

**VAKUMLU KÜRESEL SERAMİKLERİN
DENEYSEL VE TEORİK OLARAK İNCELENMESİ**

Ümit KESKİN

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

MART 2007

ANKARA

Ümit KESKİN tarafından hazırlanan VAKUMLU KÜRESEL SERAMİKLERİN DENEYSEL VE TEORİK OLARAK İNCELENMESİ adlı bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. Ö. Ercan ATAER

Tez Yöneticisi

Bu çalışma, jürimiz tarafından Makine Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan : Prof. Dr. Ö. Ercan ATAER

Üye : Doç. Dr. İrfan AR

Üye : Doç. Dr. İbrahim USLAN

Üye : Doç. Dr. Cemil YAMALI

Üye : Y. Doç. Dr. Oğuz TURGUT

Tarih: 30/03/2007

Bu tez, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygundur.

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada orijinal olmayan her türlü kaynağa eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Ümit KESKİN

**VAKUMLU KÜRESEL SERAMİKLERİN
DENEYSEL VE TEORİK OLARAK İNCELENMESİ
(Yüksek Lisans Tezi)**

Ümit KESKİN

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

Mart 2007

ÖZET

Isı yalıtımında kullanılan vakumlu küresel seramiklerin ısı iletim katsayıları düşüktür. Yüksek sıcaklıklara ve yüksek basınçlara dayanıklıdır. Bu çalışmada, içi vakumlu küresel seramiklerin konutlardaki enerji kazanımına etkisi belirlenmiştir. Bu amaçla 1mx1mx1m boyutlarında üç kapalı ortam tasarlanmıştır. İçi vakumlu seramikler farklı boyalar ile ağırlıkça %18 oranında karıştırılmış ve oluşturulan üç kapalı ortamdaki birisinin iç ve dış yüzeylerine uygulanmıştır. Diğer iki ortamdaki birisi plastik boya ve diğeri 3 cm kalınlığında haddelenmiş polistiren ile yalıtılmıştır. Kapalı ortamların iç ve dış yüzeyleri ile iç ve dış ortamına ısı-çiftler yerleştirilmiştir. Kapalı ortamların iç ortam sıcaklıkları termostatlar ile sabit tutulmuştur. Üç kapalı ortamın iç ortam sıcaklıkları 28 °C, 30 °C ve 40 °C iken tükettikleri elektrik enerjileri sırasıyla bu sıcaklıklarda yapılan üç deney ile belirlenmiştir. Diğer taraftan, ısı-çiftler ile ölçülen analog sıcaklık verileri, analog verileri dijitale dönüştüren bir donanım ile bilgisayar ortamına aktarılmıştır. Deneyler sonucunda elde edilen veriler tablolar ve grafikler haline dönüştürülerek tartışılmıştır. Vakumlu küresel seramiklerin üretimi için deneysel bir çalışma önerilmiştir. Önerilen çalışmada, küresel seramiklerin üretiminin RF (Radio Frequency) indüktif bağlaşımlı ısı plazma (ICTP, Inductively Coupled Thermal Plasma) sistemi ile yapılabileceği açıklanmıştır. İndüktif bağlaşımlı plazma sistemleri; geniş hacimleri, yüksek saflıkları, eksenel 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 seramiklerin üretiminin temelini oluşturur. İndüktif bağlaşımlı ısı plazma sisteminin birimleri olan toz besleme birimi, torç, reaktör, siklon, toz filtresi ve gaz çıkışı birimleri açıklanmıştır. Deneysel çalışmada kullanılacak olan plazma gazı ve tozlar belirtilmiştir. İndüktif bağlaşımlı ısı plazma sisteminin çalışma prensibi ile ilgili gaz debisi, toz hızı, reaktör çapı ve plazma sisteminin çekeceği güç gibi parametrelerin yanı sıra RF elektrik akım üretici ve diğer cihazlar açıklanmıştır. Gazi Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Metroloji Laboratuvarı'nda gaz atomizasyon yöntemi ile kalay tozları üretilmiştir. Bu çalışma gelecekte indüktif bağlaşımlı ısı plazma sistemi ile yapılması düşünülen deneysel çalışmalara ön hazırlık olarak gerçekleştirilmiştir. Tozların ısı plazma sisteminde küreselleştirilmesi konusunda bir teorik çalışma yapılmıştır. Bu çalışmada, doğrusal (linear) olmayan momentum ve enerji denklemleri sayısal olarak FORTRAN dilinde hazırlanan bir bilgisayar programı ile çözülmüştür. Analizde, plazma gazının sıcaklık ile hızının, lüle çapının, tanecik boyutunun, taneciğin 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.

Bilim Kodu	: 914.1.065
Anahtar Kelimeler	: İçi boş, Seramik, ICTP
Sayfa Adedi	: 101
Tez Yöneticisi	: Prof. Dr. Ö. Ercan ATAER

EXPERIMENTAL AND THEORETICAL INVESTIGATION OF HOLLOW SPHERICAL CERAMICS

(M.Sc. Thesis)

Ümit KESKİN

**GAZİ UNIVERSITY
INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY**

March 2007

ABSTRACT

The hollow spherical ceramics used as heat insulation materials have low thermal conductivities. They withstand high temperature and pressure. In this study, the effect of energy gain of hollow spherical ceramics in houses was determined. For this purpose, three closed systems which have 1mx1mx1m dimensions were built. The hollow spherical ceramics were mixed with different paints at a rate of 18 percent by mass and were applied to the inner and outer surfaces of the one of these closed volumes. The plastic paint was applied to the one of the other two closed volumes and the other was insulated with an extruded polystyrene material which has a 3 cm thickness. Thermo-couples were set to the inner and outer surfaces of the closed volumes along with inside and outside the system. Thermostats were used to maintain the temperature of the media inside of them at a constant temperature. While the temperatures inside them were at 28 °C, 30 °C ve 40 °C, consumed electric energy by these closed volumes was determined through the experiments made for these temperatures respectively. On the other hand, measured analog temperature values with thermocouples were transferred to the computer via a hardware equipment in which gathered analog data is formed into digital data. Different tables and diagrams were made from the data obtained through experiments and they were discussed as a result. An experimental study was proposed for the production of hollow spherical ceramics. It was explained that RF (Radio

Frequency) inductively coupled thermal plasma (ICTP) system may be used in the experimental study for the production of hollow spherical ceramics. 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 ceramics via inductively coupled thermal plasma systems include melting process of powders in the plasma jet and free falling of them through the reactor. The units of the RF-ICTP system such as powder injection unit, torch, reactor, cyclone, powder filter and gas exit units were described. The plasma gas and the powder material planned to use in the experimental study were explained. System parameters of the RF-ICTP such as gas flow rate, powder flow rate, reactor diameter, power supplied to the plasma system together with RF electric current generator and the other agents were clarified. Tin powder was produced using gas atomization method in Metrology Laboratory of Mechanical Engineering Department, Engineering and Architecture Faculty, Gazi University. This experimental study was made as a 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 this 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.

Science Code	: 914.1.065
Key Words	: Hollow, Ceramic, ICTP
Page Number	: 101
Adviser	: Prof. Dr. Ö. Ercan ATAER

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren hocam Prof. Dr. Ö. Ercan ATAER'e, deney düzeneğinin hazırlanmasındaki katkılarından dolayı Uzman Faruk OGÜN'e ve BOR-TEK Termal Boya Şirketi'ne, ayrıca tüm çalışma arkadaşlarıma ve manevi destekleriyle beni hiçbir zaman yalnız bırakmayan aileme teşekkürü bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	iv
ABSTRACT	vi
TEŞEKKÜR	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ÇİZELGELERİN LİSTESİ	xi
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	xii
RESİMLERİN LİSTESİ	xv
SİMGELER VE KISALTMALAR	xvi
1. GİRİŞ	1
2. ISI YALITIMINDA KULLANILAN VAKUMLU KÜRESEL SERAMİKLER	3
3. DENEY DÜZENEĞİ VE DENEYSEL YÖNTEM	10
3.1. Deney Düzeneği	11
3.2. Deneysel Yöntem	13
4. ISIL PLAZMA YÖNTEMİ İLE VAKUMLU SERAMİK KÜRELERİN TEORİK ANALİZİ	17
4.1. Giriş	17
4.2. Bu Konuda Yapılan Çalışmalar	22
4.3. Teori	29
4.4. Çözüm Yöntemi	49
5. KÜRESEL TANECİK ÜRETİMİ İLE İLGİLİ DENEYSEL ÇALIŞMA	52
5.1. Giriş	52
5.2. Gaz Atomizasyon Yöntemi	52

Sayfa

5.3. Gaz Atomizasyon Ünitesi	56
5.3.1. Gaz sistemi.....	57
5.3.2. Isıtma ve eritme.....	58
5.3.3. Gaz atomizasyon kulesi	59
5.3.4. Siklon	61
5.3.5. Lüle	61
5.4. Gaz Atomizasyon Çalışmaları.....	63
6. SONUÇLAR VE SONUÇLARIN TARTIŞILMASI	65
6.1. Deneysel Sonuçlar.....	65
6.1.1. Isı yalıtımı özellikleri ile ilgili sonuçlar.....	65
6.1.2. Ses yalıtımı özellikleri ile ilgili sonuçlar	81
6.1.3. Toz üretim deneyinin sonuçları	83
6.2. Teorik Sonuçlar.....	88
6.3. Sonuçların Tartışılması	97
6.4. Bu Konuda İleride Yapılacak Çalışmalar	98
KAYNAKLAR	100
EKLER.....	104
EK-1 Bilgisayar programı	105
EK-2 Bilgisayar programının akış şeması.....	118
ÖZGEÇMİŞ	120

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 3.1. Deneysel çalışmada iç ve dış ortam sıcaklıkları	13
Çizelge 5.1. Mannesmann tipi lülenin boyutları	62
Çizelge 6.1. Yüzde olarak elektrik enerjisi kazanımı	66
Çizelge 6.2. Yüzde olarak elektrik enerjisi kazanımı	70
Çizelge 6.3. Seramik katkılı boya, mastik sıva ve plastik boya yüzeylerinin yayıcılıkları	74
Çizelge 6.4. Yüzde olarak elektrik enerjisi kazanımı	77
Çizelge 6.5. Plastik boya uygulanan ortamda yapılan ölçümler	82
Çizelge 6.6. Seramik katkılı boya uygulanan ortamda yapılan ölçümler	82
Çizelge 6.7. Ekstrüde polistiren yalıtım uygulanan ortamda yapılan ölçümler	82
Çizelge 6.8. Isıl plazma sisteminin çalışma şartları	89

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Seramiklerin yapısındaki elementlerin yüzde olarak ağırlık ve atom sayıları.....	8
Şekil 2.2. Seramiklerin yapısındaki elementlerin yüzde olarak ağırlık ve atom sayıları.....	8
Şekil 3.1. Deney düzeneğinin şematik görünümü.....	12
Şekil 3.2. Seramik katkılı boya uygulanan ortamın çeper kesiti.....	12
Şekil 4.1. İndüktif bağlaşımlı plazma sisteminin şematik görünümü	18
Şekil 4.2. İndüktif bağlaşımlı plazma torçunun birimleri	19
Şekil 4.3. Tek yönlü plazma akışı içerisindeki tanecik üzerine etki eden kuvvetler	30
Şekil 5.1. Düşey gaz atomizasyon ünitesi.....	53
Şekil 5.2. Damlacık oluşumu	54
Şekil 5.3. Serbest düşmeli lüle sistemi.....	55
Şekil 5.4. Yakından eşlemeli lüle sistemi	56
Şekil 5.5. Gaz atomizasyon ünitesinin şematik görünümü	60
Şekil 6.1. RC#233 yalıtım boyası, plastik boya ve haddelenmiş (ekstrüde) polistiren ile yalıtılmış ortamların elektrik enerjisi tüketiminin zamanla değişimi.....	66
Şekil 6.2. RC#233 yalıtım boyası, plastik boya ve haddelenmiş polistiren ile yalıtılmış ortamların elektrik enerjisi tüketiminin zamanla değişimi	67
Şekil 6.3. Plastik boyaya göre yüzde olarak elektrik enerjisi kazanımının zamanla değişimi.....	68
Şekil 6.4. Plastik boyaya göre yüzde olarak elektrik enerjisi kazanımının zamanla değişimi.....	68

Şekil	Sayfa
Şekil 6.5. RC#233 yalıtım boyası, plastik boya ve haddelenmiş polistiren ile yalıtılmış ortamların elektrik enerjisi tüketiminin zamanla değişimi.....	69
Şekil 6.6. RC#233 yalıtım boyası, plastik boya ve haddelenmiş polistiren ile yalıtılmış ortamların elektrik enerjisi tüketiminin zamanla değişimi.....	71
Şekil 6.7. Plastik boyaya göre yüzde olarak elektrik enerjisi kazanımının zamanla değişimi.....	71
Şekil 6.8. Plastik boyaya göre yüzde olarak elektrik enerjisi kazanımının zamanla değişimi.....	72
Şekil 6.9. RC#233 yalıtım boyası, plastik boya ve haddelenmiş polistiren ile yalıtılmış ortamların iç ortam ve yüzey sıcaklıklarının zamanla değişimi	73
Şekil 6.10. RC#233 yalıtım boyası, plastik boya ve haddelenmiş polistiren ile yalıtılmış ortamların dış yüzey sıcaklık değerlerinin zamanla değişimi	74
Şekil 6.11. Kapalı ortamların iç sıcaklıklarının zamanla değişimi	75
Şekil 6.12. #AL-2402 yalıtım boyasının elektrik enerjisi tüketiminin zamanla değişimi ve diğer yalıtım türü ve boya ile karşılaştırılması	76
Şekil 6.13. #AL-2402 yalıtım boyasının elektrik enerjisi tüketiminin zamanla değişimi ve diğer yalıtım türü ve boya ile karşılaştırılması	77
Şekil 6.14. Plastik boyaya göre yüzde olarak elektrik enerjisi kazanımının zamanla değişimi.....	78
Şekil 6.15. Plastik boyaya göre yüzde olarak elektrik enerjisi kazanımının zamanla değişimi.....	79
Şekil 6.16. #AL-2402 yalıtım boyasının iç ortam ve iç yüzey sıcaklık değerlerinin zamanla değişimi.....	79
Şekil 6.17. #AL-2402 yalıtım boyasının dış yüzey sıcaklık değerlerinin zamanla değişimi	80
Şekil 6.18. Lazer ışınının kırınımı teorisinin şematik görünümü.....	85
Şekil 6.19. Malvern Mastersizer E ile yapılan toz boyutu analiz raporu	87

Şekil	Sayfa
Şekil 6.20. Tanecik ve plazma gazı hızının zamanla ve plazma gazı sıcaklığı ile değişimi	89
Şekil 6.21 Tanecik sıcaklığının zaman ve plazma gazı sıcaklığı ile değişimi	90
Şekil 6.22. Taneciğin plazma içerisinde kalma ve erime zamanının plazma gazı sıcaklığına bağlı olarak değişimi.....	91
Şekil 6.23. Tanecik sıcaklığının zaman, plazma gazı sıcaklığı ve plazma gazının hacimsel debisi ile değişimi	92
Şekil 6.24. Tanecik hızının zaman, taneciğin başlangıçtaki hızı ve plazma gazı sıcaklığı ile değişimi.....	92
Şekil 6.25. Tanecik sıcaklığının zaman, taneciğin başlangıçtaki hızı ve plazma gazı sıcaklığı ile değişimi.....	93
Şekil 6.26. Plazma hızının zaman, taneciğin başlangıç hızı ve plazma gazı sıcaklığı ile değişimi.....	94
Şekil 6.27. Tanecik hızının zaman, tanecik çapı ve plazma gazı sıcaklığı ile değişimi	95
Şekil 6.28. Tanecik sıcaklığının zaman, tanecik çapı ve plazma gazı sıcaklığı ile değişimi	96
Şekil 6.29. Tanecik sıcaklığının zaman, lüle çapı ve plazma gazı sıcaklığı ile değişimi	97

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 2.1. Vakumlu seramiklerin 80 kez büyütülerek çekilmiş fotoğrafı	5
Resim 2.2. Vakumlu seramiklerin 200 kez büyütülerek çekilmiş fotoğrafı	5
Resim 2.3. Vakumlu seramiklerin 1500 kez büyütülerek çekilmiş fotoğrafı	6
Resim 2.4. Vakumlu seramiklerin 100 kez büyütülerek çekilmiş fotoğrafı	7
Resim 3.1. Cool Edit programı ile üretilen sinüzoidal ses	15
Resim 3.2. Ses geçiş kaybı ölçümü	15
Resim 4.1. İndüktif bağlaşımlı plazma torçu	19
Resim 4.2. 100 kW güç ile çalışan indüktif bağlaşımlı ısı plazma sistemi reaktörü	20
Resim 5.1. Gaz atomizasyon yöntemi ile üretilen tozların yüzey yapısı	53
Resim 5.2. Gaz atomizasyon ünitesi	57
Resim 5.3. Gaz sistemi	58
Resim 5.4. Kompresör	58
Resim 5.5. Isıtma ve eritme biriminin görünümü	59
Resim 5.6. Siklon biriminin görünümü	61
Resim 5.7. Çıkıntı aparatı – lüle bağlantısının görünümü	62
Resim 5.8. Çıkıntı aparatının görünümü	62
Resim 6.1. Kalay taneciklerinin 50 kez büyütülerek çekilmiş fotoğrafı	83
Resim 6.2. Kalay taneciklerinin 150 kez büyütülerek çekilmiş fotoğrafı	84
Resim 6.3. Kalay taneciklerinin 350 kez büyütülerek çekilmiş fotoğrafı	84
Resim 6.4. Malvern Mastersizer E parçacık boyutu ölçme cihazı	85

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış bazı simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklama
a	İvme, m/s^2
A	Isı aktarım alanı, m^2
A_{kp}	Taneciğin akışa dik izdüşüm alanı, m^2
A_p	Taneciğin yüzey alanı, m^2
C_D	Sürükleme katsayısı
C_p	Özgül ısı, J/kgK
C_{gp}	Tanecik malzemesinin erime 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	Sürükleme kuvveti, N
F_g	Yerçekimi kuvveti, N
F_M	Magnus kuvveti, N
F_{net}	Taneciğe 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	Taneciğin kütlesi, kg
$\dot{m}_g$	Plazma gazının debisi, kg/s
Nu	Nusselt sayısı

Simgeler	Açıklama
Pr	Prandtl sayısı
r	Küreselleşme indeksi
Re	Reynolds sayısı
S	Plazma jeti içerisinde taneciğin aldığı yol, m
t	Zaman, s
t_m	Taneciğin erime zamanı, s
t_r	Taneciğin plazma içerisinde kalma zamanı, s
t_{tr}	Taneciğin sıcaklığının dengeye ulaşması için geçen süre, s
t_{vr}	Taneciğin hızının dengeye ulaşması için geçen süre, s
T	Sıcaklık, K
u	Hız, m/s
u_g	Plazma jetinin hızı, m/s
u_p	Taneciğin hızı, m/s
u_r	Taneciğin plazma gazına göre bağlı hızı, m/s
z	Zaman adımı
ε	Yayıcılık
μ	Dinamik viskozite, kg/ms
ρ	Yoğunluk, kg/m ³
ρ_f	Plazmanın film sıcaklığındaki yoğunluğu, kg/m ³
ρ_p	Taneciğin yoğunluğu, kg/m ³
σ	Stefan-Boltzman sabiti
∞	Akışkan

Kısaltmalar	Açıklama
--------------------	-----------------

CVM	Seramik Vakum Matris
------------	----------------------

1. GİRİŞ

Günümüzde nanoteknoloji, ileri malzeme teknolojileri ve uzay teknolojileri bilim dünyasının oldukça ilgi gören alanları içerisinde yer almaktadır. Gelişmekte olan ülkemizde, TÜBİTAK'ın da desteğiyle bu alanlarda yapılan bilimsel çalışmalara önem verilmektedir. Özellikle mikro ve nano boyutlardaki seramikler ileri teknolojilerin kullanıldığı malzemelerin üretiminde önemli bir yere sahiptir. Seramiklerin üretiminde kullanılan hammaddelerin en önemlisi killerdir. Kil çeşitlerinden seramik kil grubunda olanlar seramiklerin üretiminde kullanılmaktadır. Literatürde seramik killeri; kil, kaolen, refrakter kil ve bentonit ile birlikte değerlendirilmektedir. Seramik killerini diğerlerinden ayırmak oldukça zordur. Bilgi toplayarak, araştırma yaparak, tedbirler alarak ve önerilerde bulunarak Devlet Planlama Teşkilatı yapısında kurulan sürekli ve geçici Özel İhtisas Komisyonları, bu zorlukları gidermek amacıyla, Türkiye'de üretim ve tüketim yapan kuruluşlardan elde edilen bilgiler paralelinde, seramik killeri ile ilgili çalışmalar yapmışlardır [1].

Seramik killerinden, ince seramikler veya ileri teknoloji seramikleri olarak bilinen 5-200 µm çapındaki içi vakumlu küresel seramik mikro tanecikler üretilmektedir. Literatürde içi boş küresel seramik taneciklerin üretimi ile ilgili geliştirilmiş teknikler sunulmuştur. Su ile özütlenme esasına dayanan (water extraction) sol-gel sık kullanılan bir yöntemdir. İçi boş küresel seramik tanecikler, üretilmiş polimer veya cam mikro kürelerin seramik jel ile kaplanması ve bunu takiben seramik fırınında pişirilmesi ile üretilir. Mikro kürelerin oluşumunu sağlayan önemli bir yöntem ise, toz taneciklerinin yüksek sıcaklık sağlayan ısı plazma boyunca geçirilmesidir.

İçi boş küresel seramiklerin ısı ve ses yalıtımı sağladığı belirtilmektedir. Ayrıca, elektronikte piezoelektrik dönüştürücülerde, düşük elektrik ve ısı iletkenliğine sahip malzemelerde, akışkan taşınımında filtrelerde ve ısı yalıtımının olduğu yanma ortamlarında kullanılmaktadırlar [2].

Bu çalışma kapsamında yapılan deneylerde, NASA'nın uzay mekiklerinin dış yüzeyinde yalıtım amaçlı kullandığı, Hy-Tech Thermal Solutions Firması'nda

Seramik Vakum Matris (Ceramic Vacuum Matrix, CVM) teknolojisi ile üretilen vakumlu seramik mikro kürelerin ısı yalıtımı özellikleri incelenmiştir. İçi vakumlu seramikler farklı boyalar ile ağırlıkça %18 oranında karıştırılmış ve oluşturulan 1mx1mx1m boyutlarındaki üç kapalı ortamdan birisinin iç ve dış yüzeylerine uygulanmıştır. Diğer iki ortamdan birisi plastik boya ve diğeri 3 cm kalınlığında haddelenmiş polistiren ile yalıtılmıştır. Kapalı ortamların iç ortam sıcaklıkları termostatlar ile sabit tutulmuştur. Üç kapalı ortamın iç ortam sıcaklıkları 28 °C, 30 °C ve 40 °C iken tükettikleri elektrik enerjileri sırasıyla bu sıcaklıklarda yapılan üç deney ile belirlenmiştir. Kapalı ortamların iç ve dış yüzeyleri ile iç ve dış ortamına ısı-çiftler yerleştirilmiştir. Isı-çiftler ile ölçülen analog sıcaklık verileri bilgisayar ortamına aktarılmıştır. Deneyler sonucunda elde edilen veriler tablolar ve grafikler haline dönüştürülerek tartışılmıştır.

Vakumlu küresel seramiklerin 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. Bu çalışmalar incelenerek, küresel seramiklerin üretimi ile ilgili bir teori açıklanmıştır. İçi boş küresel seramiklerin üretimi için indüktif bağlaşımlı ısı plazma (Inductively Coupled Thermal Plasma) sisteminin kullanıldığı bir deneysel çalışma önerilmiştir. Bu çalışmada önerilen yöntemle farklı metal tozları ve alaşımları kullanılarak farklı özelliklere sahip küresel tozlar elde edilebilir. Bu konuda ülkemizde yatakları bulunan kil mineralleri kullanılarak farklı özelliklere ve boyutlara sahip içi boş veya dolu küresel seramikler üretilebilir. Bunlar yüksek yayıcılık, yüksek soğuruculuk, v.b. önemli özelliklere sahip olabilir. Bu nedenle, bu çalışma ve devamında gerçekleştirilecek çalışmalar, ileride ülkemizin bilimsel ve ekonomik gelişimi açısından önemlidir. Bu konuda ileride gerçekleştirilecek çalışmalarla, ülkemiz gelişmiş ülkelerde olduğu gibi gelecekte kullanılacak teknolojik malzemelerin üretimini yapabilecek seviyeye ulaşabilecektir. Bu ise, ülke ekonomisini olumlu yönde etkileyecektir.

2. ISI YALITIMINDA KULLANILAN VAKUMLU KÜRESEL SERAMİKLER

İçi boş küresel seramikler ısı yalıtımı sağlamaktadır. Ayrıca, elektronikte piezoelektrik dönüştürücülerde, düşük elektrik ve ısı iletkenliğine sahip malzemelerde, akışkan taşınımında filtrelerde ve ışıının olduğu yanma ortamlarında kullanılabilirler [2]. İçi boş küresel seramikler yardımıyla, keskin kenarlara ya da yüzeylere sahip makinelerin yüksek hızlarda çalışması sonucu yüzeylerinin ısınması gibi problemler engellenebilir. Farklı kesit alanlarına sahip iklimlendirme kanallarının yüzeylerinde kullanılmaları, hafif olmalarından ve uygulama kolaylıklarından dolayı avantajlı olabilir.

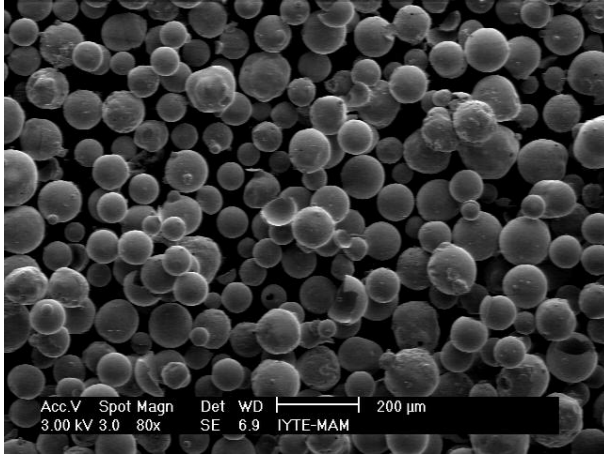
Isı yalıtımında kullanılan içi vakumlu küresel mikro seramik taneciklerin özellikleri şu şekilde sıralanabilir [3]:

1. Boyanın dayanıklılığını arttıırırlar ve ömrünü uzatırırlar.
2. Isıl iletim katsayıları, $k= 0,1 \text{ W/m}^{\circ}\text{C}$ gibi düşüktür.
3. Yüksek sıcaklıklara dayanıklıdırlar.
4. Et kalınlıkları çaplarının $1/10$ 'u kadardır.
5. Kimyasallara karşı dirençli olan ve tepkimeye girmeyen türleri vardır.
6. 44-413 MPa gibi yüksek basınçlara dayanıklı türleri vardır.
7. 1800°C 'ye kadar sıcaklıklara dayanıklı türleri vardır.
8. Ses ve nem yalıtımı sağlayan türleri vardır.
9. Pas önleme özellikleri vardır.
10. Toksik madde içermeyizler.
11. Mor ötesi ışınlara karşı ve uzun dönemli olumsuz iklim etkilerine karşı koruyucudurlar.
12. Diğer malzemelerle karıştırıldıklarında karışımın ısı direncini arttıırırlar.

Vakumlu küresel mikro seramikler uygun miktarda boya ile karıştırılarak uygulandıklarında, vakum hücrelerinden oluşan boyadan daha hafif yoğun bir film tabakası oluşmasını sağlamaktadırlar. Seramik katkılı boyalar güneş ışınları ve

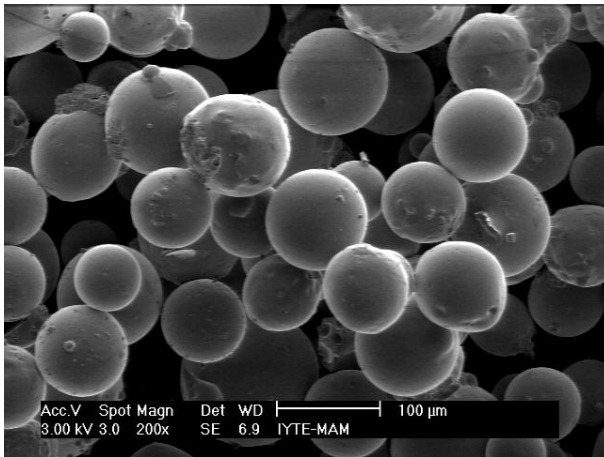
morötesi (ultraviyole) ışınların büyük bir bölümünü engellemektedir. Uygulandıkları atmosfere açık yüzeylerde ısı ve ses yalıtımı sağlamakta, nemi önlemekte, korozyona karşı koruyucu bir ortam oluşturmakta, morötesi ışınlardan korumaktadırlar. Yangına dirençli seramik tabaka, doğanın yıkıcı kuvvetlerine karşı dayanıklılık sağlamaktadır. Seramik taneciklerin, diğer maddelerle kimyasal reaksiyona girmemeleri, zehirleyici olmamaları gibi özellikleri herhangi bir tip boya, kaplama, yapıştırıcı veya yapı malzemesiyle birlikte kullanılmalarına izin vermektedir. Seramik katkılı boyalar uygulandıkları yüzeyde uzun süre dayanıklılık sağlarlar. Boyalar içinde kullanılan vakumlu küresel seramikler boyanın kurumasıyla yüzeydeki hataları gizleyen bir kalıntı bırakmaktadır. Yanma tehlikeleri yoktur, yangına dayanıklıdır. Kimyasallara karşı dirençlidirler, tepkimeye girmezler. Pas önleme özellikleri vardır. Radyasyonu yansıtır ve engelleyebilirler. Diğer malzemelerle karıştırıldıklarında ısı dirençlerini artırırlar. Bu olumlu özelliklerinden dolayı seramik katkılı ürünlerin geniş kullanım alanları vardır [3].

Hy-Tech Thermal Solutions Firması'ndan satın alınan vakumlu küresel seramiklerin İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü Malzeme Araştırma Merkezi'nde 80, 200 ve 1500 kez büyütülerek elde edilen resimleri sırasıyla Resim 2.1-Resim 2.4'te verilmiştir. Resimlerde de görüldüğü gibi seramikler arasında küresel olmayan tanecikler de mevcuttur. Diğer taraftan, bu kürelerden bazıları kırık ve bazıları da küreden farklı, düzensiz geometrilerdedir. Resim 2.1-Resim 2.4'te görüldüğü gibi küreler birbirlerinden bağımsız seramik tozlardır. Resimler ile Şekil 2.1. ve Şekil 2.2'de taneciklerin yoğun dağılmamış olduğu görülmektedir.



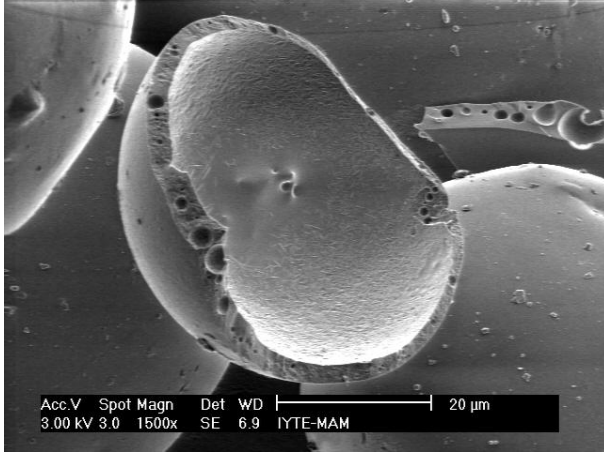
Resim 2.1. Vakumlu seramiklerin 80 kez büyütülerek çekilmiş fotoğrafı

Resim 2.1 ve Resim 2.2’de sırasıyla 80 ve 200 kez büyütülerek çekilmiş fotoğraflarda görüldüğü gibi seramik katkı maddeleri yaklaşık olarak kürelerden oluşmaktadır ve kürelerin çapları farklı boyutlardadır. Resim 2.3’te ise üretimi sırasında veya sonradan kırılmış bir seramik taneciğinin 1500 kez büyütülerek çekilmiş fotoğrafı görülmektedir.



Resim 2.2. Vakumlu seramiklerin 200 kez büyütülerek çekilmiş fotoğrafı

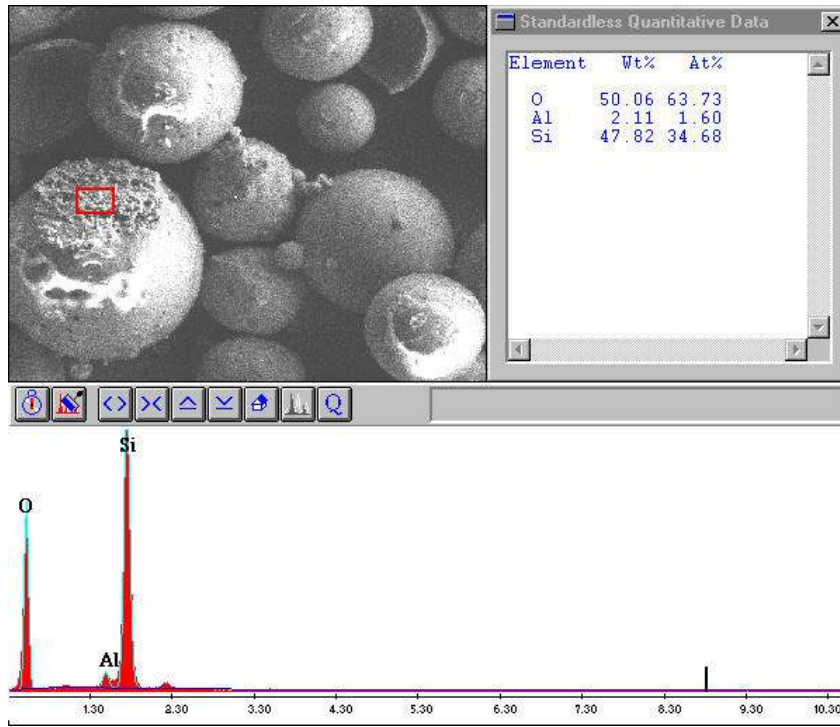
Resim 2.2-Resim 2.4’te resimler üzerinde görülen Acc.V terimi tanecikler üzerine gönderilen ışınların ivmelerini ve Magn terimi çekilen fotoğrafların ne kadar büyültüldüğünü göstermektedir. Örneğin, Resim 2.4 ile verilen fotoğraf 100 defa büyütülmüştür.



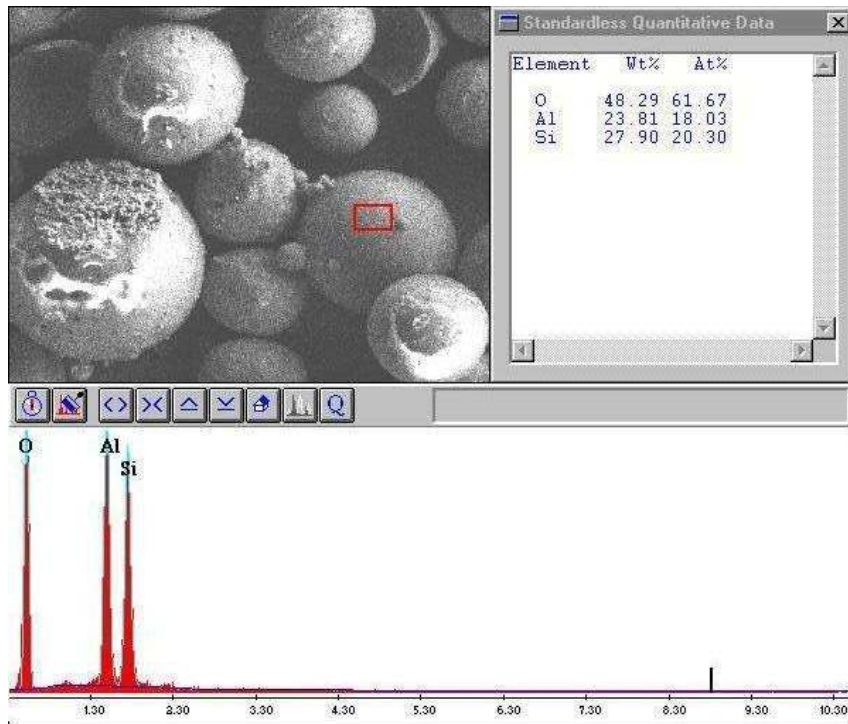
Resim 2.3. Vakumlu seramiklerin 1500 kez büyütülerek çekilmiş fotoğrafı

Kırık kürenin iç kısmı şekilde görülmektedir ve farklı bir geometridedir. Bu şekil vakumlu seramiklerin kırılabileceğini göstermektedir. Doğal olarak, bu kırık seramikler beklenen ısı ve ses yalıtımını gösteremezler. Vakumlu seramik kürelerin 100 kez büyütülerek çekilmiş fotoğrafı Resim 2.4'te verilmiştir. Resimde görüldüğü gibi kürelerin çapları her birinin üzerinde verilmiştir ve kürelerin dış çapları 46,13 μm ile 153,76 μm arasında değişmektedir. Dolayısıyla bu içi boş küreler nano boyutlarda değildir. Bu resimde kırık küreler, bazı küreler arasındaki bağlantılar, uydulaşmış küreler ve hatta düzensiz geometriye sahip küreler ayrıntılı olarak görülmektedir. Resimde görüldüğü gibi, küresel seramiklerin boyutları farklıdır ve bu farklılık kürelerin üretim yönteminden kaynaklanır. Vakumlu kürelerin yapıları X-ışınları ile incelenmiş ve Şekil 2.1 ve Şekil 2.2'de verilmiştir. Görüldüğü gibi kürelerin yapısında oksijen, alüminyum ve silisyum vardır. Bu elementlerin yüzde olarak ağırlık ve atom sayıları Şekil 2.1 ve Şekil 2.2'de verilmiştir.

Resim 2.4. Vakumlu seramiklerin 100 kez büyütülerek çekilmiş fotoğrafı



Şekil 2.1. Seramiklerin yapısındaki elementlerin yüzde olarak ağırlık ve atom sayıları



Şekil 2.2. Seramiklerin yapısındaki elementlerin yüzde olarak ağırlık ve atom sayıları

Şekil 2.1 ve Şekil 2.2’de görülen “Element” ifadesi vakumlu seramiklerin yapısında bulunan elementler, “Wt %” terimi, vakumlu seramiklerin yapısında bulunan elementlerin ağırlıkça yüzdelerini, “At %” terimi ise, vakumlu seramiklerin yapısında bulunan elementlerin atom sayısı olarak yüzdelerini belirtmektedir. Şekillerde görüldüğü gibi içi boş küresel seramiklerin üretiminde yapısında oksijen, alüminyum ve/veya silisyum bulunan bir bileşimin kullanıldığı söylenebilir. İçi boş küresel seramiklerin yapısında ağırlıkça yaklaşık % 48-50 oranında oksijen, % 2-23 oranında alüminyum ve % 28-48 oranında silisyum bulunmaktadır. İçi boş küresel seramiklerin üretiminde ileride yapılacak çalışmalarda alümina (Al_2O_3) kullanılacaktır.

3. DENEY DÜZENEGİ VE DENEYSEL YÖNTEM

Pozitif bilim yoluyla, doğa ve evreni anlamada güvenilir ve geçerli sonuçlar elde edilmiştir. Olayların anlaşıldığını gösteren en iyi kanıt, bilimsel veriler temelinde, bir kısım doğa ve hatta evren olaylarının kontrol edilmekte olmasıdır. Pozitif bilimin temel ölçütleri; gözlenen ve ölçülebilen olayların iletilebilmesi ve başkalarınca tekrarlanabilmesi, böylece de araştırma hipotezinin sağlanabilmesidir. Pozitif bilim, bilim adamlarınca geliştirilmiş deneysel ve istatistiksel işlemleri içerir. Diğerlerinde olduğu gibi pozitif bilimlerde de bilim adamı olaylar arasındaki nedensellik ilişkilerini, prensip olarak bu ilişkinin keşfine en uygun yöntemi yani deneysel yöntemi kullanarak keşfetmeye çalışır. Deneysel yöntem, temelde bir nedensellik anlayışı içerir ve deneysel teknikler nedensellikle ilgili ölçütleri sağlama amacına yöneliktir. Kuralına uygun gözlemlerden bilim adamı çıkarımlar yaparak, mevcut tüm durumları kapsamayan bir sonuca ulaşır. Deneysel yöntem olayları ve nedenlerini sorgulama ve araştırma yöntemidir.

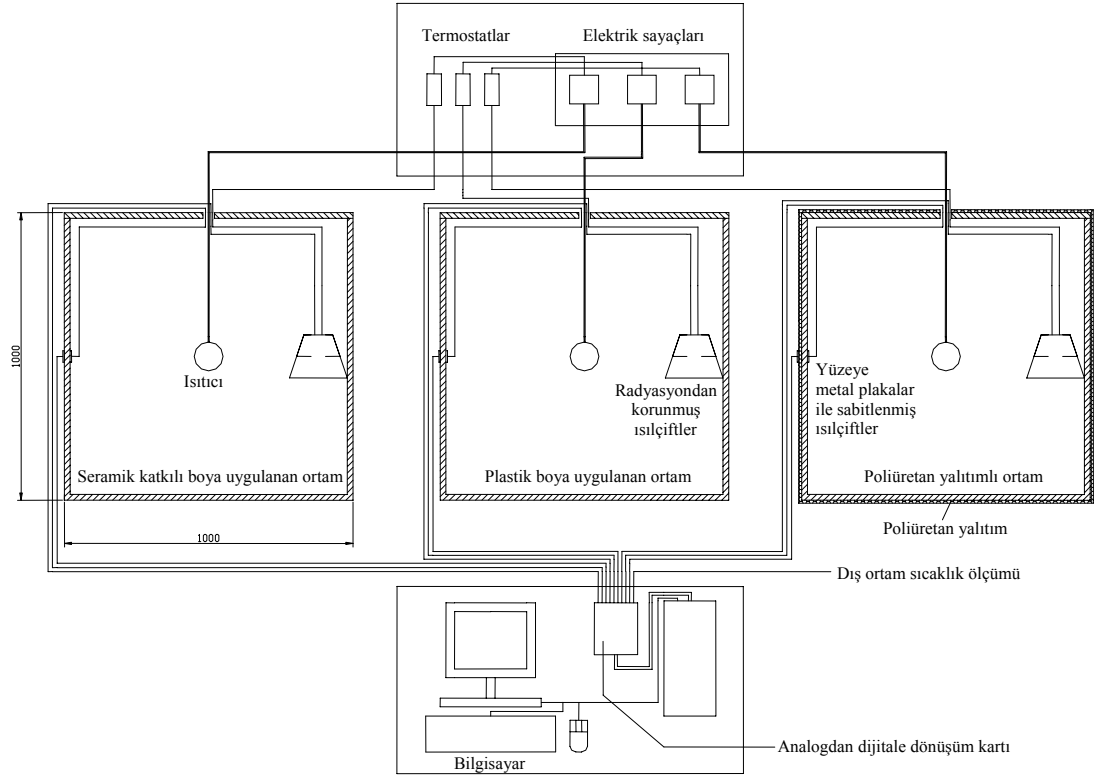
Çalışmanın bu bölümünde, deneysel çalışmanın yapılması için hazırlanan deney düzeneği ve ölçümlerin yapılması için uygulanan deneysel yöntem açıklanmıştır. Deney düzeneği bölümünde, ölçümlerin yapıldığı üç kapalı ortamın hazırlanmasında kullanılan yapı malzemeleri ve özellikleri, oluşturulan kapalı ortamların boyutları tarif edilmiştir. Yüzey ve ortamların sıcaklıklarının belirlenmesinde ve kapalı ortamların elektrik enerjisi tüketimlerinin ölçümünde kullanılan cihazların özellikleri anlatılmıştır. Deneylerde kullanılan cihazların ve kapalı ortamların yerleşimi tarif edilmiştir. Kapalı ortamların iç ortamında, iç yüzeyinde, dış yüzeyinde ve dış ortamında yapılan sıcaklık ölçümleri açıklanmıştır. Ortamların tükettiği elektrik enerjisinin ölçülmesi için kullanılan düzenek tarif edilmiştir. Kullanılan ısıl-çiftlerin sayısı ve tipi, sıcaklık ölçümlerinde kullanılan bilgisayar programı ve ölçülen analog verileri toplayıp dijital verilere dönüştüren donanım cihazı açıklanmıştır. Kapalı ortamların yüzeylerine uygulanan seramik katkılı boya, plastik boya ve haddelenmiş polistiren yalıtım malzemesinin özellikleri sunulmuştur. Kapalı ortamlar içerisindeki sıcaklıkların sabit tutulması için kullanılan termostatların özellikleri anlatılmıştır.

Deneysel yöntem bölümünde ise, yapılan ölçümlerin nasıl gerçekleştirildiği anlatılmıştır. Isıl-çiftlerin yerleştirilmesi açıklanmıştır. Kapalı ortamların sıcaklık ve elektrik enerjisi ölçümleri anlatılmıştır. Kapalı ortamların iç ortamında, iç yüzeyinde, dış yüzeyinde ve dış ortamında yapılan sıcaklık ölçümleri açıklanmıştır. Sıcaklık ölçümlerinde kullanılan bilgisayar programı ve ölçülen analog verileri toplayıp dijital verilere dönüştüren donanım cihazının deneysel çalışmadaki kullanımı açıklanmıştır. Kapalı ortamların yüzeylerine uygulanan seramik katkılı boya, plastik boya ve haddelenmiş polistiren yalıtım malzemesinin özelliklerinin deneysel yöntemine etkisi incelenmiştir. Kapalı ortamlar içerisindeki sıcaklıkların sabit tutulması için kullanılan termostatların deneysel yöntemine etkisi araştırılmıştır.

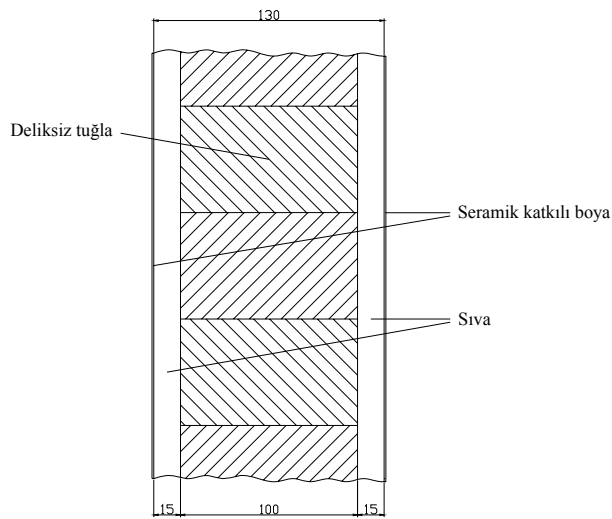
3.1. Deney Düzeneği

Bu çalışmada, vakumlu seramik kürelerin katkı maddesi olarak kullanıldığı boyaların, normal plastik boyaların ve ekstrüde polistirenin yalıtım özelliklerini karşılaştırmak için bir deneysel çalışma yapılmıştır. Seramik katkılı boyalar, plastik boya ve ekstrüde polistiren ile yalıtılan kapalı ortamların tükettikleri elektrik enerjisi karşılaştırılmıştır. Deneysel çalışmada Şekil 3.1’de görüldüğü gibi deliksiz tuğla ve sıvadan yapılmış üç adet kapalı ortam oluşturulmuştur. Bu kapalı ortamların çeperleri Şekil 3.2’de görüldüğü gibi 13 cm kalınlığında ve iç boyutları 1mx1mx1m’dir. Duvar kalınlıkları kumpas ile ölçülmüştür ve üç kapalı ortamın da duvar kesitlerinin aynı olduğu belirlenmiştir. Bu üç ortamdan birinin çeperleri plastik boya ile boyanırken, ikincisi önce ABD’de Hy-Tech Thermal Solutions firmasının ürettiği, vakumlu seramik kürelerin içerisinde yaklaşık % 18 oranında bulunduğu, #85 Barrier Coat Radiant Barrier, Radiation Control Kaplama astar boya ile, ardından üzerine yine aynı firmaca geliştirilen hammaddelerin Türkiye’de Bortek Termal Boya Ticaret Ltd. Şti. tarafından plastik boya ile yaklaşık % 18 oranında karıştırılması ile elde edilen RC#233 yalıtım boyası ile ve üçüncü kapalı ortam ise 3 cm kalınlığında haddelenmiş (ekstrüde) polistiren ile yalıtılmıştır. Seramik katkılı boya ile yalıtılan ortamın çeper kesiti Şekil 3.2’de görülmektedir. Deneylerde kapalı ortamların iç ortam sıcaklıkları 200 W’lık ampullerle sağlanmış ve belirlenen sıcaklıklar ELİMKO E-48 Serisi termostatlarla sabit tutulmuştur. Ampullerin

tükettiği toplam elektrik enerjisi KAAN BA 1116F Model bir telli, çok tarifeli akıllı elektrik sayaçları ile ölçülmüştür.



Şekil 3.1. Deney düzeneğinin şematik görünümü



Şekil 3.2. Seramik katkılı boya uygulanan ortamın çeper kesiti

Deneyler sırasında kapalı ortamların iç ve dış ortam, iç ve dış çeper sıcaklıkları LabVIEW veri değerlendirme sistemine bağlı 10 adet T tipi ısıl-çift (thermo-couple) ile ölçülmüştür. Termostatlarla üç kapalı ortamın iç sıcaklıklarını sabit tutmak için, 3 adet ısıl-çift kullanılmıştır. Isıl-çiftler, analog verileri dijital ortama dönüştüren NI AT-MIO-16XE-50 tipindeki bir veri toplama kartına bağlanmıştır. Kapalı ortamların iç ortam sıcaklıklarının ölçülmesinde kullanılan ısıl-çiftler Şekil 3.1’de görüldüğü gibi ışıınımdan etkilenmeyecek şekilde kapalı ortamların duvarlarına yerleştirilmişlerdir. Dijital verilerin zamanla değişimi çok sayıda veri toplama-işleme özelliğine sahip ve grafik temelli olan LabVIEW veri değerlendirme sistemi kullanılarak bilgisayar ekranında gözlenmiştir. Kapalı ortamların ısıtılmasında 200 W’lık ampuller kullanılmış, Çizelge 3.1’de görüldüğü gibi belirlenen 28, 30 ve 40 °C iç ortam sıcaklıkları termostatlar ile kontrol edilmiştir.

Çizelge 3.1. Deneysel çalışmada iç ve dış ortam sıcaklıkları

Deney no	Dış ortam sıcaklığı (°C)	İç ortam sıcaklığı (°C)
1	24	28
2	26	30
3	23	40

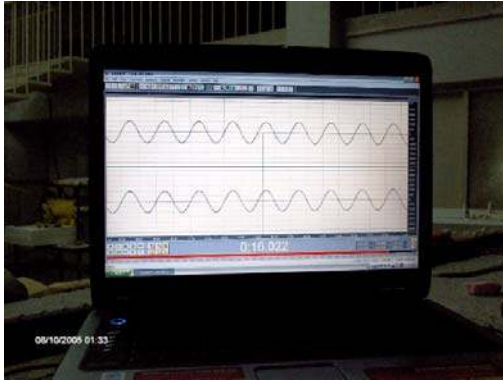
3.2. Deneysel Yöntem

Bu çalışmada, üç adet kapalı ortamın ısı ve ses yalıtımı özellikleri karşılaştırılmıştır. Üç kapalı ortamda deneyler aynı anda başlatılmıştır. Deney düzeneği çalıştırıldığında birbirine bağlı ısıtıcılar ve elektrik sayaçları eş zamanlı olarak çalışmışlardır. Isı yalıtımı özelliklerinin belirlenmesi için, sıcaklık ve elektrik enerjisi tüketimi ölçümleri yapılmıştır. Deneyler kapalı ortamlar içerisinde üç farklı ortam sıcaklığı oluşturularak tekrarlanmıştır. 1mx1mx1m boyutlarındaki kapalı ortamların iç sıcaklıkları sırasıyla 28 °C, 30 °C ve 40 °C’de sabit tutularak gerçekleştirilmiştir. Kapalı ortamlar içerisinde ve dışarısında, sıcaklık ölçümleri National Instruments Firması’nın geliştirdiği NI AT-MIO-16XE-50 tipindeki veri toplama kartı ile çok sayıda veri toplama-işleme özelliğine sahip ve grafik temelli olan LabVIEW veri değerlendirme sistemi kullanılarak yapılmıştır. LabVIEW programı ile ölçülen

analog veriler dijital olarak bilgisayar ortamına aktarılmıştır. Sıcaklık ölçümleri için toplam 13 adet ısıl-çift kullanılmıştır. Isıl-çiftler üç kapalı ortamın iç ve dış yüzeyleri ile iç ve dış ortama yerleştirilmiştir. İç ortam ölçümlerini yapan ısıl-çiftler kapalı ortamlar içerisinde iç yüzeylerden birisinin orta noktasına tutturulmuştur. Ancak, yapıştırılmamıştır. Üstleri beyaz bir malzeme ile deney düzeneği bölümünde Şekil 3.1’de görüldüğü gibi kapatılmıştır. Bu ampullerden kaynaklanan ışınmı engellemiştir. Diğer ısıl-çiftler metalik bir yapıştırıcı ile yüzeylere yapıştırılmıştır. Sıcaklık ölçümleri kapalı ortamların iç ve dış yüzeylerinin orta noktalarından yapılmıştır. Kapalı ortamların ısıtılması için 200 W güç ile çalışan ampuller kullanılmıştır. Sırasıyla, 28 saat, 83 saat ve 24 saat süresince seramik katkılı boya, plastik boya ve polistiren ile yalıtılan kapalı ortamlar laboratuvar şartlarında üç deney yapılarak test edilmiştir. Kapalı ortamların iç ortam sıcaklıkları termostatlar ile sabit tutulmuştur. Deneysel çalışmada kapalı ortamların tükettikleri elektrik enerjisi her kapalı ortam için ayrı bir elektrik sayacı ile ölçülmüş ve kaydedilmiştir. Elektrik enerjisi tüketimleri 15 dakika aralıklarla yapılmıştır. Sıcaklık ölçümleri 5 saniye aralıklarla yapılmıştır. Bu veriler veri toplama donanımı ile bilgisayar ortamına aktarılmıştır. Elde edilen veriler tablolar ve grafikler halinde çalışmanın 6. bölümünün deneysel sonuçlar ile ilgili kısmında verilmiştir.

Çalışmada yapılan ilk deneyde kapalı ortamların iç ortam sıcaklıkları 28 °C’de sabit tutulmuştur. Bu deneyde, dış ortam sıcaklığı 24 °C olarak ölçülmüştür. Kapalı ortamların iç ve dış ortam sıcaklıkları arasındaki fark 4 °C olmuştur. İkinci deneyde kapalı ortamların iç ortam sıcaklıkları 30 °C’de sabit tutulmuştur. Bu deneyde, dış ortam sıcaklığı 26 °C olarak ölçülmüştür. Kapalı ortamların iç ve dış ortam sıcaklıkları arasındaki fark 4 °C olmuştur. Üçüncü deneyde kapalı ortamların iç ortam sıcaklıkları 40 °C’de sabit tutulmuştur. Bu deneyde, dış ortam sıcaklığı 23 °C olarak ölçülmüştür. Kapalı ortamların iç ve dış ortam sıcaklıkları arasındaki fark 17 °C olmuştur. Vakumlu küresel seramiklerin ısı yalıtım özelliklerinin incelenmesi için yapılan üç deney yukarıda açıklanan ve Çizelge 3.1’de görülen laboratuvar şartlarında gerçekleştirilmiştir.

Vakumlu küresel seramiklerin ısı yalıtım özelliklerinin incelenmesi için yapılan deneysel çalışmadan sonra ısı yalıtımı amacı ile kullanılan seramik katkılı boya ların ses yalıtım özellikleri deneysel olarak incelenmiştir. Ses yalıtım özelliklerinin belirlenmesi için yapılan deneyler sırasında 63 Hz, 125 Hz, 250 Hz, 500 Hz, 1000 Hz, 2000 Hz, 4000 Hz, 8000 Hz frekansları için ölçümler yapılmıştır. Konutlar için önemli olan frekans aralığı 63 Hz-1000 Hz'dir. Bu nedenle, deneysel çalışmada 63 Hz-1000 Hz frekans aralığında yapılan ölçümler dikkate alınmıştır. Ölçümler sonucunda elde edilen veriler tablolar halinde çalışmanın 6. bölümünün deneysel sonuçlar ile ilgili kısmında verilmiştir.



(a)



(b)

Resim 3.1. Cool Edit programı ile üretilen sinüzoidal ses

Resim 3.1'de görülen Cool Edit programı ile kapalı ortamlar içerisinde sinüzoidal bir ses üretilmiştir.



(a)



(b)

Resim 3.2. Ses geçiş kaybı ölçümü

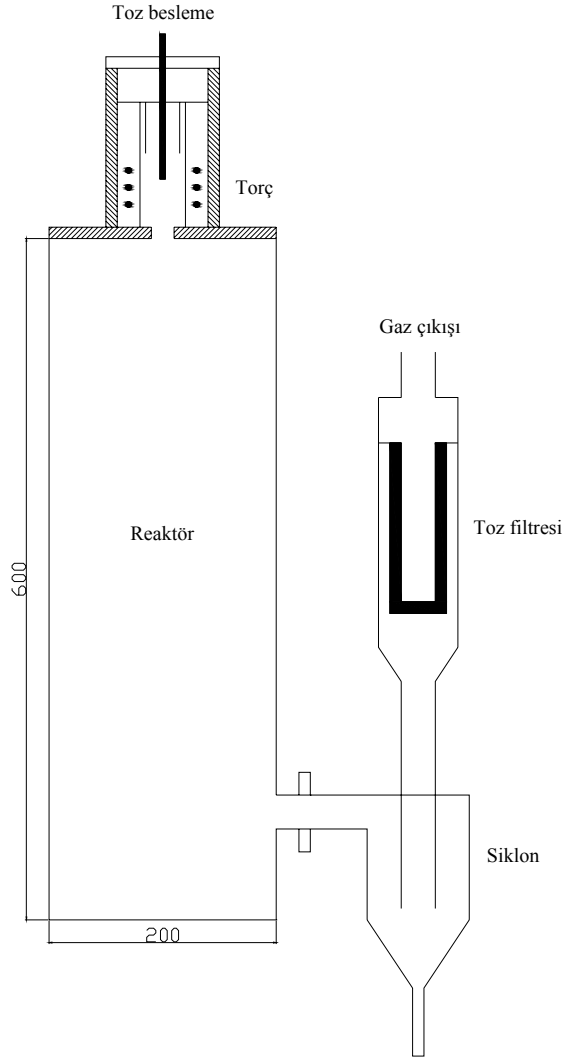
Ses seviyesi ölçümleri RS 104 model, 63 Hz-8 kHz frekans aralığında ölçüm yapabilen Resim 3.2’de görülen RETEC INSTRUMENTS firmasının geliştirdiği ses seviyesi ölçüm cihazı ile yapılmıştır.

4. ISIL PLAZMA YÖNTEMİ İLE VAKUMLU SERAMİK KÜRELERİN TEORİK ANALİZİ

4.1. Giriş

Bölüm 3’te, yapılan deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar ışığında, NASA’da üretilen ve Amerikan Enerji Bakanlığı tarafından da kullanımı teşvik edilen içi boş vakumlu mikro seramik kürelerin ısı yalıtımı amacı ile kullanılabileceği görülmektedir. Ancak, vakumlu mikro seramik kürelerin ithal edilerek ısı yalıtımı uygulamalarında kullanılmaları pahalı bir yöntemdir. Dolayısıyla, ülke ekonomisi göz önüne alındığında vakumlu mikro seramik kürelerin Türkiye’de üretilmesi daha doğru olacaktır. Vakumlu mikro seramiklerin üretimi için literatürde farklı yöntemler önerilmiştir. Tanecik boyutları (çapları) 5-200 μm arasında değişen küresel tozların seri şekilde üretilibilmeleri için, gerekli enerji sağlandığında yüksek sıcaklıkta iyonize olarak yüksek elektrik iletkenliğine ulaşan gazlardan oluşan ısı plazmaları kullanılabilir. Ülkemizde üretimleri yapılmayan küresel tozların üretimi için literatürde verilen ısı plazma sistemleri incelenmiştir. Vakumlu seramik kürelerin üretimi için kullanılabilecek ve güncel bir yöntem olduğu için bu çalışmada önerilecek sistem indüktif bağlaşımlı ısı plazma sistemidir. İndüktif bağlaşımlı ısı plazma sistemleri 50 yıldan fazla süredir incelenmekte ve NASA’nın araştırmaları için 1970’lerden beri kullanılmaktadır. Şekil 4.1’de şematik olarak görülen indüktif bağlaşımlı ısı plazma sistemi toz besleme ünitesi, indüktif bağlaşımlı torç, reaktör, siklon, toz filtresi ve gaz çıkış birimlerinden oluşmaktadır. Şekilde de görülen indüktif bağlaşımlı ısı plazma sistemini oluşturan birimlerin boyutları ve kapasiteleri üretilmesi planlanan içi boş kürelerin boyutlarına ve birim zamanda üretilmesi planlanan toz miktarına bağlı olarak belirlenebilmektedir. İndüktif bağlaşımlı ısı plazma sistemi, eksenel toz beslenebilmesi ve tozun uzun süre elektrik boşalma bölgesinde kalabilmesi gibi avantajlara sahiptir. İndüktif bağlaşımlı ısı plazma sistemlerinde, eksenel toz besleme özelliklerinden dolayı toz ve gaz aynı yönde plazma bölgesine girer. Böylece plazma sistemine beslenen tozun yönünü ve hızını, taşıyıcı gaz ve plazma gazının parametrelerini değiştirerek kontrol etmek mümkün olabilir. Plazma sistemine beslenen tozların uzun süre elektrik boşalma bölgesinde

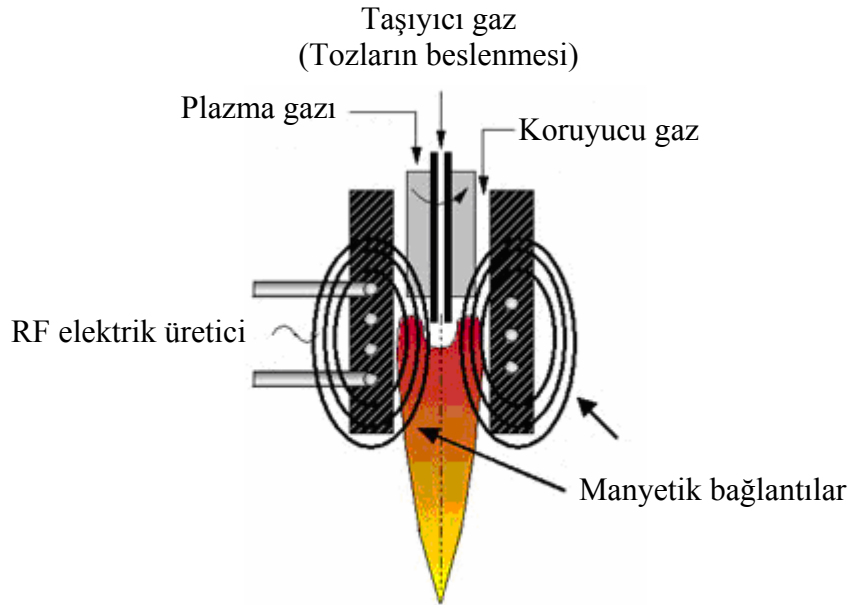
kalması tozların daha çabuk istenilen yüksek sıcaklıklara ulaşmalarını ve erimelerini sağlar.



Şekil 4.1. İndüktif bağlaşımlı plazma sisteminin şematik görünümü

Elektrik boşalma bölgesi Şekil 4.2 ve 4.3'te görülen, su soğutmalı olarak tasarlanan indüktif bağlaşımlı ısıl plazma torçu içerisinde kalan bölgedir. Şekilde görülen indüktif bağlaşımlı ısıl plazma torçu üzerinde bulunan manyetik bağlantılara RF elektrik akım üretici ile RF frekans aralığında frekanslara sahip elektrik akımı sağlanabilir. İndüktif bağlaşımlı ısıl plazma torçu içerisinde, elektrik akımının etkisini dokunmaksızın manyetik alan aracılığıyla gösterdiği su soğutmalı endüksiyon bobinlerinin bulunduğu bölgenin iç çeperinde iki adet seramik tüp

bulunmaktadır. Seramik tüpler indüktif bağlaşımlı ısı plazma torçunun yüksek sıcaklıktan zarar görmesini engellemektedir. İndüktif bağlaşımlı plazma torçlarında plazma sisteminde kullanılan gazın sisteme girişini sağlayan, uygulanacak işleme bağlı olarak, boyutları ve tipleri değiştirilebilen lüleler vardır. İndüktif bağlaşımlı ısı plazma torçunun üst kısmından toz besleme ünitesinde bulunan püskürtme probu ile beslenen tozların ve taşıyıcı gazın, plazma gazının ve koruyucu gazın plazma sistemine girişi sağlanır. Bu kısımdan plazma sistemine belirli bir debi ile beslenen tozlar seramik ya da metal oksit tozları olabilir.



Şekil 4.2 İndüktif bağlaşımlı plazma torçunun birimleri



Resim 4.1 İndüktif bağlaşımlı plazma torçu

Önerilen deney düzeneğinde kullanılması planlanan Şekil 4.2’de görülen indüktif bağlaşımlı ısı plazma torçunda plazma gazı, taşıyıcı gaz ve koruyucu gaz olarak çabuk iyonize olduğu için argon gazı kullanılması planlanmaktadır. İndüktif bağlaşımlı ısı plazma torçuna giren plazma gazı plazma oluşumunu sağlayan gazdır, taşıyıcı gaz tozların plazma sistemine aktarılmasını ya da beslenmesini sağlayan gazdır ve koruyucu gaz indüktif bağlaşımlı plazma torçu içerisinde oluşan plazmanın yüksek sıcaklığından torç ve reaktör çeperlerinin korunmasını sağlayan gazdır. Beslenen tozlar ile taşıyıcı ve koruyucu gaz indüktif plazma torçunu terk ettikten sonra Resim 4.2’de görülen reaktöre ulaşır. Resimde de görüldüğü gibi beslenen tozlar ile taşıyıcı ve koruyucu gaz genellikle çelik malzemeden yapılan reaktörden geçer. Reaktör için kütle dengesi,

$$\dot{m}_{\text{plazma gazı}} + \dot{m}_{\text{koruyucu gaz}} + \dot{m}_{\text{taşıyıcı gaz}} + \dot{m}_{\text{toz}} = \dot{m}_{\text{toplam}} \quad (4.1)$$

şeklinde yazılabilir.



Resim 4.2. 100 kW güç ile çalışan indüktif bağlaşımlı ısı plazma sistemi reaktörü

Plazma sisteminde reaktör boyunca akan plazma gazına plazma jeti denir. Plazma jeti sıcaklığı 1000 K–10000 K arasında değişebilmektedir. Literatürden elde edilen veriler temelinde, taneciklerin en iyi şekilde küreselleşmesi için uygun plazma parametrelerini seçmek mümkün olabilmektedir. Küreselleşme, taneciklerin plazma

jet i içerisinde kalarak erimeleri ve plazma jetinden çıkarken soğumaları ile gerçekleşmektedir. Küreselleşmenin hangi oranda gerçekleşeceği taneciklerin plazma içerisinde kalma zamanları ve erime zamanlarına bağlıdır. Taneciğin toz şeklinde plazma sistemine girmesi ile plazma jetinden çıkması arasında geçen süreye taneciğin plazma içerisinde kalma zamanı denir. Taneciğin toz şeklinde plazma sistemine girişi ile erime sıcaklığına ulaşması arasında geçen süreye taneciğin erime zamanı denir. Literatürde, taneciklerin plazma içerisinde kalma zamanları ve erime zamanları teorik olarak hesaplanabilmekte, taneciklerin plazma içerisinde kalma zamanları (t_r) ve erime zamanlarının (t_m) taneciklerin boyutlarının artışıyla arttığı ve taneciklerin plazma içerisinde kalma zamanları (t_r) kadar erime zamanlarının (t_m) da artan sıcaklıkla azaldığı ifade edilmektedir. $t_m < t_r$ ise ve taneciklerin serbest düşüşü ve soğuması gerçekleşirse, tüm taneciklerin erimesi ve küreselleşmesi olasılığı vardır. Literatürde, büyük boyutlu taneciklerin erimesinin, dolayısıyla küreselleşmesinin, daha uzun zaman gerektirdiği ifade edilmektedir. Taneciklerin erimesi ve reaktörde serbest düşüşleri küreselleşmelerine sebep olurken, bazı tanecikler küreselleşemeyebilirler. Küreselleşebilen ve küreselleşemeyen tanecikler reaktörden geçtikten sonra plazma sisteminin siklon birimine ulaşırlar. Plazma gazının plazmanın olduğu indüktif bağlaşımlı torç bölgesinden çıkışından sonraki sistem içerisindeki akışından etkilenmeyen tanecikler siklon bölgesinde birikir. Dolayısıyla, siklon birimi üretilen tozların toplanması için kullanılır. Plazma sisteminde siklondan sonra gelen ve gazın dışarı atılmasını sağlayan gaz çıkışından önce bulunan birim toz filtresidir. Plazma gazının indüktif bağlaşımlı plazma sistemi içerisindeki akışından etkilenen, boyutları siklon bölgesinde biriken taneciklere göre daha küçük olan, hafif tanecikler toz filtresi ile yakalanırlar. Dolayısıyla, toz filtresi gaz içerisinde bulunan taneciklerin plazma sisteminden dışarı atılmasını engeller.

Eriyen tozların indüktif bağlaşımlı plazma sistemi içerisindeki hareketi sırasında ısı, taşınım ile plazmadan tozların yüzeyine aktarılırken, ışıınım yoluyla tozların yüzeyinden ısı kaybı gerçekleşir. İndüktif bağlaşımlı plazma sistemi içerisinde, küreselleşme işlemi temel olarak beslenen tozların ısıtılması ve eritilmesi şeklinde gerçekleşmektedir. İleride yapılacak deneysel çalışmada, plazma sisteminde alümina (Al_2O_3) tozlarının kullanılması planlanmaktadır. Eriyen alümina tozları 200 mm

çapındaki ve 600 mm yüksekliğindeki reaktörde düşerken kademeli olarak sıcaklıkları düşer. Eriyen alümina tozlarının reaktör tabanına ulaşmadan katılaşması beklenir. Genişleyen lüleler tozların küreselleşmesi için uygundur. Daralan lüleler kaplama uygulamaları için uygundur. Daralıp genişleyen (supersonic) lüleler ise, nano boyutlarda malzemeler ve kaplamalar ile ilgili uygulamalarda kullanılır [4].

4.2. Bu Konuda Yapılan Çalışmalar

Kumar ve Selvarajan 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 erime süreleri hesaplanmış ve bu sürelerde tozların küreselleşme oranları belirlenmiştir. Küreselleşmenin büyük oranda tanecik boyutuna ve plazma jeti sıcaklığına bağlı olduğu görülmüştür [5].

Ramasamy ve Selvarajan ısı plazma içerisinde tozların davranışını incelemişlerdir. Çalışmada, taneciklerin ısı plazma içerisinde kalma süreleri ve hızları için bir yaklaşım geliştirilmiştir. Farklı ısı güçlerinde, alümina taneciğinin hızı, plazma içerisinde kalma zamanı, plazma içerisine püskürtülme hızı, boyutu, gaz akış oranı, lüle uzunluğu ve lüle çapı belirlenmiştir. Dolayısıyla, farklı plazma sıcaklıkları için bir argon plazma içerisindeki taneciğin davranışı belirlenmiştir. Tanecik boyutu küçültülerek, giriş gücü ve tozun plazma içerisinde kalma süresi arttırılarak plazma içerisinde iken tozlara olan ısı aktarımının arttırılabileceği sonucuna ulaşılmıştır [6].

Ramasamy ve Selvarajan bir başka çalışmalarında tanecikler arasındaki etkileşimi ihmal ederek, ısı plazma ile içerisine püskürtülen bir tanecik arasındaki ısı aktarımını ve ısı plazma içerisindeki taneciğin buharlaşmasının plazmadan taneciğe olan ısı aktarımının etkisini sayısal olarak incelemişlerdir. 3000-25000 K arasında değişen sıcaklıklarda azot plazması ile argon plazması karşılaştırılmış, alümina ve tungsten taneciği ile plazma arasındaki ısı ve hidrodinamik etkileşim incelenmiştir.

Buharlaşma, taneciğe olan ısı transferini azaltmaktadır ve bu etki buharlaşma gizli ısısı düşük malzemelerde daha fazla görülmektedir. Ar, N₂ ve Ar+H₂ gibi gazlardan oluşturulan plazmadan 50  m yarıçapındaki taneciğe iletimle olan ısı aktarımı hesaplanmış ve tanecikten ışınlımla olan ısı aktarımıyla karşılaştırılmıştır. Analiz sonucunda, tanecikten çevresine ışınlımla olan ısı transferi, plazmadan taneciğe iletimle olan ısı transferiyle karşılaştırıldığında ihmal edilebilecek düzeyde olduğu görülmüştür. Bir toz parçasının kaynama noktasına ulaşması için gerekli en düşük plazma sıcaklığı hesaplanmıştır. Bu çalışmada, alümina, tungsten, grafit malzemeleri ile Ar, N₂, H₂ ve Ar+H₂ 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 ışınlımla olan ısı kayıplarının yayma oranının k  k toz parçacıkları seçilerek düşürülmesi gerektiğini göstermektedir [7].

K roly ve Sz p lgyi 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, k  k taneciklerin oldukça çok buharlaşmasına veya büyük taneciklerin yeterince erimemesine sebep olduğu gözlemlenmiştir. RF ısı plazmalar yoğun veya içi boşluklu oksit seramik mikro kürelerin üretilmesi için uygun cihazlar olduğu belirtilmiştir. I i boş seramik kürelerin özel  n işlemlerden geçirilmiş tozlardan hazırlanabileceği ve küresel alüminaların düşük maliyetli alüminyum oksit veya alüminyum hidroksitlerden  retilenilebileceği ifade edilmiştir. Ayrıca, giriş gücünün düşürülmesinin ya da taneciklerin plazma içerisinde kalma süresinin kısaltılmasının büyük taneciklerin küreselleşmesini engelleyebileceği gözlenmiştir [8].

McKelliget ısı plazma torçu içerisinde gözenekli taneciklerin erime, buharlaşma süreçleri ve küreselleşmesi için bir analitik yöntem geliştirmiştir. Çalışmada, katı/gözenekli durum ve erimiş/gözeneksiz durum arasındaki tanecik yoğunluğu arasındaki farklılık, erime süresince önemli hacim değişimleri olabileceğini ve erimiş

durumdaki fiziksel özelliklerin yeniden katılaşma süresince sabit kalacağından bahsetmektedir. Tanecikler içerisindeki sıcaklık dağılımı bir entalpi eşitliğinden hesaplanırken, taneciklerin fiziksel özellikleri gözenekli ortam teorisinden yararlanılarak hesaplanmıştır. DC ve RF plazma torçları içerisinde alümina taneciklerinin davranışı için hesaplamalar yapılmıştır [9].

Chen ve Li 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 torçundaki 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 [10].

Cochran 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 [2].

Ford sol-gel yöntemi ile içi boş taneciklerin üretimini incelemiştir. Nano boyutlarındaki bir oksit tozu su içerisine dağınık bir şekilde atılarak bir çözelti elde edilir. Daha sonra bu çözelti, mikron boyutlarındaki taneciklerden oluşan bir karışım meydana getirmek için, organik bir sıvıyla karıştırılır. Sonuçta oluşan karışıma alkol eklenir. Diğer yöntemlerle karşılaştırıldığında, sol-gel yöntemi üretilen tozların boyut dağılımının daha iyi kontrol edilmesine izin verir [11].

Proulx ve arkadaşları yoğun yükleme koşullarında indüktif bağlaşımlı plazma sistemi içerisindeki plazma-tanecik etkileşimini incelemişlerdir. İndüktif bağlaşımlı bir plazma içerisinde tozların davranışı modellenmiştir. Hesaplamalarda bakır ve alümina tozları ve plazma gazı olarak atmosferik basınçta argon kullanılmıştır [12].

Gauvin plazma uygulamaları için yeni reaktörler geliştirmiştir. Verimli ve güvenilir torçların 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 [13].

Proulx ve arkadaşları indüktif bağlaşımlı ısı plazma sistemindeki ışınlama ile aktarılan enerjiyi incelemişlerdir. 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 [14].

Ye ve arkadaşları indüktif bağlaşımlı RF plazma torçu içerisindeki türbülans oluşumunu, $k-\epsilon$ türbülans modeliyle sıcaklık ve yoğunluk değişimlerinin plazma türbülansı ve enerji transferi üzerine etkileri incelemişlerdir. Çalışmada, plazmanın çalışma parametrelerinin plazma türbülansı üzerine etkileri tartışılmıştır [15].

Rahmane ve arkadaşları teorik ve deneysel olarak indüktif plazma reaktörü içerisinde kütle transferini incelediler. Plazma akışına aksel yönde püskürtülen gazın konsantrasyonu reaktör eksen boyunda ölçülmüştür. Sayısal türbülans modeli ile konsantrasyon, sıcaklık ve akış alanları hesaplanmıştır. Ölçülen konsantrasyon profilleri ve sayısal modelin sonuçları karşılaştırılmıştır [16].

Fizsdon plazma alevi içerisinde metal tozlarının erimesini ve tanecikler ile plazmanın termofiziksel 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 [17].

Dilawari ve Szekely plazma reaktörleri içerisindeki akışı ve ısı aktırımını incelemiş, reaktör içerisindeki hız ve sıcaklık profillerini hesaplamışlardır. Bu çalışmada, içerisine sürekli gaz püskürtülen bir plazma jet sistemi içerisinde akış, konsantrasyon ve ilgili sıcaklık alanlarını tanımlamak için bir analitik yöntem geliştirilmiştir. Çalışmanın amacı plazma jetinin dairesel hareketinin plazma işlemi üzerindeki etkisini incelemektir [18].

Jiang ve Boulos tungsten ve molibden tozlarının indüktif bağlaşımlı ısı plazma ile küreselleşmesini incelediler. Tungsten ve molibdenin indüktif bağlaşımlı ısı plazma içerisindeki erime, buharlaşma, oksitlenme ve katılaşma davranışlarını belirlemişlerdir. Basıncın küreselleşme ve oksitlenme üzerine etkisi ele alınmıştır. Molibdenin erime sıcaklığının tungstenden daha düşük olmasına rağmen, aynı toz besleme oranında ve aynı plazma şartlarında tungstenden daha az sayıda molibden tozunun küreselleştiği gözlenmiştir [19].

Bica 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 $\pm \% 16$ hata oranında uyum içerisinde olduğu görülmüştür [20].

Moon ve arkadaşları plazma torçunun 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 N₂ gazları kullanılmıştır. Sonuçlar 30°'nin en uygun giriş açısı olduğunu göstermiştir [21].

Shanmugavelayutham ve Selvarajan 40-100 µm boyutlarındaki nikel tozlarını plazma yöntemi ile küreselleştirmişlerdir. İşlenmiş taneciklerin küresel şekillerini SEM (Scanning Electron Microscopy) ve optik mikro görüntüleme yöntemleriyle elde etmişlerdir. Çalışmada, plazma ile tozların küreselleşebileceğini ve plazma sıcaklığının küreselleşmenin kalitesini etkileyen önemli bir faktör olduğunu göstermişlerdir [22].

O'Dell ve arkadaşları küresel ve alaşımlı tozlar üretmek için kullanılan PAS (Powder Alloying and Spheroidization) yöntemi ile erime ve gerilme kuvvetlerinin etkisiyle küreselleşmenin gerçekleştiği plazmayı metal tozları ile beslemişlerdir. Bu çalışmada, erime süresince alaşımlandırma gerçekleşmiş ve tanecikler plazma dışına çıkınca hızlı bir şekilde katılarak küreselleşmişlerdir. PAS yöntemiyle ısıya dayanıklı olmayan metallerin de küreselleşebileceğini sunmuşlardır [23].

Zhang ve arkadaşları sol-gel yöntemiyle oda sıcaklığında içi boş titanya (TiO₂) 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 [24].

Károly ve arkadaşları farklı tanecik boyutlarındaki Al(OH)₃ (gibbsite) 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)₃ taneciklerinin küreselleşme için büyük boyutlarda olduğu gözlenmiştir. Yüksek sıcaklıklardaki ısı plazma işlemleri ile küreselleşmenin mümkün olduğu görülmüştür. 12 µm boyutlarında püskürtülen taneciklerin, erimesi ve soğuması sonucunda, belirli bir miktarının mikro küre taneciklere dönüştüğünü gözlemişlerdir [25].

Károly ve Szépvölgyi RF ısı plazma yöntemiyle içi boş alumina mikro kürelerin elde edilmesini incelemişlerdir. Farklı yapılardaki 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 [26].

Bica 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 kütesini hesaplanmasında kullanılmıştır. Ayrıca, mikro kürelerin çapları ve duvar kalınlıkları hesaplanmıştır [27].

Reed 1960'lı yılların başlarında MIT'de Lincoln laboratuvarlarında yaptığı çalışmalarda, indüktif bağlaşım yöntemi ile plazma oluşumunu tanımlamıştır. Plazmanın oluşumu için argon gazı kullanımını ve argon ile ayrı ayrı helyum, hidrojen, oksijen ve hava karışımlarının kullanımını incelemiştir. Bu çalışmalarda, 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, ışıınım 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 [28].

4.3. Teori

Kumar ve Selvarajan tarafından yapılan çalışmalara göre, plazma teknolojisi malzemelerin ısıt işlemlerinde geniş bir spektruma sahiptir. Plazmalar aşağıda verilen üç amaçla kullanılırlar [5].

1. Zararlı malzemelerin yok edilmesi
2. Malzemelerin hatalarının düzeltilmesi
3. Atıkların sentezi

Mikron boyutlarındaki küresel metal ve seramik taneciklerin plazma işlemi ile üretimi yeni bir tekniktir. Bu teknikte, tozlar bir plazma jeti içerisinde taşıyıcı gaz ile taşınmaktadır. Metal tozların küresel tanecikler halini alabilmesi için tozlar eritilir ve daha sonra katılaştırılır. Plazma reaktörü içerisinde oluşan plazma jeti yüksek sıcaklıklara çıkmaktadır. Yüksek sıcaklıklarda, tozlar erir ve düşüşleri sırasında yüzey gerilim kuvvetlerinin etkisi ile küreselleşirler [9].

Çalışmanın bu bölümünde toz metalürjisi malzemelerinin küreselleşmesinin bir ısıt plazma sistemi içerisindeki teorik analizi sunulmuştur. Momentum ve enerji denklemleri kabuller yapılarak çözülmüştür. Plazma akışı içerisinde taneciğin hızı, sıcaklığı, erime zamanı ve plazma içerisinde kalma zamanı ile plazma gazının hızı ve sıcaklığı hesaplanmıştır. Bu hesaplamalar için FORTRAN dilinde bir program yazılmış ve elde edilen sonuçlar tablolar ve grafikler halinde 6. bölümde teorik sonuçlar kısmında verilmiştir.

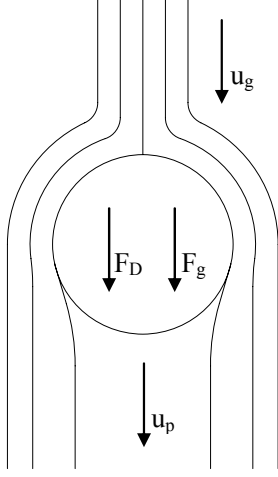
Tek yönlü plazma akışı içerisindeki taneciğin hareketi için aşağıdaki eşitlik yazılabilir.

$$F_{net} = ma \quad (4.2)$$

Burada, F_{net} taneciğe etki eden net kuvvettir ve Eş. 4.2,

$$m \frac{dV}{dt} = F_D + F_g + F_A + F_B + F_S + F_M + F_c \quad (4.3)$$

şeklinde ifade edilebilir.



Şekil 4.3. Tek yönlü plazma akışı içerisindeki tanecik üzerine etki eden kuvvetler

Bu bağıntıdaki m taneciğin kütlesi, V taneciğin hızı, t zaman, F_D sürüklenme kuvveti, F_g yerçekimi kuvveti, F_A eklenen (taşınan) kütle kuvveti, F_B Basset kuvveti, F_S Staffman kuvveti, F_M Magnus kuvveti ve F_c çarpışma kuvvetini göstermektedir. Bu kuvvetler dışında taneciğe etki eden diğer kuvvetler içerisinde, elektrostatik, Van der Waals, manyetik ve benzeri kuvvetler vardır. Analizde küçük olduğu için bu kuvvetler ihmal edilmiştir.

Plazma akışı içerisinde taneciğe etki eden sürüklenme ve yerçekimi kuvvetleri ile tanecik ve plazma gazının akış hızları Şekil 4.3'te verilmiştir. Şekilde de görüldüğü gibi tek yönlü akışta, plazma gazı ile tanecik aynı yönde hareket etmektedir ve plazma jetinin hızı (u_g), taneciğin hızından (u_p) büyüktür.

Analizde taneciğin plazma akışı içerisindeki hareketi için aşağıdaki varsayımlar yapılmıştır:

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

Yukarıda yapılan kabuller kullanılarak Eş. 4.3,

$$m_p \frac{du_p}{dt} = F_D + m_p g \quad (4.4)$$

şeklinde yazılabilir. Bu eşitlikte; m_p plazma içerisindeki taneciğın kütlesi, u_p taneciğın hızı ve F_D taneciğe etki eden sürüklenme kuvvetidir. Eş. 4.4'teki sürüklenme kuvveti,

$$F_D = C_D A_{kp} \frac{\rho_f}{2} u_r (u_g - u_p) \quad (4.5)$$

şeklinde tanımlanır [29]. Bu eşitlikte; C_D sürüklenme katsayısı, ρ_f plazmanın film sıcaklığındaki yoğunluğudur. A_{kp} küresel taneciğın akışa dik izdüşüm alanıdır ve

$$A_{kp} = \frac{\pi d_p^2}{4} \quad (4.6)$$

şeklinde tanımlanır.

Eş. 4.5'teki u_g ve u_p sırasıyla plazma jetinin ve taneciğın hızıdır. u_r tek yönlü akış için taneciğın plazma gazına göre bağıl hızıdır ve

$$u_r = \sqrt{(u_g - u_p)^2 + (v_g - v_p)^2 + (w_g - w_p)^2} \quad (4.7)$$

şeklinde tanımlanır [30]. Yapılan varsayımlara uygun olarak Eş. 4.7,

$$u_r = \sqrt{(u_g - u_p)^2} = |u_g - u_p| \quad (4.8)$$

şeklinde yazılabilir. Eş. 4.8 Eş. 4.5'te kullanılarak sürüklenme kuvveti için,

$$F_D = C_D A_{kp} \frac{\rho_f}{2} |u_g - u_p| (u_g - u_p) \quad (4.9)$$

bağıntısı elde edilir. Bu ifadede $u_g > u_p$ olduğundan Eş. 4.9,

$$F_D = C_D A_{kp} \frac{\rho_f}{2} (u_g - u_p)(u_g - u_p) \quad (4.10)$$

şeklinde yazılabilir. Eş. 4.10 Eş. 4.4'te kullanılarak,

$$m_p \frac{du_p}{dt} = C_D A_{kp} \frac{\rho_f}{2} (u_g - u_p)^2 + m_p g \quad (4.11)$$

elde edilir. Bu eşitlikte taneciğin kütlesi (m_p),

$$m_p = \frac{4\pi}{3} \left(\frac{d_p}{2} \right)^3 \rho_p \quad (4.12)$$

veya

$$m_p = \frac{\pi d_p^3}{6} \rho_p \quad (4.13)$$

şeklinde tanımlanır.

Eş. 4.13 kullanılarak Eş. 4.11'i yeniden düzenlersek,

$$\frac{du_p}{dt} = \frac{3}{4} C_D (u_g - u_p)^2 \frac{\rho_f}{\rho_p d_p} + g \quad (4.14)$$

elde edilir.

Eş. 4.14'te d_p ve ρ_p sırasıyla taneciğin çapı ve yoğunluğudur. Sürüklemeye katsayısı (C_D) literatürde Reynolds sayısının bir fonksiyonu olarak verilir ve aşağıdaki eşitliklerin kullanılmasıyla hesaplanabilir [14, 31].

$$C_D = \frac{24}{Re_p} \quad Re_p < 0,2 \quad (4.15)$$

$$C_D = \frac{24}{Re_p} \left(1 + \frac{3}{16} Re_p \right) \quad 0,2 < Re_p < 2 \quad (4.16)$$

$$C_D = \frac{24}{Re_p} \left(1 + 0,11 Re_p^{0,81} \right) \quad 2 < Re_p < 20 \quad (4.17)$$

$$C_D = \frac{24}{Re_p} \left(1 + 0,189 Re_p^{0,632} \right) \quad 20 < Re_p \quad (4.18)$$

Eş. 4.15 küre çevresindeki akış için Stokes çözümünü temel alır [32] ve Eş. 4.16 Oseen yaklaşımını temel alır [33]. Eş. 4.17 ve 4.18 Beard ve Pruppacher tarafından verilen deneysel verileri temel alır [34]. Beard ve Pruppacher'ın sonuçları Hamielec ve arkadaşlarının sayısal hesaplamaları ile uyum içerisindedir [35].

Yukarıdaki eşitliklerde Reynolds sayısı,

$$Re_p = \rho_f (u_g - u_p) d_p / \mu_f \quad (4.19)$$

şeklinde tanımlanır.

Burada μ_f plazmanın dinamik viskozitesidir ve film sıcaklığında hesaplanır [36].

Film sıcaklığı,

$$T_f = (T_p + T_\infty) / 2 \quad (4.20)$$

şeklinde tanımlanır. Bu eşitlikte; T_f , T_∞ ve T_p sırasıyla film sıcaklığı, plazmanın serbest akış bölgesindeki sıcaklığı ve taneciğin yüzey sıcaklığıdır.

Zamanın bir fonksiyonu olan taneciğin yüzey sıcaklığının belirlenmesi için, taşıma ve ışıma terimleri dikkate alınarak enerji denkleminde yararlanılır. Enerji denklemi,

$$m_p C_p \frac{dT_p}{dt} = hA_p (T_\infty - T_p) - A_p \varepsilon \sigma (T_p^4 - T_a^4) \quad (4.21)$$

veya

$$\frac{dT_p}{dt} = E_1 (T_\infty - T_p) - E_2 (T_p^4 - T_a^4) \quad (4.22)$$

şeklinde yazılabilir. A_p küresel taneciğin yüzey alanıdır ve $A_p = 4\pi(d_p^2/4)$ 'tür. Burada T_a çevre sıcaklığıdır ve analizde 300 K alınmıştır. Eş. 4.22'de E_1 ve E_2 sabittir ve

$$E_1 = \frac{hA_p}{m_p C_p} \quad (4.23)$$

ve

$$E_2 = \frac{A_p \varepsilon \sigma}{m_p C_p} \quad (4.24)$$

şeklinde ifade edilebilirler. Eş. 4.22,

$$\frac{dT_p}{dt} = E_1 T_\infty - E_1 T_p - E_2 T_p^4 + E_2 T_a^4 \quad (4.25)$$

veya

$$\frac{dT_p}{dt} = E_3 T_p^4 + E_4 T_p + E_5 \quad (4.26)$$

şeklinde yazılabilir.

Elde edilen eşitlikler analitik olarak çözülürken gaz özellikleri $(T_{giriş} + T_{çıkış})/2$ ortalama sıcaklığında alınmıştır.

$Re_p < 0,2$ için, Eş. 4.15'te verilen sürüklenme katsayısı ifadesi Eş. 4.19 kullanılarak,

$$C_D = \frac{24}{Re_p} = \frac{24\mu_f}{\rho_f(u_g - u_p)d_p} \quad Re_p < 0,2 \quad (4.27)$$

şeklinde yazılabilir. Eş. 4.27'nin Eş. 4.14'te kullanılması ile

$$\frac{du_p}{dt} = \frac{3}{4} \frac{24\mu_f}{\rho_f(u_g - u_p)d_p} (u_g - u_p)^2 \frac{\rho_f}{\rho_p d_p} + g \quad (4.28)$$

ifadesi elde edilir. Eş. 4.28 aşağıdaki şekilde de yazılabilir.

$$\frac{du_p}{dt} = (u_p - u_g) \left(\frac{-18\mu_f}{\rho_p d_p^2} \right) + g \quad (4.29)$$

Taneciğin plazma jeti içerisindeki hareketini analiz etmek için, plazma jetinin hızı gereklidir. Plazma jetinin hızı, plazma gazının kütle debisi ve karakteristik özellikleri ile lülenin çapına bağlı olarak hesaplanabilir ve aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$u_g = \frac{\dot{m}_g}{(\pi/4)d_l \rho_f} \quad (4.30)$$

Eş. 4.30'da $\dot{m}_g$ lüleden birim zamanda geçen plazma gazının debisidir ve d_l lülenin çapıdır. İleride yapılacak çalışmalarda plazma gazı olarak kullanılacak argonun kütleli debisi 15, 20 ve 25 litre/dakika alınarak deneyler yapılabilir.

Eş. 4.29 aşağıdaki şekilde de ifade edilebilir.

$$\frac{du_p}{dt} = E_6 u_p + E_7 \quad (4.31)$$

Bu eşitlikte; E_6 ve E_7 sabittir ve

$$E_6 = \left(\frac{-18\mu_f}{\rho_p d_p^2} \right) \quad (4.32)$$

ve

$$E_7 = \left(\frac{18\mu_f}{\rho_p d_p^2} \right) u_g + g \quad (4.33)$$

şeklinde yazılabilir.

Taneciğin hızı $t=0$ anında 0'dır. Eş. 4.31'un çözümü

$$u_p(t) = \frac{E_7}{E_6} [\exp(E_6 t) - 1] \quad (4.34)$$

şeklinde yazılabilir ve plazma jeti içerisinde taneciğin aldığı mesafe (S) Eş. 4.34'ün $t=0$ 'dan $t=t_r$ 'ye integre edilmesiyle,

$$\int_0^{t_r} u_p dt = \int_0^{t_r} \frac{E_7}{E_6} [\exp(E_6 t) - 1] dt \quad (4.35)$$

veya

$$S = \frac{E_7}{E_6} \left[\frac{\exp(E_6 t_r) - 1}{E_6} - t_r \right] \quad (4.36)$$

veya

$$S = \frac{E_7}{E_6^2} [\exp(E_6 t_r) - 1 - E_6 t_r] \quad (4.37)$$

şeklinde elde edilir. Bu eşitlikteki üstel fonksiyon, ilk üç terimi dikkate alınarak, Taylor serisi ile açılır ve eşitlik tekrar yazılırsa,

$$S = \frac{E_7}{E_6^2} \left[1 + E_6 t_r + \frac{(E_6 t_r)^2}{2} - 1 - E_6 t_r \right] \quad (4.38)$$

veya

$$S = \frac{E_7}{2} t_r^2 \quad (4.39)$$

elde edilir ve taneciğin plazma içerisinde kalma süresi

$$t_r = \left(\frac{2S}{E_7} \right)^{1/2} \quad (4.40)$$

şeklinde tanımlanır.

Taneciğin plazma jeti içerisinde kalma süresi taneciğin küreselleşmesini etkiler [5]. Taneciğin plazma jeti içerisinde aldığı mesafe taneciğin plazma jeti içerisinde kalma süresinin hesaplanması ile elde edilebilir. Küreselleşme işleminin gerçekleşmesi için,

taneciğin erimesi gereklidir. Eğer taneciğin erime süresi plazma jeti içerisinde kalma süresine eşit olursa, tanecik erir.

Taneciğin erime süresi,

$$t_m = \frac{t_{tr}}{Nu \ln[(T_g - T_p)/(T_g - T_m)]} \quad (4.41)$$

şeklinde tanımlanır [5].

Eş. 4.41’da t_{tr} ile gösterilen taneciğin sıcaklığının dengeye ulaşması için geçen süre,

$$t_{tr} = \frac{3}{2\rho_f t_{vr} (C_p / C_{gp})} \quad (4.42)$$

şeklinde tanımlanır [37].

Bu eşitlikte; C_p plazma gazının özgül ısısı ve C_{gp} toz malzemesinin erime sıcaklığında plazma gazının özgül ısısıdır. 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. 4.42,

$$t_{tr} = \frac{3}{2\rho_f t_{vr}} \quad (4.43)$$

şeklinde yazılabilir [37].

Taneciğin hızının dengeye ulaşması için gerekli zaman t_{vr} ,

$$t_{vr} = \frac{\rho_p d_p^2}{18\mu_f} \quad (4.44)$$

şeklinde yazılabilir [5].

Prandtl sayısı,

$$Pr = \mu C_p / k \quad (4.45)$$

şeklinde tanımlanır. Bu eşitlikte; k plazma gazının ısı iletim katsayısıdır.

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

$$Nu = 2 + 0,6 Re_p^{0,5} Pr^{0,33} \quad (4.46)$$

şeklinde tanımlanır [38, 39].

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

$$Nu = 1 + 0,2295 Re_p^{0,55} Pr^{0,33} \quad (4.47)$$

şeklinde alınmıştır [5]. Bu eşitlikteki Reynolds ve Prandtl sayıları sırasıyla Eş. 4.19 ve Eş. 4.45 kullanılarak hesaplanabilir.

Taneciğin küreselleşme miktarını karakterize eden küreselleşme oranı

$$r = t_r / t_m \quad (4.48)$$

bağıntısı kullanılarak belirlenir [37]. Bu bağıntıdaki t_r taneciğin plazma içerisinde kalma süresi ve t_m taneciğin erime zamanıdır. Taneciğin plazma içerisinde kalma süresi erime zamanından büyükse, $t_r > t_m$, $r > 1$ olacak ve tanecik eriyecektir. Klinskaya-Rudenskaya ve arkadaşlarının taneciğin küreselleşme miktarı üzerine yaptıkları deneysel ve teorik çalışmalardan elde edilen verilerden küreselleşme oranı

$$Küreselleşme [\%] = 68(r) \quad (4.49)$$

şeklinde ifade edilebilir [40, 5]. Literatürdeki deneysel ve teorik çalışmalardan yararlanarak yazılan ifadeler kullanılarak plazma jeti içerisinde yerçekiminin ve plazma gazının etkisi ile akan bir taneciğin küreselleşme oranı hesaplanabilir.

0,2<Re_p<2 aralığı için, Eş. 4.16'da verilen sürüklenme katsayısı ifadesi Eş. 4.19 kullanılarak,

$$C_D = \frac{24}{Re_p} \left(1 + \frac{3}{16} Re_p \right) = \frac{24}{Re_p} + \frac{9}{2} \quad 0,2 < Re_p < 2 \quad (4.50)$$

veya

$$C_D = \frac{24\mu_f}{\rho_f(u_g - u_p)d_p} + \frac{9}{2} \quad (4.51)$$

şeklinde yazılabilir. Eş. 4.51 Eş. 4.14'te kullanılarak

$$\frac{du_p}{dt} = \frac{3}{4} \left[\frac{24\mu_f}{\rho_f(u_g - u_p)d_p} + \frac{9}{2} \right] (u_g - u_p)^2 \frac{\rho_f}{\rho_p d_p} + g \quad (4.52)$$

veya

$$\frac{du_p}{dt} = \left[\frac{18\mu_f}{\rho_f(u_g - u_p)d_p} + \frac{27}{8} \right] (u_g - u_p)^2 \frac{\rho_f}{\rho_p d_p} + g \quad (4.53)$$

veya

$$\frac{du_p}{dt} = \frac{18\mu_f}{\rho_p d_p^2} (u_g - u_p) + \frac{27}{8} \frac{\rho_f}{\rho_p d_p} (u_g - u_p)^2 + g \quad (4.54)$$

ifadesi yazılabilir. Eş. 4.54 yeniden düzenlenerek,

$$\frac{du_p}{dt} = \frac{18\mu_f}{\rho_p d_p^2} u_g - \frac{18\mu_f}{\rho_p d_p^2} u_p + \frac{27}{8} \frac{\rho_f}{\rho_p d_p} (u_p^2 - 2u_p u_g + u_g^2) + g \quad (4.55)$$

veya

$$\begin{aligned} \frac{du_p}{dt} = & \frac{18\mu_f}{\rho_p d_p^2} u_g - \frac{18\mu_f}{\rho_p d_p^2} u_p + \frac{27}{8} \frac{\rho_f}{\rho_p d_p} u_p^2 - \frac{27}{4} \frac{\rho_f}{\rho_p d_p} u_p u_g \\ & + \frac{27}{8} \frac{\rho_f}{\rho_p d_p} u_g^2 + g \end{aligned} \quad (4.56)$$

bağıntısı yazılabilir. Eş. 4.56 tekrar düzenlenerek

$$\begin{aligned} \frac{du_p}{dt} = & \frac{27}{8} \frac{\rho_f}{\rho_p d_p} u_p^2 + \left(-\frac{18\mu_f}{\rho_p d_p^2} - \frac{27}{4} \frac{\rho_f}{\rho_p d_p} u_g \right) u_p \\ & + \frac{18\mu_f}{\rho_p d_p^2} u_g + \frac{27}{8} \frac{\rho_f}{\rho_p d_p} u_g^2 + g \end{aligned} \quad (4.57)$$

veya

$$\begin{aligned} \frac{du_p}{dt} = & 3,375 \frac{\rho_f}{\rho_p d_p} u_p^2 + \left(\frac{-18\mu_f - 6,75\rho_f d_p u_g}{\rho_p d_p^2} \right) u_p \\ & + 3,375 \frac{\rho_f}{\rho_p d_p} u_g^2 + \frac{18\mu_f}{\rho_p d_p^2} u_g + g \end{aligned} \quad (4.58)$$

ifadesi elde edilir. Bu eşitlik lineer değildir. Ancak $u_g^2 \gg u_p^2$ olduğu durum için u_p^2 'li terim ihmal edilerek denklemin lineer olması sağlanabilir. Dolayısıyla denklem,

$$\frac{du_p}{dt} = \left(\frac{-18\mu_f - 6,75\rho_f d_p u_g}{\rho_p d_p^2} \right) u_p + 3,375 \frac{\rho_f}{\rho_p d_p} u_g^2 + \frac{18\mu_f}{\rho_p d_p^2} u_g + g \quad (4.59)$$

şeklinde yazılabilir. Eş. 4.59

$$\frac{du_p}{dt} = E_8 u_p + E_9 \quad (4.60)$$

şeklinde yazılabilir. Bu eşitlikte E_8 ve E_9 sabittir ve değerleri

$$E_8 = \left(\frac{-18\mu_f - 6,75\rho_f d_p u_g}{\rho_p d_p^2} \right) \quad (4.61)$$

ve

$$E_9 = 3,375 \frac{\rho_f}{\rho_p d_p} u_g^2 + \frac{18\mu_f}{\rho_p d_p^2} u_g + g \quad (4.62)$$

şeklinde yazılabilir.

Taneciğin hızı $t=0$ anında 0'dır. Eş. 4.60'ın çözümü

$$u_p(t) = \frac{E_9}{E_8} [\exp(E_8 t) - 1] \quad (4.63)$$

şeklinde yazılabilir ve plazma jeti içerisinde taneciğin aldığı mesafe (S) Eş. 4.63'ün $t=0$ 'dan $t=t_r$ 'ye integre edilmesiyle,

$$\int_0^{t_r} u_p dt = \int_0^{t_r} \frac{E_9}{E_8} [\exp(E_8 t) - 1] dt \quad (4.64)$$

şeklinde veya

$$S = \frac{E_9}{E_8} \left[\frac{\exp(E_8 t_r) - 1}{E_8} - t_r \right] \quad (4.65)$$

veya

$$S = \frac{E_9}{E_8^2} [\exp(E_8 t_r) - 1 - E_8 t_r] \quad (4.66)$$

şeklinde ifade edilir. Bu eşitlikteki üstel fonksiyon, Taylor serisi ile açılır, ilk üç terimi alınır ve eşitlik tekrar yazılırsa,

$$S = \frac{E_9}{E_8^2} \left[1 + E_8 t_r + \frac{(E_8 t_r)^2}{2} - 1 - E_8 t_r \right] \quad (4.67)$$

veya

$$S = \frac{E_9}{2} t_r^2 \quad (4.68)$$

bağıntısı elde edilir. Taneciğin plazma içerisinde kalma süresi

$$t_r = \left(\frac{2S}{E_9} \right)^{1/2} \quad (4.69)$$

şeklinde tanımlanır.

$2 < \text{Re}_p < 20$ aralığında, Eş. 4.17'de verilen sürüklenme katsayısı ifadesi Eş. 4.19 kullanılarak,

$$C_D = \frac{24}{\text{Re}_p} \left(1 + 0.11 \text{Re}_p^{0.81} \right) \quad 2 < \text{Re}_p < 20 \quad (4.70)$$

veya

$$C_D = \frac{24}{\text{Re}_p} + \frac{2.64}{\text{Re}_p^{0.19}} \quad (4.71)$$

bağıntısı elde edilir. Eş. 4.71 yeniden düzenlenerek

$$C_D = \frac{24\mu_f}{\rho_f(u_g - u_p)d_p} + \frac{2.64\mu_f^{0.19}}{[\rho_f(u_g - u_p)d_p]^{0.19}} \quad (4.72)$$

veya

$$C_D = \frac{24\mu_f + 2.64\mu_f^{0.19}[\rho_f(u_g - u_p)d_p]^{0.81}}{\rho_f(u_g - u_p)d_p} \quad (4.73)$$

şeklinde yazılabilir. Eş. 4.73 Eş. 4.14'te kullanılarak

$$\frac{du_p}{dt} = \frac{3}{4} \left[\frac{24\mu_f + 2.64\mu_f^{0.19}[\rho_f(u_g - u_p)d_p]^{0.81}}{\rho_f(u_g - u_p)d_p} \right] (u_g - u_p)^2 \frac{\rho_f}{\rho_p d_p} + g \quad (4.74)$$

veya

$$\frac{du_p}{dt} = \frac{3}{4} \left\{ 24\mu_f + 2.64\mu_f^{0.19}[\rho_f(u_g - u_p)d_p]^{0.81} \right\} \frac{(u_g - u_p)}{\rho_p d_p^2} + g \quad (4.75)$$

veya

$$\frac{du_p}{dt} = [18\mu_f + 1.98\mu_f^{0.19}\rho_f^{0.81}d_p^{0.81}(u_g - u_p)^{0.81}] \frac{(u_g - u_p)}{\rho_p d_p^2} + g \quad (4.76)$$

bağıntısı elde edilir. Bağıntı yeniden düzenlenerek

$$\frac{du_p}{dt} = [18\mu_f \frac{(u_g - u_p)}{\rho_p d_p^2} + 1.98\mu_f^{0.19}\rho_f^{0.81}d_p^{0.81}(u_g - u_p)^{0.81} \frac{(u_g - u_p)}{\rho_p d_p^2}] + g \quad (4.77)$$

veya

$$\frac{du_p}{dt} = \frac{18\mu_f}{\rho_p d_p^2}(u_g - u_p) + \frac{1.98\mu_f^{0.19}\rho_f^{0.81}}{\rho_p d_p^{1.19}}(u_g - u_p)^{1.81} + g \quad (4.78)$$

veya

$$\frac{du_p}{dt} = \frac{18\mu_f}{\rho_p d_p^2}u_g + \left(-\frac{18\mu_f}{\rho_p d_p^2}\right)u_p + \frac{1.98\mu_f^{0.19}\rho_f^{0.81}}{\rho_p d_p^{1.19}}(u_g - u_p)^{1.81} + g \quad (4.79)$$

ifadesi elde edilir. Bu ifade lineer değildir. Ancak $u_g^{1.81} \gg u_p^{1.81}$ olduğu durum için $u_p^{1.81}$ terimi ihmal edilebilir ve denklemin lineer olması sağlanır. Dolayısıyla Eş. 4.79,

$$\frac{du_p}{dt} = \left(-\frac{18\mu_f}{\rho_p d_p^2}\right)u_p + \frac{1.98\mu_f^{0.19}\rho_f^{0.81}}{\rho_p d_p^{1.19}}u_g^{1.81} + \frac{18\mu_f}{\rho_p d_p^2}u_g + g \quad (4.80)$$

şeklinde yazılabilir. Bu bağıntı yeniden düzenlenerek

$$\frac{du_p}{dt} = E_{10}u_p + E_{11} \quad (4.81)$$

ifadesi yazılabilir. Bu eşitlikteki E_{10} ve E_{11} sabittir ve

$$E_{10} = \left(-\frac{18\mu_f}{\rho_p d_p^2} \right) \quad (4.82)$$

ve

$$E_{11} = \frac{1.98\mu_f^{0.19}\rho_f^{0.81}}{\rho_p d_p^{1.19}} u_g^{1.81} + \frac{18\mu_f}{\rho_p d_p^2} u_g + g \quad (4.83)$$

şeklinde yazılabilir.

Taneciğin hızı $t=0$ anında 0'dır. Eş. 4.83'ün çözümü

$$u_p(t) = \frac{E_{11}}{E_{10}} [\exp(E_{10}t) - 1] \quad (4.84)$$

şeklinde yazılabilir ve plazma jeti içerisinde taneciğin aldığı mesafe (S) için Eş. 4.84 $t=0$ ile $t=t_r$ arasında integre edilerek,

$$\int_0^{t_r} u_p dt = \int_0^{t_r} \frac{E_{11}}{E_{10}} [\exp(E_{10}t) - 1] dt \quad (4.85)$$

veya

$$S = \frac{E_{11}}{E_{10}} \left[\frac{\exp(E_{10}t_r) - 1}{E_{10}} - t_r \right] \quad (4.86)$$

veya

$$S = \frac{E_{11}}{E_{10}^2} [\exp(E_{10}t_r) - 1 - E_{10}t_r] \quad (4.87)$$

ifadesi elde edilir. Bu eşitlikteki üstel fonksiyon Taylor serisine açılır ve serinin ilk üç terimi dikkate alınarak eşitlik tekrar yazılırsa,

$$S = \frac{E_{11}}{E_{10}^2} \left[1 + E_{10}t_r + \frac{(E_{10}t_r)^2}{2} - 1 - E_{10}t_r \right] \quad (4.88)$$

veya

$$S = \frac{E_{11}}{2} t_r^2 \quad (4.89)$$

bağıntısı elde edilir. Taneciğin plazma içerisinde kalma süresi

$$t_r = \left(\frac{2S}{E_{11}} \right)^{1/2} \quad (4.90)$$

şeklinde tanımlanır.

$20 < \text{Re}_p$ aralığı için, Eş. 4.18 ile verilen sürüklenme katsayısı Eş. 4.19 kullanılarak,

$$C_D = \frac{24}{\text{Re}_p} \left(1 + 0.189 \text{Re}_p^{0.632} \right) \quad 20 < \text{Re}_p \quad (4.91)$$

veya

$$C_D = \frac{24}{\text{Re}_p} + \frac{4.536}{\text{Re}_p^{0.368}} \quad (4.92)$$

ifadesi elde edilir. Eş. 4.92 yeniden düzenlenerek

$$C_D = \frac{24\mu_f}{\rho_f(u_g - u_p)d_p} + \frac{4.536\mu_f^{0.368}}{[\rho_f(u_g - u_p)d_p]^{0.368}} \quad (4.93)$$

veya

$$C_D = \frac{24\mu_f + 4.536\mu_f^{0.368}[\rho_f(u_g - u_p)d_p]^{0.632}}{\rho_f(u_g - u_p)d_p} \quad (4.94)$$

şeklinde yazılabilir. Eş. 4.94 Eş. 4.14 kullanılarak

$$\frac{du_p}{dt} = \frac{3}{4} \left[\frac{24\mu_f + 4.536\mu_f^{0.368}[\rho_f(u_g - u_p)d_p]^{0.632}}{\rho_f(u_g - u_p)d_p} \right] (u_g - u_p)^2 \frac{\rho_f}{\rho_p d_p} + g \quad (4.95)$$

veya

$$\frac{du_p}{dt} = \frac{3}{4} \left\{ 24\mu_f + 4.536\mu_f^{0.368}[\rho_f(u_g - u_p)d_p]^{0.632} \right\} \frac{(u_g - u_p)}{\rho_p d_p^2} + g \quad (4.96)$$

veya

$$\frac{du_p}{dt} = [18\mu_f + 3.402\mu_f^{0.368}\rho_f^{0.632}d_p^{0.632}(u_g - u_p)^{0.632}] \frac{(u_g - u_p)}{\rho_p d_p^2} + g \quad (4.97)$$

bağıntısı elde edilir. Eş. 4.97 yeniden düzenlenerek

$$\frac{du_p}{dt} = [18\mu_f \frac{(u_g - u_p)}{\rho_p d_p^2} + 3.402\mu_f^{0.368}\rho_f^{0.632}d_p^{0.632}(u_g - u_p)^{0.632} \frac{(u_g - u_p)}{\rho_p d_p^2}] + g \quad (4.98)$$

veya

$$\frac{du_p}{dt} = \frac{18\mu_f}{\rho_p d_p^2} (u_g - u_p) + \frac{3.402\mu_f^{0.368} \rho_f^{0.632}}{\rho_p d_p^{1.368}} (u_g - u_p)^{1.632} + g \quad (4.99)$$

veya

$$\frac{du_p}{dt} = \frac{18\mu_f}{\rho_p d_p^2} u_g + \left(-\frac{18\mu_f}{\rho_p d_p^2} \right) u_p + \frac{3.402\mu_f^{0.368} \rho_f^{0.632}}{\rho_p d_p^{1.368}} (u_g - u_p)^{1.632} + g \quad (4.100)$$

ifadesi elde edilir. Bu eşitlik lineer değildir. Ancak, bu eşitlik de lineer hale getirilerek analitik çözümüne ulaşılabilir. $u_g^{1.632} \gg u_p^{1.632}$ olduğu durum için $u_p^{1.632}$ 'li terim ihmal edilerek denklemin lineer olması sağlanabilir ve çözüme ulaşılır.

4.4. Çözüm Yöntemi

Mühendisler ve uygulamalı matematikçiler tarafından geliştirilen en önemli yöntemlerden birisi doğrusal olmayan diferansiyel denklemlerin doğrusallaştırılmasıdır. Doğrusal diferansiyel eşitlikler aşağıdaki kurala uymaktadırlar.

$$a_n(x)y^{(n)} + \dots + a_1(x)y' + a_0(x)y = f(x) \quad (4.101)$$

Eş. 4.101'de, $y^{(n)}$ y'nin x'e bağlı n. dereceden türevidir ve a ile f x'in fonksiyonudur. Doğrusal diferansiyel eşitliklerin uygulamadaki önemi analitik olarak çözülebilmeleridir. Ancak, çoğu doğrusal diferansiyel eşitlik analitik olarak çözülememektedir. Bu nedenle, geçmişte doğrusal olmayan diferansiyel eşitliklerin çözüm yöntemlerinden birisi doğrusallaştırmaydı. Diğer taraftan, bu yöntemin kullanılması ile yeterince güvenilir sonuçlar elde etmek zordur. Bilgisayar bilim ve teknolojisi alanındaki gelişmeler ile sayısal yöntemlerin güvenilirliğinde artış gözlenmiştir. Doğrusal ve homojen olmayan diferansiyel eşitlikleri çözmek için

geliştirilen yöntemlerin en önemlileri yüksek dereceli Runge-Kutta yöntemleridir. Teori kısmında elde edilen diferansiyel eşitliklerin lineer olmaması nedeniyle bu çalışmada sayısal yöntem olarak Butcher tarafından 1964 yılında geliştirilen beşinci dereceden Runge-Kutta yöntemi kullanılmıştır.

Bu yöntem aşağıdaki eşitlikler ile verilmektedir [41].

$$y_{i+1} = y_i + (1/90)(7k_1 + 32k_3 + 12k_4 + 32k_5 + 7k_6)z \quad (4.102)$$

Burada

$$k_1 = f(x_i, y_i) \quad (4.103)$$

$$k_2 = f\left(x_i + \frac{1}{4}z, y_i + \frac{1}{4}k_1z\right) \quad (4.104)$$

$$k_3 = f\left(x_i + \frac{1}{4}z, y_i + \frac{1}{8}k_1z + \frac{1}{8}k_2z\right) \quad (4.105)$$

$$k_4 = f\left(x_i + \frac{1}{2}z, y_i - \frac{1}{2}k_2z + k_3z\right) \quad (4.106)$$

$$k_5 = f\left(x_i + \frac{3}{4}z, y_i + \frac{3}{16}k_1z + \frac{9}{16}k_4z\right) \quad (4.107)$$

$$k_6 = f\left(x_i + z, y_i - \frac{3}{7}k_1z + \frac{2}{7}k_2z + \frac{12}{7}k_3z - \frac{12}{7}k_4z + \frac{8}{7}k_5z\right) \quad (4.108)$$

şeklinde ifade edilmektedir.

Yukarıdaki eşitlikler ile verilen beşinci dereceden Runge-Kutta yöntemi kullanılarak elde edilen sonuçlar tablolar ve grafikler halinde 6. bölümde teorik sonuçlar ile ilgili kısımda verilmiştir.

5. KÜRESEL TANECİK ÜRETİMİ İLE İLGİLİ DENEYSEL ÇALIŞMA

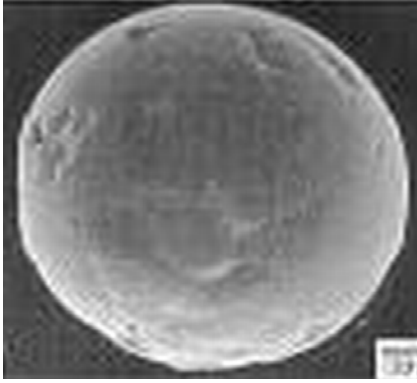
5.1. Giriş

Bu bölümde sunulan küresel taneciklerin üretimi için yapılan deneysel çalışma, ısı plazma yöntemi ile ileride yapılabilecek vakumlu küresel taneciklerin üretimi için bir ön çalışma oluşturacaktır. Bu çalışmada, kalay kullanılarak, küresel kalay taneciklerinin üretilmesi amaçlanan bir deneysel çalışma yapılmıştır. Küresel tanecik üretimi ile ilgili deneysel çalışma, Gazi Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Metroloji Laboratuvarı'ndaki gaz atomizasyon ünitesinde yapılmıştır. İçi vakumlu küresel taneciklerin elde edilmesinde kullanılabilecek indüktif bağlaşımlı plazma sistemi üniversitemizde mevcut değildir. Yukarıda da belirtildiği gibi bu deney düzeneğinde içi dolu kürelerin elde edilmesi amaçlanmıştır.

5.2. Gaz Atomizasyon Yöntemi

Atomizasyon, kullanılan gaz yardımıyla sıvının bir lüleden geçerek farklı boyutlarda damlacıklara ayrılması yöntemidir. Gaz atomizasyon yönteminde, potanın alt kısmından akan erimiş metale yüksek basınçlı gaz püskürtülür. Atomizasyon gazı, erimiş metali farklı boyutlarda damlacıklara ayırır. Damlacıklar katılarak metal tozları haline gelir. Gaz atomizasyon yöntemi erime, atomizasyon ile katılma ve soğuma olarak üç aşamadan oluşur.

Gaz atomizasyon yöntemi paslanmaz çelik, pirinç, demir, alüminyum, çinko, kalay ve kurşun gibi metal ve alaşımları için kullanılabilir [42]. Gaz atomizasyon yöntemi ile üretilen tozlar Resim 5.1'de görüldüğü gibi küresel veya küresele yakın şekilde olabilmektedirler. Bu yöntemle üretilen tanecik boyutu 1 µm ile 1 mm arasında değişebilen tozlar erimiş metal damlacıklarının sırasıyla küreselleşmesi, soğuması ve katılması ile elde edilir. Gaz atomizasyonda temel fikir yüksek hızda bir lüle boyunca geçen gazın kinetik enerjisini erimiş metale aktarması sonucu erimiş metalin metal damlacıkları haline dönüşmesidir.



Resim 5.1. Gaz atomizasyon yöntemi ile üretilen tozların yüzey yapısı [43]

Gaz atomizasyon yöntemiyle tozun ortalama tanecik boyutu, toz şekli, yüzey kompozisyonu, kimyasal bileşimi ve mikroyapısı kontrol edilebilir. Gaz olarak azot, argon, karbondioksit ve helyum gibi asal gazların kullanılmasıyla küresel tozlar elde edilebilmektedir.

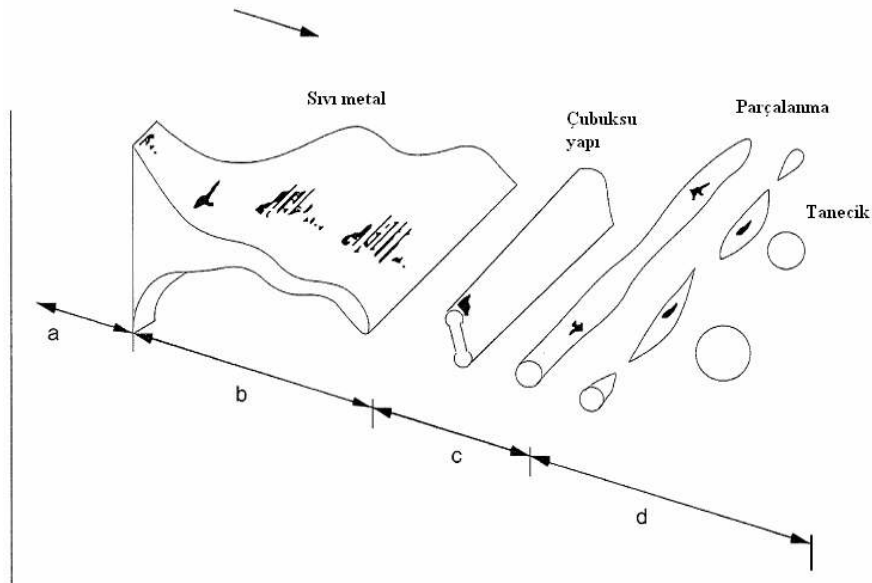
Erime sıcaklığı yüksek olan metallerin atomizasyonunda düşey gaz atomizasyon ünitesi kullanılır. Düşey gaz atomizasyon ünitesi şematik olarak Şekil 5.1’de görülmektedir. Bu tip sistemlerde, indüksiyon fırını ile erime sıcaklığının üzerindeki bir sıcaklığa ısıtılmış olan metal, lüleden ve atomizasyon kulesinden geçer. Atomizasyon kulesi damlacıkların kule çeperlerine çarpmadan katılaşmasına izin verecek şekilde tasarlanır.



Şekil 5.1. Düşey gaz atomizasyon ünitesi [44]

Şekil 5.1’de görülen düşey gaz atomizasyon ünitesinde atomizasyon kulesi paslanmaz çelikten üretilir. Atomizasyonda kullanılan gazın, atomizasyon kule iç basıncını yükseltmemesi için gaz kule dışına aktarılmalıdır. Bunun için siklon birimi kullanılır. Siklon birimi ince tozların tutulması amacıyla da kullanılır. Gaz atomizasyon yönteminde gaz basıncı 0,5-9 MPa arasındadır. Hacimsel gaz debisi 0,002 m³/s ile 0,24 m³/s arasında değişmektedir. Gazın lüleden çıkış hızı lüle tasarımına bağlı olarak 20 m/s ile ses üstü hızlar arasında değişmektedir [45].

Dombrowski ve Johns çalışmalarında, damlacık oluşumu için fiziksel bir model geliştirmişlerdir (Şekil 5.2). Bu modelde öncelikle, tabaka üzerinde kritik bir genliğe ulaşana kadar dalgalar büyür. Sonra dalganın tepe ve dip bölgelerinde yırtılmalar oluşur ve yarım dalga boyuna karşılık gelen kısımlar kırılır. Kırılan bu kısımlar yüzey geriliminin etkisiyle kararsız çubuk haline gelerek damlacıklar oluşur [46].

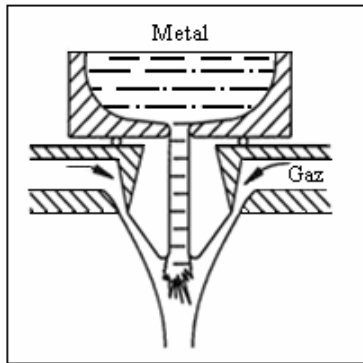


Şekil 5.2. Damlacık oluşumu [47]

Tozların soğuma ve katılaşması atomizasyon kulesi içerisinde meydana gelir. Sıvı metal damlacıklarının katılaşma hızı önemlidir; katılaşma hızı tozların şeklini belirler. Gaz atomizasyon ünitesinde lüle, atomizasyon ortamının akışını kontrol eder ve onu istenen özelliklerdeki bir tozu üretmek için sıvı metalle temas ettirip, sıvı

metalin parçacıklara ayrılmasını sağlar [48]. Lüle yapısı, tozların boyutunu ve şeklini etkiler. Lüleler, dairesel yarıklı veya dairesel delikli olarak üretilirler. Gaz atomizasyonunda kullanılan lülelerin serbest düşmeli ve yakından eşlemeli lüle sistemleri olmak üzere iki grupta sınıflandırılır.

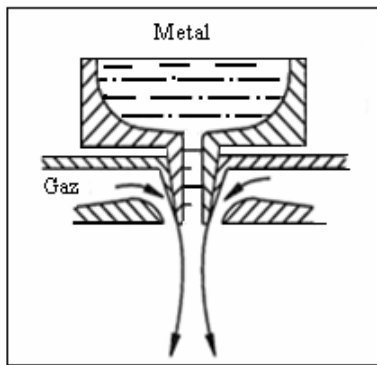
Serbest düşmeli atomizasyon sistemlerinde sıvı metal, yerçekimi etkisi altında potanın yaklaşık 50-200 mm aşağısına düştükten sonra dairesel delikli veya dairesel yarıklı gaz jetleri ile atomize edilir [49, 50]. Çarpışma olduğu anda sıvı metal çok küçük damlacıklara ayrılır ve bu damlacıklar katılaşır. Şekil 5.3'te serbest düşmeli lüle sistemi görülmektedir. Serbest düşmeli lüle 5-20 μm aralığında toz üretmek için ekonomik olmadığından tercih edilmez. Sıvı metali ince taneciklere ayırmak için gerekli momentumun, gazdan sıvı metale aktarılması gerekir. Yüksek gaz hızları ve büyük çarpışma açıları kararsızlıklara yol açar.



Şekil 5.3. Serbest düşmeli lüle sistemi [51]

Yakından eşlemeli lüleler genellikle dairesel yarıklı gaz jetleri ile kullanılırlar. Yakından eşlemeli lülelerde sıvı metal demeti, metal akış borusunun hemen ucunda ince bir tabaka halinde gaz jetleri ile karşılaşarak atomize olur [49, 52]. Bu sistemlerde büyük çarpma açıları kullanılabilir. Şekil 5.4'te yakından eşlemeli lüle sistemi görülmektedir. Yakından eşlemeli lülelerde gaz ile sıvı metalin, akış borusunun hemen uç kısmında çarpışması, aşırı gaz hızları ile büyük çarpma açılarının sebep olduğu kararsızlıkları ortadan kaldırır. Yakından eşlemeli lüle sistemleri ince tozların üretimi için uygundur. Gaz jeti, akmakta olan sıvı metale

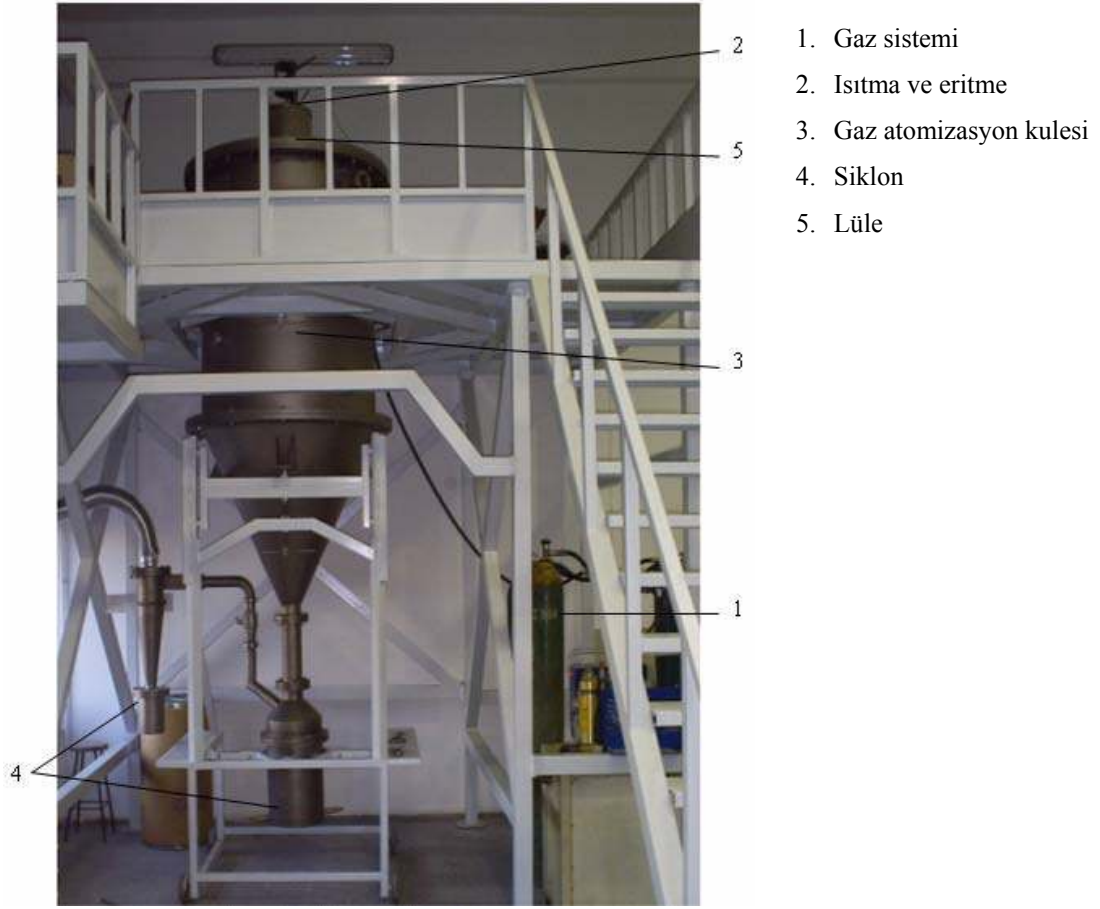
yakındır. Bu durum maksimum kinetik enerjinin aktarılmasını ve gaz jetinin daha büyük açılarında atomizasyon yapılabilmesini sağlar. Bu durum da daha fazla enerjinin sıvı metale aktarılması sağlanmış olur. Yakından eşlemeli lülelerin bu avantajlarının yanında, sıvı metal akış borusu ucundaki metalin donması ve daha fazla atomizasyon yapılmasına engel olması dikkate alınmalıdır. Sıvı metal akış borusu ısıtılarak donmanın oluşumu engellenebilir, ancak bu durum karmaşık tasarım problemlerine yol açabilir.



Şekil 5.4. Yakından eşlemeli lüle sistemi [51]

5.3. Gaz Atomizasyon Ünitesi

Küresel toz üretimiyle ilgili bir deneysel çalışma Gazi Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Metroloji Laboratuvarı'nda bulunan gaz atomizasyon ünitesinde yapılmıştır. Bu çalışmanın amacı küresel toz üretimi ve gaz atomizasyon ünitesi ile ilgili bilgi edinmektir. Resim 5.2'de görülen gaz atomizasyon ünitesi beş ana birimden oluşmaktadır. Bu birimler sırasıyla; gaz sistemi, ısıtma ve eritme birimi, atomizasyon kulesi, siklon ve lüledir.



Resim 5.2. Gaz atomizasyon ünitesi [53]

5.3.1. Gaz sistemi

Gaz atomizasyon işlemi için gereken basınçlı gazın gaz atomizasyon ünitesine aktarımını sağlayan sisteme gaz sistemi denir. Yapılan deneysel çalışmada gaz sistemi 150 bar işletme basıncına ve 40 litre hacme sahip, 6 adet yüksek basınçlı tüpten oluşmaktadır. Resim 5.3a'da görülen, birbirine paralel bağlanmış tüpler gaz atomizasyon ünitesine gaz aktarımının sağlanması için Resim 5.3b'de görüldüğü gibi atomizasyon kulesine de bağlanmıştır. Atomizasyon gazı basıncı basınç ayar vanası ile kontrol edilmiştir. Atomizasyon gaz basıncı, basınç ayar vanasının giriş ve çıkışında bulunan manometreler ile okunmuştur. Deneysel çalışmada, gaz atomizasyon ünitesinde atomizasyon gazı olarak hava kullanılmıştır. Tüplerin hava ile doldurulması için, Resim 5.4'te görülen, hacimsel debisi 100 litre/dakika ve

tüplere hava sıkıştırabilme kapasitesi 225 bar olan, Bauer marka kompresör kullanılmaktadır.



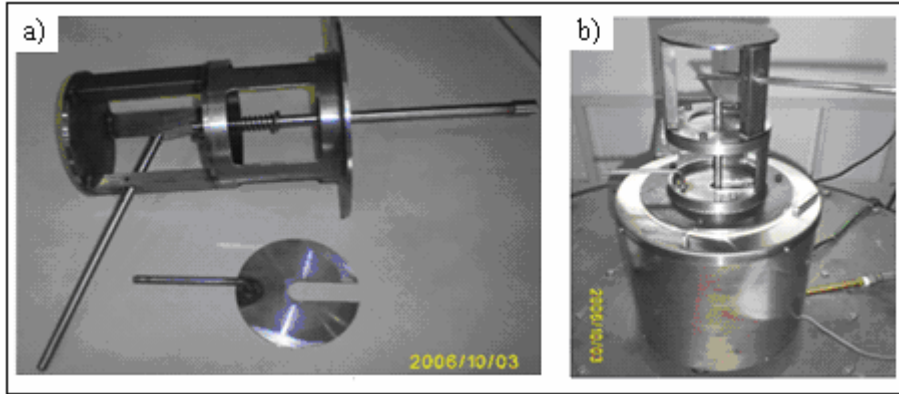
Resim 5.3. Gaz sistemi a) Yüksek basınçlı tüpler, b) Basınç ayar vanası [53]



Resim 5.4. Kompresör [53]

5.3.2. Isıtma ve eritme

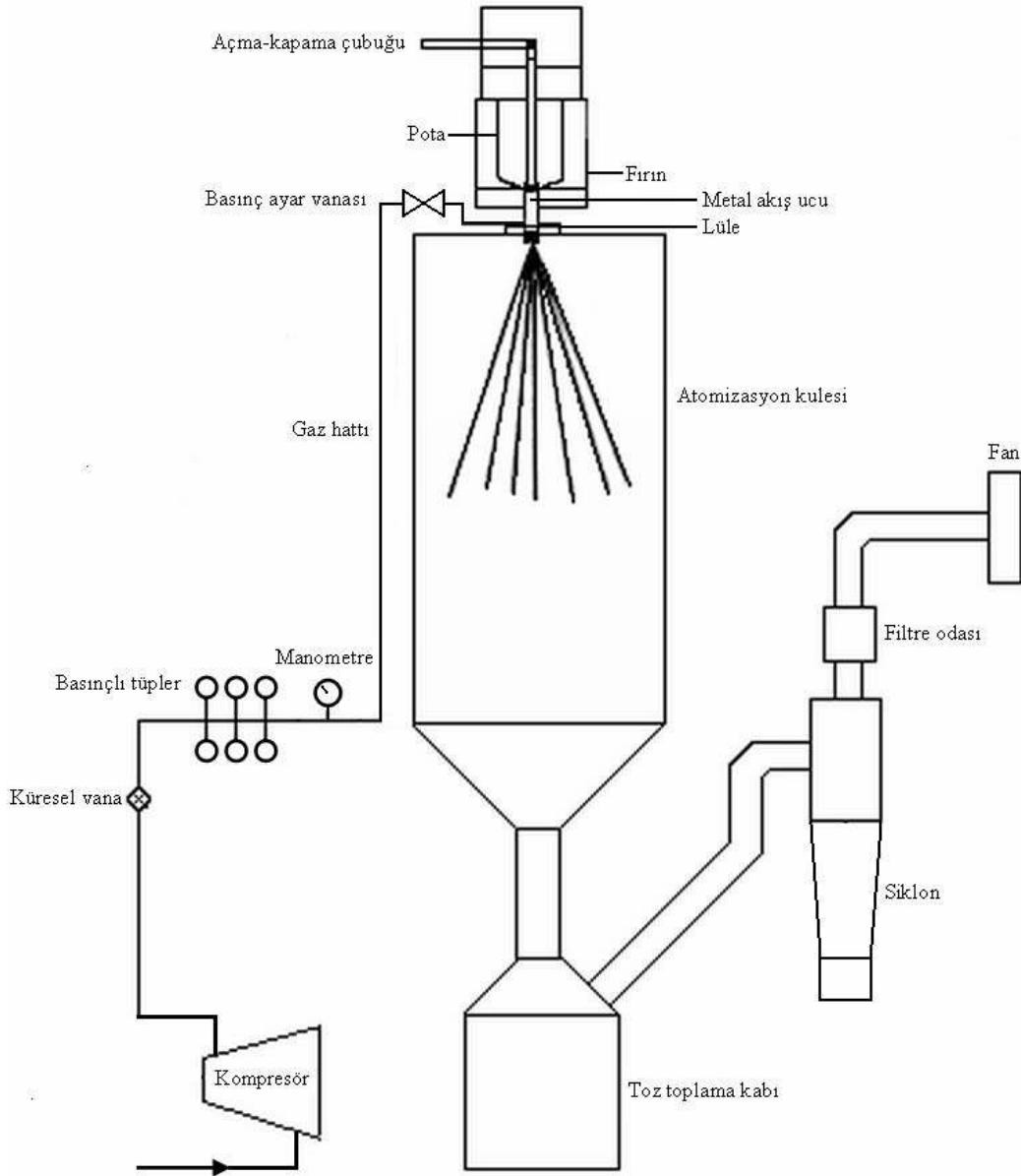
Deneysel çalışmada kullanılan metalin ısıtılması ve ergitilmesi işleminde, Resim 5.5a'da görülen açma kapama mekanizması ile Resim 5.5b'de görülen eritme fırın kullanılmıştır. Paslanmaz çelik pota Resim 5.5b'de görülen gaz atomizasyon kulesinin üzerinde bulunan fırın içerisine yerleştirilmiştir. Isıtılan ve eritilen metalin sıcaklık kontrolü, pota içerisine daldırılan ısıl çiftler ile yapılmıştır. Isıl çiftler dijital sıcaklık ölçme ve kontrol cihazına bağlanmıştır. Paslanmaz çelik potanın içerisine, ısıtılan ve eritilen metalin akışını kontrol edebilmek için, el ile kontrol edilebilen, Resim 5.5a'da görülen açma-kapama mekanizması yerleştirilmiştir. Açma-kapama mekanizmasında bulunan yay ile sızdırmazlık sağlanmaktadır.



Resim 5.5. Isıtma ve eritme biriminin görünümü (a. Açma-kapama mekanizması b. Eritme fırını) [53]

5.3.3. Gaz atomizasyon kulesi

Isıtılarak ve ergitilerek elde edilen sıvı metalin basınçlı gaz ile çarpışarak atomize olduğu ve katılaşarak toz haline geldiği kapalı ortama gaz atomizasyon kulesi denir. Gaz atomizasyon kulesinin boyutları katılaşma süresine bağlıdır. Bu nedenle gaz atomizasyon ünitesi tasarımında, sıvı damlacığının katılaşmadan önce kule içerisinde hangi mesafeye ulaşacağı belirlenmelidir. Gaz atomizasyon kulesinin boyutları küçük ise, sıvı metal ile gazın çarpışması ile oluşan sıvı damlacıklar gaz atomizasyon kulesinin çeperlerine yapışır. Gaz atomizasyon kulesinin paslanmaz çelikten imal edilmesi, sistemin temizliği açısından önemlidir.



Şekil 5.5. Gaz atomizasyon ünitesinin şematik görünümü

Şekil 5.5'te şematik olarak görülen gaz atomizasyon ünitesine ait gaz atomizasyon kulesi; paslanmaz çelikten imal edilmiş ve iç yüzeyleri, sistemin temiz olarak çalışması için parlatılmıştır. Gaz atomizasyon kulesinin çapı ve yüksekliği damlacıkların katılaşmaları için önemli ölçülerdedir. Gaz atomizasyon çalışmalarını izlemek için, gaz atomizasyon kulesinin çevresine gözetleme pencereleri yerleştirilmiştir. Gaz atomizasyon kulesinin tabanı altı kapalı koni şeklinde imal

edilmiştir. Üretilen büyük boyutlu tozlar burada toplanmaktadır. Gaz atomizasyon ünitesinde kullanılan gazın ünite dışına tahliye edilmesi ve üretilen küçük boyutlu tozların tutulması için siklon birimi kullanılmıştır.

5.3.4. Siklon

Gaz atomizasyon ünitesinde üretilen tozların temizliği ve bu tozların tutulması önemlidir. Gaz atomizasyon işleminden sonra taşıyıcı gaz ile metal tozlarını ayırmak için Resim 5.6’da görülen siklon birimi kullanılmıştır.



Resim 5.6. Siklon biriminin görünümü [53]

Siklon tasarımında, siklonun toz tutma veriminin veya siklondan geçen gazın debisinin yüksek olması istenir. Deneysel çalışmada kullanılan gaz atomizasyon ünitesi için tasarlanan siklon birimi, atomizasyon gazı içerisinde boyutları 5 μm ’den küçük olan tozları ayırabilecek şekilde tasarlanır [54].

5.3.5. Lüle

Deneysel çalışmada, yakından eşlemeli “Mannesmann” tipi lüle kullanılmıştır. Lülenin boyutları Çizelge 5.1’de verilmiştir.

Çizelge 5.1. Mannesmann tipi lülenin boyutları [53]

Lüle tipi	Lülenin yapıldığı malzeme	Lüle gazı çıkış açısı $\alpha (^{\circ})$	Lüle gaz çıkış alanı (mm^2)
Mannesmann	Çelik	64	28,9

Deneysel çalışmada kullanılan lüle ve sıvı metal akışını sağlayan pota akış ucunda çıkıntı aparatları vardır. Çıkıntı aparatlarının lüle ile olan bağlantıları Resim 5.7’de görülmektedir. Pota akış ucunun içerisine iç çapları sırasıyla 3 mm ve 4 mm olan iki ayrı seramik akış borusu yerleştirilmiştir. Deneysel çalışmada kullanılan çıkıntı aparatı Resim 5.8’de görülmektedir.



Resim 5.7. Çıkıntı aparatı - lüle bağlantısının görünümü [53]



Resim 5.8. Çıkıntı aparatının görünümü ($h = 6 \text{ mm}$) [53]

5.4. Gaz Atomizasyon Çalışmaları

Gazi Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Metroloji Laboratuvarı'ndaki gaz atomizasyon ünitesinde yapılan deneysel çalışmada, atomizasyon gazı olarak havanın kullanıldığı yakından eşlemeli Mannesmann tipi lüle sistemi ile kalay tozu üretilmiştir. Deneysel çalışmada sıvı kalay, ergime sıcaklığının üzerinde 400 °C'ye kadar ısıtılmıştır. Yakından eşlemeli sistemlerde sıvı metal akış borusunun ısıtılması önemlidir. Sıvı metalin içerisinden geçtiği akış borusunun iyi ısıtılamaması halinde, ergimiş metalin akış borusu ucunda sıcaklığı düşer ve debisi azalır. Oluşan geri basıncın etkisiyle ergimiş sıvı metal, akış borusu ucunda donabilmekte ve akış borusunu tıkayabilmektedir. Bu nedenle, yapılan deneysel çalışmada akış memesi içerisine yerleştirilen seramik akış borusunun çevresine direnç teli sarılmış ve üzeri şamot (tuğla çamuru) ile sıvanarak yalıtılmıştır. Direnç telinin kopmaması için ve sürekli ısıtmanın sağlanabilmesi için, akış ucunun bir tarafına açılmış olan kanal yardımı ile direnç telinin uçları voltaj regülatörüne bağlanmıştır.

Yapılan deneysel çalışmada öncelikle akış ucu ve çıkıntı aparatının bağlantıları, daha sonra aparatların lüle ile olan bağlantıları yapılmıştır. Pota fırın içerisine yerleştirilmiştir. İçerisinde pota bulunan fırın, akış ucu üzerine fırının alt kısmına açılan delikten oturtularak pota ile akış ucunun bağlantısı yapılmıştır. Açma-kapama çubuğu fırın içerisinde bulunan potanın merkezine monte edilmiş ve sızdırmazlık sağlayacak şekilde ayarlanmıştır. Çalışmada, ergitme fırını içerisindeki potaya 300 gr kalay konularak fırın çalıştırılmış ve kalay 400 °C'ye kadar ısıtılmıştır. Ergitilmiş kalayın sıcaklığı pota içerisine daldırılan ısıl çiftler ile ölçülmüştür. Kalayın ergimeye başlamasıyla birlikte sıvı metal akış borusu direnç teli ile ısıtılmaya başlanmıştır. Atomizasyon gaz basıncı, basınç ayar vanası ile istenilen basınç değerine ayarlanmış ve gaz lüleye gönderilmiştir. Açma-kapama çubuğunun yukarı doğru kaldırılmasıyla ergimiş kalayın akması ve gaz jeti ile parçalanması sağlanmıştır. Metal akışının sona ermesiyle gaz akışı durdurulmuş ve atomizasyon işlemi tamamlanmıştır. Atomizasyon kulesi bağlantı noktalarından sökülerek, toz toplama kabında ve siklonda biriken tozlar alınmıştır. Tozlar 250 µm'lik elek

elenerek, elek altı tozlar ayrılmış ve poşet içerisinde muhafaza edilmiştir. Toz toplama kabı, siklon ve kule iç yüzeyine yapışan tozlar silinerek gaz atomizasyon ünitesi temizlenmiştir. Deneysel çalışmada elde edilen kalay tozlarının yapıları ODTÜ laboratuvarlarında incelenmiş ve sonuçlar 6. bölümde deneysel sonuçlar ile ilgili kısımda verilmiştir.

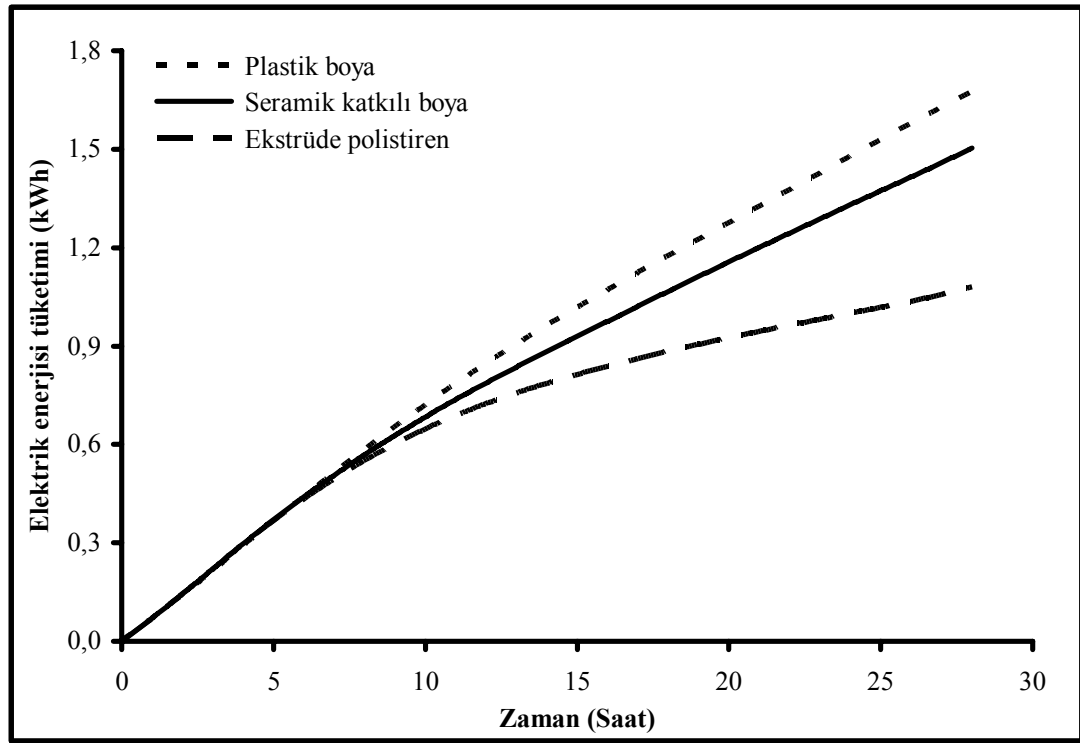
6. SONUÇLAR VE SONUÇLARIN TARTIŞILMASI

Çalışmanın bu bölümünde, indüktif bağlaşımlı plazma sistemlerinde üretilen küresel tozlarla ilgili yapılan teorik ve deneysel çalışma ile vakumlu küresel seramiklerin ısı yalıtım özelliklerinin incelenmesi için yapılan deneysel çalışmadan elde edilen sonuçlar verilmiştir. Sonuçlar deneysel ve teorik olarak ayrı ayrı başlıklar altında değerlendirilmiştir.

6.1. Deneysel Sonuçlar

6.1.1. Isı yalıtımı özellikleri ile ilgili sonuçlar

Çalışmada gerçekleştirilen ilk deneyde, seramik katkı boyanın kullanıldığı kapalı ortamda Hy-Tech Thermal Solutions firması tarafından geliştirilen #85 ısı yalıtım ile ısı aktarımını engelleyen astar boya kullanılmış ve daha sonra üzeri yine aynı firmanın geliştirdiği, RC#233 yalıtım boyası ile boyanmıştır. İlk deneyde her üç ortamın toplam elektrik enerjisi tüketiminin zamanla değişimi Şekil 6.1’de verilmiştir.



Şekil 6.1. RC#233 yalıtım boyası, plastik boya ve haddelenmiş (ekstrüde) polistiren ile yalıtılmış ortamların elektrik enerjisi tüketiminin zamanla değişimi

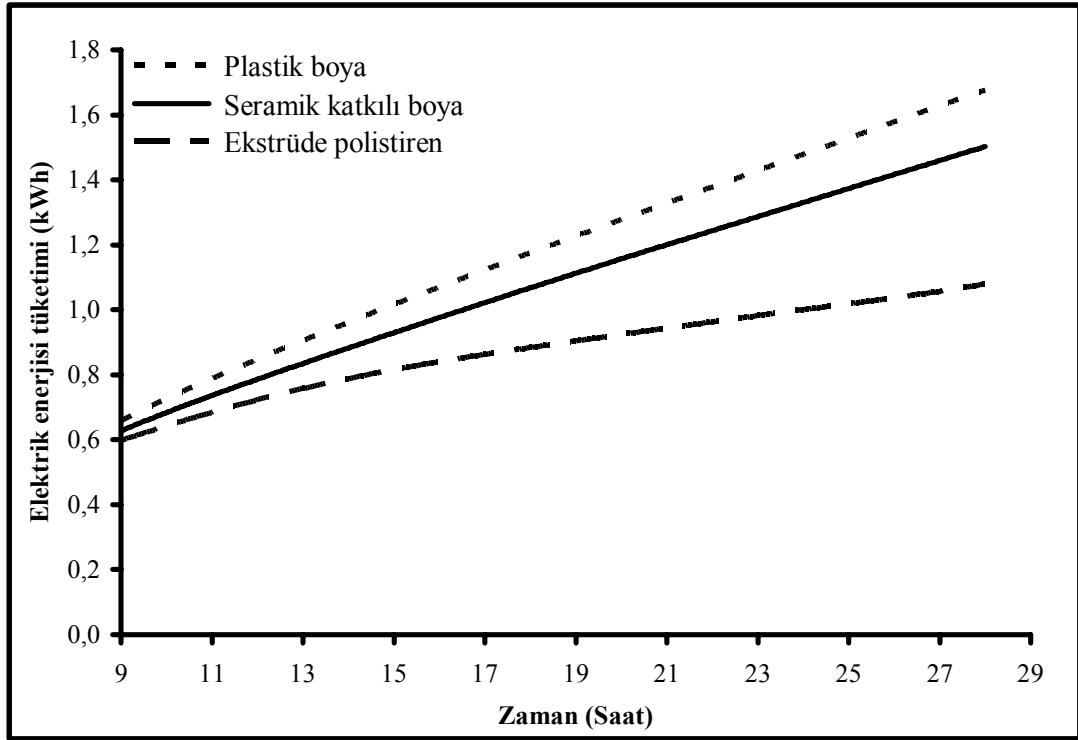
Şekil 6.1’de görüldüğü gibi deneyin başlangıcından itibaren üç ortamın iç sıcaklığının artış süreci aynı eğimle 6,5 saat devam etmektedir. Daha sonra ortamların farklı yalıtımlarının etkisi ile elektrik enerjisi tüketimleri değişmektedir. Elektrik enerjisi tüketimi yüksek olan plastik boya baz alınarak diğer iki ortamın farklı sürelerdeki elektrik enerjisi kazanımı yüzde olarak Çizelge 6.1’de verilmiştir.

Çizelge 6.1. Yüzde olarak elektrik enerjisi kazanımı

Deney süresi Yalıtım türü	10 Saat	15 Saat	20 Saat	25 Saat
Seramik katkılu boya	5,9	8,5	9,4	10,1
Haddelenmiş (ekstrüde) polistiren yalıtım	11,6	19,4	27,6	33,2

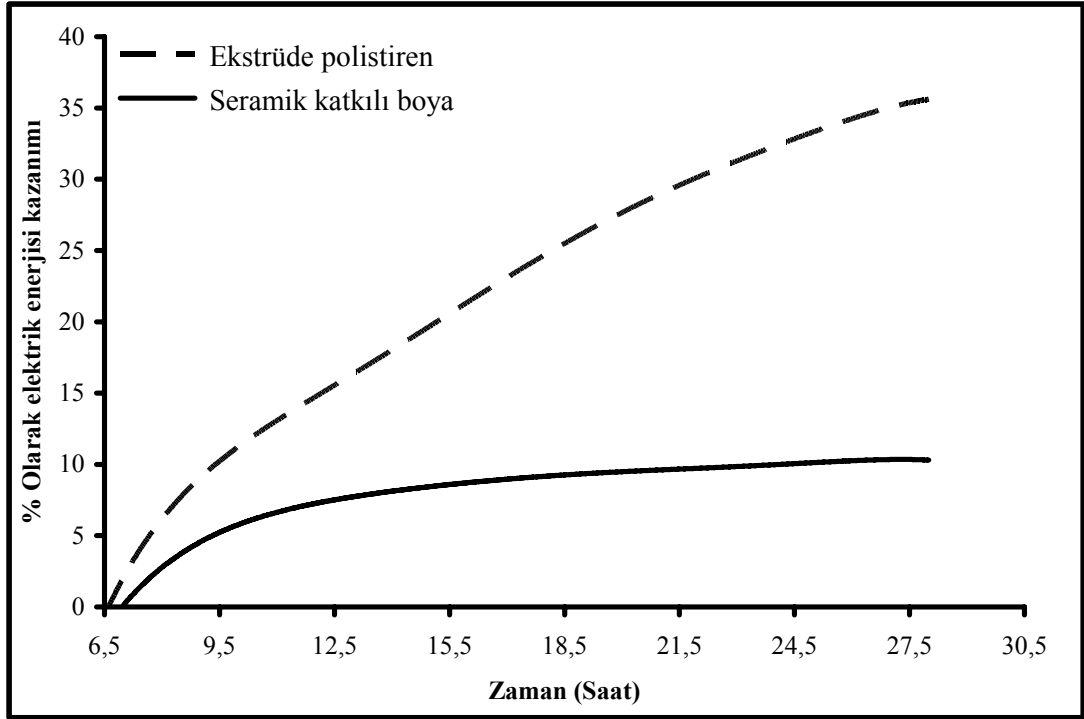
Üç farklı ortamın elektrik enerjisi tüketimindeki farkı ayrıntılı olarak görebilmek için Şekil 6.1, deneyin dokuzuncu saatinden başlamak üzere tekrar çizilmiş ve Şekil 6.2’de verilmiştir. Seramik katkılu boya ve haddelenmiş (ekstrüde) polistiren yalıtımlı

ortamın plastik boyaya göre elektrik enerjisi kazanımları Çizelge 6.1’de verilmiştir. Çizelgede görüldüğü gibi seramik katkılı boyanın plastik boyaya göre elektrik enerjisi tüketimi ilk 10 saatte % 5,9 ve 25 saat sonra % 10,1 daha azdır.

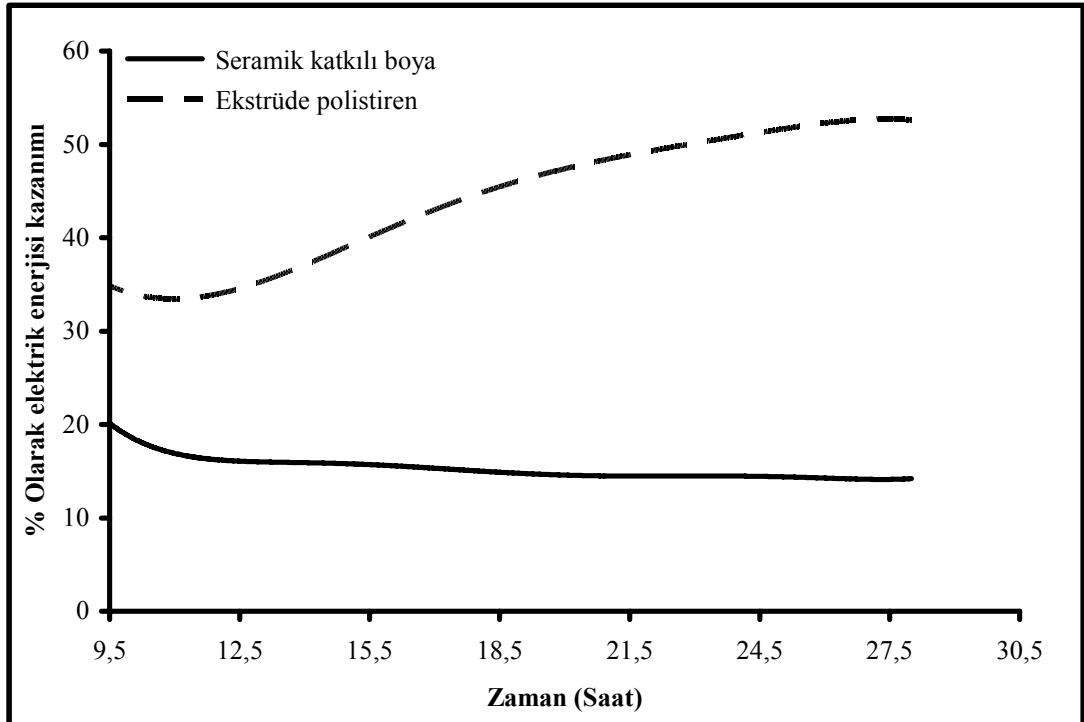


Şekil 6.2. RC#233 yalıtım boyası, plastik boya ve haddelenmiş (ekstrüde) polistiren ile yalıtılmış ortamların elektrik enerjisi tüketiminin zamanla değişimi

Yukarıda belirtildiği gibi kapalı ortamların iç ortam sıcaklıkları ilk deneyde termostatlar ile 28 °C sabit sıcaklıkta tutulmuş ve elektrik enerjisi tüketimleri elektrik sayaçları ile ölçülmüştür. Plastik boya ile karşılaştırıldığında Şekil 6.3’te görüldüğü gibi 28 saat sonunda haddelenmiş (ekstrüde) polistiren ile yalıtılan ortamın elektrik enerjisi kazanımı % 35,6 iken, seramik katkılı boyanın elektrik enerjisi kazanımı % 10,4 olmaktadır. Deneyler yaz aylarında, laboratuvar ortamında yapılmış ve ilk deney sırasında dış ortam sıcaklığı 24 °C olmuştur. Düşük iç ortam sıcaklıklarında plastik boyaya göre seramik katkılı boyanın Şekil 6.3’te görülen elektrik enerji kazanımı % 10,4’tür. Üç ortamın iç sıcaklığı 28 °C’ye ulaştıktan sonra seramik katkılı boyanın elektrik enerjisi kazanımı Şekil 6.4’te görüldüğü gibi % 20’den % 14,1’e düşmektedir.

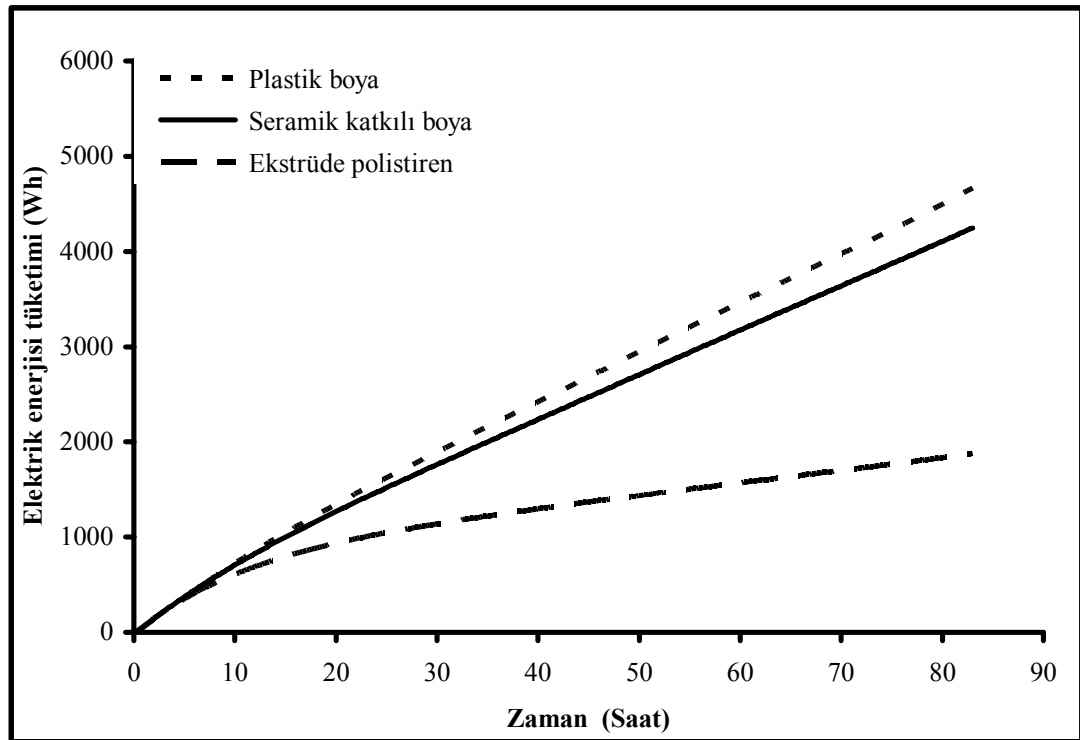


Şekil 6.3. Plastik boyaya göre yüzde olarak elektrik enerjisi kazanımının zamanla değişimi



Şekil 6.4. Plastik boyaya göre % olarak elektrik enerjisi kazanımının zamanla değişimi

İlk deney sonucunda seramik katkılı boya uygulanan kapalı ortamın yüzeyleri yeterince düzgün olmadığından, ikinci deney yapılmadan yüzeyleri düzeltmek ve pürüzlülüklerini gidermek için % 4 seramik katkılı yüzey düzeltici mastik kullanılmıştır. Daha sonra bunun üzerine RC#233 yalıtım boyası kullanılmıştır. İkinci deney sırasında dış ortam sıcaklığı 26 °C ve kapalı ortamların iç sıcaklıkları 30 °C'dir. Bu şartlarda elde edilen elektrik enerjisi tüketimi Şekil 6.5 ve Şekil 6.6'da görülmektedir. Şekil 6.5'te görüldüğü gibi deneyin başlangıcından itibaren ortamların ısınma süreci aynı eğimle 4 saat devam etmektedir. Daha sonra kapalı ortamların farklı yalıtımlarının etkisi ile elektrik enerjisi tüketimi değişmektedir. Şekilde görüldüğü gibi elektrik enerjisi tüketimi en yüksek olan plastik boyadır. Elektrik enerjisi tüketiminin yüksek olduğu plastik boya baz alınarak diğer iki ortamın farklı sürelerdeki yüzde elektrik enerjisi kazanımı Çizelge 6.2'de verilmiştir.



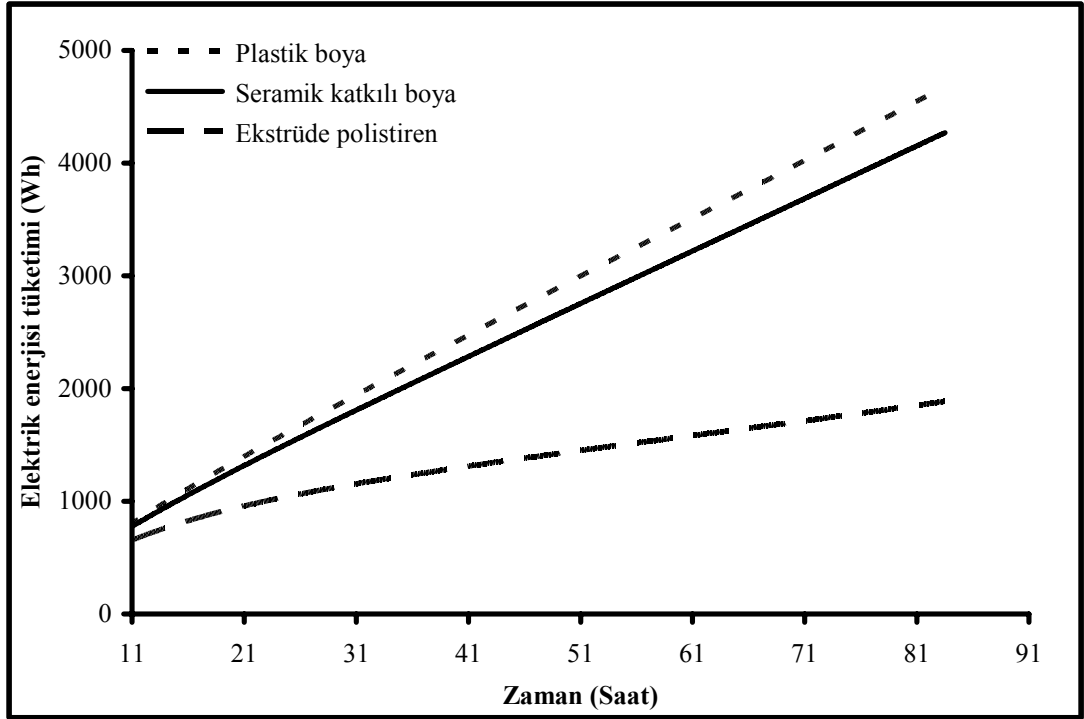
Şekil 6.5. RC#233 yalıtım boyası, plastik boya ve haddelenmiş (ekstrüde) polistiren ile yalıtılmış ortamların elektrik enerjisi tüketiminin zamanla değişimi

Çizelge 6.2. Yüzde olarak elektrik enerjisi kazanımı

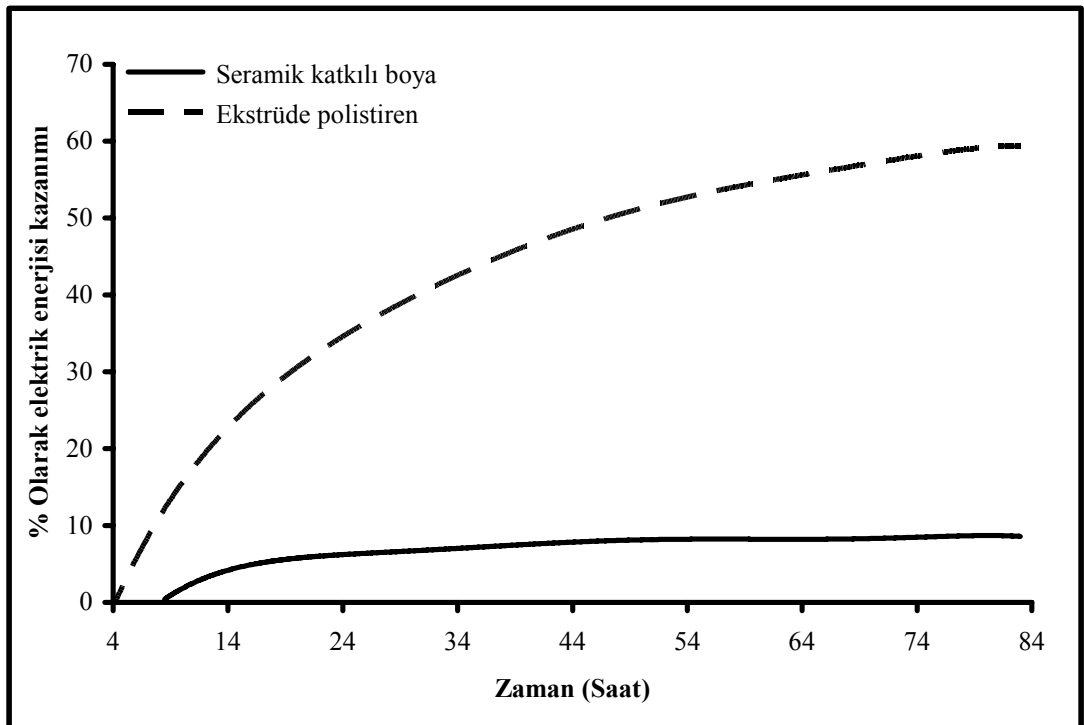
Deney süresi Yalıtım türü	20 Saat	30 Saat	40 Saat	50 Saat	60 Saat	70 Saat	80 Saat
Seramik katkılı boya	5,5	6,9	7,5	8,1	8,3	8,3	8,7
Haddelenmiş (ekstrüde) polistiren yalıtım	30,2	39,6	46,6	51,1	54,6	57,2	59,1

Kapalı ortamların üzerine uygulanan üç farklı yalıtım türünün elektrik enerjisi tüketimindeki farklarını görebilmek için Şekil 6.5 11. saatten başlamak üzere tekrar çizilmiş ve Şekil 6.6'da verilmiştir. Şekil 6.6 ve Çizelge 6.2'de görüldüğü gibi seramik katkılı boyanın plastik boyaya göre elektrik enerjisi tüketimi ilk 20 saatte % 5,5 ve 80 saat sonra % 8,7 daha azdır.

İkinci deneyde iç ortam sıcaklıkları 30 °C olacak şekilde ısıtıcılar termostatlar ile ayarlanmıştır. Deney başlangıcından 11 saat sonra plastik boya, 4 saat sonra haddelenmiş (ekstrüde) polistiren yalıtım, 8 saat sonra seramik katkılı boya uygulanan kapalı ortamın iç sıcaklığı 30 °C'ye ulaşmış ve daha sonra elektrik enerjisi tüketimlerinin zamanla değişimi Şekil 6.6'da görüldüğü gibi farklılaşmıştır.

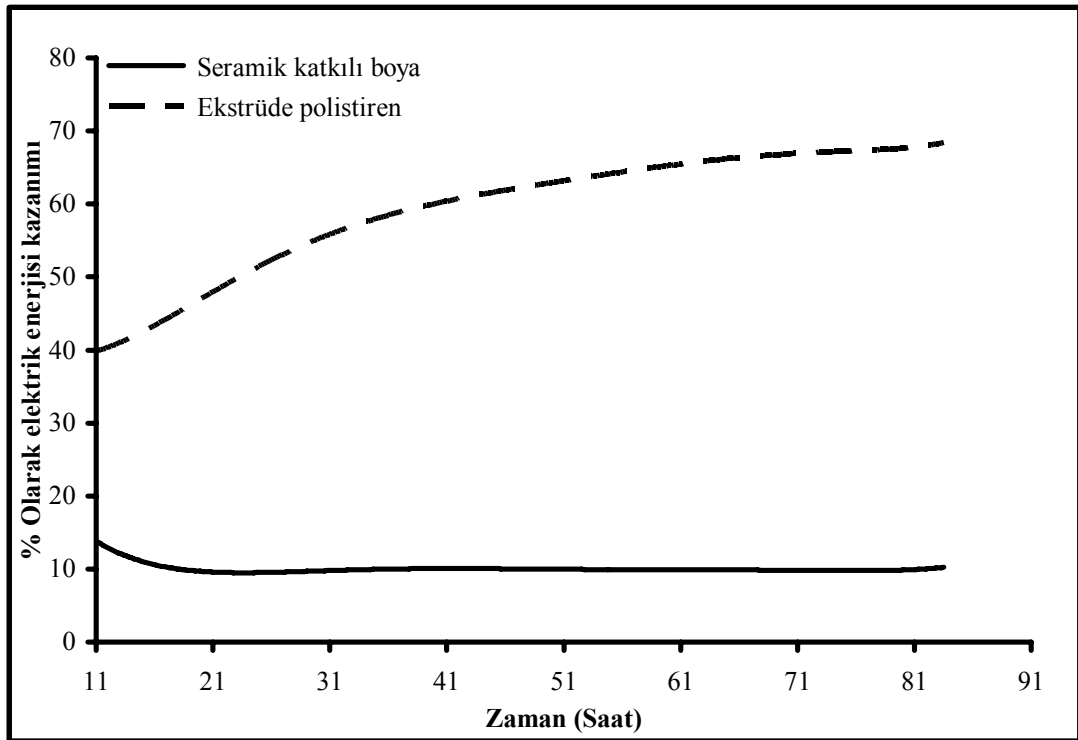


Şekil 6.6. RC#233 yalıtım boyası, plastik boya ve haddelenmiş polistiren ile yalıtılmış ortamların elektrik enerjisi tüketiminin zamanla değişimi



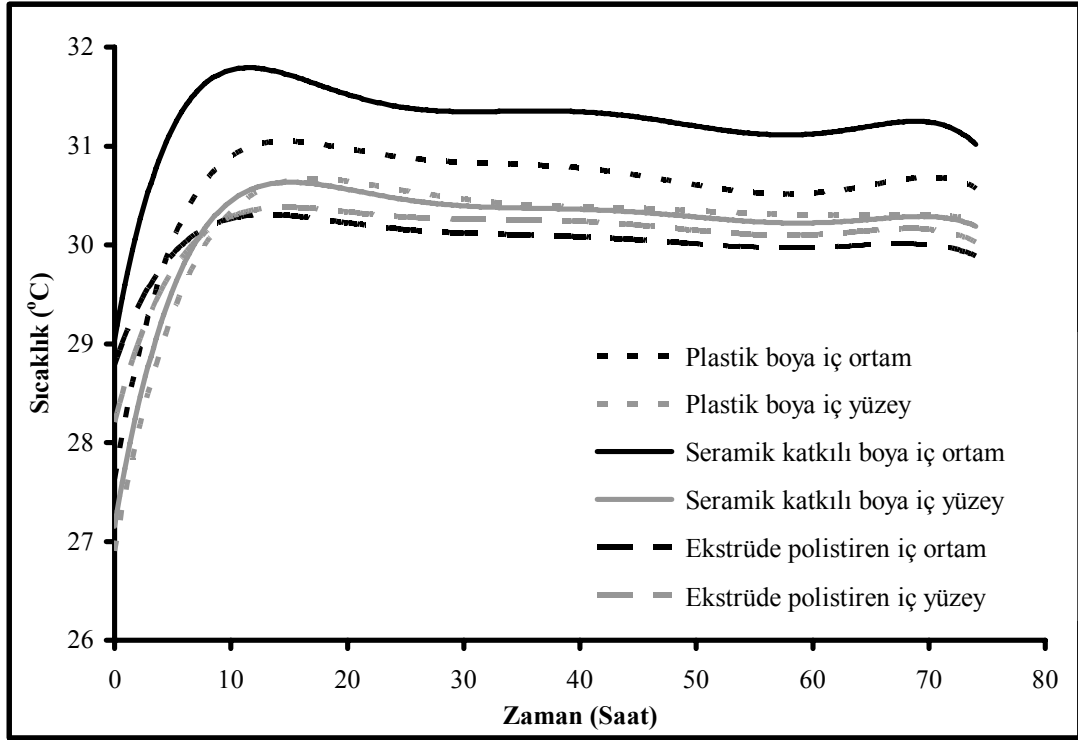
Şekil 6.7. Plastik boyaya göre yüzde olarak elektrik enerjisi kazanımının zamanla değişimi

Düşük sıcaklık farklarının olduğu ikinci deney süresince seramik katkılı boyanın elektrik enerjisi kazanımı Şekil 6.7’de görüldüğü gibi % 8’dir. Üç ortamın iç sıcaklığı 30 °C’ye ulaştıktan sonra seramik katkılı boya ile yalıtılan kapalı ortamın elektrik enerjisi kazanımı Şekil 6.8’de görüldüğü gibi % 13,8’den % 10,1’e düşmektedir.



Şekil 6.8. Plastik boyaya göre yüzde olarak elektrik enerjisi kazanımının zamanla değişimi

Kapalı ortamların iç ortam ve iç yüzey sıcaklıklarının zamanla değişimi Şekil 6.9’da görülmektedir. Şekilde de görüldüğü gibi seramik katkılı boya uygulanan ortam 30 °C iç sıcaklığa çok kısa sürede ulaşmaktadır. Bu olumlu davranış seramik katkılı boyanın yalıtım özelliğinden ve boya yüzeyinin yayıcılık özelliğinden kaynaklanmaktadır.

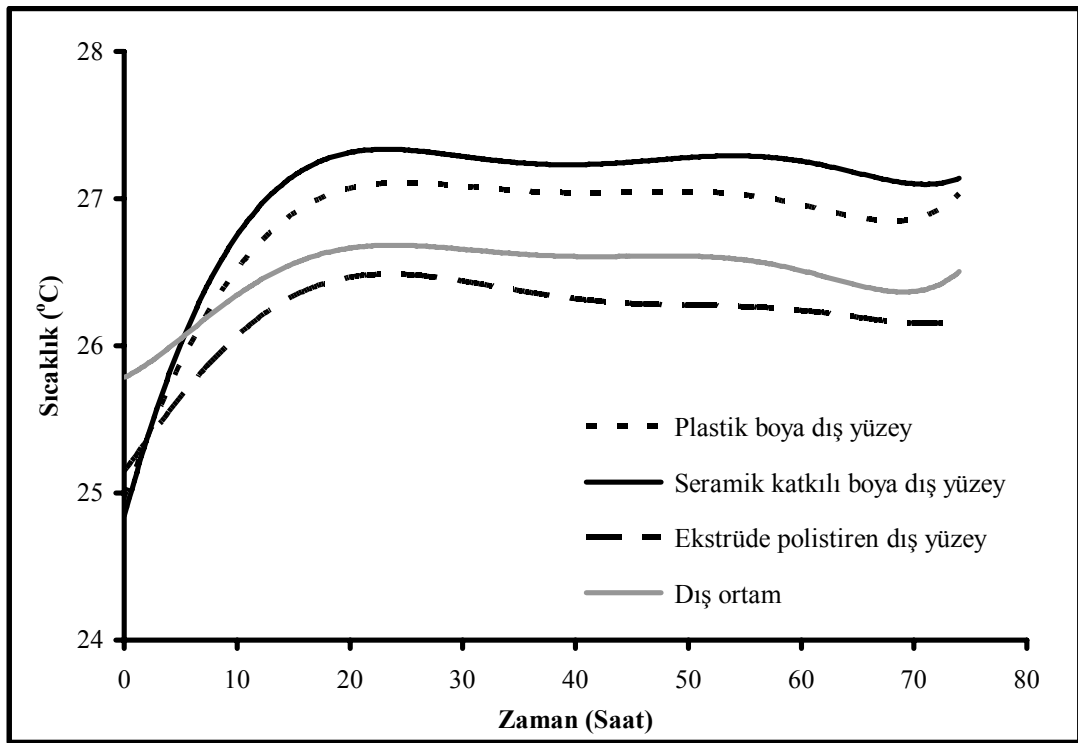


Şekil 6.9. RC#233 yalıtım boyası, plastik boya ve haddelenmiş polistiren ile yalıtılmış ortamların iç ortam ve yüzey sıcaklıklarının zamanla değişimi

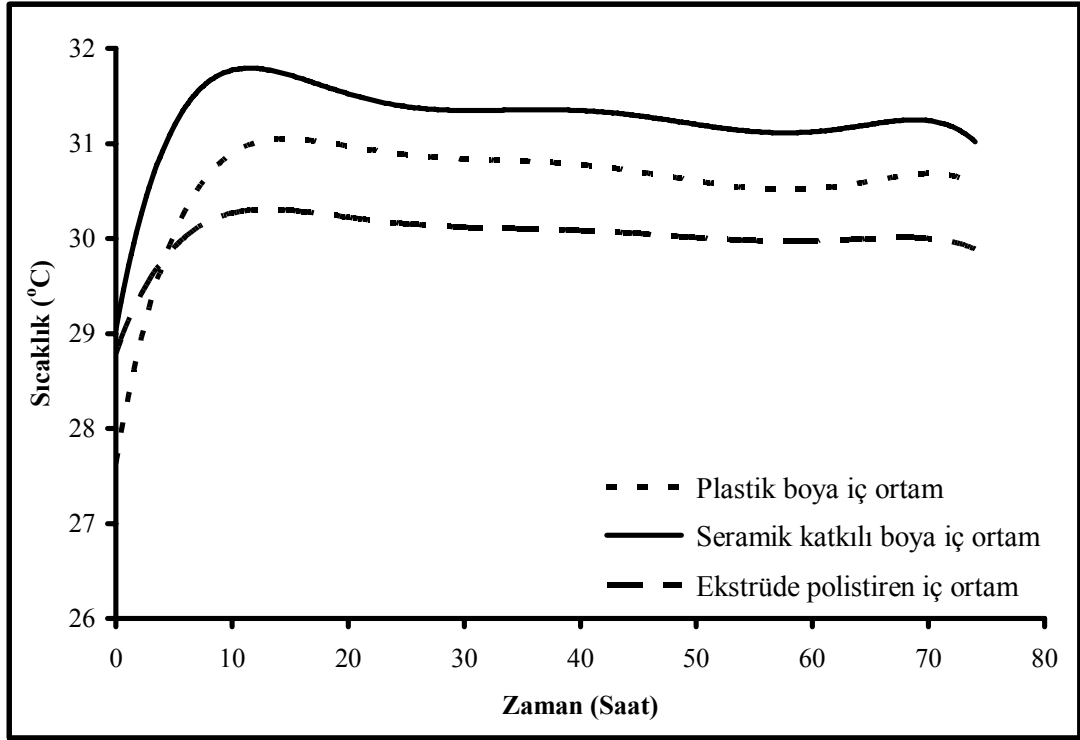
LabVIEW veri değerlendirme cihazı ile iç ortam, iç yüzey, dış ortam ve dış yüzey sıcaklıkları ölçülmüştür. Veri toplama cihazı ile kaydedilen bu sıcaklıklar Şekil 6.9, Şekil 6.10 ve Şekil 6.11’de verilmiştir. Deneyler süresince en yüksek iç ortam sıcaklığı seramik katkılı boya uygulanan kapalı ortam içerisinde ve dış yüzeyinde oluşmaktadır. Bu durum seramik katkılı boyanın bulunduğu ortamda yüzeylerin yüksek yayıcılıklarından kaynaklanmaktadır. Plastik boya ve seramik katkılı boya ile boyanmış yüzeylerin yayıcılıkları, bir dijital voltmetreden (Scaling Digital Voltmeter Model RDI) ve yayıcılığı ölçecek ölçüm kafasından oluşan, D&S(Devices & Services) Emissometre Model AE cihazı ile ölçülmüştür. Plastik boya ve seramik katkılı boya yüzeylerinin ölçülen yayıcılıkları Çizelge 6.3’te verilmiştir.

Çizelge 6.3. Seramik katkılı boya, mastik sıva ve plastik boya yüzeylerinin yayıcılıkları

Boya tipi	Ölçülen yayıcılık (ϵ)
#AL-2402 yalıtım boyası	0,41
Plastik boya	0,86
RC#233 yalıtım boyası (Yüzey pürüzlü)	0,90
Mastik sıva	0,83

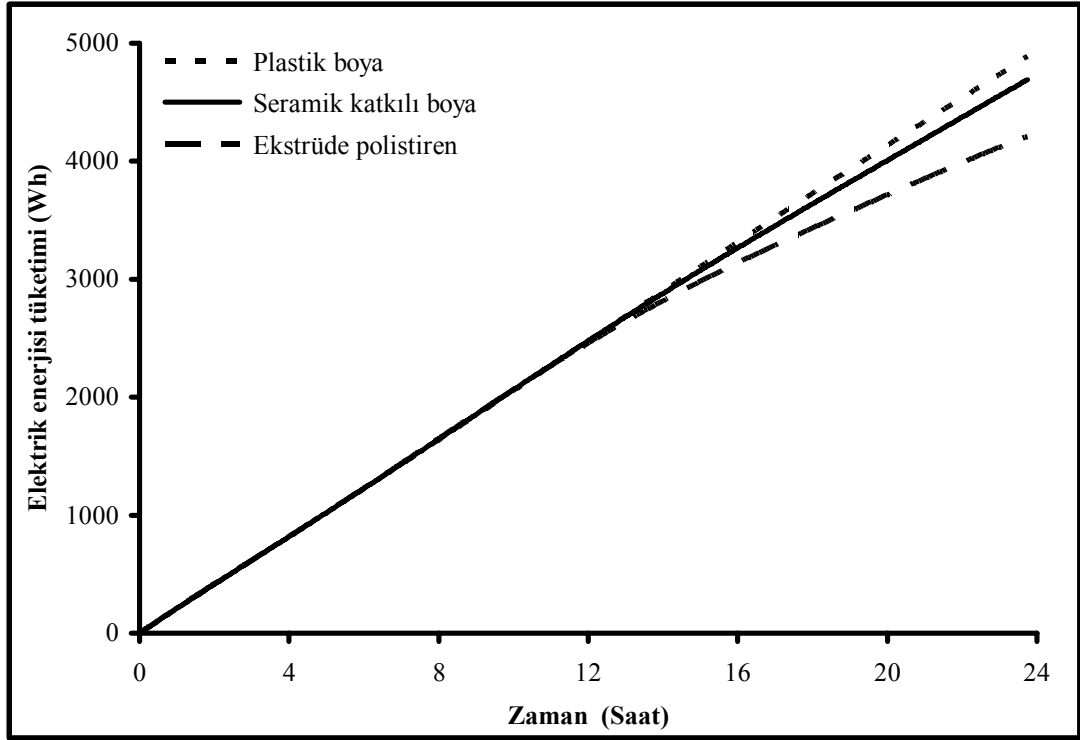


Şekil 6.10. RC#233 yalıtım boyası, plastik boya ve haddelenmiş polistiren ile yalıtılmış ortamların dış yüzey sıcaklık değerlerinin zamanla değişimi



Şekil 6.11. Kapalı ortamların iç sıcaklıklarının zamanla değişimi

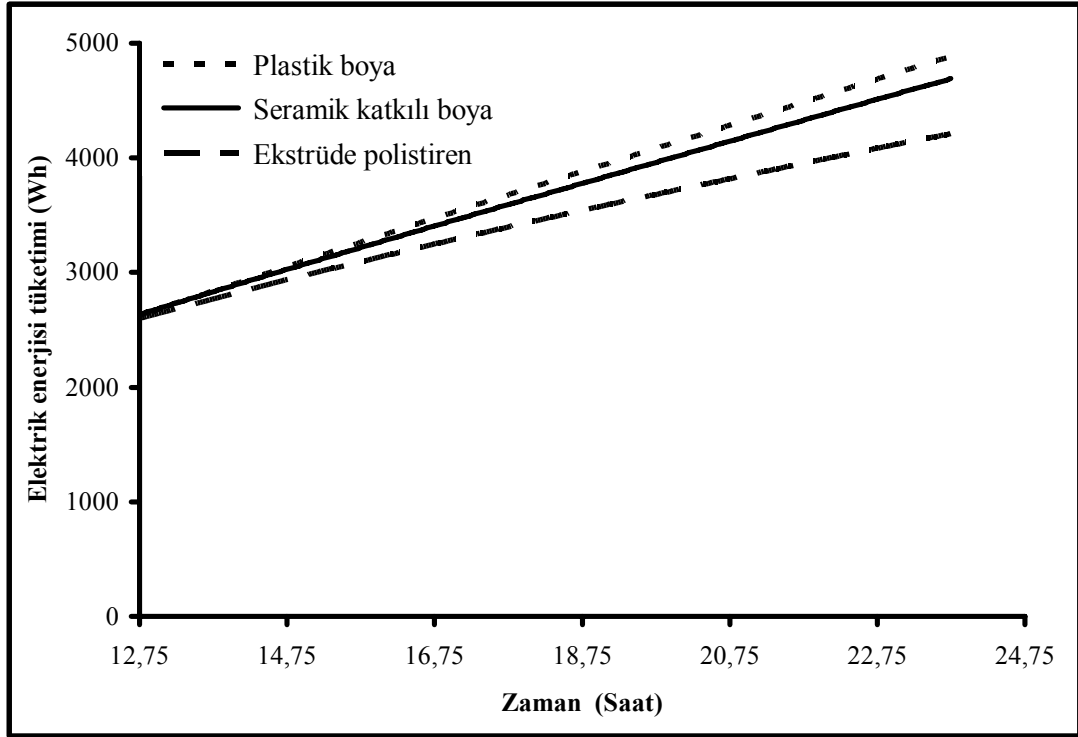
Üçüncü deneyde seramik katkılı boya uygulanan kapalı ortamın iç yüzeylerine #Al-2402 yalıtım boyası uygulanmış ve dış ortam sıcaklığı 23 °C iken, kapalı ortamların iç sıcaklıkları 40 °C’de tutulmuştur. Bu şartlarda elektrik enerjisi tüketimi Şekil 6.12 ve Şekil 6.13’te görülmektedir.



Şekil 6.12. #AL-2402 yalıtım boyasının elektrik enerjisi tüketiminin zamanla değişimi ve diğer yalıtım türü ve boya ile karşılaştırılması

Kapalı ortamların üçüncü deney süresince elde edilen elektrik enerjisi tüketimleri Şekil 6.12’de görülmektedir. Şekilde görüldüğü gibi, deneyin başlangıcından itibaren ortamların ısınma süreci aynı eğimle 9,5 saat devam etmektedir. Daha sonra kapalı ortamların farklı yalıtımlarının etkisi ile elektrik enerjisi tüketimi değişmektedir. Şekilde görüldüğü gibi elektrik enerjisi tüketimi en yüksek olan plastik boyadır. Elektrik enerjisi tüketiminin yüksek olduğu plastik boya baz alınarak diğer iki ortamın farklı sürelerdeki yüzde elektrik enerjisi kazanımı Çizelge 6.4’te verilmiştir.

Üç farklı yalıtım türünde elektrik enerjisi tüketimindeki farkı görebilmek için Şekil 6.12, 12,75’inci saatten başlamak üzere tekrar çizilmiş ve Şekil 6.13’te verilmiştir. Şekil 6.13 ve Çizelge 6.4’te görüldüğü gibi seramik katkılı boyanın plastik boyaya göre elektrik enerjisi tüketimi ilk 15 saatte % 0,9 ve 23 saat sonra % 3,8 daha azdır.

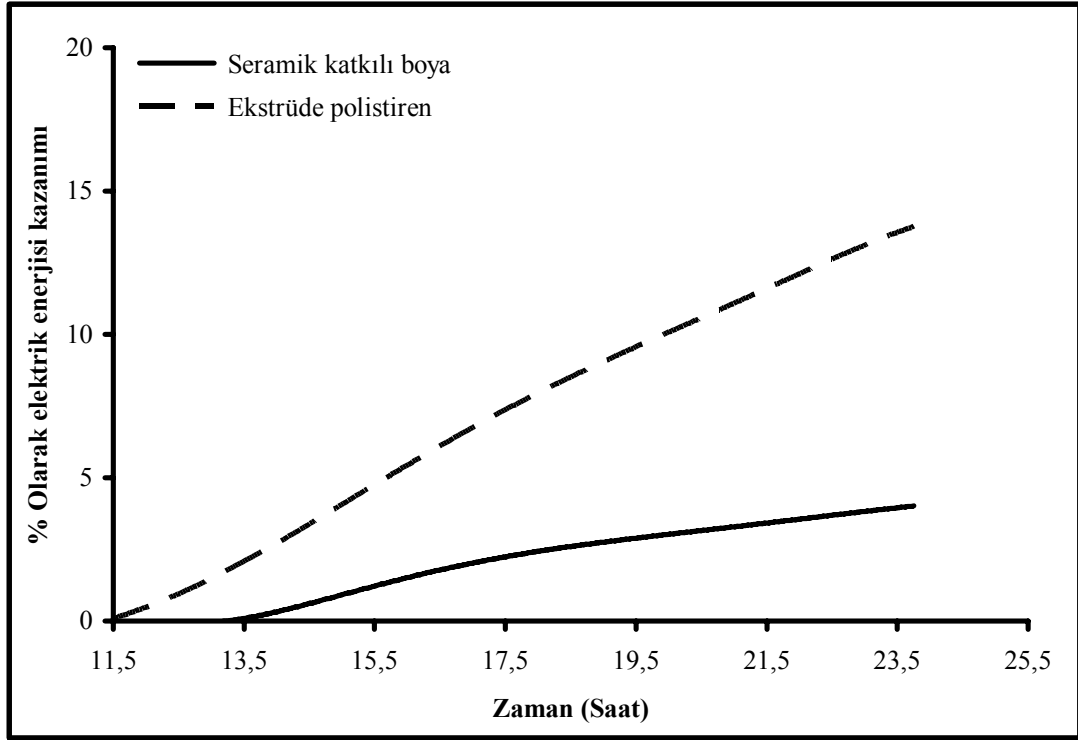


Şekil 6.13. #AL-2402 yalıtım boyasının elektrik enerjisi tüketiminin zamanla değişimi ve diğer yalıtım türü ve boya ile karşılaştırılması

Çizelge 6.4. Yüzde olarak elektrik enerjisi kazanımı

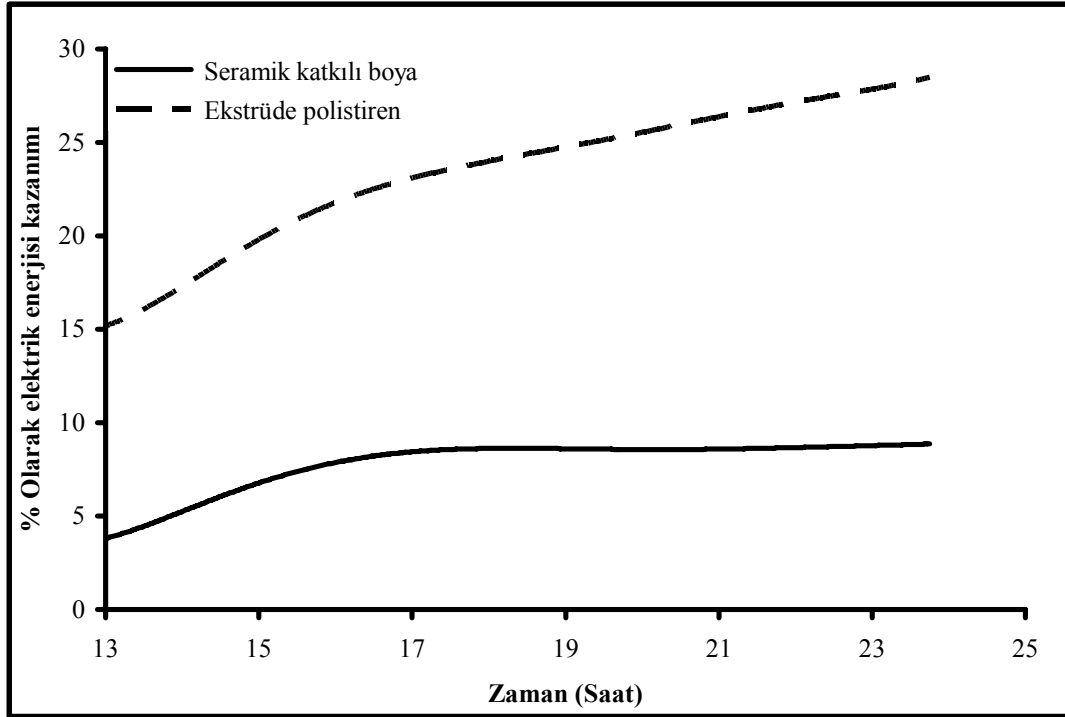
Yalıtım türü \ Deney süresi	Deney süresi				
	15 Saat	17 Saat	19 Saat	21 Saat	23 Saat
Seramik katkılı boya	0,9	2	2,7	3,3	3,8
Haddelenmiş (ekstrüde) polistiren yalıtım	4,1	6,8	9	11,1	13,1

Kapalı ortamların iç sıcaklıkları üçüncü deneyde termostatlar ile 40 °C sabit sıcaklıkta tutulmuştur. Deney başlangıcından 9,5 saat sonra haddelenmiş (ekstrüde) polistiren yalıtımlı kapalı ortamın iç sıcaklığı, 11,25 saat sonra seramik katkılı boya uygulanan kapalı ortamın iç sıcaklığı 40 °C'ye ulaşmış ve daha sonra elektrik enerjisi tüketimlerinin zamanla değişimi Şekil 6.13'te görüldüğü gibi farklılaşmıştır.

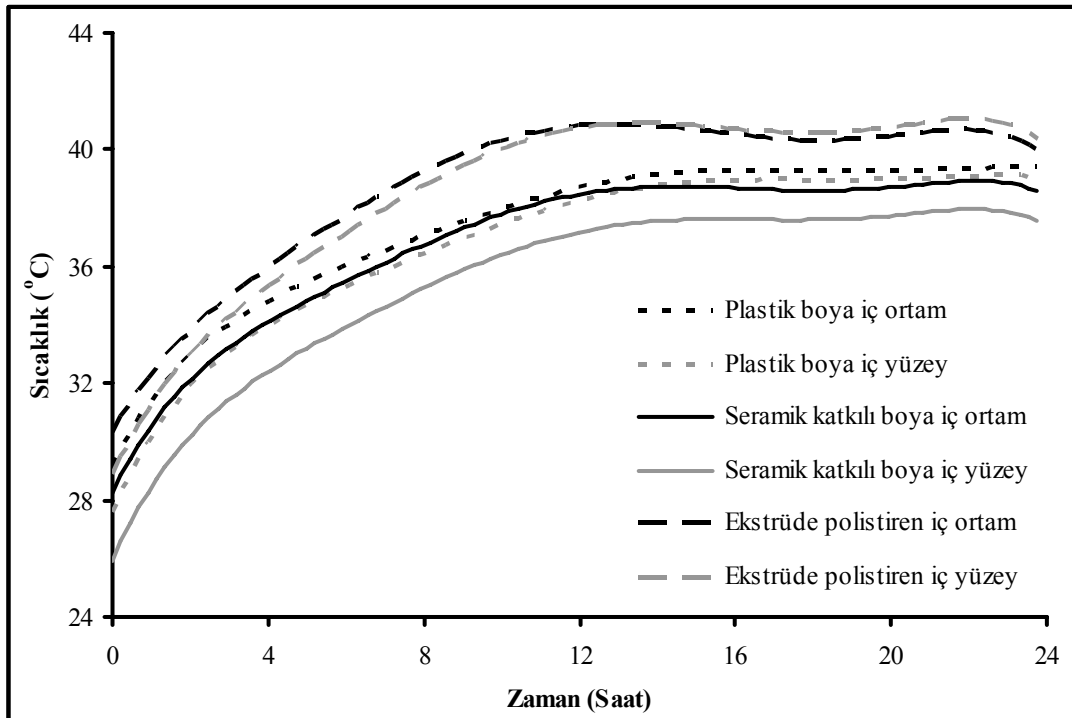


Şekil 6.14. Plastik boyaya göre yüzde olarak elektrik enerjisi kazanımının zamanla değişimi

Üçüncü deney süresince seramik katkılı boyanın elektrik enerjisi kazanımı Şekil 6.14'te görüldüğü gibi % 3,8'dir. Üç ortamın iç sıcaklığı 40 °C'ye ulaştıktan sonra, seramik katkılı boyanın elektrik enerjisi kazanımı Şekil 6.15'te görüldüğü gibi % 8,9 olmaktadır.



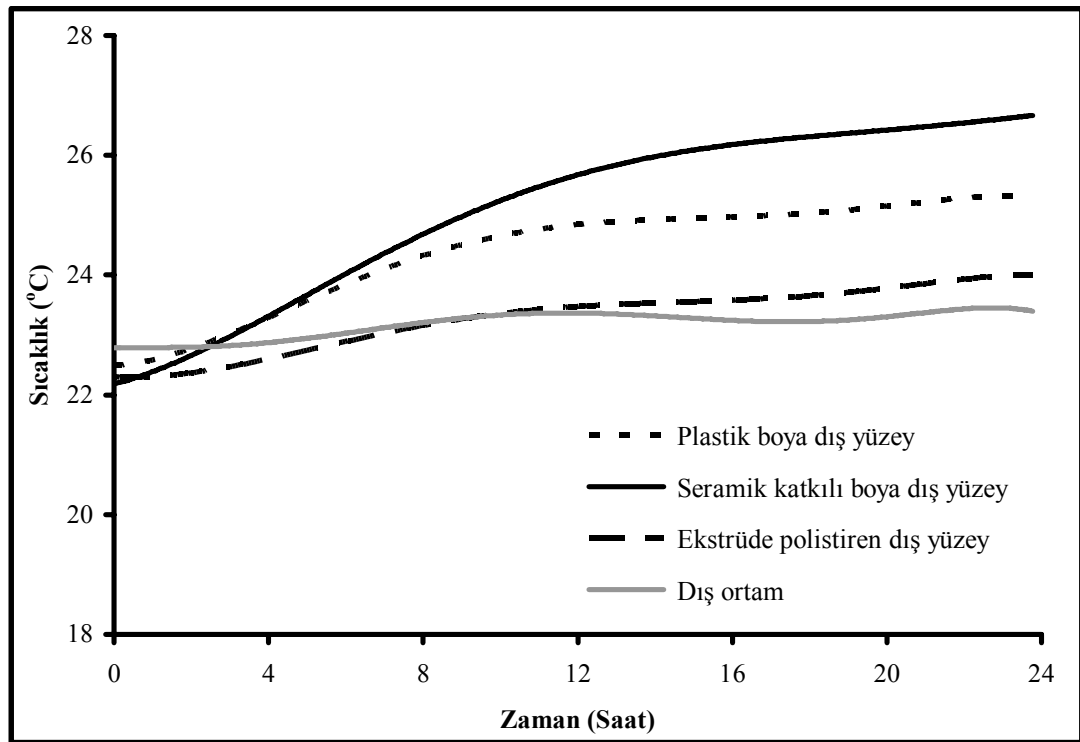
Şekil 6.15. Plastik boyaya göre yüzde olarak elektrik enerjisi kazanımının zamanla değişimi



Şekil 6.16. #AL-2402 yalıtım boyasının iç ortam ve iç yüzey sıcaklık değerlerinin zamanla değişimi

Kapalı ortamların iç ortam sıcaklıkları ile yüzey sıcaklıklarının zamanla değişimi Şekil 6.16’da görülmektedir. Şekilde de görüldüğü gibi seramik katkılı boya uygulanan ortam 40 °C iç sıcaklığa çok kısa sürede ulaşmaktadır. Bu olumlu davranış seramik katkılı boyanın yalıtım özelliğinden ve boya yüzeyinin yayıcılık özelliğinden kaynaklanmaktadır. Seramik katkılı boyanın bu olumlu davranışına karşın üçüncü deney süresince plastik boyalı kapalı ortamın iç sıcaklığı 40 °C’ye ulaşamamıştır.

LabVIEW data değerlendirme cihazı ile iç ortam, iç yüzey, dış ortam ve dış yüzey sıcaklıkları ölçülmüştür. Veri toplama cihazı ile kaydedilen bu sıcaklıklar Şekil 6.16 ve Şekil 6.17’de verilmiştir. Deneyler süresince en yüksek iç ortam sıcaklığı seramik katkılı boya uygulanan kapalı ortam içerisinde oluşmaktadır.



Şekil 6.17. #AL-2402 yalıtım boyasının dış yüzey sıcaklık değerlerinin zamanla değişimi

Bu deney düzeneği kullanılarak içi vakumlu küresel seramiklerin katkı maddesi olarak kullanıldığı boyaların ısı iletim katsayısının belirlenmesi mümkün değildir.

Bunun nedeni, deneyler sırasında seramik katkılı boya uygulanan kapalı ortamın yüzeylerinden aynı miktarda ısı kaybı olmamasıdır.

6.1.2. Ses yalıtımı özellikleri ile ilgili sonuçlar

Başlangıçta, düşük frekanslarda (63 Hz) seramik katkılı boya ile yalıtılan kapalı ortam içerisinde ölçülen ses seviyesi 48 dB iken, dış ortamda ölçülen ses düzeyi 16 dB'dir. Kapalı ortam içerisinde ses üretilmez iken, dış ortamda ölçülen ses seviyesi 16 dB'dir. 125 Hz'de kapalı ortamlar içerisindeki ses seviyesi seramik katkılı boyalar için 61 dB iken, dış ortamda ölçülen ses düzeyi 24 dB'dir. Bu durumda kapalı ortam içerisinde ses üretilmez iken, dış ortamda ölçülen ses seviyesi 3 dB'dir. 250 Hz'de kapalı ortamlar içerisindeki ses seviyesi seramik katkılı boyalar için 75 dB iken, dış ortamda ölçülen ses düzeyi 50 dB'dir. Bu durum ve daha yüksek frekanslarda yapılan ölçümler için kapalı ortam içerisinde ses üretilmez iken, dış ortamda ölçülen ses seviyesi 0 dB'dir. Seramik katkılı boya 2000 Hz ile 7000 Hz arasında normal boyanın altında ses geçirgenliğine sahipken, 7000 Hz üzerinde normal boyadan daha yüksek ses geçirgenliğine sahip olmaktadır.

Sonuç olarak seramik katkılı boyaların ses geçiş kaybı özelliği poliüretanla karşılaştırıldığında 63 Hz frekansta 32-14 dB daha yüksek, 125 Hz frekansta 42-37 dB daha düşük, 250 Hz frekansta 28-25 dB daha düşük, 500 Hz frekansta 23-16 dB daha yüksek ve 1000 Hz frekansta 24-21 dB daha yüksek olduğu Çizelge 6.5, Çizelge 6.6 ve Çizelge 6.7'de görülmektedir. Sistem dışındaki ses ölçümleri Reten Electronic firmasının üretmiş olduğu RS 104 tip analog göstergeli cihazla ölçülmüştür. Sistem içerisinde ses, sinüzoidal olarak, CoolEdit programı ile bilgisayar ortamında elde edilmiştir. Bu sinüzoidal ses iki hoparlör yardımı ile kapalı ortamlarda oluşturulmuştur.

Çizelge 6.5. Plastik boya uygulanan ortamda yapılan ölçümler

Boya				
Frekans (Hz)	İç Ortamda Ölçülen Ses Seviyesi (dB)	Dış Ortamda Ölçülen Ses Seviyesi (dB)	Çevrenin Ses Seviyesi (dB)	Ses Geçiş Kaybı (dB)
63	46	14	12	32
125	62	15	6	47
250	65	39	0	26
500	62	33	0	29
1000	72	40	0	32
2000	55	26	0	29
4000	69	30	0	39
8000	61	3	0	58

Çizelge 6.6. Seramik katkılı boya uygulanan ortamda yapılan ölçümler

Seramik Katkılı Boya				
Frekans (Hz)	İç Ortamda Ölçülen Ses Seviyesi (dB)	Dış Ortamda Ölçülen Ses Seviyesi (dB)	Çevrenin Ses Seviyesi (dB)	Ses Geçiş Kaybı (dB)
63	48	16	16	32
125	61	24	3	37
250	75	50	0	25
500	65	42	0	23
1000	76	52	0	24
2000	60	30	0	30
4000	69	29	0	40
8000	57	18	0	39

Çizelge 6.7. Ekstrüde polistiren yalıtım uygulanan ortamda yapılan ölçümler

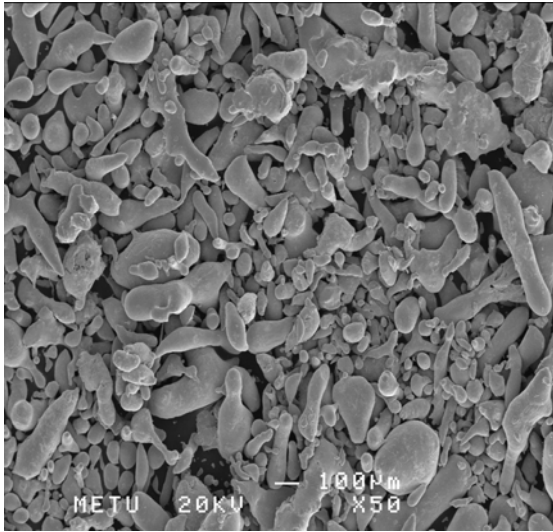
Haddelenmiş (Ekstrüde) Polistiren Yalıtım				
Frekans (Hz)	İç Ortamda Ölçülen Ses Seviyesi (dB)	Dış Ortamda Ölçülen Ses Seviyesi (dB)	Çevrenin Ses Seviyesi (dB)	Ses Geçiş Kaybı (dB)
63	27	13	12	14
125	60	18	4	42
250	72	44	4	28
500	58	42	0	16
1000	68	47	0	21
2000	58	28	0	30
4000	57	34	0	23
8000	64	15	0	49

Çizelge 6.5, Çizelge 6.6 ve Çizelge 6.7’de verilen ses geçiş kayıpları iç ortam ve dış ortamda ölçülen ses seviyeleri arasındaki farktır. Çizelgelerde de görüldüğü gibi 500 Hz ve üzerindeki frekanslarda çevre ses seviyesi 0 dB’dir.

6.1.3. Toz üretim deneyinin sonuçları

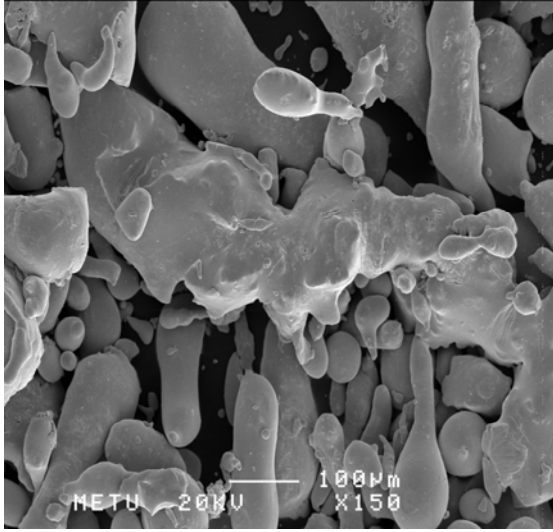
Çalışmanın bu bölümünde, atomizasyon değişkenlerinden gaz basıncı ve çıkıntı uzunluğunun tozların boyut ve dağılımına, şekline, morfolojisine ve mikroyapısına olan etkileri ele alınmıştır.

Aşağıda Resim 6.1-Resim 6.3’te Gazi Üniversitesi Metroloji Laboratuvarı’nda bulunan gaz atomizasyon ünitesinde atomizasyon gazı olarak havanın kullanıldığı deneysel çalışmada üretilen kalay taneciklerinin SEM (Scanning Electron Microscope) ile çekilen fotoğrafları görülmektedir.

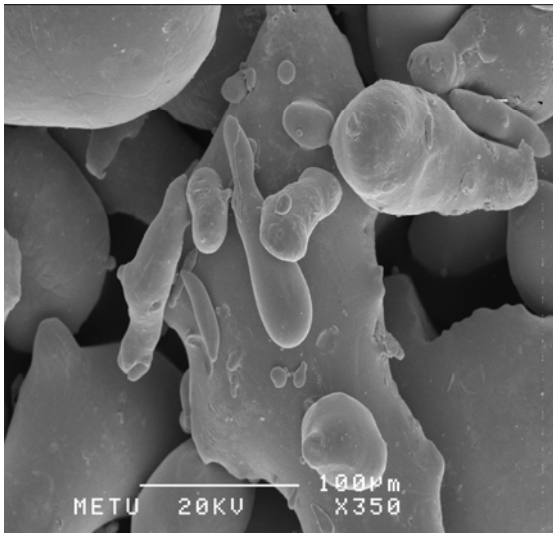


Resim 6.1. Kalay taneciklerinin 50 kez büyütülerek çekilmiş fotoğrafı

Resim 6.1-Resim 6.3’te atomizasyon gazı olarak havanın kullanıldığı gaz atomizasyon ünitesi ile üretilen kalay tozlarının küresel şekle sahip olmadığı görülmektedir.



Resim 6.2. Kalay taneciklerinin 150 kez büyütülerek çekilmiş fotoğrafı



Resim 6.3. Kalay taneciklerinin 350 kez büyütülerek çekilmiş fotoğrafı

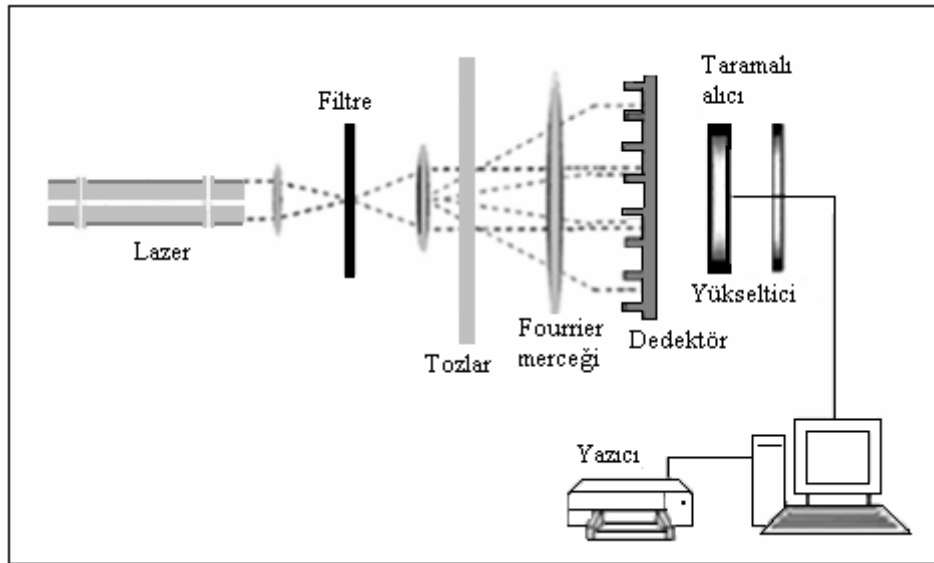
Atomize edilip 250 μm 'lık (60 meş) elekten elendikten sonra elde edilen elek altı kalay tozlarının boyut analizi, Resim 6.4'te görülen ve Fraunhofer'ın lazer ışınının kırınımı teorisine göre çalışan Malvern Mastersizer E lazerle parçacık boyutu ölçme cihazında yapılmıştır.

Bu teoriye göre, katı cisimler ışığı çaplarının karesiyle ters orantılı olarak kırarlar. Bu amaçla; içerisinde uygun bir taşıyıcı ortamda süspansiyon halinde bulunan tozların

pompa yardımıyla lazer ışınlarının önünden geçmesini sağlayan hazne, ışın yoluna yerleştirilir. Bu hazneden ve daha sonrada seçilen lens üzerinden geçip dedektör üzerine düşen kırılmış ışının açısı ve şiddeti dedektörde ölçülür.



Resim 6.4. Malvern Mastersizer E parçacık boyutu ölçme cihazı



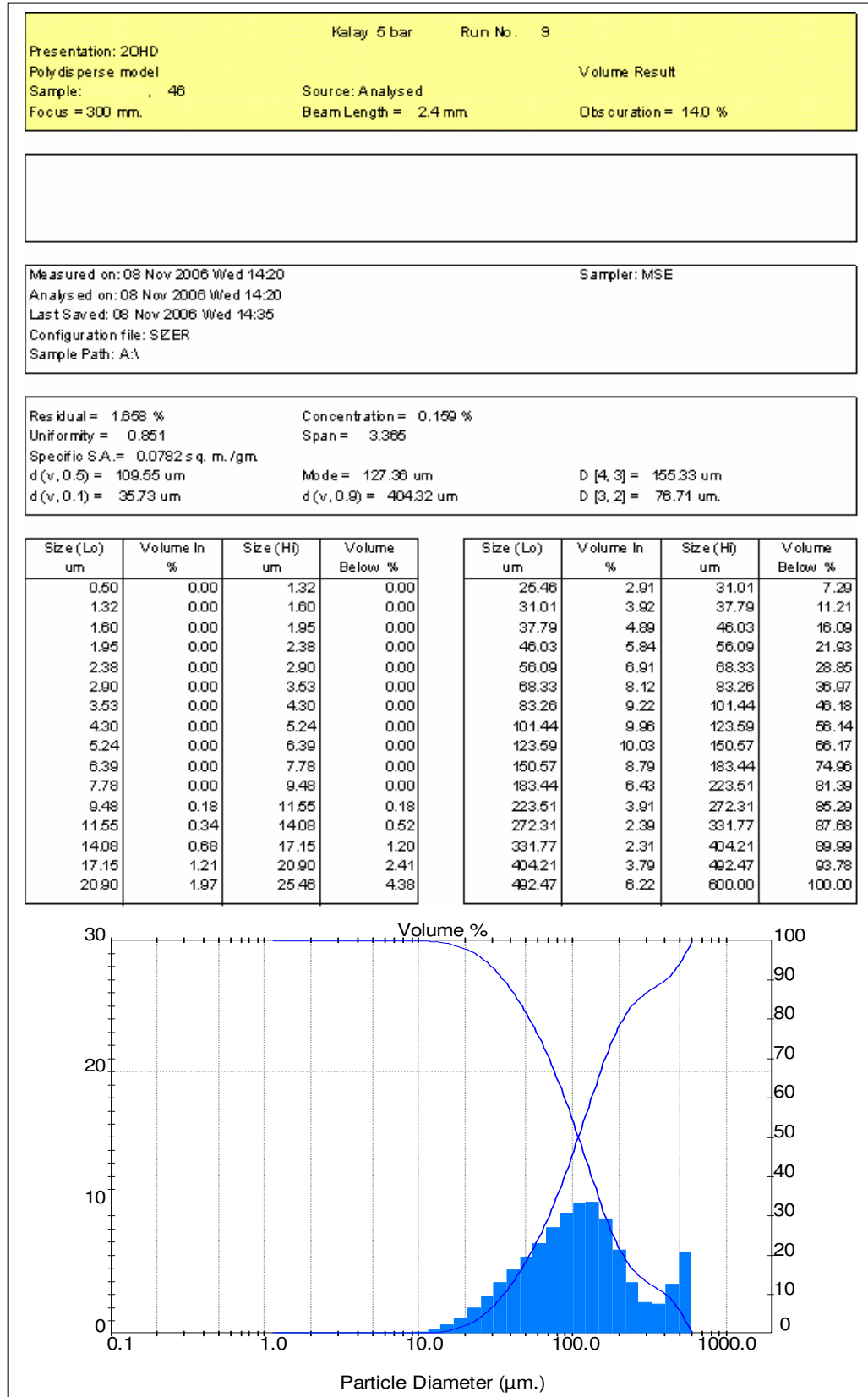
Şekil 6.18. Lazer ışınının kırınımı teorisinin şematik görünümü

Bu teoriye göre hesaplanan toz boyutları, ölçüm sırasında otomatik olarak bilgisayara kaydedilir ve birçok istatistik bilgi ile birlikte toz dağılımı grafik olarak elde edilir (Şekil 6.18). Cihaz 0,1-600 μm arasındaki toz boyutlarını ölçebilmektedir. Ölçümler sırasında taşıyıcı ortam olarak su kullanılmıştır. Bu teknikte toz şekli küresel kabul

edilir. Tozların topaklanmasının algılanması zordur ancak, uygun bir taşıyıcı ortam kullanılarak veya ultrasonik titreştirici yardımıyla topaklanma en aza indirilebilir.

Malvern Mastersizer E lazerli boyut analizi cihazı ile yapılan analiz raporu Şekil 6.19'da verilmiştir. Şekilde d_{50} şeklinde ifade edilen ortalama boyut $d(0,5)$, tozların %10'unun kendisinden küçük olduğu toz boyutu $d(0,1)$, tozların %90'ının kendisinden küçük olduğu toz boyutu $d(0,9)$, Sauter ortalama çapı $D[3,2]$ ve hacim ortalama çapı $D[4,3]$ olarak görülmektedir. Şekilde istatistiki bilgilerin verildiği tabloda 2. sütun, 1. ve 3. sütunlardaki toz boyut aralıklarındaki toz yüzdesi, 4. sütun ise 3. sütundaki toz boyutları için kümülatif yüzdendir [53].

Şekil 6.19'da tablodaki bu veriler, grafik üzerinde kümülatif yüzde eğrileri, frekans eğrisi ve histogram ile gösterilmiştir. Grafikte yatay eksen toz boyutunu, sağ düşey eksen kümülatif toz yüzdesini, sol düşey eksen ise histogram da görülen toz boyutu aralıklarındaki toz yüzdesini ifade etmektedir. Bütün bu değerleri Şekil 6.19'daki analiz raporundan örnekleyecek olursak; $11,55 \mu\text{m}$ ile $14,08 \mu\text{m}$ arasında var olan toz yüzdesinin % 0,34 olduğu ve tozların % 0,52'sinin $14,08 \mu\text{m}$ 'den küçük olduğu görülmektedir.



Şekil 6.19. Malvern Mastersizer E ile yapılan toz boyutu analiz raporu

Şekil 6.19’da Gazi Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Metroloji Laboratuvarı’nda bulunan gaz atomizasyon ünitesinde atomizasyon gazı olarak havanın kullanıldığı deneysel çalışmada üretilen kalay tozlarının tanecik boyutunun hacimsel olarak dağılımı görülmektedir. Gaz atomizasyon ünitesinde yapılan deneysel çalışmada, yakından eşlemeli Mannesmann tipi lüle sistemi ile kalay tozu üretilmiştir. Üretilen ve toz toplama kabında biriken toz boyutlarıyla ilgili değerler incelendiğinde, ortalama toz boyutunun $109,55 \mu\text{m}$ olduğu görülmüştür. Tozların %10’unun boyutu $35,73 \mu\text{m}$ ’nin altındadır. Tozların %90’ının boyutu $404,32 \mu\text{m}$ ’nin altındadır. Yapılan deneysel çalışmada, atomizasyon kulesinin iç yüzeylerine fazla miktarda kalay tozunun yapışarak katılaştığı görülmüştür. Bunun nedeni 64° olan lüle gaz çıkış açısının büyük olmasıdır. Lüle gaz çıkış açısının küçülmesi hem daha küçük boyutta tozların üretilmesini, hem de daha az miktarda tozun atomizasyon kulesi iç yüzeyine yapışmasını sağlayacaktır [53].

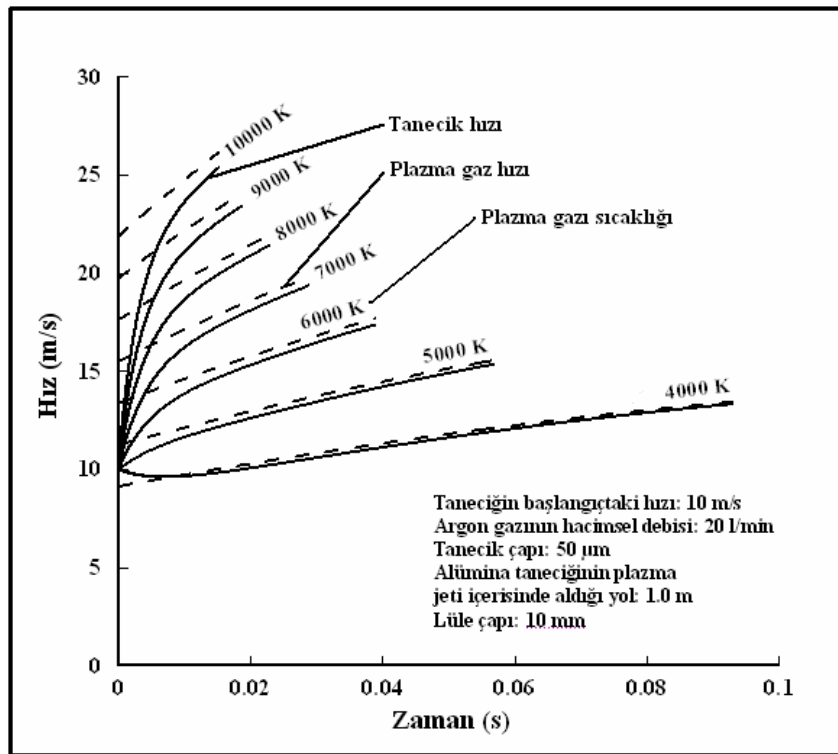
6.2. Teorik Sonuçlar

Küresel tozların indüktif bağlaşımlı ısı plazma sisteminde üretilmesi ile ilgili bir teorik çalışma yapılmıştır. Bu çalışmada, parçacıkların ve gazın lüleden çıkışından itibaren geçen zaman “proses zamanı” olarak adlandırılmıştır. Lüle içerisinde plazma oluşmamakta ve parçacık erimemektedir. Lüle çıkışından itibaren lüle çıkışının ve torçun etkisi ile plazma oluşmakta ve plazma içerisinde parçacıklar erimektedir. Sayısal çözümde zaman adımı 0,00001 saniye alınmıştır.

Çizelge 6.8’de verilen plazma sisteminin çalışma parametrelerinde momentum ve enerji denkleminin çözülmesi için FORTRAN dilinde bir bilgisayar programı yazılmıştır. Analizde, plazma gazının hacimsel debisi ve sıcaklığı, taneciğin başlangıç sıcaklığı ve hızı, lüle çapı, tanecik malzemesi ve taneciğin plazma içerisinde aldığı yol için varsayımlar yapılmıştır. Çalışmada kullanılan plazma gazı argondur ve argon gazının özellikleri tablolar halinde literatürde verilmiştir [55]. Bu tablolardan ampirik bağıntılar elde edilmiş ve bilgisayar programında kullanılmıştır.

Çizelge 6.8. Isıl plazma sisteminin çalışma şartları

Plazma gazı	: Argon
Plazma sıcaklığı	: 4000-10000 K
Plazma gazının hacimsel debisi	: 15, 20, 25, 30 l/min
Taneciğin başlangıç sıcaklığı	: 300 K
Taneciğin başlangıç hızı	: 5, 10, 20 m/s
Lüle çapı, D	: 10 mm
Tanecik malzemesi	: Al_2O_3
Taneciğin plazma sistemi içerisinde aldığı yol	: 1.0 m

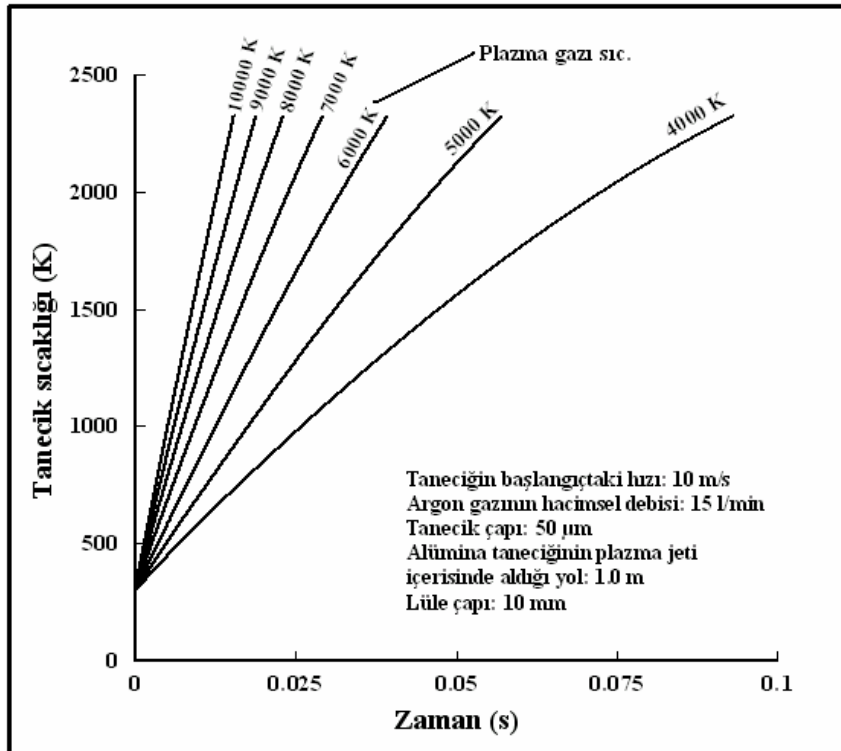


Şekil 6.20. Tanecik ve plazma gazı hızının zamanla ve plazma gazı sıcaklığı ile değişimi

Tanecik ve plazma gazı hızının zamanla ve plazma gazı sıcaklığı ile değişimi Şekil 6.20’de verilmiştir. Şekil 6.20 taneciğin 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 µm’dir. Çizelge 6.8’de görüldüğü gibi taneciğin yolu 1,0 m alınmıştır.

Düşük sıcaklıklarda taneciklerin ve plazma gazının hızı düşüktür. Plazma gazının sıcaklığı artarken plazma gazının hızı ile taneciğin 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 taneciğin hızında bir düşüş görülmektedir.



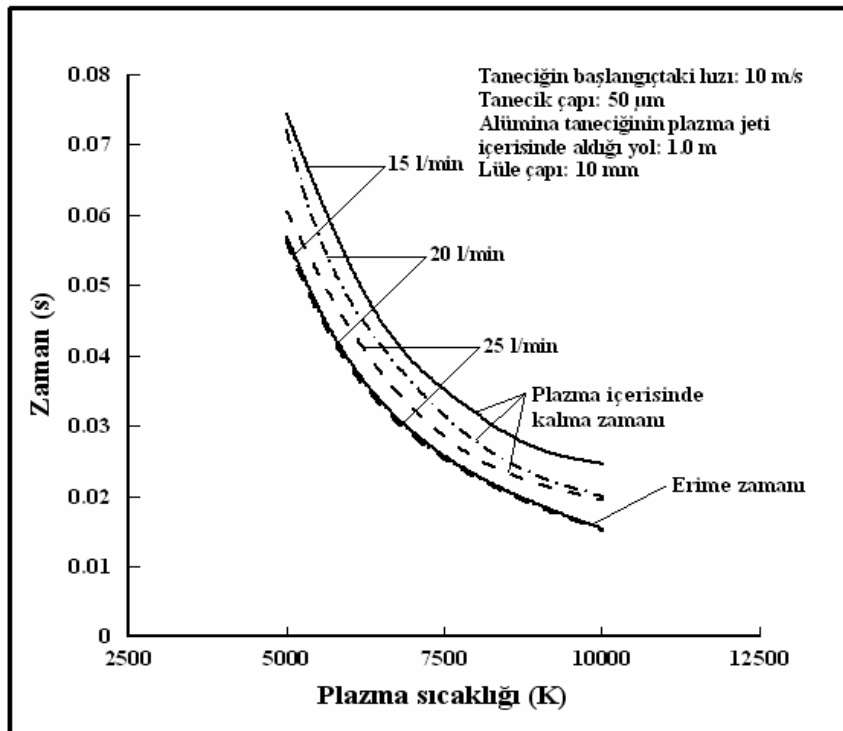
Şekil 6.21. Tanecik sıcaklığının zaman ve plazma gazı ile değişimi

Taneciğin sıcaklığının zaman ve plazma gazı ile değişimi Şekil 6.21’de verilmiştir. Taneciğin başlangıç sıcaklığı Çizelge 6.8’de verildiği gibi 300 K’dir. Tanecik kısa bir sürede plazma gazı sıcaklığına bağlı olarak erime sıcaklığı olan 2323 K’e ulaşmaktadır. Düşük plazma gazı sıcaklıklarında tanecik sıcaklığı erime sıcaklığına uzun sürede ulaşmaktadır. 10000 K sıcaklıkta alumina taneciği erime sıcaklığına plazma jeti içerisinde 0,01534 saniye kaldıktan sonra ulaşmaktadır.

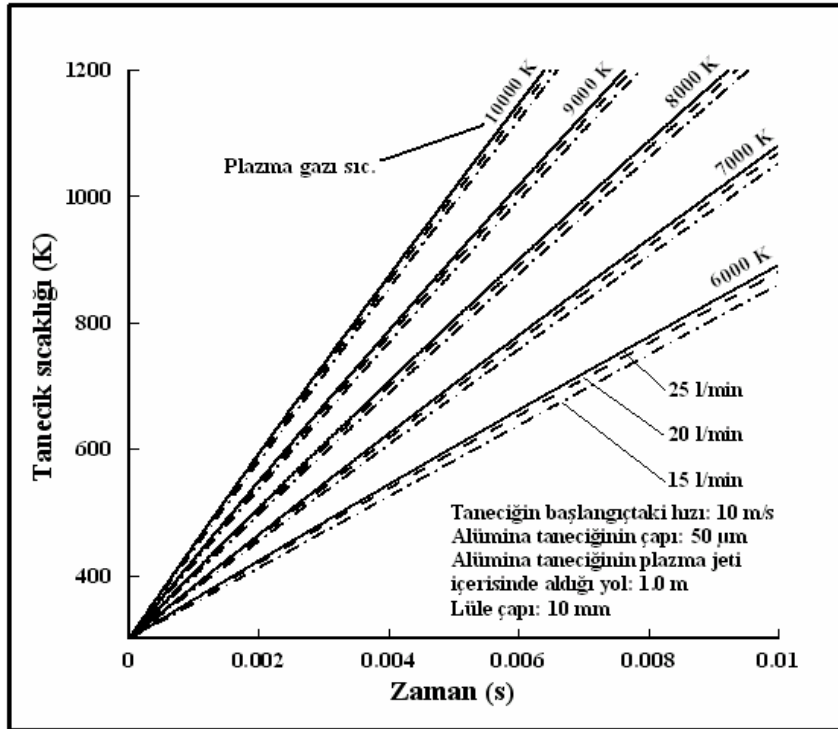
Taneciğin plazma içerisinde kalma süresinin ve erime süresinin farklı plazma gazı debilerinde değişimi Şekil 6.22’de verilmiştir. Burada plazma gazı sıcaklığı 4000 K ile 10000 K arasında değişmektedir. Plazma gazının yüksek hacimsel debilerinde

alüminanın taneciğinin erime ve plazma jeti içerisinde kalma zamanı kısadır. Plazma sıcaklığı yükseldikçe, taneciğin erime ve plazma içerisinde kalma zamanı kısalmaktadır. Bu nedenle, Şekil 6.20’de görüldüğü gibi plazma gazı sıcaklığının artışı plazma gazı ve tanecik hızını etkilemektedir.

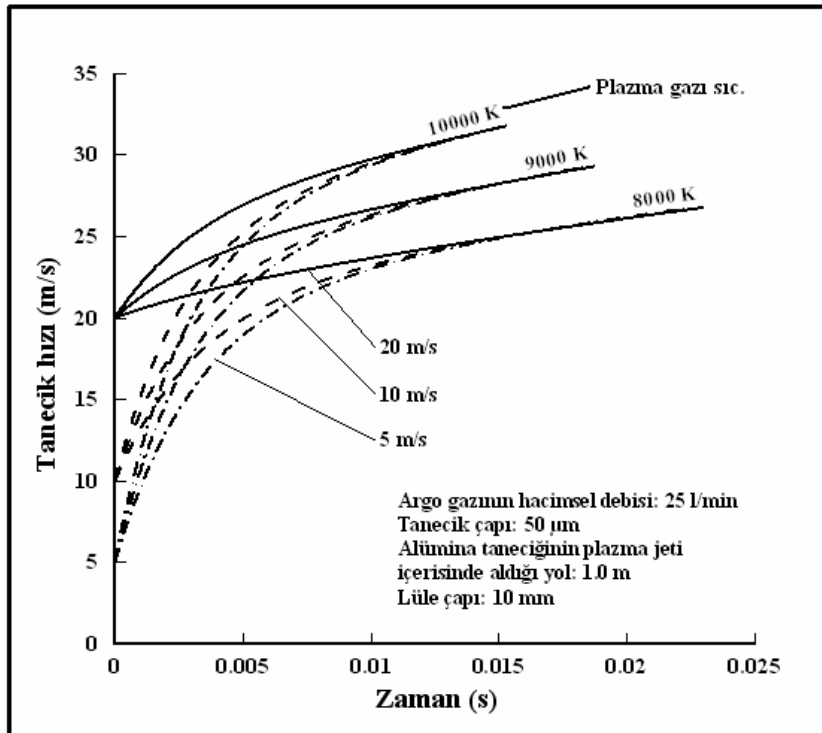
Farklı plazma gazı sıcaklıklarında tanecik sıcaklığının zaman ve plazma gazının hacimsel debisi ile değişimi Şekil 6.23’te verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi düşük plazma gazı sıcaklıklarında taneciğin sıcaklığı düşüktür ve plazma gazının farklı hacimsel debilerinde 300 K ile 1200 K arasındaki sıcaklıklarda 0,01 saniyeye kadar tanecik sıcaklığı az miktarda değişmektedir.



Şekil 6.22. Taneciğin plazma içerisinde kalma ve erime zamanının plazma gazı sıcaklığına bağlı olarak değişimi

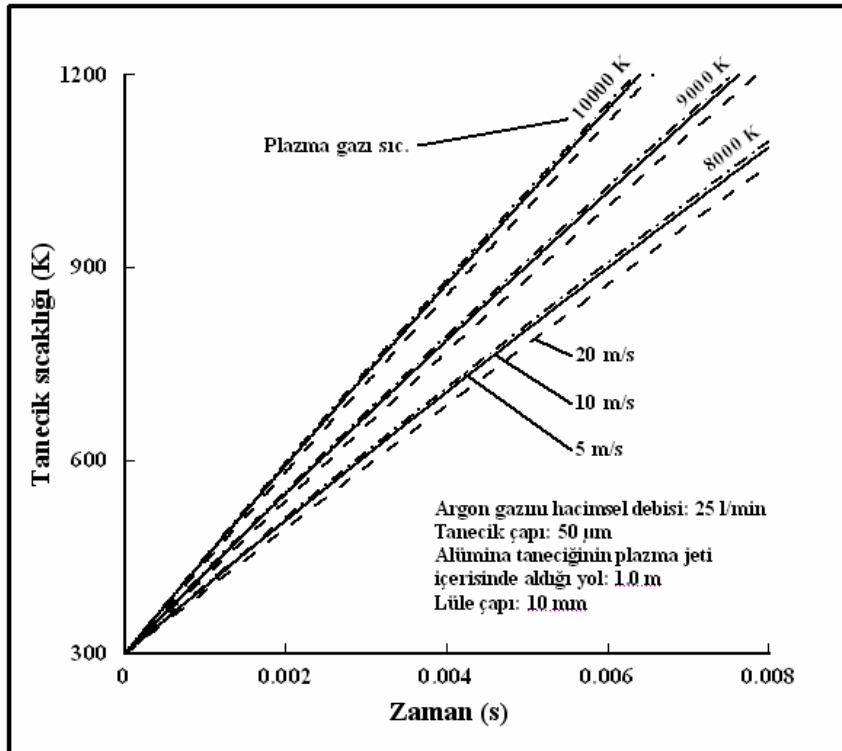


Şekil 6.23. Tanecik sıcaklığının zaman, plazma gazı sıcaklığı ve plazma gazının hacimsel debisi ile değişimi



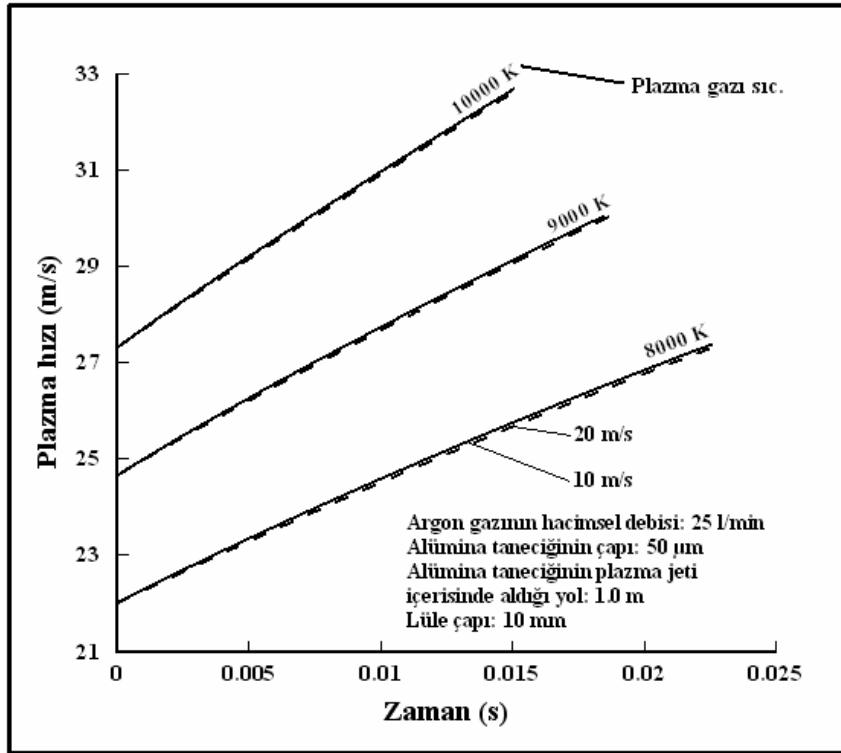
Şekil 6.24. Tanecik hızının zaman, taneciğin başlangıçtaki hızı ve plazma gazı sıcaklığı ile değişimi

Tanecik hızının farklı plazma gazı sıcaklıklarında, zaman ve taneciğin başlangıçtaki hızı ile değişimi Şekil 6.24'te verilmiştir. Hesaplamalar taneciğin erime sıcaklığına kadar yapılmıştır. Farklı tanecik başlangıç hızlarında, belirli bir zamanda taneciğin hızı aynı değere ulaşmaktadır. Bu taneciğin başlangıç hızının plazma sistemi tasarımında önemli olmadığını göstermektedir.



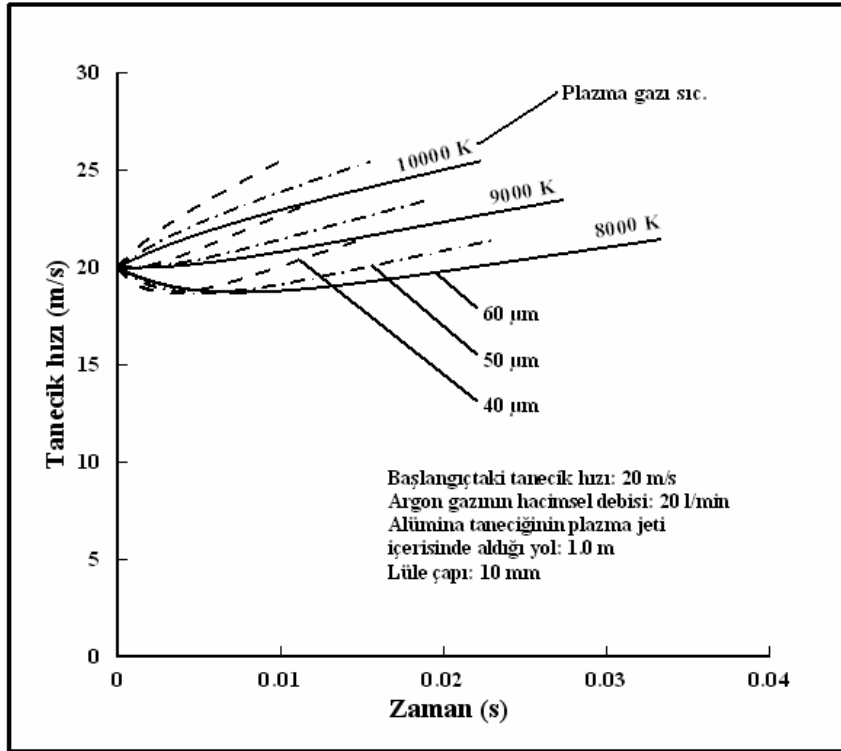
Şekil 6.25. Tanecik sıcaklığının zaman, taneciğin başlangıçtaki hızı ve plazma gazı sıcaklığı ile değişimi

Tanecik sıcaklığının farklı tanecik başlangıç hızlarında zaman ve plazma gazı sıcaklığı ile değişimi Şekil 6.25'te verilmiştir. Şekil 6.23 ve 6.25 karşılaştırılırsa, belirli bir zamanda tanecik sıcaklığının plazma gazının hacimsel debisindeki artışla az miktarda değiştiği gözlenebilir. Diğer taraftan, taneciğin sıcaklığı taneciğin başlangıç hızı ile birlikte azalmaktadır.



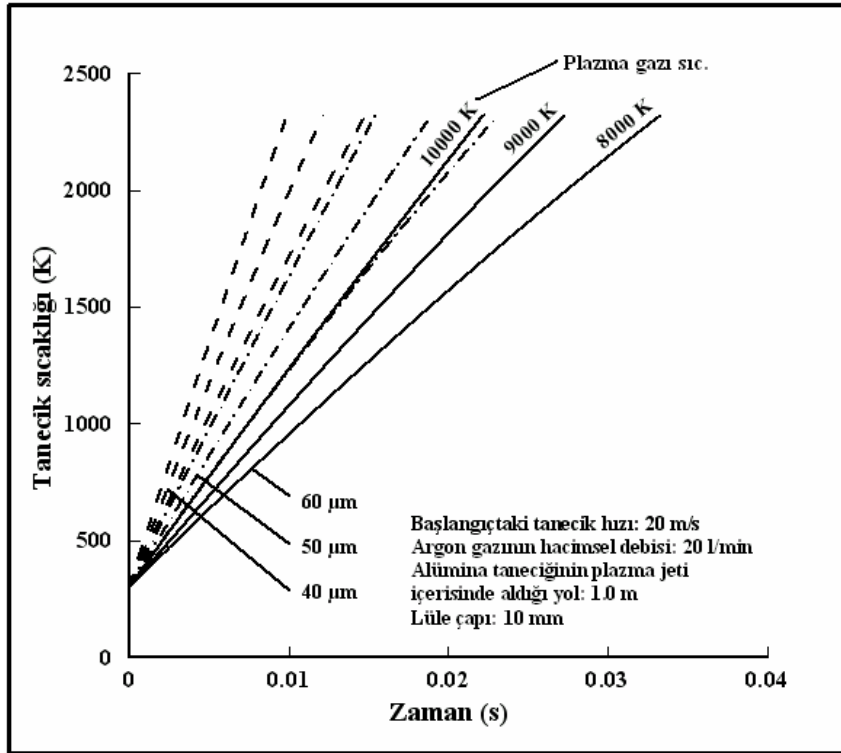
Şekil 6.26. Plazma hızının zaman, taneciğin başlangıç hızı ve plazma gazı sıcaklığı ile değişimi

Plazma hızının farklı plazma gazı sıcaklıklarında zaman ve taneciğin başlangıç hızı ile değişimi Şekil 6.26’da verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi plazma gazı hızını plazma gazı sıcaklığı etkilemesine rağmen taneciğin 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.



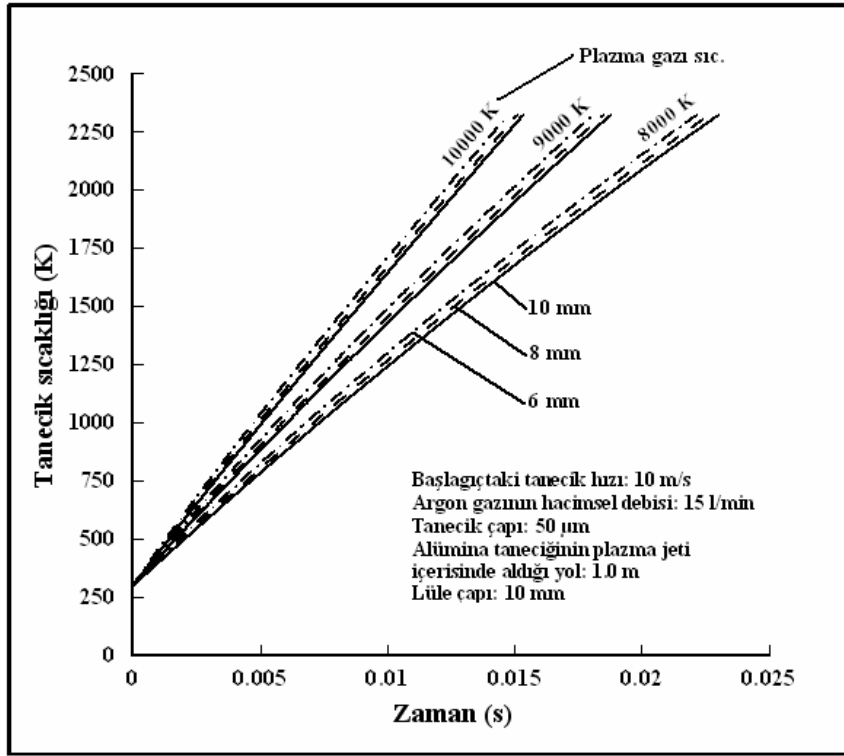
Şekil 6.27. Tanecik hızının zaman, tanecik çapı ve plazma gazı sıcaklığı ile değişimi

Tanecik hızının farklı tanecik çaplarında zaman ve plazma gazı sıcaklığı ile değişimi Şekil 6.27’de 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 erime sıcaklığına ulaşana kadar yükselmeye devam etmektedir.



Şekil 6.28. Tanecik sıcaklığının zaman, tanecik çapı ve plazma gazı sıcaklığı ile değişimi

Şekil 6.28’de taneciklerin çapındaki değişimin farklı plazma gazı sıcaklıklarında taneciklerin erime zamanını ve tanecik sıcaklığını nasıl etkilediği görülmektedir. Belirli bir zamanda alümina taneciğinin çapı artarsa, tanecik daha geç erir. Diğer bir deyişle, taneciğin erimesi için geçen süre uzar. Şekilde görüldüğü gibi 40 µm çapındaki taneciğin 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 6.29. Tanecik sıcaklığının zaman, lüle çapı ve plazma gazı sıcaklığı ile değişimi

Tanecik sıcaklığının zaman, lüle çapı ve plazma gazı sıcaklığı ile değişimi Şekil 6.29'da görülmektedir. Şekilde 8000 K ile 10000 K arasındaki farklı plazma gazı sıcaklıklarında lüle çapındaki değişimin taneciğin erime zamanını ve sıcaklığını az miktarda etkilediği görülmektedir. Belirli tanecik sıcaklığında eğer lüle çapı artarsa, taneciğin erime zamanı da artar. Şekilde lüle çapının 10 mm olduğu durumda tanecik sıcaklığının daha az bir eğime sahip olduğu görülmektedir.

6.3. Sonuçların Tartışılması

Teorik çalışmada, elde edilen sonuçlar teorik sonuçlar bölümünde tablolar ve grafikler halinde verilmiştir. Elde edilen sonuçlar ısı plazma sisteminin tasarımında faydalı olacaktır. Grafiklerde görüldüğü gibi taneciğin başlangıç hızı sistemi çok etkilememektedir. Plazma gazı sıcaklığına bağlı olarak tanecik hızı kısa sürede belirli bir değere ulaşmaktadır. Taneciğin sıcaklığı plazma gazının hacimsel debisinin değişiminden çok etkilenmemektedir.

Vakumlu küresel seramiklerin ısı yalıtım özelliklerinin incelendiği deneysel çalışmadan aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

1. Seramik kürelerin çok düşük ısı iletim katsayılarına sahip olmalarının nedeni içlerinde vakum olmasıdır.
2. Seramik katkılı boyalar ile seramik katkının miktarına bağlı olarak birinci kattan sonra ikinci ve üçüncü kat sürüldüğünde % 20'nin üzerinde elektrik enerjisi kazanımı sağlanabilir.
3. Büyük boyutlardaki mikro küreler daha küçük boyutlardaki mikro kürelerle karıştırılarak kullanıldığında, büyük küreler arasına boya ile birlikte küçük küreler de dolarak yalıtım miktarı artırılabilir.
4. Seramik katkıların yansıtma özelliği olumlu bir etkidir. Düşük zaman sabitlerinden dolayı iç sıcaklığın kısa zamanda yükselmesine neden olurlar.
5. Yaz ve kış aylarında seramik katkılı boyalar ile uzun dönemde sağlanan enerji kazanımı miktarı oldukça yüksek değerlere çıkabilir.
6. Dayanıklı seramik küreler yapı malzemeleri ile karıştırılarak düşük ısı iletim katsayısına sahip ve hafif yapı malzemeleri üretilebilir. Bu üretim sırasında, katkı oranları ve işleme yöntemleri değiştirilerek ya da ilave katkıların da kullanılmasıyla bu ürünler yapısal ve işlevsel olarak güçlendirilebilirler.
7. Geleneksel yalıtım malzemeleri ile karşılaştırıldığında, eş değer kalınlık dikkate alındığında, avantajlara sahiptir.
8. Ses yalıtımı için boya kalınlığının artırılması gerekiyor.
9. Boyaların tam kurumamış olması farklı sonuçların elde edilmesine sebep olmuş olabilir.

Toz üretimi konusu ile ilgili yapılan deneysel çalışmadan olumsuz sonuçlar elde edilmesine rağmen çalışma toz üretimi konusunda bir deneyim kazandırmıştır.

6.4. Bu Konuda İleride Yapılacak Çalışmalar

İleride yapılacak çalışmalarda küresel tozların indüktif bağlaşımlı ısı plazma sistemlerinde üretilmesi gelmektedir. Bu ön aşama gerçekleştirildikten sonra içi boş

küresel tozların üretimi gerçekleştirilebilir. İçi boş küresel tozların üretimi sonrasında indüktif bağlaşımlı ısı plazma sistemlerinde bu işlem için en uygun çalışma parametrelerinin belirlenmesi gelmektedir. İçi boş küresel tozların Türkiye’de üretimi gerçekleştirildikten sonra boyalar içerisine karıştırılarak veya yüksek sıcaklık ya da basınca dayanıklı plakalar halinde kullanılması sağlanabilir. Bu uygulama ulusal düzeyde enerji tasarrufuna ve ekonomik kazanca neden olacaktır.

KAYNAKLAR

1. İnternet: Devlet Planlama Teşkilatı “Sekizinci Beş Yıllık Kalkınma Planı: Madencilik Özel İhtisas Komisyonu Raporu Endüstriyel Hammaddeler Alt Komisyonu Toprak Sanayii Hammaddeleri I (Seramik Killeri - Kaolen - Feldspat - Pirofillit - Wollastonit - Talk) Çalışma Grubu Raporu”
<http://ekutup.dpt.gov.tr/madencil/sanayiha/oik622.pdf> (2002).
2. Cochran, J. K., “Ceramic hollow spheres and their applications”, *Current Opinions in Solid State & Materials Science*, 3: 474-479 (1998).
3. İnternet: National Aeronautics and Space Administration “Spinoff 2003”
http://www.sti.nasa.gov/tto/spinoff2003/er_4.html (2007).
4. İnternet: Tekna Plasma Systems Inc. “ICTPs” <http://www.tekna.com> (2007).
5. Kumar, S. and Selvarajan, V., “Spheroidization of metal and ceramic powders in thermal plasma jet”, *Computational Materials Science*, 36: 451-456 (2006).
6. Ramasamy, R. and Selvarajan, V., “Injected particle behavior in a thermal plasma”, *Applied Surface Science*, 169: 617-621 (2001).
7. Ramasamy, R. and Selvarajan, V., “Heat transfer to a single particle injected into a thermal plasma”, *Computational Materials Science*, 15: 265-274 (1999).
8. Károly, Z., and Szépvölgyi, J., “Plasma spheroidization of ceramic particles”, *Chemical Engineering and Processing*, 44: 221-224 (2005).
9. 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).
10. Chen, X., and Li H., “Three-dimensional flow and heat transfer in thermal plasma systems”, *Surface & Coatings Technology*, 171: 124-133 (2003).
11. Ford, I. J., “A model of hollow particle production by a sol-gel process”, *Journal of Aerosol Science*, 27: 389-390 (1996).
12. 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).
13. Gauvin, W. H., “Novel reactors for plasma applications”, *Chemical Engineering Science*, 45: 2453-2460 (1990).

14. 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).
15. 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).
16. 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).
17. Fizsdon, J. K., "Melting of powder grains in a plasma flame", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 22: 749-761 (1979).
18. 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).
19. Jiang X., and Boulos, M., "Induction plasma spheroidization of tungsten and molybdenum powders", *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 16: 13-17 (2006).
20. Bica, I., "Pore formation in iron micro-spheres by plasma procedure", *Materials Science & Engineering*, 393: 191-195 (2005).
21. 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).
22. Shanmugavelayutham, G. and Selvarajan, V., "Plasma spheroidization of nickel powders in a plasma reactor", *Bull. Mater. Sci.*, 27 (5): 453-457 (2004).
23. O'Dell, J. S., Schofield, E. C., Hickman, R., McKechnie, T. N. and Power, C., "Powder alloying and spheroidization", *PM²Tec Conference*, Chicago, (2001).
24. 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).
25. 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).
26. Károly, Z. and Szépvölgyi, J., "Hollow alumina microspheres prepared by RF thermal plasma", *Powder Technology*, 132: 211-215 (2003).

27. Bica, I., "Obtaining of micro-spheres in plasma: theoretical model", *Materials Science & Engineering B*, 77: 293-296 (2000).
28. Reed, T. B., "Induction-coupled plasma torch", *Journal of Applied Physics*, 32: 821-824 (1961).
29. Fan, L. and Zhu, C., "Principles of Gas-Solid Flows", *Cambridge University Press*, Cambridge, 88 (1998).
30. Wei, D. Y. C., Farouk, B. and Apelian, D., "Melting metal powder particles in an inductively coupled RF plasma torch", *Metallurgical Transactions B*, 19: 213-226 (1988).
31. Boulos, M. I., "Heating of powders in the fire ball of an induction plasma", *IEEE Transactions on Plasma Physics*, PS 6: 93-106 (1978).
32. Schlichting, H., "Boundary Layer Theory 6th ed.", *McGraw-Hill*, New York, 106 (1968).
33. Schlichting, H., "Boundary Layer Theory 6th ed.", *McGraw-Hill*, New York, 108 (1968).
34. 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).
35. Hamielec, A. E., Hoffman, T. W. and Ross, L. L., *A. I. Ch. E. J.*, 13: 212 (1967).
36. Bernardi, D., Colombo, V., Ghedini, E., Mentrelli, A. and Trombetti, T., "Powders trajectory and thermal history within 3-D ICTPs modelling for spheroidization and purification purposes", *48. Internationales Wissenschaftliches Kolloquium*, (2003).
37. 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).
38. Ranz, W. E. and Marshall, W. R., "Evaporation from drops part I", *Chemical Engineering Progress*, 48: 141-146 (1952).
39. Ranz, W. E. and Marshall, W. R., "Evaporation from drops part II", *Chemical Engineering Progress*, 48: 173-180 (1952).
40. 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).

41. Chapra, S. C. ve Canale R. P., “Yazılım ve Programlama Uygulamalarıyla Mühendisler için Sayısal Yöntemler”, **McGraw-Hill**, İstanbul, 758-760 (2003).
42. Doğan, C., Sarıtaş, S., “Metal powder production by centrifugal atomization”, **Int. J. Powder Metallurgy**, 30: 419-427 (1994).
43. İnternet: Metal Powder Industries Federation <http://www.mpif.org/apmi/doc4.htm> (2007).
44. İnternet: Daido Steel Co., Ltd. “Düşey Gaz Atomizasyon Ünitesi” http://www.daido.co.jp/english/products/powder/images/e-levi_2.gif (2007).
45. Ünal, R., “Gaz atomizasyonu ile metal tozu üretim parametrelerinin araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 3-6, 24-25, 57-58 (1995).
46. Dombrowski, N., Johns, W. R., “The aerodynamic instability and disintegration of viscous liquid sheets”, **Chemical Engineering Science**, 18: 203-214 (1963).
47. Ting, J., Jeffrey, C. and Stephen, R., “High speed cinematography of gas-metal atomization”, **Materials Science & Engineering A**, 390: 452-460 (2005).
48. Ünal A. and Robertson, D. G. C., “Pilot plant gas atomizer for rapidly solidified metal powders”, **Int. J. Rapid Solidification**, 2: 219-229 (1986).
49. Ünal, A., “Production of rapidly solidified aluminium alloy powders by gas atomisation and their applications”, **Powder Metallurgy**, 33(1): 53-64 (1990).
50. Dube, R. K., Koria, S. C. and Singh, D., “Study of free fall gas atomisation of liquid metals to produce powder”, **Powder Metallurgy**, 44(2): 177-184 (2001).
51. Yule, A. J., and Dunkley, J. J., “Atomization of Melts”, **Oxford Univ. Press**, New York, USA, 165-189 (1994).
52. Henein H. and Le T., “Effect of nozzle geometry and position on gas atomization”, **The International Journal of Powder Metallurgy**, 32(4): 353-364 (1996).
53. Küçükarslan, S., “Gaz atomize kalay tozu üretim parametrelerinin deneysel olarak araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 55-60, (2006).
54. Hopkins W. G., “High Performance RPS Gas Atomization - Critical Areas of Equipment Design”, **Metal Powder Report**, 42(10): 706-710 (1987).
55. Vargaftik, N. B., “Tables on the Thermophysical Properties of Liquids and Gases”, **Hemisphere Corp**, (1975).

EKLER

EK-1. Bilgisayar programı

```

C *****
C ISIL PLAZMA SISTEMINDE METAL TOZLARININ KURESELLESMESI
C *****

REAL MUF, MDOT, KG, NU, MP

OPEN(1,FILE='TPKAC.TXT',STATUS='UNKNOWN')

C PROGRAMDA SABIT KABUL EDILENLER*****

C TANECIGIN PLAZMA ICINDE KALMA SURESI (S)
TR=0.0
PRINT*, 'TR= ',TR

C TANECIGIN YOGUNLUGU (KG/M3)
TANYO=3900
PRINT*, 'TANYO=',TANYO

C TANECIK MALZEMESININ ERIME SICAKLIGI (K)
TME=2323
PRINT*, 'TME= ',TME

C ALUMINANIN OZGUL ISISI (J/KGK)
CPK=1450
PRINT*, 'CPK= ',CPK

C ZAMAN ADIMI (S)
TTH=0.00001
PRINT*, 'TTH= ',TTH

```

EK-1. (Devam) Bilgisayar programı

```

C   YER CEKIMI IVMESI (M/S2)
      G=9.81
      PRINT*, 'G= ', G

C   TANECIGIN YAYICILIGI
      EPS=0.3
      PRINT*, 'EPS= ', EPS

C   ODA SICAKLIGI (K)
      TA=300
      PRINT*, 'TA= ', TA

C   PI SAYISI
      PI=3.14159
      PRINT*, 'PI= ', PI

C   STEFAN-BOLTZMAN SABITI (W/M2K4)
      STBZ=5.67*10.**(-8.)
      PRINT*, 'STBZ= ', STBZ

C   TANECIK CAPI(M)
      PRINT*, 'MIKRON OLARAK TANECIK CAPINI GIRIN!'
      READ(*,*) DP
      DP=DP*10.**(-6.)
      PRINT*, 'DP= ', DP

C   TANECIK AKIŞA DIK IZDUSUM ALANI (M2)
      AP=PI*DP**2./4.
      PRINT*, 'AP= ', AP

```

EK-1. (Devam) Bilgisayar programı

C MP:TANECIGIN KUTLESİ (KG)

$MP=(TANYO*PI*DP**3.)/6.$

PRINT*, 'MP= ',MP

C LULE CAPI (M)

PRINT*, 'MM OLARAK LULE CAPINI GIRIN!'

READ(*,*) D

$D=D*10.**(-3.)$

PRINT*, 'D= ',D

C LULE KESİT ALANI (M2)

$A=(PI*D**2.)/4.$

PRINT*, 'A= ',A

C HACİMSEL DEBİ (LİTRE/DAKİKA)

PRINT*, 'LİTRE/DAKİKA OLARAK HACİMSEL DEBİYİ GIRIN!'

READ(*,*) VDOT

PRINT*, 'VDOT= ',VDOT

C HACİMSEL DEBİ (M3/S)

$VDOT=(VDOT*10**(-3.))/60.$

PRINT*, 'VDOT= ',VDOT

C BASLANGICTAKI GAZ SICAKLIĞI (K)

PRINT*, 'KELVIN OLARAK BASLANGICTAKI GAZ SICAKLIĞINI
GIRIN!'

PRINT*, '1000 K - 10000 K'

READ(*,*) TF

PRINT*, 'TF= ',TF

EK-1. (Devam) Bilgisayar programı

```

C   GAZIN BASLANGICTAKI YOGUNLUGU (KG/M3)
    CALL YOGUNLUK(TF, YO)

C   KUTLE DEBISI (KG/S)
    MDOT=VDOT*YO
    PRINT*, 'MDOT= ', MDOT

C   GAZ SICAKLIGI (K)
    PRINT*, 'KELVIN OLARAK GAZ SICAKLIGINI GIRIN!'
    PRINT*, '4000 K - 10000 K'
    READ(*,*) TG
    PRINT*, 'TG= ', TG

C   TANECIGIN BASLANGICTAKI HIZI (M/S)
    PRINT*, 'TANECIGIN BASLANGIC HIZINI GIRIN!'
    READ(*,*) UP
    PRINT*, 'UP= ', UP

C   TANECIGIN BASLANGICTAKI SICAKLIGI (K)
    TP=300
    PRINT*, 'TP= ', TP

    PRINT*, '*****ZAMAN DONGUSUNUN BASLANGICI*****'

    DO 3 K=1,10000
    TR=TTH*K
    PRINT*, 'TR= ', TR

C   FILM SICAKLIGI (K)
    TF=(TP+TG)/2.

```

EK-1. (Devam) Bilgisayar programı

```
PRINT*, 'TF= ', TF
```

```
C    FILM SICAKLIGINDA GAZIN YOGUNLUGU (KG/M3)
```

```
CALL YOGUNLUK(TF, YO)
```

```
PRINT*, 'YO= ', YO
```

```
C    PLAZMA GAZININ HIZI (M/S)
```

```
UG=MDOT/(YO*A)
```

```
PRINT*, 'UG= ', UG
```

```
C    GAZIN DINAMIK VISKOZITESI(KG/MS)
```

```
MUF=0.00002283*(TF/300.)**0.72
```

```
PRINT*, 'MUF= ', MUF
```

```
C    REYNOLDS SAYISI
```

```
RE=YO*(ABS(UP-UG))*DP/MUF
```

```
PRINT*, 'RE= ', RE
```

```
C    SURTUNME KATSAYISI
```

```
CALL SURTUNME(RE, CD)
```

```
PRINT*, 'CD= ', CD
```

```
C    TANECIK HIZI (M/S)
```

```
CALL TANHIZ(CD, UG, UP, YO, TANYO, DP, G, TTH)
```

```
PRINT*, 'UP= ', UP
```

```
C    GAZIN ISI ILETIM KATSAYISI (W/MK)
```

```
CALL ISIILETIM(TF, KG)
```

```
PRINT*, 'KG= ', KG
```

EK-1. (Devam) Bilgisayar programı

```

C   OZGUL ISI (J/KGK)
    CALL OZGULISI(TF,CP)
    PRINT*, 'CP= ',CP

C   PRANDTL SAYISI
    CALL PRANDTL(MUF,CP,KG,PR)
    PRINT*, 'PR= ',PR

C   NUSSELT SAYISI
    CALL HNUSSELT(RE,PR,NU)
    PRINT*, 'NU= ',NU

C   TANECIGIN YUZEY ALANI
    AP=PI*DP**2.
    PRINT*, 'AP= ',AP

C   TANECIK SICAKLIGI (K)
    CALL TANSIC(TP, TTH, NU, KG, TG, DP, AP, STBZ, MP, CPK, EPS, TA)
    PRINT*, 'TP= ',TP

    IF(TP.GT.TME) THEN
    PRINT*, 'TP>TME'
    STOP
    ENDIF

    CALL YAZ1(TR,TP)

    PRINT*, '*****ZAMAN DONGUSUNUN SONU*****'

3  CONTINUE

```

EK-1. (Devam) Bilgisayar programı

STOP

END

C *****

C ALTPROGRAMLAR

C *****

C SURTUNME KATSAYISI

SUBROUTINE SURTUNME(RE, CD)

IF(RE.LE.0.2) THEN

CD=24./RE

ELSE IF(RE.GT.0.2.OR.RE.LE.2.0) THEN

CD=24./RE*(1.+(3./16.)*RE)

ELSE IF(RE.GT.2.0.OR.RE.LE.20.0) THEN

CD=24./RE*(1.+0.11*RE**0.81)

ELSE IF(RE.GT.20.0) THEN

CD=24./RE*(1.+0.189*RE**0.632)

END IF

RETURN

END

C *****

C TANECIK HIZI(M/S)

SUBROUTINE TANHIZ(CD, UG, UP, YO, TANYO, DP, G, TTH)

F1=(3./4.)*CD

&*(UG-UP)*(ABS(UP-UG))

&*(YO/(TANYO*DP))+G

F2=(3./4.)*CD

EK-1. (Devam) Bilgisayar programı

```
&*(UG-(UP+0.25*F1*TTH))*(ABS((UP+0.25*F1*TTH)-UG))
&*(YO/(TANYO*DP))+G
```

```
F3=(3./4.)*CD
&*(UG-(UP+0.125*F1*TTH+0.125*F2*TTH))
&*(ABS((UP+0.125*F1*TTH+0.125*F2*TTH)-UG))
&*(YO/(TANYO*DP))+G
```

```
F4=(3./4.)*CD
&*(UG-(UP-0.5*F2*TTH+F3*TTH))*(ABS((UP-0.5*F2*TTH+F3*TTH)-UG))
&*(YO/(TANYO*DP))+G
```

```
F5=(3./4.)*CD
&*(UG-(UP+0.1875*F1*TTH+0.5625*F4*TTH))
&*(ABS((UP+0.1875*F1*TTH+0.5625*F4*TTH)-UG))
&*(YO/(TANYO*DP))+G
```

```
F6=(3./4.)*CD
&*(UG-(UP-0.42857*F1*TTH+0.28571*F2*TTH+1.71429
&*F3*TTH-1.71429*F4*TTH+1.14286*F5*TTH))
&*(ABS((UP-0.42857*F1*TTH+0.28571*F2*TTH+1.71429
&*F3*TTH-1.71429*F4*TTH+1.14286*F5*TTH)-UG))
&*(YO/(TANYO*DP))+G
```

```
UP=UP+(1./90.)*(7.*F1+32.*F3+12.*F4+32.*F5+7.*F6)*TTH
```

```
RETURN
```

```
END
```

C *****

EK-1. (Devam) Bilgisayar programı

C ARGON GAZININ YOGUNLUGU(KG/M3)
SUBROUTINE YOGUNLUK(TF,YO)

YO=1.783*((273/TF)-2.06*10**(-7)*TF+6.71*10**(-11)*TF**2
&-5.21*10**(-15)*TF**3)

RETURN
END

C *****

C ARGON GAZININ ISI ILETIM KATSAYISI(W/MK)

C TF<11000 K ICIN
SUBROUTINE ISIILETIM(TF, KG)
REAL KG

KG=0.05647645140971089-0.0001839584512252854*TF
&+3.751137644847692*10.**(-7.)*TF**2-3.214542329708675
&*10.**(-10.)*TF**3+1.5353220056488485*10.**(-13.)
&*TF**4-4.422700084637607*10.**(-17.)*TF**5+7.966594816470403
&*10.**(-21.)*TF**6-9.028533323113486*10.**(-25.)*TF**7
&+6.259406456702206*10.**(-29.)*TF**8-2.428079279918774
&*10.**(-33.)*TF**9+4.0427937254779276*10.**(-38.)*TF**10.

RETURN
END

C *****

C ARGON GAZININ OZGUL ISI(J/KGK)

SUBROUTINE OZGULISI(TF,CP)
IF(TF.LT.8000) THEN

EK-1. (Devam) Bilgisayar programı

```

      CP=519.06400
      ELSE IF(TF.GE.8000.AND.TF.LT.11000) THEN
      CP=-9937.467825326166+2.953993749819968*TF
      &-0.00021392284153799065*TF**2+3.074134567754132
      &*10**(-29)*TF**8-9.224494949301233*10**(-119)*TF**30
      &+2.1863045165813044*10**(-159)*TF**40
      END IF
      RETURN
      END

C *****
C  PRANDTL SAYISI
      SUBROUTINE PRANDTL(MUF, CP, KG, PR)
      REAL KG,MUF
      PR=MUF*CP/KG
      RETURN
      END

C *****
C  NUSSELT SAYISI
      SUBROUTINE HNUSSELT(RE,PR,NU)
      REAL NU
      NU=1+0.2295*(RE**0.55)*(PR**0.33)
      RETURN
      END

C *****
C  TANECIK CEPER SICAKLIGI (K)

      SUBROUTINE

```

EK-1. (Devam) Bilgisayar programı

TANSIC(TP, TTH, NU, KG, TG, DP, AP, STBZ, MP, CPK, EPS, TA)
 REAL KG, NU, MP

$$E3=-(AP*EPS*STBZ/(MP*CPK))$$

$$E4=-((NU*KG/DP)*AP/(MP*CPK))$$

$$E5=((NU*KG/DP)*AP/(MP*CPK))*TG+(AP*EPS*STBZ/(MP*CPK))*$$

$$\&TA**4.$$

$$F10=E3*TP**4.+E4*TP+E5$$

$$F20=E3*(TP+0.25*F10*TTH)**4.$$

$$\&+E4*(TP+0.25*F10*TTH)$$

$$\&+E5$$

$$F30=E3*(TP+0.125*F10*TTH+0.125*F20*TTH)**4.$$

$$\&+E4*(TP+0.125*F10*TTH+0.125*F20*TTH)$$

$$\&+E5$$

$$F40=E3*(TP-0.5*F20*TTH+F30*TTH)**4.$$

$$\&+E4*(TP-0.5*F20*TTH+F30*TTH)$$

$$\&+E5$$

$$F50=E3*(TP+0.1875*F10*TTH+0.5625*F40*TTH)**4.$$

$$\&+E4*(TP+0.1875*F10*TTH+0.5625*F40*TTH)$$

$$\&+E5$$

$$F60=E3*(TP-0.42857*F10*TTH+0.28571*F20*TTH$$

$$\&+1.71429*F30*TTH-1.71429*F40*TTH+1.14286*F50*TTH)**4.$$

$$\&+E4*(TP-0.42857*F10*TTH+0.28571*F20*TTH$$

$$\&+1.71429*F30*TTH-1.71429*F40*TTH+1.14286*F50*TTH)$$

EK-1. (Devam) Bilgisayar programı

&+E5

TP=TP+(1./90.)*(7.*F10+32.*F30+12.*F40+32.*F50+7.*F60)*TTH

RETURN

END

C *****

C DOSYAYA VERILERIN YAZDIRILMASI

SUBROUTINE YAZ1(TR, TP)

REAL KUTDEB, MUF, KG, NU

IF(TR.EQ.0.00001) THEN

WRITE(1,6) TR,TP

6 FORMAT('TITLE = "Spheroidization of P/M Powders"',/,
 &'VARIABLES = "Time (s)", "Particle velocity (m/s)",',/,
 &'ZONE T="TPK"',', I=2000,',', F=POINT',/,F7.5,2X,F50.5)

ELSE IF(TR.GT.0.00001) THEN

WRITE(1,7) TR,TP

7 FORMAT(F7.5,2X,F50.5)

ENDIF

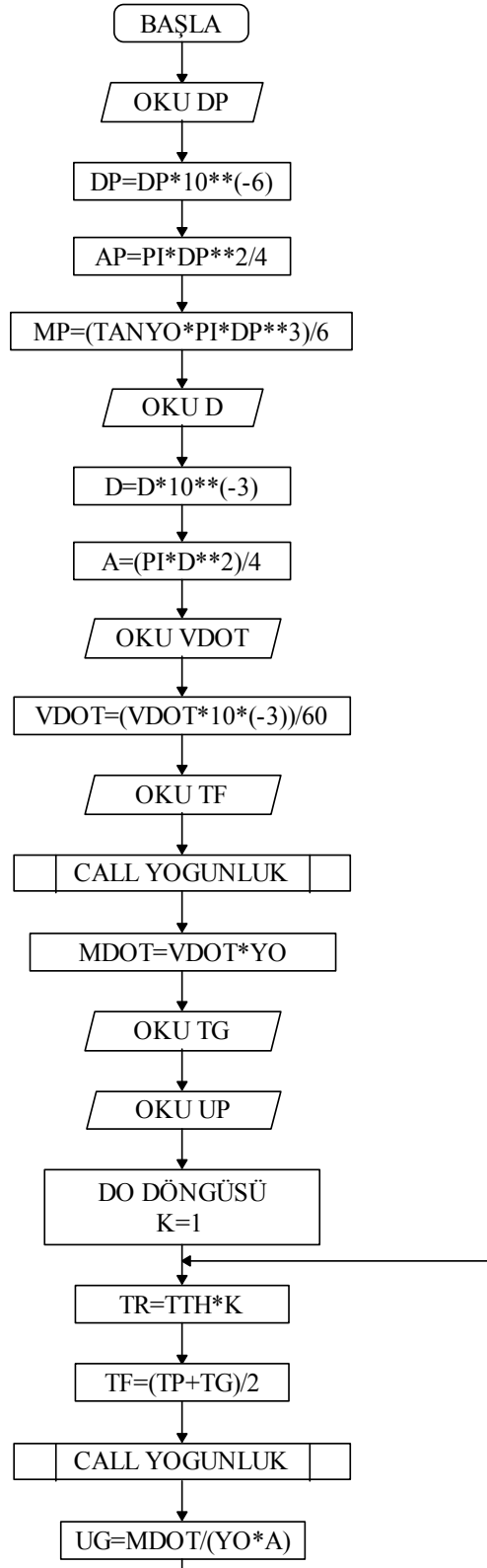
RETURN

END

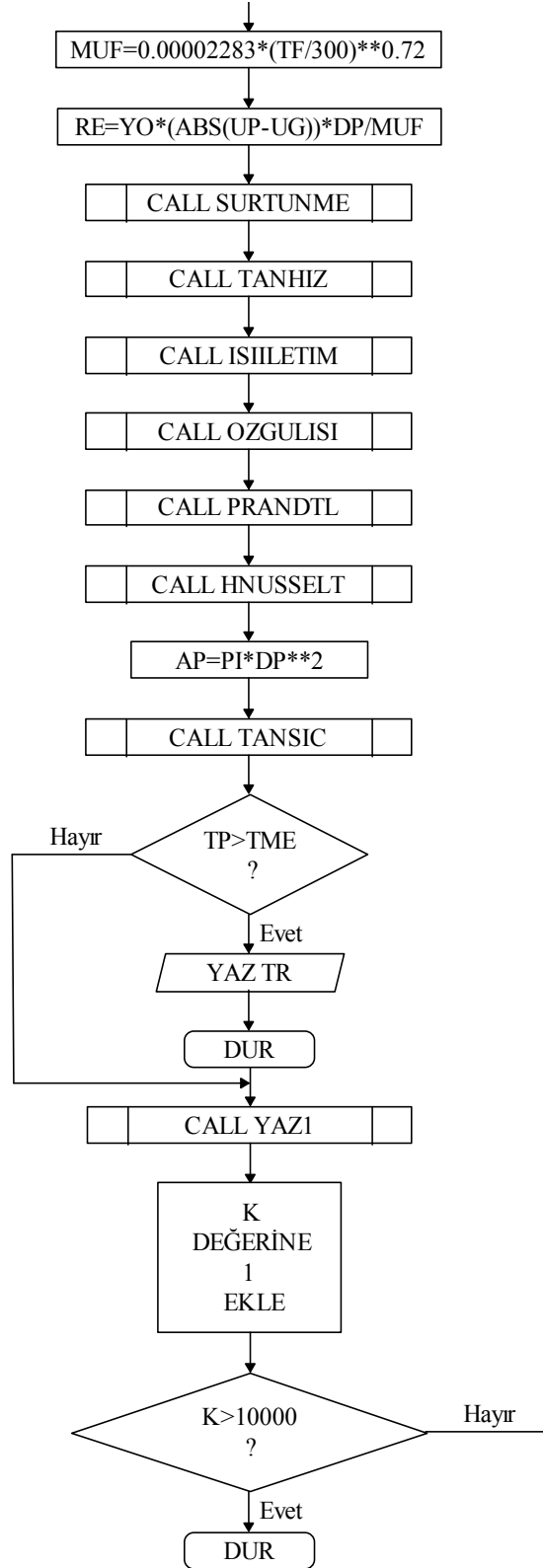
EK-1. (Devam) Bilgisayar programı

```
C *****
C  ALTPROGRAMLAR
C  *****
```

EK-2. Bilgisayar programının akış şeması



EK-2. (Devam) Bilgisayar programının akış şeması



ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : KESKİN, Ümit
 Uyuğu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 14.01.1982 Ankara
 Medeni hali : Bekar
 Telefon : 0 (312) 478 33 18
 e-mail : umitkeskin@gazi.edu.tr

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Yüksek lisans	Gazi Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü	2007
Lisans	Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü	2004
Lise	Dikmen Lisesi (Yabancı Dil Ağırlıklı Bölümü)	1999

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2005-...	Gazi Üniversitesi	Araştırma Görevlisi

Yabancı Dil

İngilizce

Hobiler

Satranç oyun analizleri okumak, bilgisayar teknolojilerini takip etmek, tiyatro izlemek.