

İndüksiyon Eşlenikli Argon Plazmasında Akış Debisi ve Bobin Lokasyonunun Sistem Çalışma Parametrelerine Etkisi İle İlgili Simülasyonlar

*¹Erdal Bozkurt,²T. Yaşar Katırcıoğlu, ³A.Tuğhan Balkan

¹AR&TeCS Anadolu Ar-Ge Teknoloji Mühendislik ve Danışmanlık A.Ş., Ankara

¹ebozkurt@ar-tecs.com, ²tykatircioglu@ar-tecs.com, ³atbalkan@ar-tecs.com

Geliş Tarihi: 2017-02-16 Kabul Tarihi: 2017-01-31

Öz

Plazmatronların üretebildikleri yüksek sıcaklıktaki plazma sayesinde kullanım alanları gün geçtikçe artmaktadır. Yüksek sıcaklıktaki ve hızlıdaki plazma akışları kömür ve biyokütle atıklarının yakılması, gazlaştırılması, hava araçlarının atmosfere yeniden giriş koşullarının simüle edilmesi, ısı koruma malzemeleri üretimi, plazma metalürjisi, aşınma-kaplama uygulamaları ve bilimsel araştırmalar gibi pek çok yüksek sıcaklık teknolojisinde kullanılmaktadır. Teknik gereksinimleri karşılayacak plazmanın tanımlanabilmesi ve tanımlanan plazma isterlerinin, üretimden önce simülasyonları yapılarak incelenmesi, zaman, maliyet ve teknik risklerin asgariye indirilmesi açısından çok önemlidir. Bu çalışmada düşük basınçta indüksiyon eşlenikli Argon plazması (Inductive Coupled Plasma-ICP) ile ilgili simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Simülasyonda kullanılan RF frekansı 13.56 MHz, vakum değeri 1 Torr seçilmiştir. Bu vakum değeri atmosferik yeniden giriş deneysel uygulamalarına uygun olarak seçilmiştir. Çalışmada; gaz akışı simülasyonu, ısı transfer simülasyonu ve plazma simülasyonu eşlenikli olarak gerçekleştirilmiştir. Gaz akış miktarı (Q), düşük ve yüksek debi etkilerinin net gözlenebilmesi için iki farklı değer olarak, $Q_1=3$ mg/s ve $Q_2=90$ mg/s seçilmiştir. Simülasyonlarda toplamda 7 farklı kimyasal reaksiyon hesaba katılmıştır. Sistemde oluşan manyetik alan ve bunlara karşılık gelen elektrik alan çizgileri, manyetik alan büyüklüğü dağılımı, sıcaklık dağılımı, konvektif ısı akış dağılımı, gaz akış hız dağılımı, gaz basıncı değişimi değerleri ve elektron yoğunluğu dağılımı, iki farklı gaz debisi için simülasyonlarda hesaplanmış ve bu iki durum için söz bu değerler birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Son olarak sistemi dalgalı-AC akım ile enerjilendiren indüksiyon bobinlerinin yeri simetri eksen-z boyunca yukarıya, gaz çıkışına doğru kaydırılmış, bobinlerin yeri sistem geometrisine göre ortada ve sonda iken simülasyonlar yapılmıştır. Bu hesaplarda her iki durum için bobin elektriksel gücü ve akış kütle debisi sabit tutulmuştur. Ardından bobinlerin lokasyonundaki değişimin elektron yoğunluğu ve plazma gaz sıcaklığına olan etkisi 1-boyutlu ve 2-boyutlu dağılımlarla incelenmiştir.

Anahtar kelimeler: Plazma, plazmatron, inductively coupled plasma (ICP plazma), kömür ve biyokütle yakma, gazlaştırma, modelleme, simülasyon

Argon ICP Plasma Simulations Related to the Effect of the Gas Flow Rate and the Location of the Coils to the System Working Parameters

¹Erdal Bozkurt,¹T. Yaşar Katırcıoğlu, ¹A.Tuğhan Balkan

¹AR & TeCS Anadolu R & D Technology Engineering and Consulting Co., Ankara

ebozkurt@ar-tecs.com, tykatircioglu@ar-tecs.com, atbalkan@ar-tecs.com

Abstract

The usage areas of the plasmatron has been increasing due to the very high level of temperature which they can reach. They are used widely in the plasma-wind tunnels to create the atmospheric test conditions of high velocity aircrafts and spacecrafts while entering atmosphere. Additionally, most efficient coal and bio-mass burning also, syngas production from burning of the coal and biomass can be achieved with the high temperature plasmatrons. They are also used in the tests of high temperature resistance materials, plasma metallurgy and related scientific researches. The usage of simulation is very important to determination and verification for technical requirements of a plasma and plasmatron system before it's production, the time, cost and technical risks can be minimized before investing money to the production and development by simulating the related plasma system. In this work, a system that is consisted of inductive coupled plasma (ICP) is investigated by making related computer

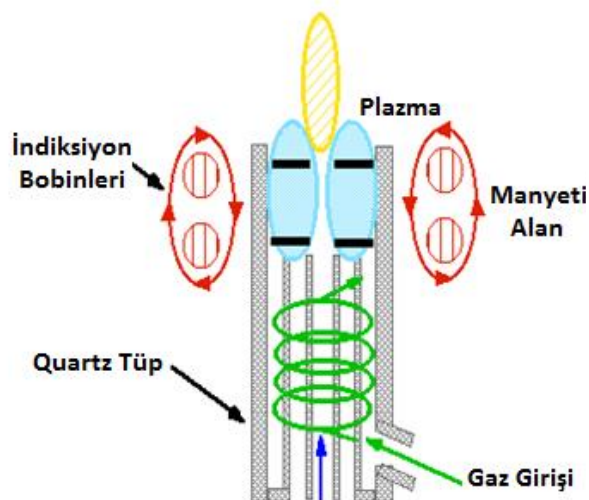
*Sorumlu Yazar: AR&TeCS Anadolu Ar-Ge Teknoloji Mühendislik ve Danışmanlık A.Ş., Ankara, tykatircioglu@ar-tecs.com, Tel: 0 312 484 55 15

simulations. Investigated simulations are gas flow simulation, heat transfer simulation and plasma simulation and, these simulations are performed as coupled. In these simulations, the RF frequency is chosen as 13.56 MHz and vacuum pressure is chosen as 1 Torr. This vacuum level is selected appropriately for atmospheric re-entry experimental conditions. The mass flow rate is adjusted as a low and a high level, $Q_1=3$ mg/s and $Q_2= 90$ mg/s respectively. With these setting the changes of flow, heat and plasma parameters are investigated. Totally, 7 different chemical reaction is added to the realized simulations. The magnetic field distribution, the electric field induced from this magnetic field, the magnetic field magnitude, flow temperature distribution, convective heat transfer distribution, plasma gas velocity field, plasma gas pressure distribution and plasma electron density distribution is calculated in these simulations and, these results are compared for the different gas mass flow rate. Finally, the location of the coils which gives the RF electrical energy to the ICP plasma are slid to where the plasma gas is leaving from the geometry which respect to symmetry axis-z. The simulations are performed when the coils are in the middle and in the gas exit of the geometry. In these two different configurations, the power which this system is taken and mass flow rates are kept the same. These values are 3500 Watt and 90 mg/s respectively. Afterward with the change of the coils location, the plasma electron temperature and plasma gas temperature are investigated for 1-D and 2-D distribution and they are compared for discussion.

Keyword:: Plasma, plasmatron, inductively coupled plasma (ICP plasma), coal and biomass burning, gasification, modeling, simulation

1.Giriş

ICP plazmatron, yüksek sıcaklıklarda gaz jeti üretmeye yarayan bir plazma kaynağı olup, yüksek entalpide gaz akışı sağlar [1] [2] [3]. Isıtılan gaz Argon, Oksijen, Nitrojen ve hava gibi çok farklı türlerde olabilir [4]. Sistem simetri ekseni-z etrafında oluşan elektrik alan çizgileri, Eddy akımlarına (Eddy Current'lara) neden olur. Bu akımlar dolayısıyla plazmatron da kullanılan gaz ısınır. Elektrik alan çizgileri ise sistem simetri ekseni yönünde oluşan manyetik alan çizgilerinin zamana göre salınımı sonucudur. Şekil 1'de görülen manyetik alan çizgileri değişiminin nedeni ise sistemde kullanılan yalıtkan malzemenin etrafına sarılan indüksiyon akım bobinleridir. Bu bobinlere MHz'ler mertebesinde alternatif akım verildiğinde sistem içinde zamanla salınan manyetik alan elde edilir [5][6] [7][8][9][10][11].



Şekil 1. Plazmatron sistemi çalışma prensibi için temsili

Plazmatronda oluşan yüksek sıcaklıktaki plazma gazının kullanılan yalıtkan malzemeyi eritmemesi için sisteme gaz girdaplı (gas vortex) olarak verilebilmektedir. Şekil 1'de yeşil ile gösterilen bu gaz akışı girdaplı hava akışına bir örnektir. Bu sayede sistem 4000-15000 K arasındaki yüksek sıcaklıklarda çalışabilmektedir [12].

ICP plazmatronun gerçek çalışan örneği Şekil 2'de görülmektedir.



Şekil 2. Çalışır halde bir ICP plazmatron plazma alevi [13]

ICP plazmatron sistemlerinde kullanılan yalıtkan malzeme sayesinde sistem elektrotsuz olarak çalışır. Elektrotlu sistemler ark boşalmalı plazmatronlardır. Ark plazmatron sistemlerinde metal elektrotlar kullanılmaktadır. Bu elektrotlara uygun miktarda elektrik gerilim uygulandığında ark plazması oluşmakta ve gazı 10,000 K gibi yüksek sıcaklıklara kadar ısıtmaktadır [20]. Ancak bu süreçte ısınan elektrotlar buharlaşmakta ve plazmanın saflığını bozmaktadır. Dolayısıyla ark plazmatron sistemleri kaplama gibi yüksek saflıkta sıcak gaz istenen durumlarda tercih edilmezler.

ICP plazmatronlarda ise herhangi bir elektrot kullanılmadığından aşınma olmaz ve yüksek saflıkta

plazma elde edilir. Bu avantajından ötürü elektrotsuz ICP plazmatron sistemleri ark boşalmalı plazmatron sistemlerine göre kaplama ve kütle spektroskopisi gibi uygulamalarda daha çok tercih edilir [14][15][16][17][18][19][6].

ICP plazmatronlar 100 mTorr'dan daha az basıncın bulunduğu ortamlardan, 10^3 Torr gibi atmosfer basıncı değerlerinin söz konusu olduğu durumlara kadar çalışabilmektedir [21].

ICP plazmatronlar düşük kaliteli linyit kömürünü yakmak için de kullanılmaktadır. Yakılan bu kömürden yüksek verimde ısı elde edilmekte, bu ısı ile de elektrik enerjisi üretilmektedir. Dünya'da kömürden elektrik elde etme yüzdesi %40.1 oranıyla en büyük payı aldığı ve geri kalan elden hidroelektrik, rüzgar, nükleer vb. olarak dağıldığı göz önünde tutulduğunda bu konuda yapılan deneysel ve nümerik çalışmaların ne kadar önemli olduğu görülmektedir [22]. Termoelektrik enerji santrallerinde kömür yakarak üretilen enerjinin yalnızca %1'i plazmatronun çalıştırılması için kullanılmakta, kömürün tutuşması için gazın ya da petrolün kullanılması gerekliliği ortadan kalkmakta, kömür ateşinin stabil şekilde yanması sağlanmakta, yanmamış karbon emisyonu ve nitrit oksit miktarı azalmaktadır[23][24]. Ayrıca plazmatron kullanılarak biyokütle (başka bir deyişle çöp) veya kömürün gazlaştırılması mümkündür. Kullanılan kömürün kalitesi önemli olmaksızın elde edilen gazın ihtiva ettiği enerji miktarı $4358-4555 \text{ kcal.kg}^{-1}$ dolaylarındadır. Bu yanma işlemi için gerçekleşirken plazma $5000 \text{ }^\circ\text{C}$ ' sıcaklık değerlerine kadar çıkmaktadır [25][26][27]. Bu gazlar 1300 K gibi yüksek sıcaklıklarda ısı enerjisi üretebilmektedir [23].

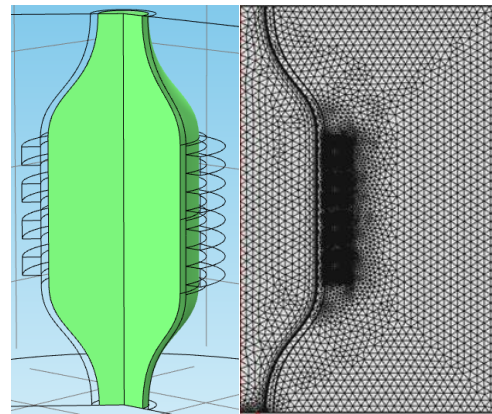
ICP ya da ark boşalmalı plazmatronların kömür ya da biyokütle yakılmasında ortaya çıkacak yüksek sıcaklık profili ve oluşan reaktif gaz türlerinin bilinmesi önem taşımaktadır. Bu çalışmada gerçekleştirilen simülasyonlarda kullanılan gaz Argon'dur ama ICP ya da ark boşalmalı plazmatronlarda genelde hava kullanılmakta ve dolayısıyla kömür-biyokütle yakmada ortaya çıkan sıcak gaz kompozisyonu buna göre değişmektedir [23]. Kömür ile yanmada $50-100 \mu\text{m}$ boyutunda olan kömür toz parçacık boyutu plazma ile oluşturulan termal şok nedeniyle $5-10 \mu\text{m}$ boyutuna inmekte ve bu durum hem oksidasyon sürecini hem de elde edilen enerji miktarını yüksek oranda artırmaktadır[23]

ICP plazma kaynakları aynı zamanda uzay vakum ortamında uydu itki sistemi olarak da kullanılmaktadır. Bu uygulamada yakıt verimliliği anlamına gelen Isp-özümlü kütle değeri kimyasal yakıtlı sistemlere oranla 4-5 kat mertebesinde

yüksektir. Yakıt verimliliği ise Isp değerine göre logaritmik olarak arttığından dolayı uzay ortamında kimyasal yakıtlı sisteme göre aynı görevi gerçekleştirmek için gereken yakıt miktarı kat kat azalmaktadır[28]. Bu iticilerin toplam çalışma ömrünün 5000-6000 saat ölçeğinde olduğu göz önünde bulundurulduğunda ICP iyon itki sistemlerinin ne kadar tercih edilir pozisyonda olduğu açıkça görülmektedir.

ICP plazma sistemlerinde elde edilen elektron sayı yoğunluğu ise oldukça yüksektir ve $10^{16}-10^{18} \text{ m}^{-3}$ dolaylarındadır[29][30][17]. Bu sayı kapasitif eşlenik plazma (Capasitively Coupled Plazma-CCP) sistemlerinden 10 kat daha fazladır [31].

Plazma sistemleriyle ilgili ticari veya deneysel bir cihaz üretmenin ve tüm parametrelerin deneysel olarak test edilmesinin yüksek maliyeti ve gerekli zaman göz önüne alındığında ihtiyaca yönelik bilgisayar simülasyonlarının gerçekleştirilmesi gerektiği görülmektedir. Kömür ve biyokütleyi plazma ile yakma gibi uygulamalarda yüksek sıcaklık istenmektedir. Dolayısıyla simülasyonlarda sıcaklık girdisine yönelik geometriyle ya da sistem çalışma parametreleri ile ilgili optimizasyonlar yapmak yerinde olacaktır. Literatürde gerçekleştirilmiş kodlardan FLOREAN ve diğerleri kömür yakma probleminin çözümünde yüksek kesinlikte sonuçlar sağlamıştır[22][25].



Şekil 3. Solda ICP plazmatron simülasyonunda kullanılan sistem geometrisi ve sağda çözüm sırasında kullanılan ağ (mesh)

2. Nümerik Analiz Metodu

Bu çalışmada plazma simülasyonları gerçekleştirilirken gaz olarak Argon kullanılmıştır. Sistem 2-boyutlu eksen simetrik olarak açık yazılımlar kullanılarak modellenmiştir. Plazma simülasyonları akışkan dinamiği ve ısı transferi eşitlikleri ile eşlenikli olarak çalışmıştır. Plazma deşarjı ile oluşan elektron yoğunluğu, sıcaklık dağılımı, gaz akış hız dağılımı, gaz basıncı dağılımı, konvektif ısı akış dağılımı rapor edilmiştir.

Bu çalışmada kullanılan sistem geometrisi ve hesabın yapıldığı ağ-mesh Şekil 3’de gösterilmiştir. Seçilen bu geometri ile ICP plazmatron alevi (plazmatron torch) atmosfere yeniden giriş testlerinde ya da düşük basınç yüksek sıcaklık malzeme testlerinde kullanılabilir. Kullanılan açık yazılımda simülasyonlar 2-boyutlu eksen-simetrik olarak hesap yapmıştır. Sistem çalışma frekansı 13.56 MHz seçilmiş, gaz olarak Argon kullanılmış, toplam gaz basıncı 1 Torr alınmıştır. Sistem giriş çalışma gücü her iki durumda da 3 kW’tır. Gaz akış debisi 3mg/s-90mg/s olarak iki ayrı değerde seçilmiştir. İkinci değer 30 kat gibi çok fazla seçilmesinin nedeni artan akış karakteristiğiyle sistemden çıkan plazma gazının sıcaklığının ne derece arttığını görmektedir.

Son olarak indüksiyon bobinlerinin lokasyonu sistem simetri eksenine-z’e göre yukarı doğru kaydırılmıştır. Her iki durumda da güç 3.5 kW ve kütle akış debisi 90 mg/s iken yapılan bu analizde fiziksel parametrelerden elektron yoğunluğu, plazma gaz sıcaklığı, konvektif ısı akış dağılımının değişimi incelenmiştir.

Aşağıda Tablo 1’de bu çalışmada gerçekleştirilen simülasyonlarda hesaplarda kullanılan diferansiyel denklemlerde başlangıç değer olarak kullanılan değerler gösterilmiş ve akışkan elektron denklemi (electron magneto-dynamic equation), elektron enerji akış denklemi, Poisson’s elektrik alan denklemi, salınımlı manyetik alan denklemi, ısı transfer denklemi ve laminar akış denklemi eşlenikli olarak çözülmüştür.

Hesaplarda gaz akış hızı ve gaz basınç dağılımı, akışkan dinamiği eşitlikleri hesaplarından elde edilmiştir. Bu değerler plazma eşitlikleri hesabına girdi olarak kullanılmıştır. Ayrıca gaz yoğunluğu ve dinamik viskozite dağılımı plazma eşitlikleri ile hesaplanmış ve akışkan eşitliklerinin hesabına girdi olarak kullanılmıştır.

Tablo 1. Bu çalışmada gerçekleştirilen simülasyonlarda çözülen diferansiyel denklemlerde kullanılan başlangıç değerler (the initial conditions for the solved differential equations)

Gaz sıcaklığı başlangıç değeri (Kelvin)	300
Gaz akış değeri başlangıç değeri (m/s)	0
Elektron yoğunluğu başlangıç değeri (m^{-3})	10^{15}
Elektron enerjisi başlangıç değeri (eV)	3
Elektrik gerilim (V)	0
Manyetik vektör potansiyel (Weber/m)	0

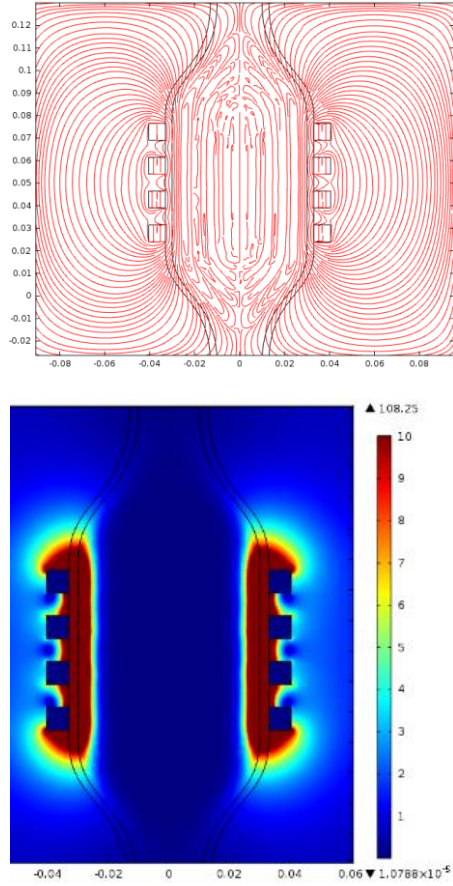
Başlangıç iyon sayı yoğunluğu yarı-yüksüzlük (quasi-neutrality) koşuluyla belirlenmiştir ($10^{15}m^{-3}$). Sistemde oluşan başlıca kimyasal reaksiyonlar Tablo 2’de özetlenmiştir. Bu tabloda kullanılan sabitlerin beş tanesi Boltzman Eşitliğinden hesaplanmış ve diğer 2 tanesi için alınan değer son iki satırda gösterilmiştir.

Tablo 2. Argon ICP plazma simülasyonunda varsayılan kimyasal reaksiyonlar-iyonlaşmalar. [32]

İndex	Reaksiyon	Reaksiyon Tipi	ΔE (eV)	Kullanılan Sabit
1	$e+Ar \rightarrow e+Ar$	Elastik Çarpışma	0	Boltzman
2	$e+Ar \rightarrow 2e+Ar^+$	Doğrudan İyonizasyon	15.8	Boltzman
3	$e+Ar \leftrightarrow e+Ar^*$	Eksitasyon	11.4	Boltzman
4	$e+Ar \rightarrow e+Ar$	Eksitasyon	13.1	Boltzman
5	$e+Ar^* \rightarrow 2e+Ar^+$	Aşamalı İyonizasyon	4.4	Boltzman
6	$2Ar^* \rightarrow e+Ar^++Ar$	Penning İyonizasyon	-	$6.2 \times 10^{-10} cm^3.s^{-1}$
7	$Ar^* \rightarrow h\nu+Ar$	Radyasyon	-	$1.0 \times 10^7 s^{-1}$

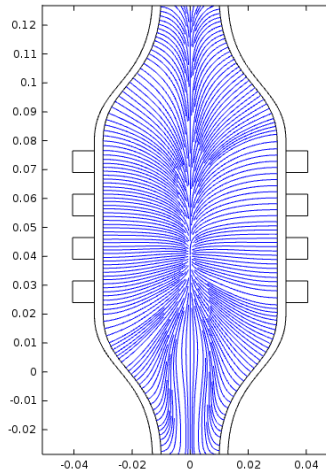
3. Sonuçlar ve Tartışma

Şekil 4’de plazma odası etrafında oluşan manyetik alan çizgilerinin anlık şekli görülmektedir. Bu manyetik alan çizgileri 13.56 MHz frekansta, simetri eksenine boyunca yön değiştirmektedir. Şekil 4’de sağda ise oluşan manyetik alanın büyüklüğü Gauss cinsinden verilmiştir. Burada sarımların olduğu lokasyon merkez eksene yaklaşık 3 cm uzaklıktadır. Uygulanan RF gücünün sarımlardan geçmesine neden olan akım 43 A olduğu simülasyon kodunda hesaplanmıştır. Şekil 4’de sağda görüldüğü gibi bu 43 A’lik akımdan ötürü indüksiyon akım bobinlerinde anlık olarak görülen manyetik alan 10 Gauss’lar dolaylarındadır. Plazma odasında bu değer anlık 1 Gauss’lar dolaylarında olduğu yine Şekil 4’de sağda görülmektedir.

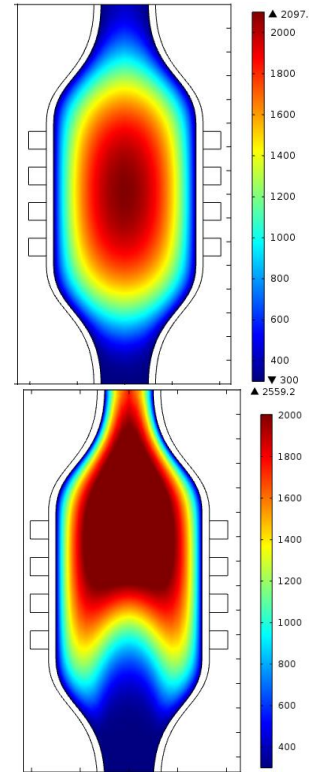


Şekil 4. Solda, plazma odası ve çevresinde oluşan manyetik alan çizgileri, sağda manyetik alan büyüklük olarak (magnitide) dağılımı Gauss biriminden verilmiştir.

Şekil 5’de oluşan elektrik alan çizgilerinin anlık hali görülmektedir. Elektrik alan çizgileri burada yaklaşık olarak dairesel yörüngeler çizer. Bunlar Şekil 4’de solda görülen manyetik alan çizgilerine eşlenik (coupled) halde simetri eksenine-z etrafında, azimutal yönde, manyetik alan çizgileri ile aynı frekansta oluşmaktadır.

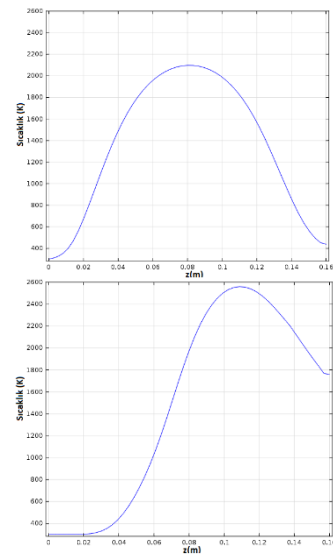


Şekil 5. Plazma odası içerisinde oluşan dairesel elektrik alan çizgileri.



Şekil 6. 2-Boyutlu görünümde solda ilk geometri ve gaz akı debisi $Q_1=3$ mg/s iken sıcaklık dağılımı, sağda gaz akış debisi $Q_2= 90$ mg/s iken Kelvin cinsinden gaz sıcaklığı dağılımı.

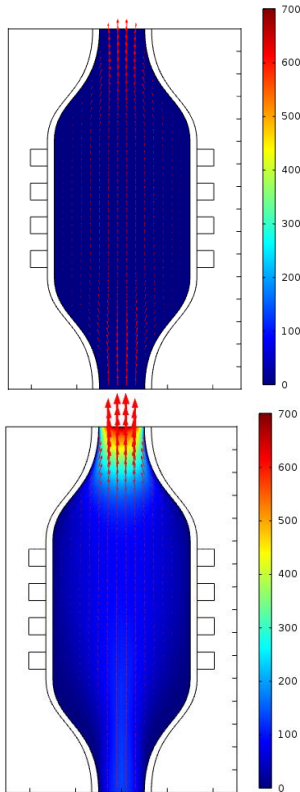
Yukarıda Şekil 6’da gaz debisi Q_1 ve Q_2 için 2-boyutlu sıcaklık dağılımı gösterilmiştir. Şekil 7’de bu geometri için elde edilmiş ICP plazmasının 1-boyutlu sıcaklık dağılımı görülmektedir. Sağda görülen sonuçta gaz debisi soldakine göre 30 kat artmıştır.



Şekil 7. 1-Boyutlu görünümde solda ilk geometri ve gaz akı debisi $Q_1=3$ mg/s iken sıcaklık dağılımı,

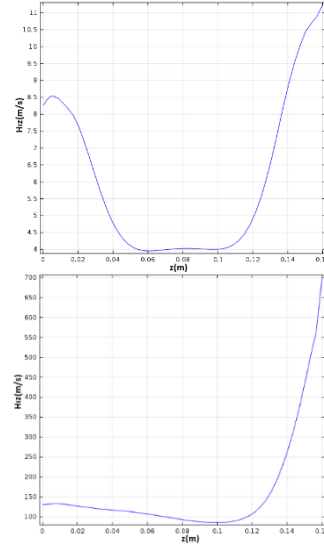
sağda gaz akış debisi $Q_2=90$ mg/s iken Kelvin cinsinden sıcaklık dağılımı (Bu veriler sistem merkez simetri eksenini boyunca alınmıştır). Bu iki farklı gaz debisinde yapılan simülasyonlar dolayısıyla Şekil 7'den görülmektedir ki aynı güç değerinde, giriş gaz debisi 30 kat artırıldığında gaz sıcaklığı sistem geometrisi simetri eksenini z 'in 16. cm'sinde, gazın sistemden ayrıldığı yerde, 438.15 K'den 1757.9 K'e çıkmıştır.

Şekil 7'den görülmektedir ki gaz debisi arttığında en yüksek sıcaklığın görüldüğü lokasyon geometride z -ekseninde sağa doğru kaymaktadır. Şekil 7'da solda gazın en yüksek sıcaklık değeri z -ekseninde plazma odasının en ortası olan 8.cm'dedir. Artan gaz debisi ile, Şekil 7'de sağda en yüksek değer, plazma odasında z -ekseninde 11. cm dolaylarına kaymıştır. Şekil 7'de gaz debisi $Q_1=3$ mg/s iken sıcaklık profili simetriktir. Aşağıda Şekil 8'de iki farklı debide yapılan simülasyonlarda elde edilen 2-boyutlu hız dağılımı görülmektedir. Şekil 7 ve Şekil 8'de solda görüldüğü gibi sıcaklığın yüksek olduğu bölgede hız değeri düşüktür. Öte yandan Şekil 8'de 2 boyutlu dağılım ile sağda kırmızı oklar ile görüldüğü gibi gaz debisi $Q_2=90$ mg/s iken hız profili dikkate alınacak derecede artmıştır ve hızın yüksek olduğu bu bölgelerde sıcaklık Şekil 7'de sağda görüldüğü gibi fazladır. Dolayısıyla konvektif ısı transferinin bu bölgede baskın olduğu söylenebilir.



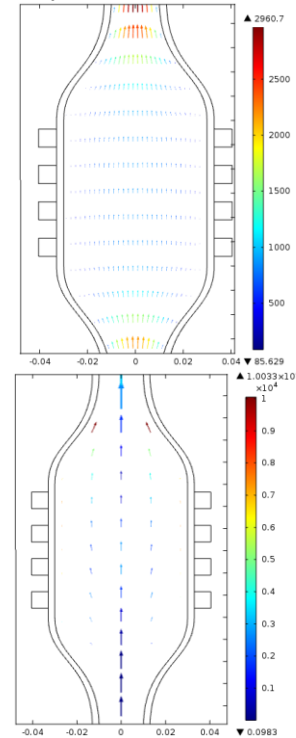
Şekil 8. Sistemde m/s biriminde 2-boyutlu hız dağılımı, solda $Q_1=3$ mg/s iken, sağda $Q_2=90$ mg/s iken hız dağılımı.

Şekil 9'da bir boyutlu dağılımda iki farklı debideki değişen hız profili görülmektedir.



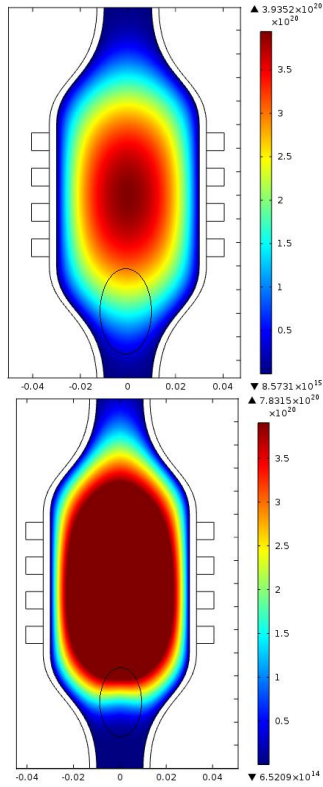
Şekil 9. Sistemde m/s cinsinden 1-boyutlu hız dağılımı, solda $Q_1=3$ mg/s iken, sağda $Q_2=90$ mg/s iken hız dağılımı (Bu veriler sistem merkez simetri eksenini boyunca alınmıştır).

Hız profili ile bağlantılı olan ikinci unsur konvektif ısı transferidir. Konvektif ısı transferinin 2 boyutlu dağılım miktarları ve yönleri aşağıda Şekil 10'da oklarla gösterilmiştir. Okların rengi ise ısı akışının büyüklüğünü göstermektedir. Solda $Q_1=3$ mg/s'de, sağda $Q_2=90$ mg/s iken konvektif ısı transferi dağılımı verilmiştir.



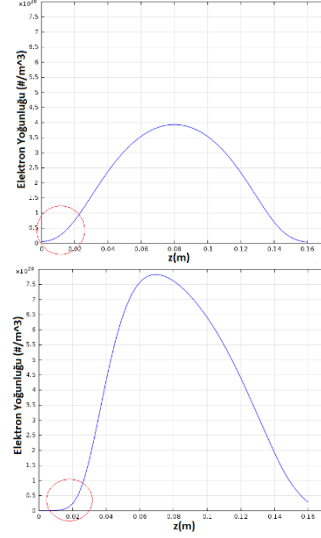
Şekil 10. Solda $Q_1=3$ mg/s ve sağda $Q_2=90$ mg/s iken konvektif ısı transferi (W/m^2 cinsinden)

Hızın yüksek olduğu bölgede sıcaklık yüksek ise konvektif ısı transfer miktarı bu bölgede baskındır. Gaz debisi $Q_1=3$ mg/s'den $Q_2=90$ mg/s'ye çıkarıldığında Şekil 10'dan görüldüğü gibi konvektif ısı akışının büyüklüğü fark edilir derecede artmaktadır. Bu beklenen bir durumdur, çünkü gaz akış hızı ve bu bölgedeki sıcaklık, konveksiyon ile ısı iletimi için bir ölçüttür. Şekil 10'da sağda görüldüğü gibi sıcaklığın yüksek olduğu bölgelerde akış hızı yüksek ve dolayısıyla bu bölgede konvektif ısı transferi baskındır. Sistemde gaz giriş debisi artırıldığında, Şekil 11'den görüldüğü gibi sistemde üretilen serbest elektron sayısı yaklaşık 2 kat artmıştır. Bu durum için sisteme birim zamanda salınan parçacık sayısındaki artma ya da başka bir deyişle basınçtaki artma neden olarak verilebilir. Şekil 11'de solda $Q_1=3$ mg/s iken, sağda $Q_2=90$ mg/s iken elektron yoğunluğu dağılımı [m^{-3}] biriminde 2 boyutta görülmektedir.



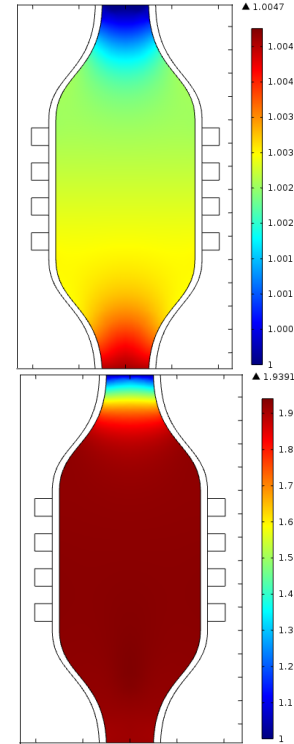
Şekil 11. Solda $Q_1=3$ mg/s iken elektron yoğunluğu (m^{-3} cinsinden), sağda $Q_2=90$ mg/s iken elektron yoğunluğu

Şekil 11'de solda ve sağda siyah çemberler ile çevrili bölgeden görülmektedir ki solda düşük debide homojen dağılan elektron yoğunluğu Şekil 11'de sağdaki yüksek debili durumda biraz daha yukarıya doğru ötelenmiştir. Aşağıda Şekil 12'de sistem merkez simetri ekseninden alınmış verilerde bu ötelemeyi göstermektedir. Burada Şekil 12'de solda kırmızı ile çevrilmiş çemberler elektron yoğunluğundaki ötelenme lokasyon olarak görülmektedir.



Şekil 12. Solda $Q_1=3$ mg/s iken elektron yoğunluğu ($1/m^3$ cinsinden), sağda $Q_2=90$ mg/s iken elektron yoğunluğu.

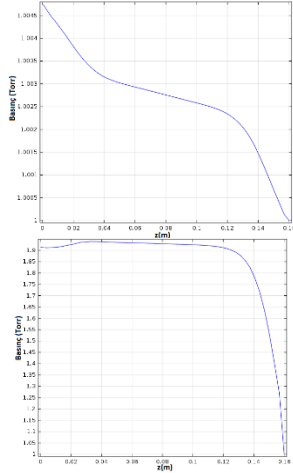
Şekil 12'de solda geometrinin 20. mm'sinde elektron yoğunluğu $0.9 \times 10^{20} m^{-3}$ iken, sağda ikinci durumda geometrinin aynı bölgesinde elektron yoğunluğu $0.5 \times 10^{20} m^{-3}$ dir.



Şekil 13. Basıncın artan debi ile değişimi, solda $Q_1=3$ mg/s iken Torr cinsinden basınç dağılımı, sağda $Q_2=90$ mg/s iken basınç dağılımı.

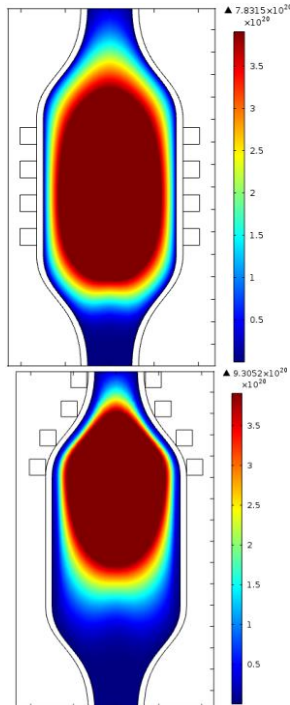
Basınc ile ilgili dağılım yukarıda Şekil 13'de 2-boyutlu ve aşağıda Şekil 14'de de 1-boyutlu olarak verilmiştir. Gaz akışındaki artan debi Şekil 13'de sağda görüldüğü gibi sistem basıncını artırmıştır.

Şekil 11'de görülen artan elektron yoğunluğunun nedeni ise basınçtaki bu artıştır.



Şekil 14. Solda $Q_1=3$ mg/s iken sistem basıncı (Torr cinsinden), sağda $Q_2=90$ mg/s iken sistem basıncı

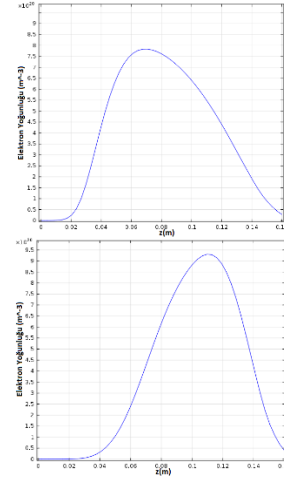
Şekil 14'deki iki grafikte $Q_1=3$ mg/s ve $Q_2=90$ mg/s akış değerlerine karşılık gelen basınç dağılımı incelendiğinde $Q_2=90$ mg/s akış değerindeki basınç yaklaşık 2 kat artmakta ve buradaki basınç dağılımı daha stabil bir şekilde z eksenini boyunca korunmaktadır.



Şekil 15. Sisteme RF gücünü veren bobinlerin lokasyonu sistemde gazın çıktığı yere doğru kaydırıldığında değişen 2-boyutlu elektron yoğunluğu profili.

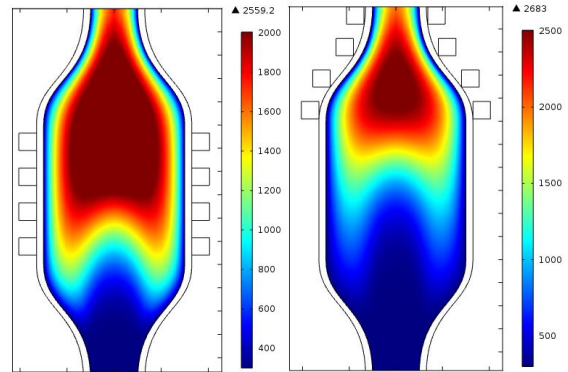
Şekil 15'deki simülasyon sonuçları ile toplamda dört

adet olan indüksiyon bobinlerinin yerinin değişmesi ile elektron yoğunluğundaki değişim incelenmiştir. Soldaki durumda sisteme enerji veren indüksiyon bobini, sistem simetri eksenine-z boyunca gazın sistemden çıktığı lokasyona yerleştirilmiştir. Burada her iki durumda da sisteme verilen güç 3500 Watt ve akış kütle debisi $Q=90$ mg/s'dir.



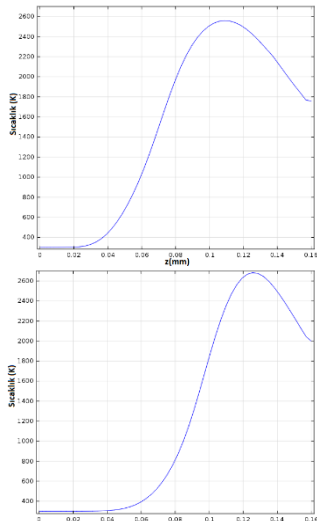
Şekil 16. Sisteme RF gücünü veren bobinlerin lokasyonu sistemde gazın çıktığı yere doğru kaydırıldığında değişen 1-boyutlu elektron yoğunluğu profili.

Şekil 16'dan görülmektedir ki indüksiyon bobinlerinin lokasyonu değiştiğinde elektron yoğunluğunun tepe değeri ve bu değerlerin yeri değişmektedir. Şekil 16'dan da görülmektedir ki bu bobinler simetri eksenine-z'e göre ileri kaydırıldığında elektron yoğunluğunun tepe değeri de z-ekseni boyunca ileri doğru kaymıştır. Burada elektron yoğunluğunun miktarı da bir miktar artmıştır.



Şekil 17. Sisteme RF gücünü veren indüksiyon bobinlerinin lokasyonu sistemde gazın çıktığı yere doğru kaydırıldığında değişen (Kelvin biriminde) 2-boyutlu gaz sıcaklığı profili.

Şekil 17'den de görüldüğü gibi sistemde indüksiyon bobinleri simetri eksenine-z'e göre ileriye doğru kaydırıldığında sıcaklık profili de bu bölgeye doğru yer değiştirmektedir.



Şekil 18. Sisteme RF gücünü veren indüksiyon bobinlerinin lokasyonu sistemde gazın çıktığı yere doğru kaydırıldığında değişen (Kelvin biriminde) 1-boyutlu gaz sıcaklığı profili.

Şekil 18’de indüksiyon bobinlerinin yerinin değiştirilmesiyle gerçekleşen, 1-boyutlu sıcaklık dağılımındaki değişme görülmektedir. Bobinlerin yerinin sistemden ayrılan gazın lokasyonuna yakın bir yerde olması bu gazın sıcaklığını yaklaşık olarak 240 K derece artırmıştır.

Bu makalede iki farklı debide yapılan simülasyonlar dolayısıyla görülmüştür ki aynı güç değerinde, giriş gaz miktarı 30 kat artırıldığında sistem çıkış gaz sıcaklığı 438.15 K’den 1757.9 K’e çıkmıştır ve bu sıcaklık artışı kömür yakma gibi uygulamalarda istenen bir durumdur. Plazma ile kömür ya da biyokütle yakmada kullanılan gazın sıcaklığının ne kadar yüksek olduğu elde edilen ısı enerjisinin miktarını belirlemektedir[23]. Bu çalışmada gerçekleştirilen simülasyonlarda görülmektedir ki artırılan gaz debisi sistemden ayrılan gazın sıcaklığını yüksek oranda artırmaktadır. Gaz debisindeki bu artış plazma elektronlarının sayısını da artırmaktadır. Sistemde elektrik alanının neden olduğu Eddy-current’in içerisindeki sayıca artan bu elektronlar da gazın ilk duruma göre daha da çok ısınmasına neden olmaktadır.

Ayrıca debi miktarı 90 mg/s ve güç 3500 Watt iken iki ayrı simülasyon daha yapılmıştır. İlk durumda indüksiyon bobinlerinin lokasyonu geometrinin ortasında, ikinci durumda ise bu yer sistem simetri eksenine-z’ine göre yukarı doğru kaydırılmıştır. Bobinlerin yerindeki bu değişim ile elektron yoğunluğu değişimi, plazma gazı sıcaklık profili değişimi 1-boyutlu ve 2-boyutlu simülasyon sonucuyla incelenmiştir. Bu durumda plazma elektron yoğunluğu bir miktar artmış ve ilk durumda en yoğun olduğu bölge sistem simetri eksenine-z boyunca ötelenmiş görülmüştür.

Elektron yoğunluğundaki bu ötelenme sıcaklık dağılımı için de geçerli olmuş, sıcaklık profilinin en yüksek olduğu bölge simetri eksenine boyunca ileriye doğru kaymıştır. Sıcaklık miktarı ise bu gaz çıkış bölgesinde yaklaşık 240 K derece artmıştır.

4. Kaynaklar

- [1] T. I. To, K. I. Shida, M. M. Izuno, T. S. Umi, and F. Science, “Construction of a 110kW ICP (Inductively Coupled Plasma) -heated Wind Tunnel,” *Aerospace*, vol. 3, pp. 34–35.
- [2] O. Access *et al.*, “Thermodynamic Characterization of High-Speed and High-Enthalpy Plasma Flows,” pp. 155–172, 2014.
- [3] M. Matsui, M. Auweter-Kurtz, G. Herdrich, and K. Komurasaki, “Enthalpy Measurement in Inductively Heated Plasma Generator Flow by Laser Absorption Spectroscopy,” *AIAA J.*, vol. 43, no. 9, pp. 2060–2064, 2005.
- [4] S. B. Punjabi, N. K. Joshi, H. A. Mangalvedekar, B. K. Lande, A. K. Das, and D. C. Kothari, “A comprehensive study of different gases in inductively coupled plasma torch operating at one atmosphere,” *Phys. Plasmas*, vol. 19, no. 1, 2012.
- [5] B. Bottin, O. Chazot, M. Carbonaro, V. van der Haegen, and S. Paris, “The VKI Plasmatron Characteristics and Performance,” *RTO AVT Course Meas. Tech. High Enthalpy Plasma Flows, Rhode-Saint-Genève (Belgium)*, RTO EN-8, pp. 6–26, 1999.
- [6] T. Okumura, “Inductively coupled plasma sources and applications,” *Phys. Res. Int.*, vol. 2010, no. 1, 2010.
- [7] A. A. Warra and W. L. O. Jimoh, “Overview of an inductively coupled plasma (icp) system,” *Ijcr*, vol. 3, no. 2, pp. 41–48, 2011.
- [8] R. Thomas, *Practical Guide to ICP-MS*, vol. 53. 2004.
- [9] F. F. Chen, “Radiofrequency Plasma Sources for Semiconductor Processing,” *Adv. Plasma Technol.*, pp. 99–115, 2008.
- [10] R. Thomas, “A beginner’s guide to ICP-MS - Part III: The plasma source,” *Spectroscopy*, vol. 16, no. 6, p. 26–+, 2001.
- [11] H.-S. Jun and H.-Y. Chang, “Development of 40 MHz inductively coupled plasma source and frequency effects on plasma parameters,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 92, no. 2008, p. 41501, 2008.
- [12] A. Gutsol, J. Larjo, and R. Hernberg, “Comparative Calorimetric Study of ICP Generator with Forward-Vortex and Reverse-Vortex Stabilization,” *Plasma Chem. Plasma Process.*, vol. 22, no. 3, pp.

- 351–369, 2002.
- [13] “index @ www.vki.ac.be.”
- [14] I. Transactions, O. N. Components, and M. Technology, “A Numerical Model for Thermal Processes,” vol. 16, no. 4, 1993.
- [15] A. Marotta, L. I. Sharakhovsky, and A. M. Essiptchouk, “Erosion of the cold electrode as an ablation process in unsteady arc spots,” *Heat and Mass Transfer under Plasma Conditions*, vol. 891. pp. 36–42, 1999.
- [16] M. Iwata and M. Shibuya, “Effects of arc current and electrode size on electrode erosion in ac plasma torches,” *Electr. Eng. Japan*, vol. 124, no. 4, pp. 10–17, 2007.
- [17] S. Xu, K. N. Ostrikov, Y. Li, E. L. Tsakadze, and I. R. Jones, “Low-frequency, high-density, inductively coupled plasma sources: Operation and applications,” *Phys. Plasmas*, vol. 8, no. 5 II, pp. 2549–2557, 2001.
- [18] P. D. Blair, “The application of inductively coupled plasma mass spectrometry in the nuclear industry,” *TrAC Trends Anal. Chem.*, vol. 5, no. 8, pp. 220–223, 1986.
- [19] S. J. Hill, “Inductively Coupled Plasma Spectrometry and its Applications, 2nd ed.,” pp. 39–40, 2007.
- [20] C. Kalra, I. Matveev, and A. Gutsol, “Transient Gliding Arc for Fuel Ignition and Combustion Control,” *Electron. Proc. 2004 Tech. Meet. Cent. States Sect. Combust. Inst.*, 2004.
- [21] D. Vanden-Abeelee and G. Degrez, “Similarity analysis for the high-pressure inductively coupled plasma source,” *Plasma Sources Sci. Technol.*, vol. 13, no. 4, pp. 680–690, 2004.
- [22] A. Askarova *et al.*, “3-D Modeling of Heat and Mass Transfer during Combustion of Solid Fuel in Bkz-420-140-7C Combustion Chamber of Kazkhstan,” vol. 9, no. 2, pp. 699–709, 2016.
- [23] 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,” *Combust. Sci. Technol.*, vol. 179, no. 10, pp. 2065–2090, 2007.
- [24] V. E. Messerle, E. I. Karpenko, A. B. Ustimenko, and O. A. Lavrichshev, “Plasma preparation of coal to combustion in power boilers,” *Fuel Process. Technol.*, vol. 107, pp. 93–98, 2013.
- [25] V. E. Messerle, A. B. Ustimenko, and O. A. Lavrichshev, “Plasma Gasification of Solid Fuels,” pp. 38–43.
- [26] V. S. Sikarwar *et al.*, “An overview of advances in biomass gasification,” *Energy Environ. Sci.*, vol. 9, no. 10, pp. 2939–2977, 2016.
- [27] M. Rajasekhar, N. V. Rao, G. C. Rao, G. Priyadarshini, and N. J. Kumar, “Energy Generation from Municipal Solid Waste by Innovative Technologies – Plasma Gasification,” *Procedia Mater. Sci.*, vol. 10, no. Cnt 2014, pp. 513–518, 2015.
- [28] P. P. Bumbarger, “ANALYSIS OF A MINIATURE RADIO FREQUENCY ION THRUSTER WITH AN INDUCTIVELY COUPLED by,” no. December, 2013.
- [29] M. W. Blades and B. L. Caughlin, “Excitation temperature and electron density in the inductively coupled plasma-aqueous vs organic solvent introduction,” *Spectrochim. Acta Part B At. Spectrosc.*, vol. 40, no. 4, pp. 579–591, 1985.
- [30] M. A. Sobolewski and J. H. Kim, “The effects of radio-frequency bias on electron density in an inductively coupled plasma reactor,” *J. Appl. Phys.*, vol. 102, no. 11, 2007.
- [31] Y. Sakamoto, S. Maeno, N. Tsubouchi, T. Kasuya, and M. Wada, “Comparison of Plasma Parameters in CCP and ICP Processes Appropriate for Carbon Nanotube Growth,” *J. Plasma Fusion Res.*, vol. 8, pp. 587–590, 2009.
- [32] I. Rafatov, E. A. Bogdanov, and A. A. Kudryavtsev, “On the accuracy and reliability of different fluid models of the direct current glow discharge,” *Phys. Plasmas*, vol. 19, no. 3, 2012.