



## ISIL PLAZMA İLE KÜRESEL TOZ METALURJİSİ MALZEMELERİNİN ÜRETİMİNİN TEORİK OLARAK İNCELENMESİ

Umit KESKİN ve Ö. Ercan ATAER

Makina Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Gazi Üniversitesi, Maltepe, 06570, Ankara  
[umitkeskin@gazi.edu.tr](mailto:umitkeskin@gazi.edu.tr), [oataer@gazi.edu.tr](mailto:oataer@gazi.edu.tr)

(Geliş Tarihi: 04. 04. 2008, Kabul Tarihi: 30. 06. 2008)

**Özet:** İndüktif bağlaşımlı plazma sistemleri; geniş hacimleri, yüksek saflıkları, aksenel toz besleme özellikleri ve tozların reaktördeki plazma jeti içerisinde daha uzun süre kalmaları açısından tozların küreselleştirilmesi işlemi için uygundur. Plazma jeti içerisinde tozların eritilmesi ve reaktör içerisindeki serbest düşüşleri, indüktif bağlaşımlı ısı plazma sistemi ile küresel seramik tozlarının üretiminin temelini oluşturur. Bu çalışma gelecekte indüktif bağlaşımlı ısı plazma sistemi ile yapılması düşünülen deneysel çalışmalara ön hazırlık olarak gerçekleştirilmiştir. Tozların ısı plazma sisteminde küreselleştirilmesi konusunda teorik çalışma yapılmıştır. Çalışmada, doğrusal olmayan momentum ve enerji denklemleri sayısal olarak FORTRAN dilinde hazırlanan bilgisayar programı ile çözülmüştür. Analizde, plazma gazının sıcaklık ile hızının, lüle çapının, taneciğin boyutunun, parçacığın başlangıç sıcaklığı ile hızının ve plazma gazının hacimsel debisinin tanecik sıcaklığı ve hızı üzerine etkisi incelenmiştir. Beşinci dereceden Runge-Kutta yöntemi kullanılarak elde edilen sonuçlar grafikler halinde verilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** İçi boş seramik, Küresel toz, ICTP.

## THEORETICAL INVESTIGATION OF PRODUCTION OF SPHERICAL MATERIAL POWDERS VIA THERMAL PLASMA

**Abstract:** Inductively coupled plasma systems are appropriate equipments for the spheroidization processes of powder materials because they have large volumes, high purities, and axial powder injection properties. Especially the long residence times of powders inside the plasma in the reactor are another advantage of ICTPs. The fundamentals of the production of spherical ceramic powders via inductively coupled thermal plasma systems include melting process of powders in the plasma jet and free falling of them through the reactor. This theoretical study was made as groundwork of the planned study by an inductively coupled thermal plasma system. A theoretical study was made on spheroidization of powders via thermal plasma systems. In the study, nonlinear momentum and energy equations were numerically solved through a computer code written in FORTRAN. The effects of plasma gas temperature and velocity, nozzle and particle diameter, initial particle temperature and velocity, and the volume flow rate of plasma gas on particle temperature and velocity were investigated in the analysis. The results obtained via the fifth order Runge-Kutta method were given as diagrams.

**Keywords:** Hollow ceramic, Spherical powder, ICTP.

### SEMBOLLER

$a$  : İvme,  $m/s^2$   
 $A$  : Isı aktarım alanı,  $m^2$   
 $A_{kp}$  : Parçacığın akışa dik izdüşüm alanı,  $m^2$   
 $A_p$  : Parçacığın yüzey alanı,  $m^2$   
 $C_D$  : Sürüklenme katsayısı  
 $C_p$  : Özgül ısı,  $J/kgK$   
 $C_{gp}$  : Tanecik malzemesinin ergime sıcaklığında plazma gazının özgül ısısı,  $J/kgK$   
 $d$  : Çap,  $m$   
 $F_A$  : Eklenen (taşınan) kütle kuvveti,  $N$   
 $F_B$  : Basset kuvveti,  $N$   
 $F_c$  : Çarpışma kuvveti,  $N$   
 $F_D$  : Sürüklenme kuvveti,  $N$   
 $F_g$  : Yerçekimi kuvveti,  $N$   
 $F_M$  : Magnus kuvveti,  $N$

$F_{net}$  : Parçacığa etki eden net kuvvet,  $N$   
 $F_S$  : Staffman kuvveti,  $N$   
 $g$  : Yerçekimi ivmesi,  $m/s^2$   
 $h$  : Isı aktarım katsayısı,  $W/m^2K$   
 $k$  : Isı iletim katsayısı,  $W/mK$   
 $m$  : Kütle,  $kg$   
 $m_p$  : Parçacığın kütlesi,  $kg$   
 $\dot{m}_g$  : Plazma gazının debisi,  $kg/s$   
 $Nu$  : Nusselt sayısı  
 $Pr$  : Prandtl sayısı  
 $r$  : Küreselleşme indeksi  
 $Re$  : Reynolds sayısı  
 $S$  : Plazma içerisinde parçacığın aldığı yol,  $m$   
 $t$  : Zaman,  $s$   
 $t_m$  : Parçacığın ergime zamanı,  $s$   
 $t_r$  : Tan. plazma içerisinde kalma zamanı,  $s$

$t_{tr}$	: Parçacığın sıcaklığının dengeye ulaşması için geçen süre, s
$t_{vr}$	: Parçacığın hızının dengeye ulaşması için geçen süre, s
T	: Sıcaklık, K
u	: Hız, m/s
$u_g$	: Plazma jetinin hızı, m/s
$u_p$	: Parçacığın hızı, m/s
$u_r$	: Parçacığın plazma gazına göre bağlı hızı, m/s
z	: Zaman adımı
$\varepsilon$	: Yayıcılık
$\mu$	: Dinamik viskozite, kg/ms
$\rho$	: Yoğunluk, kg/m <sup>3</sup>
$\rho_f$	: Plazmanın film sıcaklığındaki yoğunluğu, kg/m <sup>3</sup>
$\rho_p$	: Parçacığın yoğunluğu, kg/m <sup>3</sup>
$\sigma$	: Stefan-Boltzman sabiti
$\infty$	: Akışkan

## GİRİŞ

Günümüzde ısı plazma sistemleri farklı uygulamalar için kullanılmaktadır. Isıl plazma sistemleri arasında küresel seramik ve metal tozlarının üretimi için uygun olanı indüktif bağlaşımlı plazmalardır. Isıl plazma ile küresel tanecikli toz üretiminde tanecikten veya parçacığa olan ısı transferi ile parçacığın sıcaklık ve hızındaki değişimin belirlenmesi önemlidir. Plazma içerisinden geçirilirken tanecikler ısıtılmış olurlar. Bu işlemde ergiyen taneciklerin sıvı fazdayken ani soğumaları sonucunda küresel tanecikler elde edilir.

Çalışmada küresel tozların indüktif bağlaşımlı ısı plazma sisteminde üretilmesi ile ilgili bir teorik çalışma yapılmıştır. Küresel seramik tozlarının üretimiyle ilgili literatürde yapılan çalışmalar incelenmiştir. Literatürdeki bu çalışmalarda, farklı plazma sistemleri ile farklı boyutlarda küresel içi dolu ve içi boş tozların üretimi konusunda yapılan çalışmalar verilmiştir

Kumar ve Selvarajan Kaynak ısı plazma jetinde seramik ve metal tozların küreselleşmesini teorik olarak incelemişlerdir. Çalışmada, temel akışkanlar dinamiği denklemleri kullanılarak taneciklerin küreselleşme oranı ile ilgili bir teorik yaklaşım geliştirilmiştir. Farklı boyutlardaki metal tozları, farklı plazma gaz akış oranlarında ve sıcaklıklarında değerlendirilmiştir. Taneciklerin plazma içerisinde kalma ve ergime süreleri hesaplanmış ve bu sürelerde tozların küreselleşme oranları belirlenmiştir. Küreselleşmenin büyük oranda tanecik boyutuna ve plazma jeti sıcaklığına bağlı olduğu görülmüştür (Kumar, 2006).

Ramasamy ve Selvarajan (2001) ısı plazma içerisinde tozların davranışını incelemişlerdir. Çalışmada, taneciklerin ısı plazma içerisinde kalma süreleri ve hızları için bir yaklaşım geliştirilmiştir. Farklı ısı güçlerinde, alümina parçacığının hızı, plazma içerisinde kalma zamanı, plazma içerisine püskürtülme hızı, boyutu, gaz akış oranı, lüle uzunluğu ve lüle çapı belirlenmiştir. Dolayısıyla, farklı plazma sıcaklıkları için argon plazma içerisindeki parçacığın davranışı

belirlenmiştir. Tanecik boyutu küçültülerek, giriş gücü ve tozun plazma içerisinde kalma süresi artırılarak plazma içerisinde iken tozlara olan ısı aktarımının artırılacağı sonucuna ulaşılmıştır.

Ramasamy ve Selvarajan bir başka çalışmalarında (1999) tanecikler arasındaki etkileşimi ihmal ederek, ısı plazma ile içerisine püskürtülen bir tanecik arasındaki ısı aktarımını ve ısı plazma içerisindeki parçacığın buharlaşmasının plazmadan parçacığa olan ısı aktarımının etkisini sayısal olarak incelemişlerdir. 3000-25000 K arasında değişen sıcaklıklarda azot plazması ile argon plazması karşılaştırılmış, alümina ve tungsten parçacığı ile plazma arasındaki ısı ve hidrodinamik etkileşim incelenmiştir. Buharlaşma, parçacığa olan ısı transferini azaltmaktadır ve bu etki buharlaşma gizli ısı düşük malzemelerde daha fazla görülmektedir. Ar, N<sub>2</sub> ve Ar+H<sub>2</sub> gibi gazlardan oluşturulan plazmadan 50 µm yarıçapındaki parçacığa iletimle olan ısı aktarımı hesaplanmış ve tanecikten ışımla olan ısı aktarımıyla karşılaştırılmıştır. Analiz sonucunda, tanecikten çevresine ışımla olan ısı transferi, plazmadan parçacığa iletimle olan ısı transferiyle karşılaştırıldığında ihmal edilebilecek düzeyde olduğu görülmüştür. Bir toz parçacığın kaynama noktasına ulaşması için gerekli en düşük plazma sıcaklığı hesaplanmıştır. Bu çalışmada, alümina, tungsten, grafit malzemeleri ile Ar, N<sub>2</sub>, H<sub>2</sub> ve Ar+H<sub>2</sub> plazma gazları için hesaplamalar yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar, plazmadan toza olan ısı transferini arttırmak için, yüksek ısı iletim potansiyeline sahip gazların seçilmesi, buharlaşmanın en az seviyeye indirilmesi ve tozdan ışımla olan ısı kayıplarının yayma oranının küçük toz taneciklerinin seçilerek düşürülmesi gerektiğini göstermektedir.

Károly ve Szépvölgyi (2005) indüktif bağlaşımlı bir RF ısı plazma reaktörü içerisinde küresel ve mikro boyutlarda seramik taneciklerin üretimini deneysel olarak incelemişlerdir. Çalışmada, plazma gazlarının ve kullanılan toz cinsinin üretilen küresel taneciklerin mikro yapıları üzerine etkisi incelenmiştir. Bu çalışmada, plazma sistemine beslenen tozların çoğunun büyük boyutlu olmasının, küçük taneciklerin oldukça çok buharlaşmasına veya büyük taneciklerin yeterince ergimemesine sebep olduğu gözlemlenmiştir. RF ısı plazmalar yoğun veya içi boşluklu oksit seramik mikro-kürelerin üretimi için uygun cihazlar olduğu belirtilmiştir. İçi boş seramik kürelerin özel ön işlemlerden geçirilmiş tozlardan hazırlanabileceği ve küresel alüminaların düşük maliyetli alüminyum oksit veya alüminyum hidroksitlerden üretilebileceği ifade edilmiştir. Ayrıca, giriş gücünün düşürülmesinin ya da taneciklerin plazma içerisinde kalma süresinin kısaltılmasının büyük taneciklerin küreselleşmesini engelleyebileceği gözlenmiştir.

McKelliget (1992) ısı plazma başlığı içerisinde gözenekli taneciklerin ergime, buharlaşma süreçleri ve küreselleşmesi için analitik yöntem geliştirmiştir. Çalışmada, katı/gözenekli durum ve ergimiş/gözeneksiz durum arasındaki tanecik yoğunluğu arasındaki

farklılık, ergime süresince önemli hacim değişimleri olabileceğini ve ergimiş durumdaki fiziksel özelliklerin yeniden katılma süresince sabit kalacağından bahsetmektedir. Tanecikler içerisindeki sıcaklık dağılımı bir entalpi eşitliğinden hesaplanırken, taneciklerin fiziksel özellikleri gözenekli ortam teorisinden yararlanılarak hesaplanmıştır. DC ve RF plazma başlıkları içerisinde alümina taneciklerinin davranışı için hesaplamalar yapılmıştır.

Chen ve Li (2003) ısı plazma sistemlerindeki üç boyutlu akışı ve ısı transferini teorik olarak incelemiştir. Bu çalışmada, yapılan modellemeler sonucunda elde edilen ısı plazma reaktörü, plazma jeti ve plazma başlığındaki akışın ve ısı transferinin karakteristikleri belirlenmiştir. Tanecikler ve gaz, reaktörün yan yüzeyindeki bir girişten beslenmiştir. 2-D modellemenin 3-D modelleme kadar iyi bir şekilde yapılamadığı görülmüştür. Çünkü, 3-D etkiler, reaktör içerisindeki tanecik hareketini ve ısıtmayı etkilemektedir. Tanecikler ve gazın plazma jetine yandan beslenmesi sırasında, etkilerin göz ardı edilemeyeceği gözlenmiştir. Bu çalışmanın sonuçlarının yapılan deneysel çalışmalarla uyumlu olduğu görülmüştür.

Cochran (1998) içi boş seramik küreler ve uygulama alanları konusunda bir literatür araştırması yapmıştır. İçi boş seramik kürelerin piezoelektrik dönüştürücülerde, düşük elektrik ve ısı iletkenliğine sahip malzemelerde, akışkan taşınımında filtrelerde ve ışıma yoluyla yanma ortamlarında ve ses yalıtımında kullanılabileceğini belirtmiştir. 1-10 mm çapındaki küreler orta boyda küreler olarak kabul edilir ve daha küçük büyüklükteki küreler 1-100 µm çapındadır. İçi boş kürelerin küçük boyutlardaki üretiminin sol-gel yöntemiyle yapılabileceği belirtilmiştir.

Proulx vd. (1985) yoğun yükleme koşullarında induktif bağlaşımlı plazma sistemi içerisindeki plazma-tanecik etkileşimini incelemiştir. İndüktif bağlaşımlı bir plazma içerisinde tozların davranışı modellenmiştir. Hesaplamalarda bakır ve alümina tozları ve plazma gazı olarak atmosferik basınçta argon kullanılmıştır.

Gauvin (1990) plazma uygulamaları için yeni reaktörler geliştirmiştir. Verimli ve güvenilir başlıkların ısı plazma üretimi için kullanılabilir olmasıyla, yeni reaktörlerin tasarımına ihtiyaç duyulmuştur. Bunun sonucunda, uygulamalara bağlı olarak çeşitli tasarımlar yapılmıştır. Bunlardan ilki metalürji alanındadır. Ancak, yüksek sıcaklıktaki kimyasal işlem uygulamalarına olan ilgi artmaktadır. Bu çalışmanın amacı, çeşitli reaktör tasarımları için bazı örnek yöntemler sunmaktır.

Proulx ve arkadaşları (1991) induktif bağlaşımlı ısı plazma sistemindeki ışınlama aktarılan enerjiyi incelemiştir. İndüktif bağlaşımlı RF ısı plazmanın akış ve sıcaklık alanında ışınlama gerçekleşen ısı kayıplarının etkisi saf argon plazma ve düşük oranda bakır buharının bulunduğu argon plazma için incelenmiştir. Sıcaklık ve akış alanını hesaplamak için analitik bir model kullanılmıştır.

Ye vd. (1999) induktif bağlaşımlı RF plazma başlığı içerisindeki türbülans oluşumunu, k-ε türbülans modeliyle sıcaklık ve yoğunluk değişimlerinin plazma türbülansı ve enerji transferi üzerine etkileri incelemiştir. Çalışmada, plazmanın çalışma parametrelerinin plazma türbülansı üzerine etkileri tartışılmıştır.

Rahmane vd. (1994) teorik ve deneysel olarak induktif plazma reaktörü içerisinde kütle transferini incelediler. Plazma akışına aksel yönde püskürtülen gazın derişimi reaktör eksenini boyunca ölçülmüştür. Sayısal türbülans modeli ile derişim, sıcaklık ve akış alanları hesaplanmıştır. Ölçülen derişim profilleri ve sayısal modelin sonuçları karşılaştırılmıştır.

Fizsdon (1979) plazma alevi içerisinde metal tozlarının ergimesini ve tanecikler ile plazmanın ısı-fiziksel özelliklerinin sıcaklığa bağlı değişimini incelemiştir. Bu çalışmada, küresel taneciklerin bir jet akışı içerisindeki ısı transferi ve faz değişimleri için sayısal bir yöntem geliştirilmiştir. Argon-hidrojen plazma jeti içerisinde ısıtılan alümina tanecikleri örnek olarak verilmiştir. Yüzey sıcaklığı, tanecik hızı ve çapı için elde edilen deneysel ve sayısal sonuçların uyum içerisinde olduğu görülmüştür.

Dilawari ve Szekely (1987) plazma reaktörleri içerisindeki akışı ve ısı aktarımını incelemiş, reaktör içerisindeki hız ve sıcaklık profillerini hesaplamışlardır. Bu çalışmada, içerisine sürekli gaz püskürtülen bir plazma jet sistemi içerisinde akış, derişim ve ilgili sıcaklık alanlarını tanımlamak için bir analitik yöntem geliştirilmiştir. Çalışmanın amacı plazma jetinin dairesel hareketinin plazma işlemi üzerindeki etkisini incelemektir.

Jiang ve Boulos (2006) tungsten ve molibden tozlarının induktif bağlaşımlı ısı plazma ile küreselleşmesini incelediler. Tungsten ve molibdenin induktif bağlaşımlı ısı plazma içerisindeki ergime, buharlaşma, oksitlenme ve katılma davranışlarını belirlemişlerdir. Basıncın küreselleşme ve oksitlenme üzerine etkisi ele alınmıştır. Molibdenin ergime sıcaklığının tungstenden daha düşük olmasına rağmen, aynı toz besleme oranında ve aynı plazma şartlarında tungstenden daha az sayıda molibden tozunun küreselleştiği gözlenmiştir.

Bica (2005) argon plazma jeti içerisindeki içi boş demir mikro kürelerin üretimini incelemiştir. 1-100 µm arasında değişen çaplarda içi boş mikro küre tanecikler incelenmiştir. demir mikro kürelerin şekillendirilme mekanizmaları ile iç boşluğun plazma jetinin hızına bağlı olduğu gösterilmiştir. Taneciklerdeki iç boşluklar argon gazının demir mikro kürelerin arka yarım küresinden içeri doğru olan hareketi sebebiyle oluşmaktadır. Çalışmada, teorik elde edilen sonuçlar ile deneysel sonuçların ± % 16 hata oranında uyum içerisinde olduğu görülmüştür.

Moon vd. (2005) plazma başlığının CAD programları yardımıyla üç boyutlu geometrisini elde ettiler ve farklı

giriş açılarındaki performansını incelediler. Çalışmada, temel denklemlerin çözümünde CFD-ACE+ dili ve SIMPLER algoritması kullanılmıştır. Gaz özelliklerine bağlı olarak alevin boyutundaki değişim deneysel olarak incelenmiştir. Çalışmada, Ar, He ve N<sub>2</sub> gazları kullanılmıştır. Sonuçlar 30°'nin en uygun giriş açısı olduğunu göstermiştir.

Shanmugavelayutham ve Selvarajan (2004) 40-100 µm boyutlarındaki nikel tozlarını plazma yöntemi ile küreselleştirmişlerdir. İşlenmiş taneciklerin küresel şekillerini taramalı elektron mikroskop ve optik mikroskop yöntemleriyle elde etmişlerdir. Çalışmada, plazma ile tozların küreselleşebileceğini ve plazma sıcaklığının küreselleşmenin kalitesini etkileyen önemli bir faktör olduğunu göstermişlerdir.

O'Dell vd. (2001) küresel ve alaşımli tozlar üretmek için kullanılan toz alaşımlama ve küreselleştirme (TAK) yöntemi ile ergime ve gerilme kuvvetlerinin etkisiyle küreselleşmenin gerçekleştiği plazmayı metal tozları ile beslemişlerdir. Bu çalışmada, ergime süresince alaşımlandırma gerçekleşmiş ve tanecikler plazma dışına çıkınca hızlı bir şekilde katılarak küreselleşmişlerdir. TAK yöntemiyle ısıya dayanıklı olmayan metallerin de küreselleşebileceğini sunmuşlardır.

Zhang vd. (2005) sol-gel yöntemiyle oda sıcaklığında içi boş titanya (TiO<sub>2</sub>) küresel tozları üretmişlerdir ve XRD, FESEM, TEM ve FT-IR ile ürünlerin özelliklerini incelemişlerdir. Çalışmada, üretilen içi boş kürelerin dış çapları 200-500 nm aralığındadır.

Károly vd. (2000) farklı tanecik boyutlarındaki Al(OH)<sub>3</sub> tozlarının indüktif bağlaşımlı ısı plazma ile üretimini incelemişlerdir. İndüktif bağlaşımlı ısı plazma sistemine beslenen taneciklerin boyutuna ve plazmanın çalışma parametrelerine bağlı olarak farklı mikro ve nano boyutlarında alümina tanecikleri üretilmiştir. Çalışmada, plazma içerisine 55 µm boyutlarında beslenen Al(OH)<sub>3</sub> taneciklerinin küreselleşme için büyük boyutlarda olduğu gözlenmiştir. Yüksek sıcaklıklardaki ısı plazma işlemleri ile küreselleşmenin mümkün olduğu görülmüştür. 12 µm boyutlarında püskürtülen taneciklerin, ergimesi ve soğuması sonucunda, belirli bir miktarının mikro-küre taneciklere dönüştüğünü gözlemişlerdir.

Károly ve Szépvölgyi (2003) RF ısı plazma yöntemiyle içi boş alumina mikro kürelerin elde edilmesini incelemişlerdir. Farklı yapılarındaki seramik taneciklere ısı plazma işleminin uygulanması ile küreselleşmenin gerçekleştiği görülmüştür. Çalışmanın amacı, hammaddelerin su içeriği, gözeneklilik ve gaz fazının iç boşlukların oluşumuna etkisini araştırmaktır. Başlangıçtaki yüksek su oranı boşlukların şekillenmesi için gerekli değilken, gözenekli yapı boşlukların oluşmasında önemli bir faktördür. Farklı gazların küreselleşme ve boşluk hacmi üzerine etkileri araştırılmıştır. Yüksek saflıktaki argon, plazma gazı ve koruyucu gaz olarak sırasıyla 20 ve 60 litre/dakika

debilerde kullanılmıştır. Bazı durumlarda hidrojen ya da oksijen koruyucu gaz içine yaklaşık % 10 oranında karıştırılmıştır.

Bica (2000) demir ve cam mikro kürelerin plazma yöntemi ile şekillendirilme mekanizmasını incelemiştir. Bu çalışmada, mikro kürelerin şekillerinin üretim parametrelerine bağlı olduğunu göstermek ve mikro kürelerin iç ve dış yarıçaplarını hesaplamak için bazı eşitlikler geliştirmiştir. Sunulan teorik model mikro küresel yapının oluşması için gerekli buhar kütlelerini hesaplanmasında kullanılmıştır. Ayrıca, mikro kürelerin çapları ve duvar kalınlıkları hesaplanmıştır.

Reed (1961) 1960'lı yılların başlarında MIT'de Lincoln Laboratuvarları'nda yaptığı çalışmada, indüktif bağlaşım yöntemi ile plazma oluşumunu tanımlamıştır. Plazmanın oluşumu için argon gazı kullanımını ve argon ile helyum, hidrojen, oksijen ve hava karışımlarının kullanımını incelemiştir. Bu çalışmada, farklı gazlarla, farklı gaz akış oranlarında ve farklı güçlerde oluşturulan plazmanın sıcaklık profilini ölçmek için Fowler ve Milne yöntemleri kullanılmıştır. Ölçülen en yüksek sıcaklıklar 14000-19000 K aralığında değişmiştir. Plazmadan lüle duvarlarına taşınım, ışınım ve iletim yolu ile aktarılan ısı belirlenmiştir. Plazmaya aktarılan toplam güç 1,6-3,1 kW aralığında değişmiştir. Bu değer giriş gücünün yaklaşık %50'sine karşılık gelmektedir.

## TEORİ

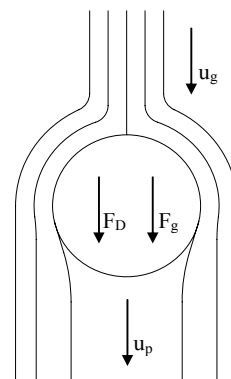
Tek yönlü plazma akışı içerisindeki parçacığın hareketi için aşağıdaki eşitlik yazılabilir.

$$F_{net} = ma \quad (1)$$

Burada Eş. (1),

$$m \frac{dV}{dt} = F_D + F_g + F_A + F_B + F_S + F_M + F_C \quad (2)$$

şeklinde ifade edilebilir. Analizde, küçük olduğu için elektrostatik, Van der Waals, manyetik ve benzeri kuvvetler ihmal edilmiştir.



Şekil 1. Tek yönlü plazma akışı içerisindeki tanecik üzerine etki eden kuvvetler.

Plazma akışı içerisinde parçacığa etki eden sürüklenme ve yerçekimi kuvvetleri ile tanecik ve plazma gazının akış hızları Şekil 1’de verilmiştir. Şekilde de görüldüğü gibi tek yönlü akışta, plazma gazı ile tanecik aynı yönde hareket etmektedir ve plazma jetinin hızı ( $u_g$ ), parçacığın hızından ( $u_p$ ) büyüktür.

Analizde parçacığın plazma akışı içerisindeki hareketi için aşağıdaki varsayımlar yapılmıştır:

1. Bir parçacığın ısıtıldığı düşünülmüştür.
2. Tanecik küresel bir şekle sahiptir.
3. Tanecik sabit sıcaklıktaki argon plazmaya beslenmektedir.
4. Tanecik içerisindeki sıcaklık değişimi ihmal edilmiştir.
5. Sürüklenme ve yerçekimi kuvvetleri parçacığın hareketini etkileyen kuvvetlerdir.
6. Tanecik plazma akışı yönünde hareket etmektedir.
7. Plazma akışı tek yöndedir ve sürekli dir.
8. Başlangıçta katı fazda olan tanecik ergime sıcaklığına kadar ısıtılmakta ve ergime sabit sıcaklıkta gerçekleşmektedir.

Yukarıda yapılan kabuller kullanılarak Eş. (2),

$$m_p \frac{du_p}{dt} = F_D + m_p g \quad (3)$$

biçiminde yazılabilir. Burada,

$$F_D = C_D A_{kp} \frac{\rho_f}{2} u_r (u_g - u_p) \quad (4)$$

şeklinde ifade edilebilir. Tek boyutlu olarak parçacığın plazma jetine göre bağıl hızı,

$$u_r = \sqrt{(u_g - u_p)^2} = |u_g - u_p| \quad (5)$$

şeklinde yazılabilir. Böylece Eş. (4) aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$F_D = C_D A_{kp} \frac{\rho_f}{2} |u_g - u_p| (u_g - u_p) \quad (6)$$

Analizde yerçekimi kuvveti ihmal edilmemiştir ve Eş. (3)

$$m_p \frac{du_p}{dt} = C_D A_{kp} \frac{\rho_f}{2} |u_g - u_p| (u_g - u_p) + m_p g \quad (7)$$

ifadesi ile yazılabilir. Bu eşitlikte parçacığın kütlesi  $m_p = \pi \cdot d_p^3 \cdot \rho_p / 6$  ifadesine eşittir. Bu ifade yerine yazılıp eşitlik yeniden düzenlenirse,

$$\frac{du_p}{dt} = \frac{3}{4} C_D |u_g - u_p| (u_g - u_p) \frac{\rho_f}{\rho_p d_p} + g \quad (8)$$

ifadesi elde edilir. Bu ifadede sürüklenme katsayısı ( $C_D$ ) literatürde Reynolds sayılarına bağıl olarak aşağıdaki eşitlikler ile verilmektedir.

$$C_D = \frac{24}{Re_p} \quad (9)$$

$$C_D = \frac{24}{Re_p} \left( 1 + \frac{3}{16} Re_p \right) \quad (10)$$

$$C_D = \frac{24}{Re_p} \left( 1 + 0.11 Re_p^{0.81} \right) \quad (11)$$

$$C_D = \frac{24}{Re_p} \left( 1 + 0.189 Re_p^{0.632} \right) \quad (12)$$

Stokes çözümü için Eş. (9)  $Re < 0,2$  (Schlichting, 1968), Oseen yaklaşımını temel alan Eş. (10)  $0,2 < Re < 2$  (Schlichting, 1968), Beard ve Pruppacher’ın elde ettiği deneysel verileri temel alan Eş. (11)  $2 < Re < 20$  ve Eş. (12)  $20 < Re$  (Beard ve Pruppacher, 1969, Hamielec, 1967) koşullarında kullanılmaktadır. Yukarıdaki eşitliklerde kullanılan Reynolds sayısı

$$Re_p = \rho_f |u_g - u_p| d_p / \mu_f \quad (13)$$

şeklinde ifade edilmektedir.

Taşıma ve ışıma ile olan ısı aktarımı dikkate alındığında tanecik için enerji eşitliği

$$m_p C_p \frac{dT_p}{dt} = h A_p (T_\infty - T_p) - A_p \varepsilon \sigma (T_p^4 - T_a^4) \quad (14)$$

ifadesi ile verilir. Bu ifade sadeleştirilerek aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$\frac{dT_p}{dt} = E_3 T_p^4 + E_4 T_p + E_5 \quad (15)$$

Bu eşitlikte  $E_3$ ,  $E_4$  ve  $E_5$  sabitleri

$$E_3 = -\frac{A_p \varepsilon \sigma}{m_p C_p} \quad (16)$$

$$E_4 = -\frac{h A_p}{m_p C_p} \quad (17)$$

$$E_5 = \frac{A_p}{m_p C_p} (h T_\infty + \varepsilon \sigma T_a^4) \quad (18)$$

eşitlikleri ile ifade edilebilir. Eş. (15) doğrusal ve homojen olmayan bir diferansiyel eşitliktir.

Eş. (13) kullanılarak  $Re < 0,2$  için sürüklenme katsayısı

$$C_D = \frac{24 \mu_f}{\rho_f |u_g - u_p| d_p} \quad (19)$$

şeklinde düzenlenebilir. Benzer olarak Reynolds ifadesi kullanılarak diğer sürüklenme katsayıları için de gerekli ifadeler elde edilebilir.

Eş. (19) Eş. (8)’de yerine yazılıp düzenlenirse,

$$\frac{du_p}{dt} = -(u_p - u_g) \left( \frac{18 \mu_f}{\rho_p d_p^2} \right) + g \quad (20)$$

şeklinde yazılabilir. Diğer sürükleme katsayıları için de Eş. (20)'ye benzer diferansiyel eşitlikler elde edilebilir.

Parçacığın plazma jeti içerisindeki hareketini belirleyebilmek için plazmanın hızının hesaplanması önemlidir. Plazma gazının hızı aşağıdaki kütle debisi eşitliğinden yararlanılarak belirlenebilir.

$$u_g = \frac{\dot{m}_g}{(\pi/4)d_1^2 \rho_f} \quad (21)$$

Eş. (20) yeniden düzenlenirse,

$$\frac{du_p}{dt} = E_6 u_p + E_7 \quad (22)$$

ifadesi elde edilir. Bu eşitlikte  $E_6$  ve  $E_7$  sırasıyla

$$E_6 = -\frac{18\mu}{\rho_p d_p^2} \quad (23)$$

$$E_7 = \frac{18\mu}{\rho_p d_p^2} u_g + g \quad (24)$$

ifadeleri ile yazılabilir.

Eğer parçacığın hızı  $t=0$  anında 0 olursa, Eş. (22)'nin çözümü

$$u_p(t) = \frac{E_7}{E_6} [\exp(E_6 t) - 1] \quad (25)$$

şeklinde yazılabilir ve plazma jeti içerisinde parçacığın aldığı mesafe ( $S$ ) Eş. (25)'in  $t=0$ 'dan  $t=t_r$ 'ye integre edilmesiyle,

$$\int_0^{t_r} u_p dt = \int_0^{t_r} \frac{E_7}{E_6} [\exp(E_6 t) - 1] dt \quad (26)$$

veya

$$S = \frac{E_7}{E_6^2} [\exp(E_6 t_r) - E_6 t_r - 1] \quad (27)$$

olarak elde edilir. Bu eşitlikteki üstel fonksiyon, ifadesi ilk üç terimi alınarak Taylor Serisi'ne açılırsa,

$$S = \frac{E_7}{2} t_r^2 \quad (28)$$

elde edilir ve parçacığın plazma içerisinde kalma süresi

$$t_r = \left( \frac{2S}{E_7} \right)^{1/2} \quad (29)$$

şeklinde tanımlanır. Parçacığın plazma jeti içerisinde kalma süresi parçacığın küreselleşmesini etkiler.

Parçacığın ergime süresi,

$$t_m = t_r / \{Nu \ln[(T_g - T_p)/(T_g - T_m)]\} \quad (30)$$

şeklinde tanımlanır (Kumar ve Selvarajan, 2006).

Eş. (30)'da  $t_r$  ile gösterilen parçacığın sıcaklığının dengeye ulaşması için geçen süre,

$$t_{tr} = \frac{3}{2\rho_f t_{vr} (C_p / C_{gp})} \quad (31)$$

şeklinde tanımlanır (2006). Bu eşitlikte;  $C_p$  plazma gazının özgül ısı ve  $C_{gp}$  toz malzemesinin ergime sıcaklığında plazma gazının özgül ısıdır. Bu çalışmada önerilen plazma gazı argondur ve 1000 K-10000 K sıcaklık aralığında  $C_p$  ve  $C_{gp}$  değerleri eşit kabul edilebilir. Bu nedenle, Eş. (31),

$$t_{tr} = \frac{3}{2\rho_f t_{vr}} \quad (32)$$

şeklinde yazılabilir (Kumar vd, 2006).

Parçacığın hızının dengeye ulaşması için gerekli zaman  $t_{vr}$ ,

$$t_{vr} = \frac{\rho_p d_p^2}{18\mu_f} \quad (33)$$

şeklinde yazılabilir (Kumar ve Selvarajan, 2006).

Plazma gazı için Nusselt sayısı, Ranz-Marshall ilişkisine göre,

$$Nu = 2 + 0,6 Re_p^{0,5} Pr^{0,33} \quad (34)$$

şeklinde tanımlanır (Ranz ve Marshall, 1952a, Ranz ve Marshall, 1952b). Prandtl sayısı,

$$Pr = \mu C_p / k \quad (35)$$

şeklinde tanımlanır.

Tanecik çevresindeki sınır tabaka içerisindeki sıcaklık dağılımları için literatürde düzeltme faktörleri önerilmiştir. Plazma akışı için düzeltme faktörü aşağıdaki eşitlikle verilir.

$$Nu = 1 + 0,2295 Re_p^{0,55} Pr^{0,33} \quad (36)$$

Parçacığın küreselleşme miktarını karakterize eden küreselleşme oranı

$$r = t_r / t_m \quad (37)$$

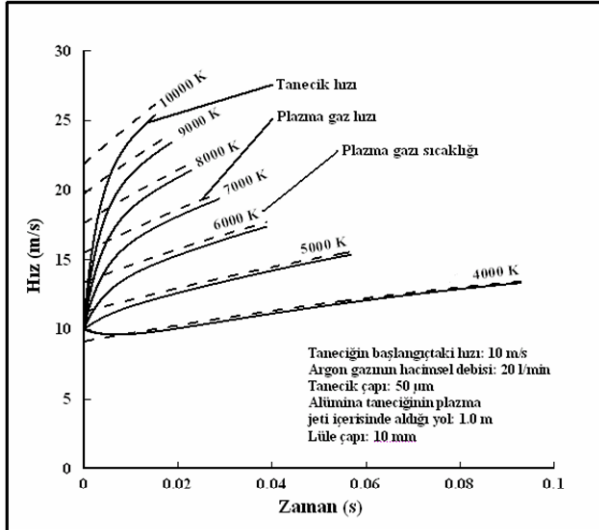
bağıntısı kullanılarak belirlenir (Kumar vd, 2006). Bu bağıntıdaki  $t_r$  parçacığın plazma içerisinde kalma süresi ve  $t_m$  parçacığın ergime zamanıdır. Parçacığın plazma içerisinde kalma süresi ergime zamanından büyükse,  $t_r > t_m$ ,  $r > 1$  olacak ve tanecik ergiyecektir. Klinskaya-Rudenskaya ve arkadaşlarının parçacığın küreselleşme miktarı üzerine yaptıkları deneysel ve teorik çalışmalardan elde edilen verilerden küreselleşme oranı

$$Küreselleşme [\%] = 68(r) \quad (38)$$

şeklinde ifade edilebilir (Kumar ve Selvarajan, 2006, Klinskaya-Rudenskaya vd, 1999).

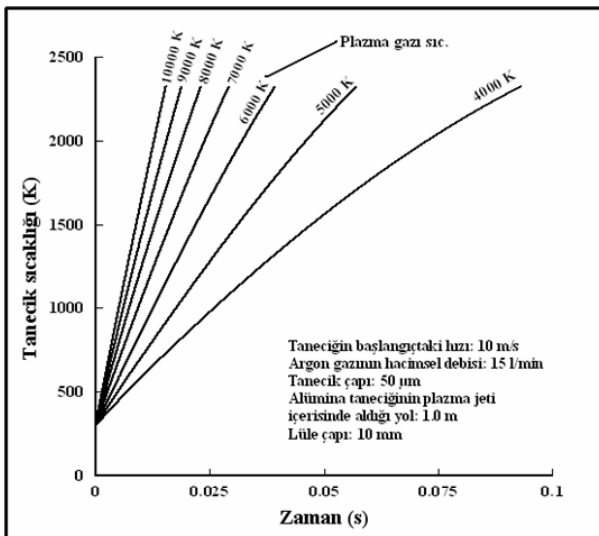
## SONUÇLAR

Tanecik ve plazma gazı hızının zamanla ve plazma gazı sıcaklığı ile değişimi Şekil 2’de verilmiştir. Bu şekil parçacığın başlangıç hızı 10 m/s, plazma gazının hacimsel debisi 20 l/min iken elde edilmiştir. Sonuçlar 4000 K ve 10000 K sıcaklık aralığındaki plazma gazı için 1000 K aralıklarla elde edilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi lüle çapı 10 mm, tanecik çapı 50  $\mu\text{m}$ ’dir.



Şekil 2. Tanecik ve plazma gazı hızının zamanla ve plazma gazı sıcaklığı ile değişimi.

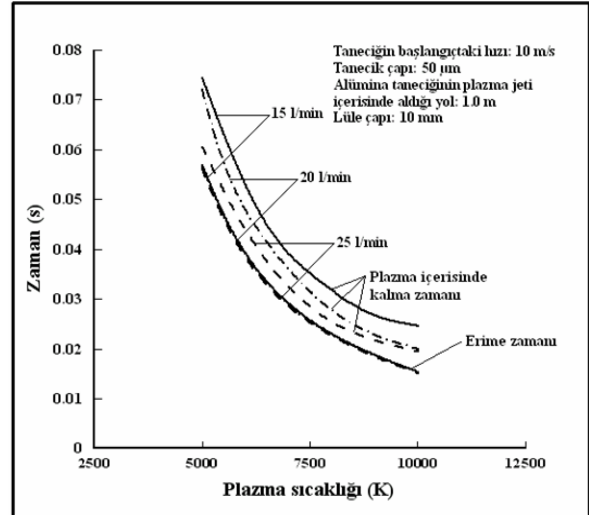
Düşük sıcaklıklarda taneciklerin ve plazma gazının hızı düşüktür. Plazma gazının sıcaklığı artarken plazma gazının hızı ile parçacığın sıcaklığı ve hızı artmaktadır. Düşük sıcaklıklarda tanecik ve plazma gazının hızları arasındaki fark düşüktür. Fark yüksek sıcaklık ve düşük zamanda artmaktadır. Plazma akışının başlangıcında 4000 K’de parçacığın hızında bir düşüş görülmektedir.



Şekil 3. Tanecik sıcaklığının zaman ve plazma gazı ile değişimi.

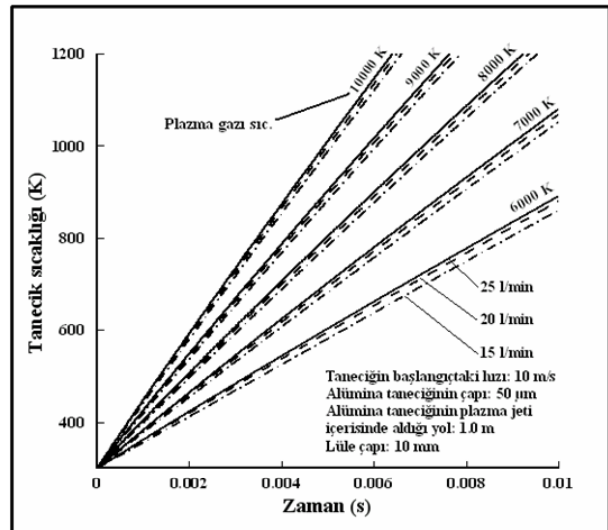
Parçacığın sıcaklığının zaman ve plazma gazı ile değişimi Şekil 3’te verilmiştir. Parçacığın başlangıç

sıcaklığı 300 K’dir. Tanecik kısa bir sürede plazma gazı sıcaklığına bağlı olarak ergime sıcaklığı olan 2323 K’e ulaşmaktadır. Düşük plazma gazı sıcaklıklarında tanecik sıcaklığı ergime sıcaklığına uzun sürede ulaşmaktadır. 10000 K sıcaklıkta alumina parçacığı ergime sıcaklığına plazma jeti içerisinde 0,01534 saniye kaldıktan sonra ulaşmaktadır.



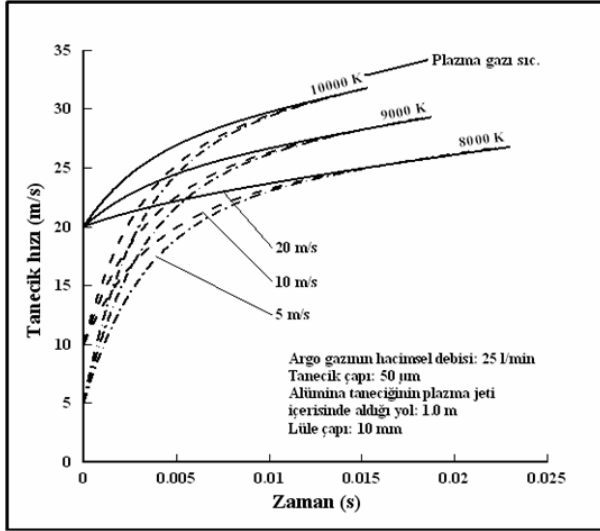
Şekil 4. Parçacığın plazma içerisinde kalma ve ergime zamanının plazma gazı sıcaklığına bağlı olarak değişimi.

Parçacığın plazma içerisinde kalma süresinin ve ergime süresinin farklı plazma gazı debilerinde değişimi Şekil 4’te verilmiştir. Burada plazma gazı sıcaklığı 4000 K ile 10000 K arasında değişmektedir. Plazma gazının yüksek hacimsel debilerinde alumina parçacığının ergime ve plazma jeti içerisinde kalma zamanı kısadır. Plazma sıcaklığı yükseldikçe, parçacığın ergime ve plazma içerisinde kalma zamanı kısalmaktadır. Bu nedenle, Şekil 2’de görüldüğü gibi plazma gazı sıcaklığının artışı plazma gazı ve tanecik hızını etkilemektedir.



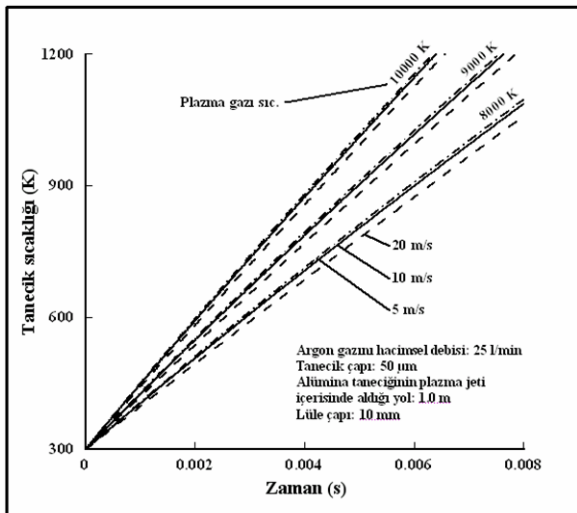
Şekil 5. Tanecik sıcaklığının zaman, plazma gazı sıcaklığı ve plazma gazının hacimsel debisi ile değişimi.

Farklı plazma gazı sıcaklıklarında tanecik sıcaklığının zaman ve plazma gazının hacimsel debisi ile değişimi Şekil 5'te verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi düşük plazma gazı sıcaklıklarında parçacığın sıcaklığı düşüktür ve plazma gazının farklı hacimsel debilerinde 300 K ile 1200 K arasındaki sıcaklıklarda 0,01 saniyeye kadar tanecik sıcaklığı az miktarda değişmektedir.



Şekil 6. Tanecik hızının zaman, parçacığın başlangıçtaki hızı ve plazma gazı sıcaklığı ile değişimi.

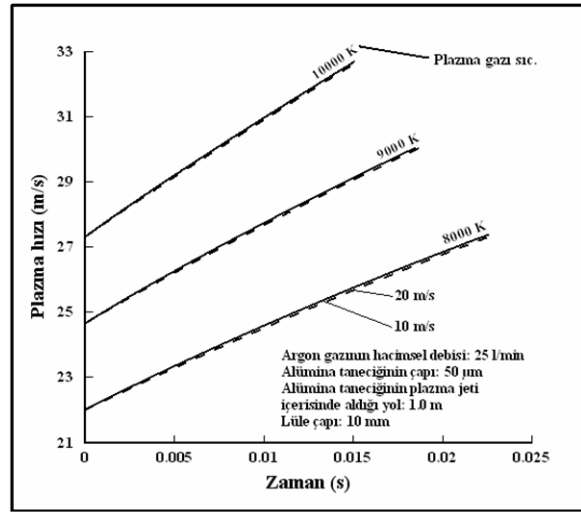
Tanecik hızının farklı plazma gazı sıcaklıklarında, zaman ve parçacığın başlangıçtaki hızı ile değişimi Şekil 6'da verilmiştir. Hesaplamalar parçacığın ergime sıcaklığına kadar yapılmıştır. Farklı tanecik başlangıç hızlarında, belirli bir zamanda parçacığın hızı aynı değere ulaşmaktadır. Bu parçacığın başlangıç hızının plazma sistemi tasarımında önemli olmadığını göstermektedir.



Şekil 7. Tanecik sıcaklığının zaman, parçacığın başlangıçtaki hızı ve plazma gazı sıcaklığı ile değişimi.

Tanecik sıcaklığının farklı tanecik başlangıç hızlarında zaman ve plazma gazı sıcaklığı ile değişimi Şekil 7'de verilmiştir. Şekil 5 ve 7 karşılaştırılırsa, belirli bir zamanda tanecik sıcaklığının plazma gazının hacimsel debisindeki artışla az miktarda değiştiği gözlemlenebilir.

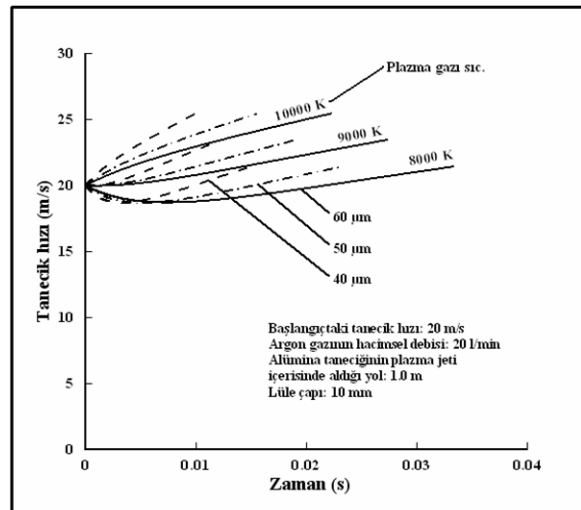
Diğer taraftan, parçacığın sıcaklığı parçacığın başlangıç hızı ile birlikte azalmaktadır.



Şekil 8. Plazma hızının zaman, parçacığın başlangıç hızı ve plazma gazı sıcaklığı ile değişimi.

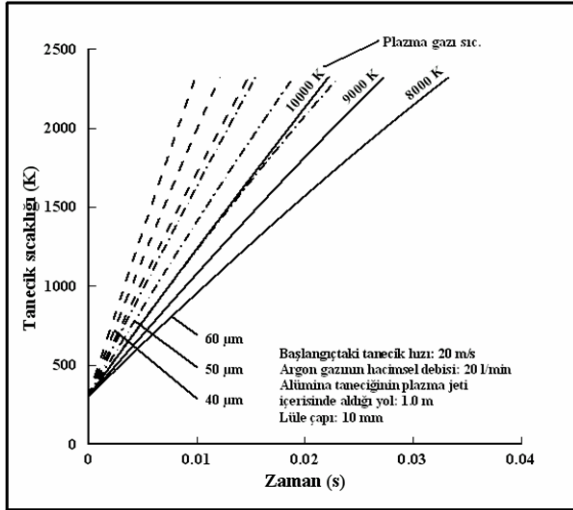
Plazma hızının farklı plazma gazı sıcaklıklarında zaman ve parçacığın başlangıç hızı ile değişimi Şekil 8'de verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi plazma gazı hızını plazma gazı sıcaklığı etkilemesine rağmen parçacığın başlangıç hızı etkilememektedir. Plazma sıcaklığı arttıkça hızı da artmaktadır. Şekilde de görüldüğü gibi plazma gazı sıcaklığının 1000 K'lik artışına karşılık plazma gazının hızı ortalama 2 m/s artış göstermektedir.

Tanecik hızının farklı tanecik çaplarında zaman ve plazma gazı sıcaklığı ile değişimi Şekil 9'da verilmiştir. Tanecik çapı tanecik hızının başlangıç anlarında çok fazla etkilememektedir. Ancak, zaman geçtikçe tanecik çapı tanecik hızı üzerinde etkili olmaktadır. Yüksek plazma gazı hızlarında tanecik hızı yüksektir ve tanecik ergime sıcaklığına ulaşana kadar yükselmeye devam etmektedir.



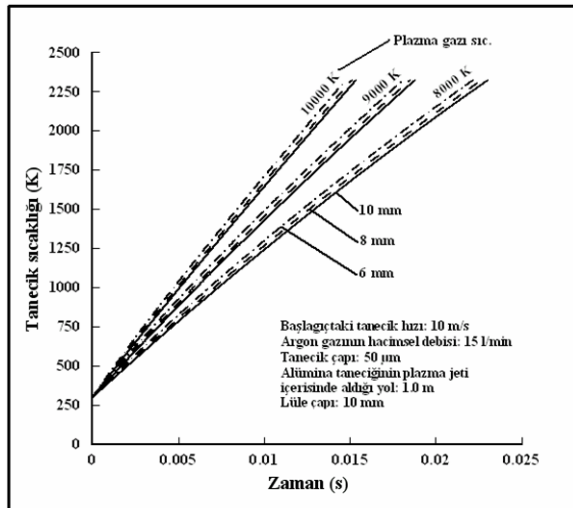
Şekil 9. Tanecik hızının zaman, tanecik çapı ve plazma gazı sıcaklığı ile değişimi.





Şekil 10. Tanecik sıcaklığının zaman, tanecik çapı ve plazma gazı sıcaklığı ile değişimi.

Şekil 10'da taneciklerin çapındaki değişimin farklı plazma gazı sıcaklıklarında taneciklerin ergime zamanını ve tanecik sıcaklığını nasıl etkilediği görülmektedir. Belirli bir zamanda alümina parçacığının çapı artarsa, tanecik daha geç erir. Diğer bir deyişle, parçacığın ergimesi için geçen süre uzar. Şekilde görüldüğü gibi 40 µm çapındaki parçacığın sıcaklık eğrisi daha dik bir eğime sahiptir. Tanecik çapı arttıkça eğimi daha az olan tanecik sıcaklık eğrileri elde edilmektedir. Şekilde plazma gazı sıcaklığının tanecik sıcaklığını etkilediği görülmektedir. Küçük çaplı tanecikler yüksek sıcaklıklara çıkacaktır ve kısa sürede eriyecektir. Plazma gazı sıcaklığı yüksek ise, tanecik sıcaklığı da yüksek olacak ve tanecik kısa sürede eriyecektir.



Şekil 11. Tanecik sıcaklığının zaman, lüle çapı ve plazma gazı sıcaklığı ile değişimi.

Tanecik sıcaklığının zaman, lüle çapı ve plazma gazı sıcaklığı ile değişimi Şekil 11'de görülmektedir. Şekilde 8000 K ile 10000 K arasındaki farklı plazma gazı sıcaklıklarında lüle çapındaki değişimin parçacığın ergime zamanını ve sıcaklığını az miktarda etkilediği görülmektedir. Belirli tanecik sıcaklığında eğer lüle çapı artarsa, parçacığın ergime zamanı da artar. Şekilde lüle

çapının 10 mm olduğu durumda tanecik sıcaklığının daha az bir eğime sahip olduğu görülmektedir.

## TARTIŞMA

Elde edilen sonuçlar ısıl plazma sistemi tasarımı için faydalı olacaktır. Grafiklerde görüldüğü gibi parçacığın başlangıç hızı sistemi çok etkilememektedir. Plazma gazı sıcaklığına bağlı olarak tanecik hızı kısa sürede belirli bir değere ulaşmaktadır. Parçacığın sıcaklığı plazma gazının hacimsel debisinin değişiminden çok etkilenmemektedir. Tanecik çapı plazma içerisinde parçacığın hızını ve sıcaklığını etkileyen önemli bir faktördür. Başlangıç anlarında tanecik hızı veya plazma gazı hızı diğerinden yüksek olabilmektedir. Ancak, kısa bir başlangıç zamanı sonrasında tanecik ve plazma gazı hız profilleri benzer karakteristikler göstermektedir. Yapılan varsayımlar altında parçacığın plazma sistemi içerisinde kalma süresi ergime süresinden uzun olmuştur. Bu gözlemden yola çıkarak bu koşullarda parçacığın plazma sistemi içerisinde ergiyeceği ve küreselleşebileceği sonucuna varılabilir.

Bu çalışmada sürtünme ve yerçekimi kuvvetleri dikkate alınarak hesaplamalar yapılmıştır. Ancak, Kumar ve Selvarajan (2006) sadece sürtünme kuvvetlerini dikkate almışlardır. Yerçekimi kuvveti tanecik hızını ( $u_p$ ), Reynolds sayısını sürüklenme katsayısını etkilemektedir. Dolayısıyla Nusselt sayısı yerçekimi kuvvetinden etkilenmektedir. Çalışmada literatürdeki diğer çalışmalardan farklı olarak enerji analizi kısmında ışıma ile ısı aktarımı dikkate alınmıştır. Plazma sistemi içerisinde tanecik yüzeyinde gerçekleşen ışıma ile ısı aktarımı oldukça önemlidir.

## KAYNAKLAR

Beard, K. V. and Pruppacher, H. R., A determination of the terminal velocity and drag of small water drops by means of a wind tunnel, *J. Atmos. Sc.*, 26, 1066, 1969.

Bica, I., Obtaining of micro-spheres in plasma: theoretical model, *Materials Science & Engineering B*, 77, 293-296, 2000.

Bica, I., Pore formation in iron micro-spheres by plasma procedure, *Materials Science & Engineering*, 393, 191-195, 2005.

Chen, X., and Li H., Three-dimensional flow and heat transfer in thermal plasma systems, *Surface & Coatings Technology*, 171, 124-133, 2003.

Cochran, J. K., Ceramic hollow spheres and their applications, *Current Opinions in Solid State & Materials Science*, 3, 474-479, 1998.

Dilawari A. H. and Szekely, J., Fluid flow and heat transfer in plasma reactors - I. Calculation of velocities, temperature profiles and mixing, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 30, 2357-2372, 1987.

- Fizsdon, J. K., Melting of powder grains in a plasma flame”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 22, 749-761, 1979.
- Gauvin, W. H., Novel reactors for plasma applications, *Chemical Engineering Science*, 45, 2453-2460, 1990.
- Hamielec, A. E., Hoffman, T. W. and Ross, L. L., *A. I. Ch. E. J.*, 13, 212, 1967.
- Jiang X., and Boulos, M., Induction plasma spheroidization of tungsten and molybdenum powders, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 16, 13-17, 2006.
- Károly, Z., Szépvölgyi, J. and Farkas, Z., Simultaneous calcination and spheroidization of gibbsite powders in an RF thermal plasma, *Powder Technology*, 110, 169-178, 2000.
- Károly, Z. and Szépvölgyi, J., Hollow alumina microspheres prepared by RF thermal plasma, *Powder Technology*, 132, 211-215, 2003.
- Károly, Z., and Szépvölgyi, J., Plasma spheroidization of ceramic particles, *Chemical Engineering and Processing*, 44, 221-224, 2005.
- Klinskaya-Rudenskaya, N. A., Frishberg, I. V., Tsymbalist, M. M. and Kuz'min, E. P., Spheroidization of high-melting powders with a dispersity of 20-100 mcm in low-temperature plasma, *High Temperature*, 37: 22-26, 1999.
- Kumar, S. and Selvarajan, V., Spheroidization of metal and ceramic powders in thermal plasma jet, *Computational Materials Science*, 36, 451-456, 2006.
- Kumar, S., Selvarajan, V., Padmanabhan, P. V. A. and Sreekumar, K. P., Spheroidization of metal and ceramic powders in thermal plasma jet: Comparison between experimental results and theoretical estimation, *Journal of Materials Processing Technology*, 176, 87-94, 2006.
- McKelliget J. W., A mathematical model of the spheroidization of porous agglomerate particles in thermal plasma torches, *Thermal Plasma Applications in Materials and Metallurgical Processing*, 337-349, 1992.
- Moon, J. H., Han, J. G. and Kim, Y. J., Performance of an atmospheric plasma torch with various inlet angles, *Surface & Coatings Technology*, 193, 94-100, 2005.
- O'Dell, J. S., Schofield, E. C., Hickman, R., McKechnie, T. N. and Power, C., Powder alloying and spheroidization, *PM2Tec Conference*, Chicago, 2001.
- Proulx P., Mustaghimi J. and Boulos M. I., Plasma-particle interaction effects in induction plasma modeling under dense loading conditions, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 28, 1327-1336, 1985.
- Proulx, P., Mostaghimi, J. and Boulos, M. I., Radiative energy transfer in induction plasma modelling, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 34, 2571-2579, 1991.
- Rahmane M., Soucy, G. and Boulos, M. I., Mass transfer in induction plasma reactors, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 37, 2035-2046, 1994.
- Ramasamy, R. and Selvarajan, V., Heat transfer to a single particle injected into a thermal plasma, *Computational Materials Science*, 15, 265-274, 1999.
- Ramasamy, R. and Selvarajan, V., Injected particle behavior in a thermal plasma, *Applied Surface Science*, 169, 617-621, 2001.
- Ranz, W. E. and Marshall, W. R., Evaporation from drops part I, *Chemical Engineering Progress*, 48: 141-146, 1952a.
- Ranz, W. E. and Marshall, W. R., Evaporation from drops part II, *Chemical Engineering Progress*, 48: 173-180, 1952b.
- Reed, T. B., Induction-coupled plasma torch, *Journal of Applied Physics*, 32, 821-824, 1961.
- Schlichting, H., *Boundary Layer Theory 6th ed.*, McGraw-Hill, New York, 1968.
- Shanmugavelayutham, G. and Selvarajan, V., Plasma spheroidization of nickel powders in a plasma reactor, *Bull. Mater. Sci.*, 27, 5, 453-457, 2004.
- Ye R., Proulx P. and Boulos, M. I., Turbulence phenomena in the radio frequency induction plasma torch, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 42, 1585-1595, 1999.
- Zhang, Y. X., Li, G. H., Wu, Y. C. and Xie, T., Sol-gel synthesis of titania hollow spheres, *Materials Research Bulletin*, 40, 1993-1999, 2005.