



## OPTİK EMİSYON SPEKTROMETRE KULLANILARAK YÜKSEK GÜÇLÜ BİR PLAZMATRON PLAZMA AKIŞI SICAKLIK ÖLÇÜMÜ

Özge YAZICIOĞLU<sup>1</sup>, T. Yaşar KATIRCIOĞLU<sup>2</sup>, Beycan İBRAHİMOĞLU<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Özge YAZICIOĞLU, AR&TeCS Anadolu Ar-Ge Teknoloji Mühendislik ve Danışmanlık A.Ş., Ankara, [oyazicioglu@ar-tecs.com](mailto:oyazicioglu@ar-tecs.com)

<sup>2</sup> T. Yaşar KATIRCIOĞLU, AR&TeCS Anadolu Ar-Ge Teknoloji Mühendislik ve Danışmanlık A.Ş., Ankara, [tykatircioglu@ar-tecs.com](mailto:tykatircioglu@ar-tecs.com)

<sup>3</sup> Beycan İBRAHİMOĞLU, AR&TeCS Anadolu Ar-Ge Teknoloji Mühendislik ve Danışmanlık A.Ş., Ankara, [bibrahimoglu@ar-tecs.com](mailto:bibrahimoglu@ar-tecs.com)

DOI: [10.23890/SUHAD.2017.0102](https://doi.org/10.23890/SUHAD.2017.0102)

### ÖZET

Plazmatron elektrik gücünü ısı güce çevirerek yüksek sıcaklıkta plazma akışı üretmektedir. Yüksek sıcaklıktaki ve hızdaki plazma akışı kömür, biyokütle ve her türlü atığın yakılması ve gazlaştırılması, hava araçlarının atmosfere yeniden giriş koşullarının simüle edilmesi, ısı koruma malzemeleri üretimi, plazma metalurjisi ve bilimsel araştırmalar gibi pek çok yüksek sıcaklık teknolojisinde kullanılmaktadır. Bu çalışmada kullanılan atmosferik basınç ve yüksek sıcaklıkta plazma akışı üreten yüksek güçlü bir plazmatronun ana elemanları elektrotlar, karışma odası, manyetik bobinler, konfuzör kanalları ve bir nozuldur. Çalışma gazı olarak kullanılan hava üç fazlı alternatif akım (AC) tarafından beslenen sistem içerisinde ısıtılmakta ve yüksek sıcaklıkta plazma akışı oluşturmaktadır. Yukarıda belirtilen alanlarda plazmanın etkin olarak kullanılabilmesi için plazmanın sıcaklık başta olmak üzere özelliklerinin iyi bilinmesi gerekmektedir. Optik emisyon spektrometre plazmanın parçacık kompozisyonu, yoğunluk ve sıcaklık gibi özelliklerini plazmaya müdahale etmeden belirlemek için geniş sıcaklık ve basınç aralığında kullanılabilen temel bir araçtır. Optik emisyon spektrometre ile plazma akışından gelen ışık alınarak, dijital ortama dalga boyu - ışık şiddeti grafiği olarak aktarılmakta ve grafik analiz edilerek elektron sıcaklığı, elektron yoğunluğu gibi plazma parametrelerine ulaşılabilmektedir. Bu yöntemle plazmaya müdahale edilmediği için plazma bozulmadan ölçüm yapılabilmektedir. Optik emisyon spektrometre ile sıcaklık ölçümlerinde farklı özelliklere sahip plazmalar için farklı metotlar geliştirilmiştir. Atmosferik ısı plazmalarda yüksek basınçla birlikte artan çarpışmalardan dolayı elektronlar sıcaklıklarını diğer ağır parçacıklara aktararak elektron sıcaklığı gaz sıcaklığına yaklaşmakta ve bu tür plazmalarda genellikle lokal termodinamik denge şartları geçerli olmaktadır. Bu çalışmada optik emisyon spektrometreye lokal termodinamik denge modeli kullanılarak yüksek güçlü bir plazmatron plazma akışı elektron sıcaklığı 11984 K olarak bulunmuştur. Literatürdeki benzer çalışmalarla karşılaştırıldığında sıcaklık seviyelerinin beklenen seviyelerde olduğu görülmüştür.

**Anahtar Kelimeler:** Plazmatron, AC, yüksek güç, kömür, biyokütle, atık yakma ve gazlaştırma, plazma akışı, optik emisyon spektrometre

### TEMPERATURE MEASUREMENT OF A HIGH POWER PLASMATRON PLAZMA FLOW USING OPTICAL EMISSION SPECTROSCOPY

#### ABSTRACT

The plasmatron produces a high temperature plasma flow by converting electric power to thermal power. High temperature and high velocity plasma flow is used in many high temperature technologies such as combustion and gasification of coal, biomass and all kinds of waste, simulating the re-entry conditions of air vehicles into the atmosphere, production of heat protection materials, plasma metallurgy and scientific research. In this study, the main elements of the high-power plasmatron which produces atmospheric pressure high temperature plasma flow are electrodes, a mixing chamber, magnetic bobbins, constrictor channels, and a nozzle. Air used as the working gas is heated in the facility which is powered from three-phase alternating current (AC) and forms the high temperature plasma flow. To use the plasma effectively in the fields mentioned above, it is necessary to know the properties of the plasma mainly in temperature. Optical emission spectrometry is a fundamental tool that can be used to determine the specifications of plasma such as particle compositions, density and temperature at wide temperature and pressure ranges without interfering the plasma. With the optical emission spectrometry, the light coming from the plasma flow is taken and transferred to digital media as wavelength versus intensity

graph and analyzing the graph, plasma parameters such as electron temperature, electron density can be reached. Because optical emission spectroscopy method does not interfere the plasma, measurements can be made without disrupting the plasma. Different methods have been developed for different plasma types to measure temperature with using optical emission spectrometry. In atmospheric thermal plasmas, due to increased collisions with high pressure, electrons transfer their temperatures to other heavy particles, the electron temperature approaches gas temperature, and local thermodynamic equilibrium conditions are generally valid in such plasmas. In this work, using local thermodynamic equilibrium model with optical emission spectrometry, electron temperature of plasma flow in high power plasmatron is obtained as 11984 K. Compared with similar studies in the literature, it is seen that the temperature levels are at the expected levels.

**Keywords:** Plasmatron, AC, high power, coal, biomass, waste combustion and gasification, plasma flow, optical emission spectrometry

## 1. GİRİŞ

Maddenin dördüncü hali olarak tanımlanan plazma, içerdiği elektron, iyon ve nötral parçacıklar ile iyonize bir gazdır (F. F. Chen, 1983). Plazmalar iyonlaşma seviyeleri ve ağır parçacıklarla elektronlar arasındaki sıcaklık farklarına göre ısıl ve ısıl olmayan plazmalar olarak sınıflandırılmaktadır (C. Tendero, v.d, 2005). Plasmatron, ürettiği yüksek sıcaklık ve yüksek entalpiye sahip plazma akışı ile kömür, biyokütle ve zehirli atıklar dahil her türlü atığın yakılmasında ve gazlaştırılmasında yüksek verim sağlamaktadır (F. Fabry, v.d, 2013, M. A. Gorokhovski, v.d, 2007). Plazma; içerdiği elektronlar, iyonlar, nötral parçacıklar, atomik oksijen, hidrojen ve hidroksil gibi reaktif türlerle kimyasal reaksiyonların dönüşümünü hızlandırmakta ve zararlı emisyonları azaltarak yakma ve gazlaştırma işlemlerinde çevreci bir teknoloji sağlamaktadır (P. Basu, 2010). Ayrıca plasmatron sağladığı yüksek sıcaklık ve sesüstü hızlardaki plazma akışı ile hava ve uzay araçlarının atmosfere yeniden giriş koşullarının yer koşullarında canlandırılması, ısı koruma malzeme üretim testleri, bilimsel çalışmalar gibi pek çok alanda kullanılmaktadır (G. Degrez, vd, 2000). Elektrik gücünü ark yoluyla gaz jeti olarak ısıl güce dönüştüren plasmatronların yukarıda belirtilen alanlarda kullanılmak için tercih edilmesinde plazmanın küçük bir hacminin bile yüksek konsantrasyonda enerji içermesinin büyük etkisi vardır (M.F. Zhukov, v.d, 2007).

Elektrik arki ilk olarak 1802 yılında St Petersburg Tıp-Cerrahi Akademisi'nde Profesör V.V. Petrov tarafından üretilmiş olmasına rağmen ancak 100 yıl sonra 20. Yüzyıl başlarında endüstride kullanılmaya başlanmıştır. Elektrik ark üreticilerine olan ilgi 1950'lerin sonlarına doğru aerodinamik borulardaki gazların ısıtılması ihtiyacı, sesüstü hızlarda hareket eden hava araçlarının uçuş modellemeleri, dünya ve diğer gezegenlerin atmosferine yeniden giriş şartlarının araştırılması ihtiyacıyla birlikte artmıştır (M.F. Zhukov, v.d, 2007). Güvenilir elektrik güç sistemlerinin geliştirilmesiyle de birlikte plasmatronların Avrupa, ABD ve Rusya'da kullanımı yaygınlaşmıştır. 2016 Ekim ayında ise Keldysh Araştırma Merkezi ile işbirliği içerisinde

Türkiye'de AR&TeCS (Anadolu R&D Teknoloji Mühendislik ve Danışmanlık Şirketi) Tesisleri'nde yüksek güçlü plasmatron test sistemlerinin kurulumu ve ilk testleri başarıyla gerçekleştirilmiştir.

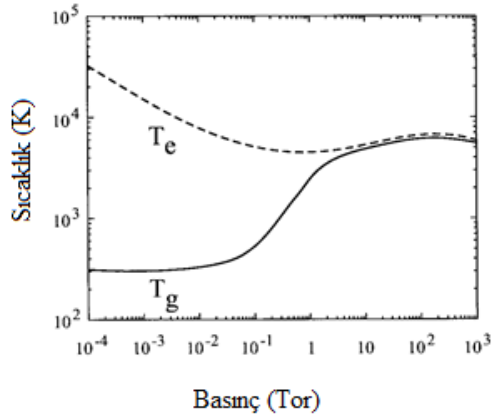
Plasmatronların performans testleri ve plazma akışının incelenmesinde ısı akısı probu, basınç probu gibi plazmaya müdahale eden ölçüm araçları kullanılmaktadır (B. Bottin, v.d, 1999). Bunların yanında; plazma parçacık karakterizasyonu, plazma yoğunluğu, plazma potansiyeli, elektron sıcaklığı, ion/elektron enerji dağılımı, ion kütle dağılımı gibi bilgilerin elde edilmesi için Langmuir prob (F. F. Chen, 2003), interferometri (A. Kono, 2002), kütle spektroskopisi (C. Seidel, v.d, 1999), optik spektrometre gibi plazmaya müdahale eden ve plazmaya müdahale etmeyen pek çok prob kullanılmaktadır (D. M. Devia, v.d, 2015). Optik spektrometre geniş sıcaklık ve basınç aralığında plazma karakterizasyonu için kullanılabilen, temel bir araçtır. Optik spektrometreler genel olarak pasif yöntem olan emisyon spektrometresi ve aktif yöntem olan absorpsiyon spektrometresi olarak ikiye ayrılmaktadır (U Fantz, 2006). Bu çalışmada kullanılan optik emisyon spektrometre ile plazmaya müdahale edilmeden fiber kablo aracılığıyla plazmadan gelen ışık bilgisayar ortamına ışık şiddeti-dalga boyu grafiği olarak aktarılmaktadır. Plazmaya müdahale edilmemesi plazmanın bozulmamasını sağlamaktadır. Optik emisyon spektrometre uygulaması kolay ve hızlı bir araç olmasına karşın, sıcaklık, yoğunluk gibi plazma parametrelerine ve parçacık kompozisyonlarına ulaşılmasında detaylı analiz çalışması gerektirmektedir (U Fantz, 2006). Elde edilen dalga boyu-ışık şiddeti grafiği incelenerek ve plazmanın türüne göre uygun metot seçilerek plazma parametrelerine ulaşılabilir (D. M. Devia, v.d, 2015).

Plazmalar sıcaklık, basınç, yoğunluk ve iyonlaşma dereceleri gibi pek çok parametreye göre farklı karakteristikler göstererek farklı türlere ayrılmaktadır (P. M. Bellan, 2004). Bu sistemde kullanılan yüksek güçlü plasmatron atmosferik basınçta "Gaz Dinamik Metot (Gas Dynamics Method)" ile 4000 K üzeri sıcaklığa çıktığı

hesaplanan plazma gaz akışı sağlayarak, ısı ve atmosferik basınçta plazma oluşturmaktadır.

Plazma içerisinde enerji ilk olarak elektronlara iletilerek çarpışmalarla birlikte diğer ağır parçacıklara (iyonlar, nötraller) aktarılmaktadır. Kütleli düşük olması sebebiyle elektronlar diğer parçacıklardan daha hareketlidir ve sıcaklıkları diğer parçacıkların sıcaklıklarından daha yüksektir ancak çarpışmalar arttıkça diğer parçacıkların sıcaklıkları da o oranda yükselmektedir (M. Moisan, v.d, 2012).

Düşük basınçtaki vakum plazmalarında elektron sıcaklığı ve gaz sıcaklığı arasında büyük fark olduğu ve basınç arttıkça elektronların enerjilerini diğer ağır parçacıklara aktararak iki sıcaklığın birbirine yaklaştığı görülmektedir. Literatürde cıva ve asal gaz karışımıyla üretilen bir plazmada yapılan çalışmalar plazma deşarj basıncının artması ve 760 tor üzerine çıkmasıyla birlikte elektron sıcaklığının gaz sıcaklığıyla yaklaşık aynı değerlerde bulunduğu Şekil 1'deki sıcaklık basınç grafiğinde görülmektedir (A. Schutze, v.d, 1998).



Şekil 1: Cıva ve asal gazlar karışımından oluşan bir deşarj plazmasında sabit akımda elektron ve gaz sıcaklığı sıcaklık-basınç grafiği (A. Schutze, vd., 1998).

Bir başka çalışmada, atmosferik ortamda test edilen, gaz olarak hava kullanılan 50 kW induktif eşleşmiş plazma (Inductively Coupled Plasma) torçunda gaz sıcaklığının yaklaşık 2000-3000 K, elektron sıcaklığının yaklaşık 116000 K (1eV) olduğu görülmektedir. Bu şartlardaki plazma kimyasal olarak dengede olmayan ısı plazmadır ve optik emisyon spektrometreyle sıcaklık ölçümlerinde lokal termodinamik denge (LTE, Local Thermodynamic Equilibrium) yöntemi kullanılmıştır (C O Laux, v.d., 2003).

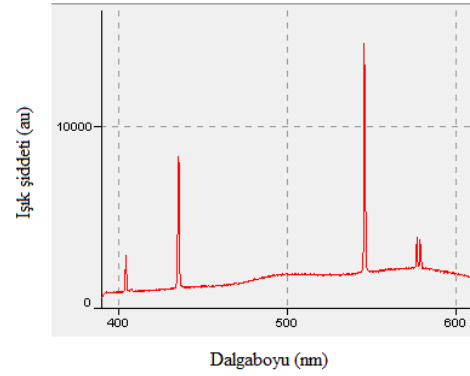
Literatürdeki bir başka çalışmada, atmosfer basıncında çalışan bir plazma torçunda lokal termodinamik denge modeli kullanılarak elektron sıcaklığı yaklaşık 11178 K olarak hesaplanmıştır (P.J. Wang, v.d., 2010).

Bu çalışmada ise AR&TeCS Tesisleri'nde kurulan ve test edilen yüksek güçlü plazmatron plazma

akışında Ocean Optics HR 4000 optik emisyon spektrometre kullanılarak atmosferik basınçta çalışan yüksek güçlü bir plazmatronun plazma elektron sıcaklığı lokal termodinamik denge yöntemi kullanılarak yaklaşık 11984 K (~1eV) olarak hesaplanmıştır.

## 2. YÖNTEM

Optik emisyon spektrometre plazmaya müdahale etmeden plazmadan gelen ışığı alarak emisyon spektrumunu analiz ederek plazma parametrelerine ulaşmayı sağlayan temel plazma diyagnostik metodlarından biridir. Elektron sıcaklığı temel plazma parametrelerinden biridir ve genel olarak gaz sıcaklığından yüksek olmakla birlikte atmosfer seviyelerindeki basınçlarda gaz sıcaklığına yaklaştığı literatürde görülmektedir (A. Schutze, v.d, 1998). Plazmadan alınan spektrum radyasyonu Şekil 2'de verildiği gibi ışık şiddeti-dalga boyu olarak elde edilmektedir.



Şekil 2: Optik emisyon spektrometreyle elde edilen örnek bir ışık şiddeti-dalgaboyu grafiği

Grafikte belirli dalga boyu ve ışık şiddetlerinde tepe noktalarının olduğu görülmektedir. Bu durum fiziksel olarak şu şekilde açıklanabilir: plazma içerisinde elektronlarla çarpışan parçacıklar (atom, molekül, iyon) enerji kazanırlar ve bu parçacıkların atomlarındaki elektronlar uyarılarak düşük seviyeden yüksek seviyeye çıkarlar. Elektronlar bu durumda stabil olmadıklarından tekrar düşük enerji seviyesine geçtiklerinde uyarılırken aldıkları enerjiyi foton olarak yayarlar. Yayılan fotonun enerjisi düşük ve yüksek enerji seviyelerindeki farka eşit olmaktadır (U. Fantz, 2006).

Salınan fotonun dalga boyu aşağıdaki denklemde de verildiği gibi  $h$  (Planck sabiti),  $c$  (ışık hızı) ve elektron yüksek enerji seviyesi ve düşük enerji seviyesi arasındaki fark ile ifade edilmektedir.

$$\lambda = \frac{hc}{E_2 - E_1} \quad (1)$$

Geçiş enerjisi parçacık türleri için karakteristik olduğu için foton enerjisinin analizi plazma kompozisyonuna ilişkin bilgi vermektedir. Optik emisyon spektrometreyle alınan data bilgisi analiz

edildiğinde plazmada olmasına rağmen gözlenemeyen bazı parçacıklar bulunmaktadır. Bunlar uyarılmamış parçacıklardır ve elektron seviye geçişleri olmadığı için foton yayınlamamışlardır (A. Kolpaková, v.d, 2011.) Grafikteki dalgaboyunun belirlenmesi denklem 1 ile kolay olmasına karşın, ışık şiddetinin ölçülmesi çizgi emisyon katsayısı ile aşağıdaki şekildedir:

$$\varepsilon_{21} = n(2)A_{21} \frac{hc}{4\pi\lambda} = \int \varepsilon_{\lambda} d\lambda \quad (2)$$

Burada  $\varepsilon_{21}$  çizgi emisyon katsayısının birimi  $W (m^2 sr)^{-1}$ 'dir.  $4\pi$  tam açı  $d\Omega$  (izotropik radyasyon) gösterir ve steradian (sr) olarak ölçülür.  $n(2)$ ; uyarılmış enerji seviyesindeki parçacık yoğunluğu ve  $A_{21}$  enerji seviyeleri arasındaki geçiş olasılığıdır (U Fantz, 2006).

Bu çalışmada optik emisyon spektrometre kullanılarak elektron sıcaklığı temel olarak plazmatron jet gazı içindeki parçacıkların uyarılma enerji seviyelerine göre belirlenmektedir. Spektrum içerisinde O, N, N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, CO ve NO, OH radikalleri gözlenmiştir. Çalışma gazı olan havada %78 oranında Azot bulunması ve plazma akışında gözlenen en belirgin tepe noktalarının azot iyonları olması sebebiyle uyarılan Azot iyonlarına göre hesaplama yapılmıştır. Azot iyonlarının birinci iyonlaşma değerleri, NII kullanılmıştır.

Lokal termodinamik denge yönteminde elektron sıcaklığı hesaplaması aşağıdaki formülasyona göre yapılmaktadır (S.X. Zhi, v.d., 2007).

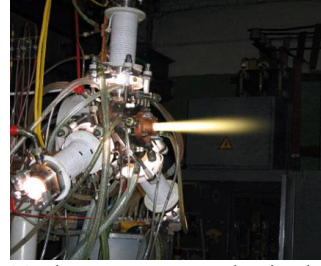
$$\ln \left[ \frac{I_2 \lambda_2}{g_2 A_2} \right] = - \frac{1}{kT} E_2 + b \quad (3)$$

Bu formülde  $I_2$  ışık şiddeti,  $\lambda_2$  dalgaboyu,  $g_2$  istatistiksel ağırlık,  $A_2$  geçiş olasılığı ve  $E_2$  enerji seviyesi, yüksek enerji seviyesi için verilen değerlerdir.  $k$  Boltzmann sabiti,  $T$  uyarılma sıcaklığı ve  $b$  ise sabittir. Dalgaboyu ve ışık şiddeti bilgisi spektrometre ile grafikten,  $g_2$ ,  $A_2$ ,  $E_2$  değerleri National Institute of Standards and Technology (NIST) tablolarından elde edilmektedir (NIST, n.d.)

$\ln \left[ \frac{I_2 \lambda_2}{g_2 A_2} \right]$  y ekseninde,  $E_2$  x ekseninde olacak şekilde grafik çizdirilerek uydurma (curve fitting) yapıldığında eksi eğime sahip bir grafik elde edilmektedir. Elde edilen doğrunun eğimi  $-1/kT$ 'yi vermekte ve bu bilgiden elektron sıcaklığına ulaşılmaktadır.

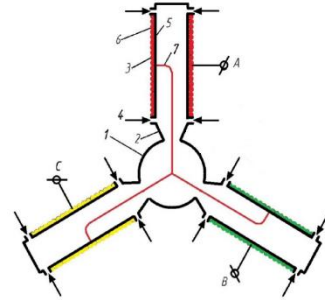
### 3. DENEY DÜZENEGİ

Keldysh Araştırma Merkezi'nde tasarlanmış 1 MW güçte çalışan AC ark plazmatronun resmi Şekil 3'te verilmiştir.



Şekil 3: Keldysh Araştırma Merkezi'nde tasarlanmış 1 MW güçte çalışan AC plazmatron

Üç fazlı AC ağı ile çalışan plazmatron temel olarak Şekil 4'te gösterildiği gibi karışma odasında (1) birleşen ve her biri boğaz (2), elektrot ünitesi (3), elektrotun iki taraflarındaki yalıtkanlardan oluşan özdeş üç arktan oluşmakta ve herbir arktan sisteme gaz verilmektedir (4). Şekilde görüldüğü gibi sistem bakır silindirik elektrotlar (5), manyetik bobinler (6) ve karışma odası çıkışındaki bir nozulden oluşmaktadır. Üç fazlı elektrik hattı her biri bir faza bağlı üç elektrot ünitesinden sağlanmaktadır ve her bir ark (7) yıldız noktası denilen bir noktada birleşmektedir (Y. S. Svirchuk and A. N. Golikov, 2016).

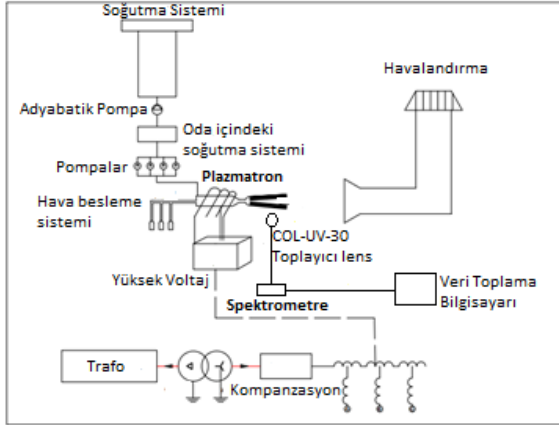


Şekil 4: Plazmatron şematik gösterimi (Y. S. Svirchuk ve A. N. Golikov, 2016).

AR&TeCS'te kurulu olan plazmatron test sistemi; elektrik güç sistemi, su soğutma sistemi, hava besleme sistemi, veri toplama sistemi ve havalandırma sisteminin yer aldığı beş alt sistemden oluşmaktadır. İlk olarak su soğutma ve hava besleme sistemleri çalıştırılmaktadır daha sonra sisteme güç verilerek elektrotlar ve boğaz arasında deşarj akımı oluşturulmaktadır. Besleme gazıyla etkileşen deşarj akımı plazma oluşturmaktadır. Manyetik alanla etkileşerek dönmeye başlayan ark boğazda hızlanarak yıldız noktasında birleşmekte ve karışma odası çıkışındaki nozulden dışarıya çıkmaktadır.

Plazmatron nozul çıkışındaki plazma akışından 200-1100 nm dalgaboyu aralığında ölçüm yapabilen Ocean Optics HR-4000-UV-NIR model spektrometre ile optik emisyon spektrumu elde edilmektedir. Alınan veriler spektrometre yazılımı ile toplanmakta ve kayıt altına alınmaktadır. Şekil 5'te optik spektrometre ile veri toplanan deney düzeneğinin genel şematığı verilmiştir. Spektrometre plazma akışından 53.5 cm uzakta ve

akışın ilk 10 cm'lik kısmından veri alacak şekilde yerleştirilmiştir.



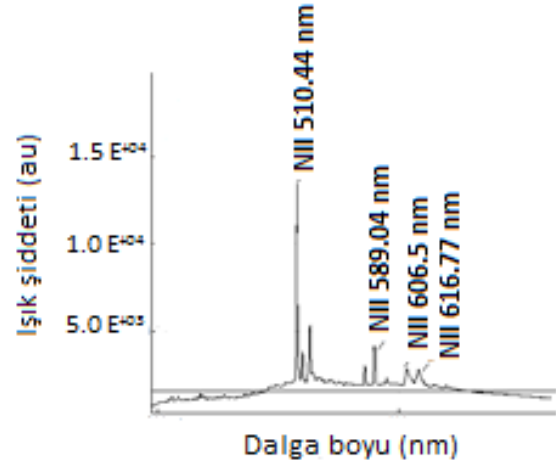
Şekil 5: Deneysel düzenek şeması

#### 4. DENEY SONUÇLARI

AR&TeCS'te kurulu olan yüksek güçlü AC plazmatron plazma akışından optik emisyon spektrometre kullanılarak elde edilen ışık şiddeti-dalgaboyu grafiği Şekil 6'da verilmiştir.

Azot birinci iyonlaşma NII değerleri ve Denklem 3'te verilen lokal termodinamik denge modeli kullanılarak, elde edilen dört tepe noktası için  $gA$  ( $s^{-1}$ ) ve  $E$  ( $cm^{-1}$ ) değerleri NIST veritabanı kullanılarak elde edilmiştir.  $k$  Boltzmann sabiti  $1.380648e^{-23}$  ( $J.K^{-1}$ ) olarak kullanılmıştır.

Elde edilen veriler ve geçişler aşağıdaki Tablo 1'de gösterilmektedir.

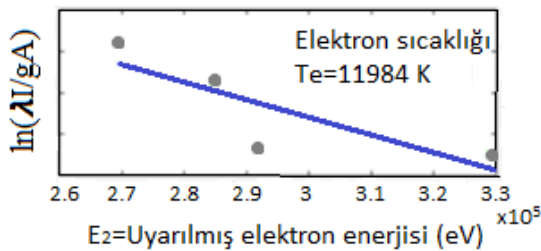


Şekil 6: Plazmatron jet gazından elde edilen ışık şiddeti-dalgaboyu grafiği

Tablodaki verilerle lokal termodinamik denge modeli kullanılarak  $\ln \left[ \frac{I_2 \lambda_2}{g_2 A_2} \right]$  y eksenini ve  $E_2$  x eksenini olacak şekilde uydurma yapılarak elde edilen  $-1/kT$  eğiminden elektron sıcaklığı Şekil 7'de gösterildiği gibi 11984 K olarak hesaplanmıştır.

Tablo 1: NII iyonlarının elektron sıcaklığını hesaplamak için gerekli spektral parametreleri

Dalgaboyu (nm)	$gA$ ( $s^{-1}$ )	$E_2$ ( $cm^{-1}$ )	Işık Şiddeti (a.u)	Geçiş
510.44	3.03E+07	197858.69	13470.92	$2s^2 2p 3p^1 S - 2s^2 2p 4s^1 P^o$
589.04	2.02E+08	228791.8	2309.52	$2s 2p^2 (^4P) 3s^3 P - 2s 2p^2 (^4P) 3p^3 D^o$
606.50	1.28E+06	187091.4	2818.24	$2s^2 2p 3p^3 P - 2s^2 2p 3d^1 D^o$
616.77	1.86E+08	202861.4	2793.72	$2s^2 2p 3d^3 F^o - 2s^2 2p 4p^3 D$



Şekil 7: LTE modeli kullanılarak elektron sıcaklığı belirlenmesi

#### 5. SONUÇ ve TARTIŞMA

Plazmatronlar yüksek sıcaklık ve yüksek hızlarda ürettikleri ısı plazma ve plazmanın küçük bir hacminde yoğun enerji içerebilmesi ile kömür, biyokütle, her türlü atık yakılması/gazlaştırılması, hava araçlarının atmosfere yeniden girişi

koşullarının simüle edilmesi, metalurji ve malzeme testleri gibi pek çok yüksek sıcaklık teknolojisinde kullanılmaktadır. Plazma akışının karakterize edilmesinde sıcaklık önemli parametrelerden biridir. Optik emisyon spektrometre plazmaya müdahale etmeden veri elde ettiği için plazmada bozulmalara sebep olmayan ve plazmaya müdahale ederek ölçüm yapan diğer problemlere göre daha güvenilir sonuç elde eden bir yöntemdir. Hızlı, kolay kullanımı ve basit deneysel düzenekleri ile anlık sonuçlar alınabilmekte ancak alınan verilerin yorumlanması, analizi, hesaplamaların yapılması ise detaylı ve dikkatli çalışma gerektirmektedir. Hesaplamaların yapılmasında çalışılan plazmanın özelliklerine göre uygun metodun kullanılması önemlidir. Bu çalışmada atmosfer basıncında hava ile çalışan yüksek güçlü AC plazmatrondan sağlanan ısı plazma akışının dalgaboyu-ışık şiddeti grafiği optik emisyon spektrometre kullanılarak elde edilmiştir. Literatürdeki atmosfer basıncındaki

plazmalar incelendiğinde, basınçla birlikte artan çarpışmaların elektron sıcaklığı ve gaz sıcaklığını birbirine yaklaştırdığını ve sistemin lokal termodinamik dengeye ulaştığını göstermektedir. Atmosferik basınçta 50 kW güçte hava ile çalışan bir indüktif eşleşmiş plazma torçunda gaz sıcaklığı 2000-3000 K civarında iken elektron sıcaklığı optik emisyon spektrometre ile lokal termodinamik denge metodu kullanılarak 11600 K olarak hesaplanmıştır (C O Laux, v.d., 2003). Argon gazı ile çalışan bir başka plazma torçunda ise sıcaklık optik emisyon spektrometre ile 11178 K olarak hesaplanmıştır. Bu çalışmada yüksek basınçlı ısı plazmaların lokal termodinamik dengede olarak tanımlandığı ifade edilmiştir (P.J. Wang, v.d., 2010).

Plazma jetlerinde yüksek basınç ve sıcaklıklarda çarpışmaların artmasıyla birlikte elektron sıcaklığının diğer ağır parçacıklar ve dolayısıyla gaz sıcaklığına yaklaştığı ve lokal termodinamik denge şartlarının geçerli olduğu literatürdeki diğer çalışmalarda da ifade edilmektedir (A. Blais, v.d, 2005).

AR&TeCS Tesisleri'nde bulunan 1 MW güçteki AC plazmatronun optik emisyon spektrometre ile sıcaklık ölçümlerinde O, N, N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, CO ve NO, OH radikaller gözlenmiş, hesaplamalarda ise 510.44 nm, 589.04 nm, 606.50 nm ve 616.77 nm dalgalı boylarındaki nitrojen birinci iyonlaşma değerleri kullanılmıştır.

Azot iyonlarının birinci iyonlaşma değerlerinden lokal termodinamik denge yöntemi ile elektron sıcaklığı 11984 K olarak hesaplanmıştır. Optik yöntemle elde edilen plazma elektron sıcaklığı yanında, plazma gaz sıcaklığı "Gaz Dinamik Metot (Gas Dynamics Method)" ile 4000 K seviyelerinde bulunmuştur.

Literatürde azot uyarılma emisyon bandları yanında gözlenebilen diğer spektrum bandları da sıcaklık hesaplarında kullanılabilir. Laux, v.d, tarafından atmosferik basınçta 50 kW güçte hava ile çalışan indüktif eşleşmiş plazma torçta da optik emisyon spektrometre ile benzer olarak OH, NO, N<sub>2</sub>, C<sub>2</sub>, CO, NH ve OH bandları gözlenmiş ve sıcaklık hesaplamaları OH, NO, N<sub>2</sub> rotasyonel bandları ve N<sub>2</sub><sup>+</sup> titreşimsel bandı kullanılarak yapılmıştır (Laux, v.d, 2003).

Uyarılma enerji bandları ve rotasyonel ve titreşimsel bandlar ile yapılan iki farklı hesaplamada da yukarıda belirtildiği şekilde yaklaşık 11000 K seviyelerinde benzer elektron sıcaklıkları hesaplanmıştır.

Benzer sistemler üzerinde optik emisyon spektrometre ile lokal termodinamik denge yönteminin kullanıldığı literatürdeki çalışmalar göz önüne alındığında bu çalışmadaki plazma elektron sıcaklığı beklenen seviyelerdedir. Bundan sonraki çalışmalarda plazmatronun farklı güçlerde çalıştırılması ile sıcaklığın değişimi incelenebilecektir.

## SEMBOLLER DİZİNİ

$T_e$ : Elektron sıcaklığı

$T_g$ : Gaz Sıcaklığı

$\lambda$ : Dalgaboyu

$h$ : Planck Sabiti

$c$ : Işık hızı

$E_2$ : Elektron yüksek enerji seviyesi

$E_1$ : Elektron düşük enerji seviyesi

$\mathcal{E}_{21}$ : Çizgi emisyon katsayısı

$n(2)$ : Uyarılmış enerji seviyesindeki parçacık yoğunluğu

$III$ : Azot iyonlarının birinci iyonlaşma değerleri

$I_2$ : Yüksek enerji seviyesi ışık şiddeti

$\lambda_2$ : Yüksek enerji seviyesi dalgaboyu

$g_2$ : Yüksek enerji seviyesi istatistiksel ağırlık

$A_2$ : Geçiş olasılığı

$T$ : Uyarılma sıcaklığı

$k$ : Boltzmann sabiti

a.u.: Arbitrary Unit (Keyfi birim)

## KAYNAKLAR

- A. Blais, B. Jodoin, J-L. Dorler, M. Gindrat, and C. Hollenstein, Inclusion of Aerodynamic Non Equilibrium Effects in Supersonic Plasma Jet Enthalpy Probe Measurements, September 2005.
- A. Kolpaková, P. Kudrna, ve M. Tichý Charles, "Study of Plasma System by OES (Optical Emission Spectroscopy)" University Prague, Faculty of Mathematics and Physics, Prague, Czech Republic, (2011): 180.
- Akihiro Kono, Negative ions in processing plasmas and their effect on the plasma structure, Center for Cooperative Research in Advanced Science and Technology, Nagoya University, Chikusa-ku, Nagoya 464-8603, Japan, (2002).
- Andreas Schutze, James Y. Jeong, Steven E. Babayan, Jaeyoung Park, Gary S. Selwyn, ve Robert F. Hicks. "The Atmospheric-Pressure Plasma Jet: A Review and Comparison to Other Plasma Sources"(1998):1-3.
- B. Bottin, O. Chazot, M. Carbonaro, V. Van Der Haegen, S. Paris, The VKI Plasmatron Characteristics and Performance, The von Karman Institute for Fluid Dynamics 72 Chaussee de Waterloo B- 1640 Rhode-Saint-Genese Belgium, (1999).
- C O Laux, T G Spence, C H Kruger ve R N Zare, "Optical diagnostics of atmospheric pressure air plasmas"(2003):125.
- C. Seidel, H. Kopf, B. Gotsmann, T. Vieth, H. Fuchs, and K. Reihls, "A plasma treated and Al metallised polycarbonate: a XPS, mass spectroscopy and SFM study," Applied Surface Science, p. 19–33, 1999.
- Claire Tendero, Christelle Tixier, Pascal Tristant, Jean Desmaison a, Philippe Leprince, Atmospheric pressure plasmas: A review, France, November 2005.

- D. M. Devia, L. V. Rodriguez-Restrepo and E. Restrepo-Parra, *Methods Employed in Optical Emission Spectroscopy Analysis: A Review*, (2015). Paul M. Bellan, *Fundamentals of Plasma Physics*, Pasadena, California, September, 2004.
- Francis F. Chen, *Introduction to Plasma Physics and Controlled Fusion*, Second Edition, Volume:1 Plasma Physics, 1983.
- Francis F. Chen, *Langmuir Probe Diagnostics*, Electrical Engineering Department University of California, Los Angeles Mini-Course on Plasma Diagnostics, IEEE-ICOPS meeting, Jeju, Korea, June 5, 2003
- Frédéric Fabry, Christophe Rehmert, Vandad Rohani, Laurent Fulcheri, *Waste Gasification by Thermal Plasma: A Review*, 2013.
- Gerard Degrez, David Vanden Abeele, Paolo Barbante, and Benoit Bottin, *Numerical Simulation of Inductively Coupled Plasma Flows and Hypersonic (Re-)entry Flows*, September 2000.
- M. A. Gorokhovski, Z. Jankoski, F. C. Lockwood, E. I. Karpenko, V. E. Messerle and A. B. Ustimenko, *Enhancement of Pulverized Coal Combustion by Plasma Technology*, 2007.
- M.F. Zhukov ve I.M Zasyplin, “Thermal Plasma Torches, Design Characteristics, Applications.” (2007): v-viii.
- Michel Moisan, Jacques Pelletier, *Physics of Collisional Plasmas: Introduction to High-Frequency Discharges*, 2012.
- NIST, National Institute of Standards and Technology, accessed January 2017. <https://www.nist.gov/pml/atomic-spectra->
- P.J. Wang, C.C. Tzeng, ve Y. Liu, “Thermal Temperature Measurements of Plasma Torch by Alexandrite Effect Spectropyrometer”(2010):1-7. doi:10.1155/2010/656421.
- Prabir Basu, *Biomass Gasification and Pyrolysis Practical Design and Theory*, 2010.
- S.X. Zhi, Y. Ping, Z.H. Ming, ve W. Jie, “Transition probabilities for NII 2p4f–2p3d and 2s2p23d–2s2p23p obtained by a semiclassical Method”, no:10, (2007): 2934-2936.
- U Fantz, Max-Planck-Institut für Plasmaphysik, EURATOM Association Boltzmannstr, 2, D-85748 Garching, Germany, “Basics of plasma spectroscopy”(2006):137-138, doi:10.1088/0963-0252/15/4/S01.
- Y. S. Svirchuk ve A. N. Golikov, “Three-Phase Zvezda-Type Plasmatrons” (2016):1-3.