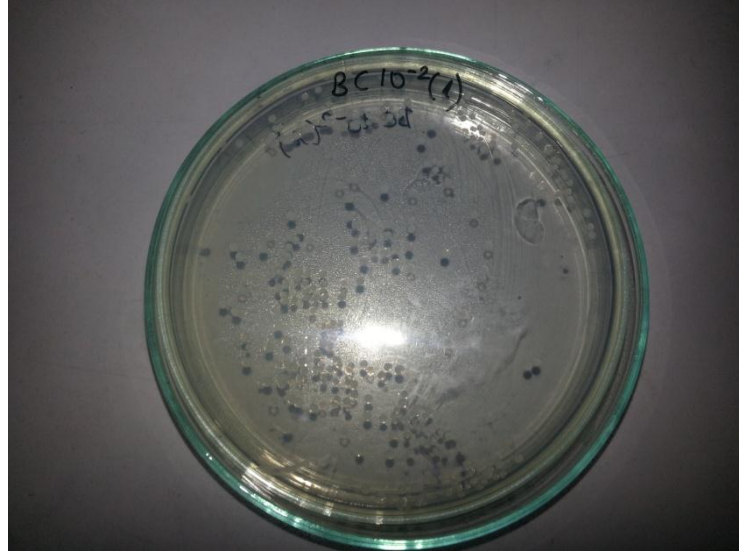
Şekil 4.12 - 4.16'da *Bacillus cereus* bakterilerinin uygulama yapmadan önce (kontrol) ve plazma uygulamasından sonra petri kabındaki üremelerinin fotoğrafı verilmiştir.



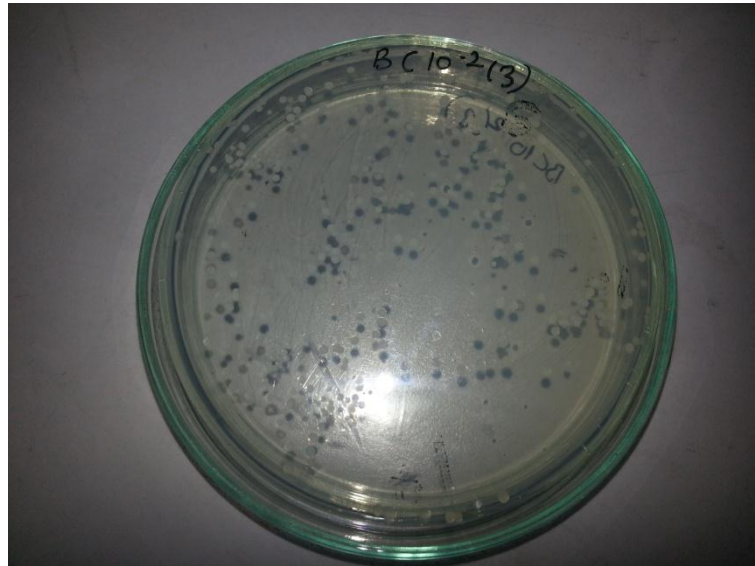
Şekil 4.12. Yalnızca akan hava gönderilen kontrol *Bacillus cereus* bakterilerinin petri kabındaki fotoğrafı.



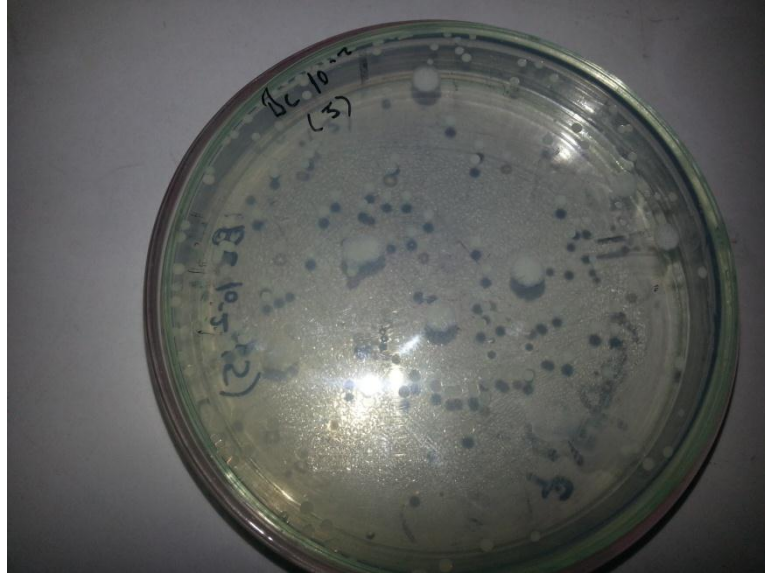
Şekil 4.13. 1 dakika akan havanın DC post-deşarj plazması uygulandıktan sonra bakterilerin fotoğrafı.



Şekil 4.14. 2 dakika akan havanın DC post-deşarj plazması uygulandıktan sonra bakterilerin fotoğrafı.



Şekil 4.15. 3 dakika akan havanın DC post-deşarj plazması uygulandıktan sonra bakterilerin fotoğrafı.



Şekil 4.16. 5 dakika akan havanın DC post-deşarj plazması uygulandıktan sonra bakterilerin fotoğrafı.

Şekil 4.12 – 4.16’den görüldüğü gibi post-deşarj plazma uygulaması ile *Bacillus cereus* bakterilerinde önemli azalma meydana gelmektedir. Atmosferik havada bakterilerin ölümüne neden olan daha çok oksijen radikalidir. Oksijen radikalleri bakteri üzerindeki C atomları ile CO yaparak bakterileri öldürdüğü gibi fiziksel zarar da verebilmektedir.

Plazma ortamına maruz kalan bakterilerin ölümüyle ilgili birçok neden açıklanmaktadır. Radikal atomların etkisi, plazmanın ürettiği UV etkisi, plazmanın bakteri yüzeyinde statik elektrik ile yırtılmaya neden olması gibi birçok açıklama yapılmıştır. Ancak halen tam olarak bir neden ortaya konmamıştır. Genel açıklama birçok etkinin birlikte yaptığı sonuç yönündedir.

SONUÇ VE YORUM

Staphylococcus aureus, *Escherichia coli*, *Bacillus subtilis*, *Bacillus cereus* ve *Pseudomonas aeruginosa* bakterileri dünyada ilk kez ve tamamıyla orijinal tasarım olan düşük basınçta üretilen akan havanın soğuk DC plazma jet plazmasına maruz bırakılmıştır. Farklı bakteri türlerinde farklı ölüm oranları gözlenmiştir. Kontrol grubuna göre farklı sürelerde (1, 2, 3, 5 ve 10 dakika) plazma uygulamasına tabi tutulan sıvı kültürlerin 24 saatlik inkübasyonları sonrasında koloni sayısında maruz kalma süresi uzadıkça koloni sayısında ciddi bir azalma gözlemlenmiştir. Ancak bu çalışmada soğuk plazma sterilizasyonunda başka parametrelerin de etkili olacağı düşünüldüğünden optimum koşulları saptamak şu aşamada mümkün olamamaktadır. Sistem ile bakteriler üzerine gönderilen atmosferik havanın sıvı bakterileri vakum pompasına ittiği gözlenmiştir. Bununla birlikte vakum ultraviyole (VUV) ışınları da bakteri ölümlerine sebep olmaktadır. Deneylerin daha düşük hava akış hızlarında tekrarlanması ile daha iyi sonuçlar elde edilebilir. Böylece düşük hava akışı bakterileri pompaya itmeyecektir. Bununla birlikte, bakteriler plazma jetin daha uzağına yerleştirilebilir. Ancak en önemli çalışma düşük basınçta sterilizasyon uygulamalarında sıklıkla başvuru kuru bakterilerle çalışmanın tekrarlanmasıdır. Bu tür problemler düşük basınçta sterilizasyon çalışmalarında genelde rastlanan problemlerdir. Bu nedenle plazma sterilizasyon uygulamalarında daha çok vakum pompası kullanılmayan atmosferik basınç plazma jetleri kullanılmaktadır. Bu sistemde cam vakum odasına monte edilen plazma üretim sistemi (plazma jet sistemi) sökülebilmektedir. Bir sonraki çalışmalarda bu plazma jet sistemi doğrudan atmosferik basınçta vakum pompası kullanılmadan bakteriler üzerine gönderilebilir. Çalışmaların ilerleyen aşamalarında hem optimum koşulların belirlenmesi sağlanacak hem de soğuk plazma uygulamasında deneyde kullanılan mikroorganizmanın hangi yapısal kısımlarının etkilendiği araştırılacaktır.

Bu tez çalışmasında kullanılan sistemin en orijinal tarafı, numune tutucu metal seçildiğinde uygulama yapılan numune üzerine hızlandırılmış iyon bombardımanı da yapılabilmesidir. Bununla birlikte, dielektrik numune tutucu seçildiğinde uygulama yapılan yüzeye sadece post-deşarj plazmasının radikalleri ve nötr atomları

bombardıman eder. Yapılacak uygulamada iyon bombardımanı ya da radikal bombardımanı etkisine göre tercih yapılabilir. Bu özelliklerinden dolayı sistem yüzey uygulamaları için tamamıyla orijinal bir sistemdir.

Soğuk Plazmaların bakteri üzerine uygulanmasında şimdiye kadar çok önemli çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalarda hem ekonomik olması hem de basit olmaları nedeniyle daha çok Atmosferik Basınç Plazma Jet sistemleri kullanılmıştır. Bu sistemleri bir vakum pompası, vakum odası ve vakum ölçüm sistemleri kullanılmadığı için tercih sebebi olmaktadır. Düşük basınçlarda soğuk plazmaların özellikle post-deşarj plazmaların bakteri sterilizasyonunda çok fazla uygulaması görülmektedir. Elektrotsuz plazma üretebildiği için mikrodalga plazmaların post-deşarjlarında düşük basınçta bakteri sterilizasyonunda başarılı sonuçlar elde edilmiştir

Bu tez çalışmasında, dünyada ilk kez düşük basınçta DC deşarjın post-deşarjı çeşitli bakteriler üzerine uygulanmıştır. Bununla birlikte kullanılan sistem, elektrot dizaynı, gaz girişi, güç girişi gibi önemli yapılarla tamamıyla orijinaldir. Sistem, farklı gaz ve farklı güç kaynakları ile de çalışabilir. Bununla birlikte post-deşarj odasına monte edilmiş “Plazma Üretim Sistemi” sökülerek atmosferik basınçta da kullanılabilir.

Burada kullanılan post-deşarj odası içinde farklı gazların farklı güç kaynakları ile üretilecek plazma jetleri; bakteri sterilizasyonunun yanında, polimer, tekstil, ince film kristalizasyonu gibi çok farklı yüzey uygulamalarında da kullanılabilir.

KAYNAKLAR DİZİNİ

Akan, T., 2003, Termiyonik Vakum Ark (TVA)'nın Temel Özelliklerinin İncelenmesi, Doktora Tezi, OGÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, 147s.

Akan, T., 2005, Maddenin dördüncü hali plazma ve temel özellikleri, Çağdaş Fizik Elektronik Dergi, sayı, <http://nucleus.istanbul.edu.tr/~cfe/dorduncu/mak1/>.

Chaua, T. T., Kao, C. K., Blankb, G. and, Madrid, F., 1996, Microwave plasmas for low-temperature dry sterilization, *Biomaterials*, 17, 13, 1273–1277.

Dallı, E., Atmosferik Basınç Soğuk Plazma Jetler, Yüksek Lisans Tezi, ESOGÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, 130 s.

Duan, Y., Huang, C. and Qingsong, Y., 2005, Low-temperature direct current glow discharges at atmospheric pressure, *IEEE Transactions on Plasma Science*, 33, 2, 328-329.

Ekem, N., Akan, T., Akgün, Y., Kiremitci, A., Pat, S. and Geavit, M., 2006, Sterilization of *Staphylococcus aureus* by atmospheric pressure pulsed plasma, *Surface and Coatings Technology*, 201, 3–4, 993–997.

Emmert, S., Brehmer, F., Hanble, H., Helmke, A., Mertens, N., Raees, A., Simon, D., Dirk Wandke., Wolfgang, M. F., Däschlein, G., Schön, M. P. and Viol, W., 2013, *Clinical Plasma Medicine*, 1, 1, 24-29.

Essam, N. and Wiley I., 1971, *Fundamentals Of Gaseous Ionization And Plasma Electronics*, 461 p.

Fridman, G., Friedman, G., Gutsol, A., Shekhter, A. B., Vasilets, V. N. and Fridman, A., 2008, Applied plasma medicine, *Plasma Processes and Polymers*, 5, 6, 503-533.

Grill, A., 1993, Cold Plasma in Materials Fabrication, IEEE Press, New York, 272 p.

Klaus, D. W., Eckhard, K., Woedtke, T., Hähnel, M., Manfred S. and Brandenburg, R., 2010, Atmospheric pressure plasma sources prospective tools for plasma medicine, Pure and Applied Chemistry, 82, 6, 1223–1237.

Krall, N. A. and Trivelpiece, A. W., 1973, Principles of plasma physics, McGraw-Hill Book Com., New York, 674 p.

Laroussi, M. and Lu, X., 2006, Dynamics of an atmospheric pressure plasma plume generated by submicrosecond voltage pulses, Journal of Applied Physics, 100, 063302 1-6.

Laroussi, M., Tendero, C., Lu, X., Alla, S. and Hynes, W. L., 2006, Inactivation of bacteria by the plasma pencil, Plasma Processes and Polymers, 3, 6-7, 470-473.

Lieberman, M. A. and Lichtenberg, A. J., 1994, Principles of Plasma Discharges and Materials Processing, Wiley, New York, 466 p.

Moisan, M., Barbeau, J., Crevier, M. C., Pelletier, J., Philip, N., and Saoudi, B., 2002 Plasma sterilization methods and mechanisms, Pure and Applied Chemistry, 74, 3, 349–358.

Raizer, Y. P., 1991, Gas Discharge Physics, Springer Verlag, USSR, 449 p.

Roth, J. R., 1995, Industrial Plasma Engineering, IOP, Philadelphia, 339 p.

Tanenbaum, B. S., 1967, Plasma Physics, McGraw-Hill Book Co., New York, 360 p.

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

www.insidescience.org, Erişim tarihi: 19.06.2013

www.plasmatreat.com Erişim tarihi: 03.06.2013

www.phys.tue.nl/EPG/stoffels/ Erişim tarihi: 15.06.2013