ALTERNATİF RENKLERDE REFLEKTÖR İÇEREN OTOMOTİV AYDINLATMA ÜRÜNLERİNİN FARKLI ALAŞIMLAR KULLANILARAK PVD KAPLAMA METODU İLE AYDINLATMA REGÜLASYONLARINA UYGUN (ECE) OLARAK ÜRETİLMESİ

İbrahim Emrah SÖZER

T.C.
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ALTERNATİF RENKLERDE REFLEKTÖR İÇEREN OTOMOTİV AYDINLATMA ÜRÜNLERİNİN FARKLI ALAŞIMLAR KULLANILARAK PVD KAPLAMA METODU İLE AYDINLATMA REGÜLASYONLARINA UYGUN (ECE) OLARAK ÜRETİLMESİ

İbrahim Emrah SÖZER
0000-0002-2413-0374

Prof. Dr. Mustafa Cemal Çakır
(Danışman)

DOKTORA TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA – 2021
Her Hakkı Saklıdır

ÖZET

Doktora Tezi

ALTERNATİF RENKLERDE REFLEKTÖR İÇEREN OTOMOTİV AYDINLATMA ÜRÜNLERİNİN FARKLI ALAŞIMLAR KULLANILARAK PVD KAPLAMA METODU İLE AYDINLATMA REGÜLASYONLARINA UYGUN (ECE) OLARAK ÜRETİLMESİ

İbrahim Emrah SÖZER

Bursa Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Mustafa Cemal ÇAKIR

Otomotiv dış aydınlatma ürünlerini oluşturan alt parçalar estetik görünüm ve yansıtıcılık ihtiyacı gereği PVD yöntemiyle alüminyum ile kaplanmaktadır. PVD kaplama işlemi, sıvı veya katı fazdan atomların veya moleküllerin düşük basınç altında buharlaşması ve buharın substrat üzerinde yoğunlaşmasıdır (Mattox, 1998). Bu çalışmada farklı bakır alaşımlar kullanılarak otomotiv aydınlatma alt parçalarında (reflektör ve bezel vb.) rose-gold renklerin elde edilmesi hedeflenmiştir. PVD kaplama metodu ile bilinen yöntemlerin dışına çıkılarak ilk kez seri şartlarda optik gereksinimler korunarak polimer malzemeye alaşım kaplama yapılmıştır. Yapılan ilk denemeler sonucunda alaşımı oluşturan farklı elementler farklı evaporasyon profilleri göstermiş ve parçalar üzerinde homojenite elde edilemediği gözlemlenmiştir. Uygun homojen film kalınlığının elde edilmesi ve evaporasyon profilinin iyileştirilmesi için CFD simülasyonları ile analizler yürütülmüş ve deneysel uygulamalar ile sonuçlar doğrulanmıştır. Farklı alaşımlar ile kaplanan parçalar ile toplanmış bitmiş ürünlere fotometri ölçümleri yapılarak optik değerler ve renk tonu değerlerinin ECE ve SAE regülasyonuna uygunluğu doğrulanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Fiziksel Buhar Biriktirme, PVD, Alaşım Kaplama, Termal Evaporasyon, Altın Kaplama, Headlamp, Rear Lamp

2021, xvi + 126 sayfa.

ABSTRACT

PhD Thesis

PVD COATING WITH DIFFERENT ALLOYS FOR PRODUCTION OF DIFFERENT COLOURED REFLECTOR COMPONENTS IN LIGHTING UNITS USED IN AUTOMOTIVE INDUSTRY AND PROVIDING ECE REGULATION REQUIREMENTS

İbrahim Emrah SÖZER

Bursa Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Supervisor: Prof. Dr. Mustafa Cemal ÇAKIR

The sub-components that are used in automotive lighting products are coated with aluminum by PVD method due to their aesthetic appearance and reflectivity needs. The PVD coating process is the evaporation of atoms or molecules from the liquid or solid phase under low pressure and condensation of the steam on the substrate (Mattox, 1998). Maintaining the required optical needs, alloy coating is achieved on polymers with PVD coating in serial conditions. This is beyond the known application of PVD coating for lighting industry. Reflector based parts are alloy coated and with natural outer lens different coloured rear lamps are first time obtained. Homogeneous thin film layer is achieved with optimizing the evaporation tower position with the help of CFD analysis. In addition, geometry optimization of tungsten filament and alloy wire was carried out in order to make the most proper heat transfer between them. Different coloured rear lamps are applied to photometry measurements. The optical values and colour tone values were verified whether they fullfill the requirements of ECE regulation. The red colour for ECE regulation is obtained with modification of the LEDs.

Key words: PVD, Alloy Coating, Thermal Evaporation, Gold Colour, Headlamp or Rear Lamp

2021, xvi + 126 pages.

TEŞEKKÜR

Otomotiv endüstrisinde rekabetin hızla devam ettiği günümüzde, Ar-Ge çalışmalarının önemi giderek artmaya devam etmektedir. Özellikle sanayi ve üniversite iş birliklerinin arttırılması ve desteklenmesi ile yakın gelecekte önemli teknolojik kazanımların elde edilmesine ve nitelikli çalışmaların artmasına imkan sağlayacaktır. Doktora eğitimim süresince teknik ve sosyal anlamda kendimi geliştirme fırsatım oldu. Öte yandan yenilikçi bakış açısı ile beni yönlendiren, bilimsel konulara farklı yaklaşımlar geliştirmeme katkı sağlayarak sonuca ulaşmamı sağlayan ve emeğini esirgemeyen danışman hocam Prof. Dr. Mustafa Cemal Çakır'a teşekkürlerimi sunarım.

Ar-Ge çalışmalarımızda ve doktora eğitim sürecimde her türlü imkanı ve desteği bizlere sunan çalıştığım Odelo A.Ş.'ye, ve yaptığımız çalışmalar boyunca samimi destekleri ve önerileri için tüm çalışma arkadaşlarıma teşekkürü borç bilirim.

Hayatım boyunca her zaman yanımda olan annem Meral Sözer, babam Hüseyin Orhan Sözer ve kardeşim Uğurcan Baki Sözer'e; desteği ve anlayışı ile çalışmalarımda bana güç veren sevgili eşim Zeynep Gözde Sözer'e ve biricik kızım Eylül Çağla Sözer'e sonsuz teşekkürler.

İbrahim Emrah SÖZER
22/04/2021

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET 1
ABSTRACT 2
TEŞEKKÜR 3
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ 6
ŞEKİLLER DİZİNİ 8
ÇİZELGELER DİZİNİ 12
1. GİRİŞ 13
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI 19
2.1 Fiziksel Buhar Biriktirme Sistemleri ve Optik Elemanların Yüksek Yansıtma Değerlerine Sahip Olması İle İlgili Çalışmalar 19
2.2 Kaplama Homojenitesi ve PVD Reaktörü İçi Gaz Akışının Modellemesi ile İlgili Çalışmalar 23
2.3 Tungsten Filamanlar ve Farklı Sıcaklılarda Mekanik Özelliklerinin İyileştirilmeleri ile İlgili Çalışmalar 28
2.4 Patent Araştırması 30
2.5 Tez Çalışmasının Literatüre Katkısı ve Diğer Çalışmalardan Farkı 32
3. MATERYAL ve YÖNTEM 34
3.1 Proseste Kullanılan Alüminyum Tel ve Tungsten Filaman Özellikleri 34
3.1.1 Alüminyum tel boyut, geometri, saflık 34
3.1.2 Tungsten flaman boyut, geometri, elektrod açıklığı, saflık 36
3.2 Uygun Kompozisyonda Alaşım Belirlenmesi 39
3.3 Proses Parametreleri ve Etkileri 43
3.3.1 Ortam basıncı ve vakum süresi 43
3.3.2 Ön ısıtma voltajı ve ön ısıtma süresi 43
3.3.3 Evaporasyon rampası ve süresi 44
3.3.4 Ön denemeler ve deneme sonuçlarının değerlendirilmesi 44
3.3.5 Proses ön fizibilite çalışmaları ve ön kabuller 48
3.4. Deneysel Tasarım ve Modelleme 56
3.4.1 Ortalama serbest yol (Mean free path) 57
3.4.2 Knudsen sayısı 57
3.4.3 PVD prosesi ve modelleme stratejisi 59
3.4.4 Hesaplamalı akışkanlar dinamiği modelleri (CFD) 61
3.4.5 Planet dönme hızı optimizasyon analizi 67
3.4.6 Çift katman film kaplamalar 74
4. BULGULAR ve TARTIŞMA 76
4.1 PVD Metalize Makinesi Çift Evaporasyon Kulesi Adaptasyonu 76
4.2 Tungsten Filaman Boyut ve Geometri Optimizasyonu 78
4.3 Prototip Kaplama Planeti İmalatı 84
4.4 CFD Analiz Sonuçlarının PVD Prosesinde Doğrulanması 86
4.4.1 CFD analiz sonuçlarının deney modeli 88
4.4.2 Değerlendirme ve sonuçlar 90
4.5 Alaşım Malzemeleri ile Yeterlilik Çalışmaları ve Yapılan Deneyler 92
4.5.1 Deneme 1 93
4.5.2 Deneme 2 94
4.5.3 Deneme 3 95
4.5.4 Deneme 4 96

4.5.5 Deneme 5 97
4.6. Spektrometre Ölçümleri 99
4.6.1 Işık için dalgaboyu tanımı 99
4.6.2 Yüksek yansıtıcı değere sahip metaller 100
4.7. Montaj Konsepti 109
4.7.1 ECE ve SAE regülasyonuna uygun altın sarısı komponentlere sahip arka stop lambası 109
4.7.2 ECE ve SAE regülasyonuna uygun rose-gold altın sarısı komponentlere sahip arka stop lambası 110
4.7.3 Belirlenen dış lensi şeffaf olan üründe kırmızı ışığın elde edilmesi 111
4.7.4 Çamurluk montaj üretimi 112
4.7.5 Bagaj montaj üretimi 116
4.8 Fotometri Ölçümleri 119
4.8.1 Altın sarısı fotometri ölçümü 120
4.8.2 Rose-gold fotometri ölçümü 123
5. SONUÇ 125
KAYNAKLAR 130
ÖZGEÇMİŞ 138

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	Açıklama
m^3	Metreküp
mm	Milimetre
mg	Miligram
N	Newton
mm^2	Milimetre Kare
ppm	Parts Per Million, Milyonda Parça
Ag	Gümüş
Cu	Bakır
Au	Altın
W	Tungsten
K	Potasyum
Si	Silisyum
Al	Alüminyum
Ca	Kalsiyum
Mg	Magnezyum
Fe	Demir
Mo	Molibden
P	Fosfor
Zn	Çinko
Sn	Kalay
Mbar	Milibar
Rpm	Revolutions Per Minute, Dakikada Atılan Devir
Sccm	Standart Cubic Centimeters Per Minute, Dakikada Akan Standart Santimetreküp
Sn	Kalay
gr	Gram
J	Joule
gK	Gram Kelvin
T	Sıcaklık
Cp	Özgül Isı
L	Faz Değişim ısısı (Erime ya da Buharlaşma)
Kn	Knudsen sayısı
ms	Milisaniye
cm	Santimetre
m/s	Metre / Saniye
dev/dak	Devir / Dakika
V	Volt
Λ	Lambda / Dalga Boyu
Nm	Newtonmetre
Cd	Kandela

Kısaltmalar	Açıklama
PVD	Physical Vapour Deposition, Fiziksel Buhar Biriktirme
CFD	Computational Fluid Dynamics, Hesaplamalı Akışkanlar Mekaniği
LED	Light Emitting Diode, Işık Yayan Diyot
PCB	Printed Circuit Board, Baskı Devre Kartı
ECE	Economic Commission for Europe, Avrupa Ekonomik Komisyonu
SAE	Society of Automotive Engineers, Amerikan Otomotiv Mühendisliği Birliği
BMC	Bulk Moulding Compound, Sıcak Pres Kalıplama Hamuru
DSMC	Direct Simulation Monte Carlo, Monte Carlo'nun Doğrudan Simülasyonu
FMD	Free Molecular Dynamics, Serbest Moleküler Dinamiği
NG	Not Good, Uygun Değil
NA	Not Applicaple, Uygulanamaz
OK	Uygun Parça
CAE	Catodic Arc Evaporation, Katodik Arc Evaporasyonu
DC-MS	Direct Current-Magnetic Sputtering, Elektromanyetik Sıçratma
HPPMS	High power pulsed magnetron sputtering, Yüksek Güç Darbeli Elektromanyetik Sıçratma
HiPIMS	High Power Impulse Magnetron Sputtering, Yüksek Güç Atımlı Elektromanyetik Sıçratma
AFM	Ayrık faz modellemesi
VOF	Volume of Fluid, Akışkan Hacimleri Tekniği
BIN	Brightness Indicator Number, Parlaklık Gösterge Numarası
AMU	Atomic Mass Unit, Atomik Kütle Birimi
AG	Aktiengesellschaft, Anonim Şirketi
HMDSO	Hexamethyldisiloxane
TEOS	Tetraetoksilan
SWL	Seitenwandleuchte, Çamurluk Tarafı Arka Stop
HDL	Heckdeckelleuchte, Bagaj Tarafı Arka Stop
WS	Workstation, Çalışma Bankosu
SL	Schlusslicht, Pozisyon Lambası
BRL	Bremslicht, Fren Lambası
EOL	End Of Line, Hat Sonu Ürün Validayson Makinası
U	Up, Yukarıya
D	Down, Aşağıya
R	Right, Sağa
L	Left, Sola
V	Vertical, Dikey
H	Horizontal, Yatay
HV	Horizontal Vertical, Araç Üzerindeki Yatay ile Dikey Kesişim Noktası
KBA	Kraftfahrt Bundesamt, ECE-SAE Onay Kurumu
VW	Volkswagen
PC	Polikarbonat
ABS	Akrilonitril Butadien Stiren
PMMA	Polimetil metakrilat
PA	Poliamid

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 1.1. Otomotiv aydınlatma firmaları pazar payı..... 16
Şekil 1.2. Otomotiv aydınlatma ürünleri rutin reflektör yüzeyleri alüminyum metalizasyon uygulamaları..... 18
Şekil 2.1. PC numunelerinin yüzey topografisi (a) işlenmemiş, (b) 5 dakika UVO, (c) 10 dakika UVO ve yansıtma toplam eğrileri karşılaştırması grafiği (Arias ve Jaramillo, 2019). 20
Şekil 2.2. PVD (a) püskürtme ve (b) buharlaştırma kaplama yöntemlerinin şematik diyagramı (Mattox, 2003) 21
Şekil 2.3. Katı metallerin Hertz-Knudsen denklemine n=1'e göre buharlaşma hızları ve 22
literatürdeki deneysel ölçümleri ile karşılaştırılması (Hirth ve Pound, 1957). 22
Şekil 2.4. PMMA'da stokastik antiretif yapıların taranan elektron mikroskobu..... 23
görüntüsü (Kaless ve diğerleri, 2005)..... 23
Şekil 2.5. Farklı 2 model için kütle akısının renk ölçekli akış çizgileriyle görüntüleri (Bobzin ve diğerleri, 2014) 24
Şekil 2.6. Sırasıyla CFD yoğunluk alanı (kg / m^3) - hız alanı (m/s) ve PVD doğrulamalarının yapıldığı reaktör (Gott ve diğerleri, 2013)..... 25
Şekil 2.7. Sayı yoğunluğu ve Knudsen sayı konturları (Venkattraman ve Alexeenko, 2011) 26
Şekil 2.8. Ölçülmüş ve simüle edilmiş film kalınlığı karşılaştırması (Lugscheider ve diğerleri, 2005) 26
Şekil 2.9. Kaplama kalınlığının grafik temsili homojenlik modeli, çeşitli l değerleri için, R=coth(s/2l) (Jamieson ve Windle, 1983) 27
Şekil 2.10. Kopma bölgelerinin yükseklik dağılımları (Zhao ve diğerleri, 2017) 28
Şekil 2.11. Örnek 1/14W: genel ısı transfer katsayısının değişimi farklı tel sıcaklık ve basınçlarda, 50 kHz'de, ateşleme 9 saniye sonra (Chondrakis ve Topalis, 2011)..... 29
Şekil 2.12. Vakum ortamında sıcak preslenmiş 4N 5W – 10Ti ve 4N W – 30Si sıçratma külçeleri (a) W–10Ti külçe fotoğrafı (b) W–10Ti mikroskop görüntüsü (c) W–30Si külçe fotoğrafı (d) W–30Si mikroskop görüntüsü (Yang ve diğerleri, 2015)..... 30
Şekil 2.13. Japonya Alınan Patent Bilgileri 31
Şekil 2.14. Yansıtma kontrol katmanı; yansıtma değeri-ışık dalgaboyu 31
Şekil 3.1. Sarmal tel yapısının teknik çizimi..... 35
Şekil 3.2. Düz ve V şekil yapısına sahip tel yapısı..... 35
Şekil 3.3. W tipi filaman yapısının teknik çizimi..... 37
Şekil 3.4. Elektrot çubuğunun ve flamanların çan içerisindeki konumu 38
Şekil 3.5. Ag-Cu-Au karışım kütle oranlarına göre renk skalası..... 39
Şekil 3.6. CuAl8 alaşımından üretilmiş gemi pervanesi..... 40
Şekil 3.7. CuAl ve CuZinc alaşımları ötektik grafikleri (Osterman ve Antes, 2010)..... 41
Şekil 3.8. Reflektör parçası 46
Şekil 3.9. Tamamı kaplanan kapatıcı panel ve kısmi kaplı optik çerçeveler 47
Şekil 3.10. Reflektör ve çerçeve parçası 47
Şekil 3.11. Tungsten filaman sıcaklık-özdirenç grafiği (Desai ve diğerleri, 1984)..... 48
Şekil 3.12. Analiz sonuçlarına göre elde edilen tungsten filaman sıcaklık-zaman grafiği 52
Şekil 3.13. Güç-zaman grafiği..... 53

Şekil 3.14. Tungsten filamana sıvanmış ergimiş alüminyum 56
Şekil 3.15. Buhar kaynağından uzaklaştıkça Knudsen Sayısının değişimi a) iki filaman arasında kalan bölge, b) filaman ile parça arasında kalan bölge, c) altlıklar ile çan duvarı arasındaki bölge 60
Şekil 3.16. Alüminyum buharının vakumda difüzyonu 62
Şekil 3.17. Alüminyum buharının çarpışmalardan kaynaklı yön kazanması 63
Şekil 3.18. Alüminyum buharının çan içerisindeki konsantrasyonu 64
Şekil 3.19. Alüminyum buharının çan içerisindeki konsantrasyonu - 3.boyutta yönlenmeler 64
Şekil 3.20. Alüminyum buharının çan içerisindeki konsantrasyonu - 2.boyutta yönlenmeler 65
Şekil 3.21. Elektrotun parçaya yaklaşması ile birim yüzeye gelen atom sayısının artması 66
Şekil 3.22. 3 boyutlu analizde merkez ve altlık devirlerinin akışkan hızı ile ilişkisi (Sözer ve diğerleri, 2020) 69
Şekil 3.23. 2 boyutlu analizde merkez ve altlık devirlerinin akışkan hızı ile ilişkisi (Sözer ve diğerleri, 2020) 70
Şekil 3.24. 4 dev/dak merkez dönüşü ve altlık dönüş sayısının yüzey temas oranına etkisi 71
Şekil 3.25. 7 dev/dak merkez ve altlık dönüş sayısının yüzey temas oranına etkisi 72
Şekil 3.26. 10 dev/dak merkez ve altlık dönüş sayısının yüzey temas oranına etkisi 72
Şekil 3.27. 10. ve 20. saniyelerde farklı devir değerlerinin CFD sonuçları 73
Şekil 3.28. Çift katman film tabakası kesit şematik görünümü 75
Şekil 4.1. Çift evaporasyon kulesi çizimi ve çan içerisinde görünümü 77
Şekil 4.2. Çift ve tek evaporasyon kulesi 77
Şekil 4.3. İlk katman film tabakası üzerine ikinci katman kaplanması şematik görünümü 78
Şekil 4.4. Sarmal tip alüminyum tel 79
Şekil 4.5. W tipi filaman yapısı 79
Şekil 4.6. Sargı şeklinde kaynak teli 80
Şekil 4.7. Düz ve V şekil yapısına sahip tel yapısı 80
Şekil 4.8. Yeni sepet tipi filaman geometrisi 81
Şekil 4.9. Sepet tipi filamanın ısı etkisiyle çarpılması 82
Şekil 4.10. Yeni sepet tipi filamandan tellerin düşmesi 83
Şekil 4.11. Geliştirilmiş sepet tipi filaman geometrisi 84
Şekil 4.12. İmal edilen prototip kaplama planeti 85
Şekil 4.13. Mevcut durum basınç gradyenleri olan bölgenin sınırları geniş 86
Şekil 4.14. İyileştirilmiş durum basınç gradyenleri olan bölgenin sınırlarının daraltılması 87
Şekil 4.15. Mevcut durum elektrotların newton fizik modellerinin hakim olduğu ve merkezde, evaporasyona yakın bölgede olması 87
Şekil 4.16. İyileştirilmiş durum elektrotların newton fizik modellerinin hakim olduğu ve evaporasyona yakın bölgeden, merkezden uzaklaştırılması 88
Şekil 4.17. Prototip kaplama planeti ve 20 filaman seri bağlı evaporasyon kulesi 89
Şekil 4.18. 5 x 10 cm plakaları ve 5 noktadan ölçüm mastarı 89
Şekil 4.19. Klaus Weiss Elektroanlagen cihazı 90
Şekil 4.20. Probun alüminyum yüzeyine dokundurularak ölçüm alınması 90
Şekil 4.21. Renklenme ve koyulaşma meydana gelen parçalar 93

Şekil 4.22. Filaman hızlarına göre koyulaşma olan parçalar 94
Şekil 4.23. Filaman sayısı belirlenmiş dikine homojenite sağlanmış parçalar..... 95
Şekil 4.24. Tüm alt parçaların aynı çanda kaplanması için belirlenmiş planet yerleşimi 97
Şekil 4.25. Elektrotun parçaya yaklaşması ile birim yüzeye gelen atom sayısının artması 98
Şekil 4.26. Elektrotun parçaya yakınlık uzaklığa göre farklı konumlandırılması..... 98
Şekil 4.27. Elektromanyetik spektrum (Yılmaz, 2019) 99
Şekil 4.28. Beyaz ışık standart spektrometresi (Yılmaz, 2019) 100
Şekil 4.29. Spektrometre ölçüm metodu..... 102
Şekil 4.30. Plakaların planet üzerine pozisyonlandırılmaları ve kaplanmış halleri..... 102
Şekil 4.31. Spektrometrede ölçülecek 20 x 10 cm plakalar 104
Şekil 4.32. Rose-gold spektrometre ölçümü sonrası 1 nokta için ortaya çıkan grafik . 105
Şekil 4.33. Gold spektrometre ölçümü sonrası 1 nokta için ortaya çıkan grafik 107
Şekil 4.34. Alüminyum buharının çan içerisindeki konsantrasyonu ve vakum ağzına aşağı doğru çökme 108
Şekil 4.35. Altın sarısı komponentlere sahip arka stop lambası..... 110
Şekil 4.36. Rose-Gold altın sarısı komponentlere sahip arka stop lambası 111
Şekil 4.37. AC238 çamurluk hattı ön montaj layoutu 112
Şekil 4.38. WS1 operasyonu 112
Şekil 4.39. WS2 operasyonu 113
Şekil 4.40. WS3 operasyonu 113
Şekil 4.41. WS4 operasyonu 113
Şekil 4.42. WS4.1-4.2 operasyonu 114
Şekil 4.43. WS5 operasyonu 114
Şekil 4.44. Alüminyum ve Rose-Gold ürünlerin hat sonu makinasında pozisyonlanması 115
Şekil 4.45. Sırasıyla sol ve sağ EOL kontrolü..... 115
Şekil 4.46. AC238 çamurluk hattı ön montaj layoutu 116
Şekil 4.47. WS1 operasyonu 116
Şekil 4.48. WS3 operasyonu 117
Şekil 4.49. WS4 operasyonu 117
Şekil 4.50. WS4.1-4.2 operasyonu 117
Şekil 4.51. WS5 operasyonu 118
Şekil 4.52. Alüminyum ve Rose-Gold ürünlerin hat sonu makinasında pozisyonlanması 118
Şekil 4.53. Sırasıyla sol ve sağ EOL kontrolü..... 119
Şekil 4.54. Ganiometre ve 1. ön fotosel..... 120
Şekil 4.55. Çamurluk pozisyon (SL), fren-stop pozisyon (BRL) kalorimetre ölçümleri 122
Şekil 4.56. Çamurluk pozisyon (SL), fren-stop pozisyon (BRL) kalorimetre ölçümleri 124
Şekil 5.1. PV1200 termal test ortam koşulları sırasıyla sıcaklık ve bağıl nem –zaman grafikleri..... 126
Şekil 5.2. Orijinal alt parçaları ile üretilen arka stop lambası (sırasıyla soğuk ve sıcak halde)..... 127
Şekil 5.3. Rose-Gold renkli alt parçalar ile üretilen arka stop lambası (sırasıyla soğuk ve sıcak halde)..... 127

Şekil 5.4. Gold ve Rose-Gold renkli alt parçalar ile üretilen arka stop lambası (soğuk halde)..... 129

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 3.1. Alüminyum telin kütlece yapısal içeriği 35
Çizelge 3.2. Kullanılan telin ölçüsel ve gramaj olarak test sonuçları 36
Çizelge 3.4. Filaman telinin ölçüsel yeterliliği 37
Çizelge 3.4. Tungsten telin kütlece yapısal içeriği 38
Çizelge 3.5. Mevcut evaporasyon parametrelerinde elementlerin buharlaşma sıcaklıkları 40
Çizelge 3.6. CuAl alaşımlarının ötektik noktaları için kompozisyonları 41
Çizelge 3.7. CuZinc alaşımlarının ötektik noktaları için kompozisyonları 42
Çizelge 3.8. Lehim-kaynak telleri listesi 42
Çizelge 3.9. Lehim-kaynak telleri kompozisyonları 42
Çizelge 3.10. Deneme parametreleri 45
Çizelge 3.11. Sonuç matrisi 46
Çizelge 3.12. Tungsten Sıcaklığının özdirence bağlı olarak değişimi 49
Çizelge 3.13. Ön ısıtma ve buharlaştırma fazlarında tungsten filaman sıcaklığı 50
Çizelge 3.13. Ön ısıtma ve buharlaştırma fazlarında tungsten filaman sıcaklığı (devam) 51
Çizelge 3.14. Alüminyum tel farklı fazlar için spesifik ortamda özısı değerleri 52
Çizelge 3.15. Filaman başına düşen alüminyum tel faz değişimi için gerekli enerji miktarı 52
Çizelge 3.16. Ön ısıtma ve buharlaştırma periyodunda açığa çıkan toplam enerji ve alüminyum fazı 53
Çizelge 3.16. Ön ısıtma ve buharlaştırma periyodunda açığa çıkan toplam enerji ve alüminyum fazı (devam) 54
Çizelge 3.16. Ön ısıtma ve buharlaştırma periyodunda açığa çıkan toplam enerji ve alüminyum fazı (devam) 55
Çizelge 3.17. Mevcut proses koşulları 56
Çizelge 3.18. Moleküler dinamiğinin analizi için kullanılan yöntemlerin kıyaslanması (Gott ve diğerleri, 2013) 58
Çizelge 4.1. Yeni sepet tipi filaman ağırlığı ve ölçüleri 81
Çizelge 4.2. Geliştirilmiş sepet tipi filaman ağırlığı ve ölçüleri 84
Çizelge 4.3. Deneyler sonrası farklı plakalarda alüminyum kaplama film kalınlığı 85
Çizelge 4.4. Deneyler sonrası farklı plakalarda alüminyum kaplama film kalınlığı 91
Çizelge 4.5. En uygun renk tonu ve homojenite için alüminyum ve alaşım besleme miktarları 96
Çizelge 4.6. Spektrometre ölçümüne girecek numunelerin pozisyonları 103
Çizelge 4.7. Rose-gold renk plakalar spektrometre ölçüm sonuçları 106
Çizelge 4.8. Gold renk plakalar spektrometre ölçüm sonuçları 107
Çizelge 4.9. Seri ve altın sarısı çamurluk pozisyon (SL) 30 dakika ölçüm karşılaştırılması 121
Çizelge 4.10. Seri ve altın sarısı çamurluk fren-stop (BRL) 1 dakika ölçüm karşılaştırılması 122
Çizelge 4.11. Seri ve rose gold çamurluk pozisyon (SL) 30 dakika ölçüm karşılaştırılması 123
Çizelge 4.12. Seri ve rose gold çamurluk fren-stop (BRL) 1 dakika ölçüm karşılaştırılması 124

1. GİRİŞ

Otomotiv aydınlatma sektöründe mevcut pazar payının sürekliliği ve büyümesi için, maliyetlerin düşürülmesi kadar önemli rekabet unsurlarından bir tanesi de rakiplerinize göre yenilikçi ürünlerin üretimidir. Bu aşamada müşterinin ilgisini çekebilmek için fonksiyonel özelliklerin dışında, estetik açıdan da yeniliklerin yapılması gerekmektedir.

Estetik açıdan en önemli noktalardan biri olan dış hat çizgileri; far ve stop ürünlerinde, çerçeve, çıta tarafından, optik özellikler ise reflektör vb. reflektif parçalar ile desteklenmektedir. İç parçalarda daha zengin bir görünüm elde etmek için boya ve metalize kaplama işlemleri yapılmaktadır. Boya proseslerinin parça maliyetlerine etkisinin metalize kaplama prosesinden daha fazla olmasından dolayı, metalize kaplama işlemi yaygın olarak kullanılmaktadır. Global anlamda da oldukça yaygın olan Fiziksel Buhar Biriktirme (PVD) kaplama yöntemi metalize kaplama yöntemleri arasında en olanıdır (Grünwald ve diğerleri, 2001). Fakat bilinen yöntemler ile aydınlatma sektöründe, optik gereksinimler ve süreklilik düşünüldüğünde sadece alüminyum kaplama işlemi yapılmaktadır ve dış görünüm olarak farklılık yaratmamaktadır. Bu bağlamda farklı alaşım kullanımı ve proses şartlarındaki değişiklikler ile optik gereksinimlerin ve müşteri şartnamesinin karşılanması, gold-rose renk aralığının yakalanarak müşteri dikkatinin çekilmesi ve pazar payının büyütülmesi hedeflenmektedir.

Polimerik malzemeler üretilebilirlik, düşük maliyet, düşük yoğunluk ve esnekliği açısından öne çıksa da; bazen yüzey özellikleri, parlaklık, ıslanabilirlik, çizilmeye karşı direnç ya da sürtünme direnci istenilen seviyede olmayabilir (Beckmann ve diğerleri, 2001). Yüzey işlem uygulamaları ile polimerik malzemenin karakteristik özellikleri değiştirilmeksizin, yüzey özellikleri istenilen seviyeye getirilebilir (Hegemann ve diğerleri, 2003).

PVD birçok farklı ihtiyacı sağlamak üzere ince filmlerin biriktirilmesi için yaygın olarak kullanılan bir teknolojidir. Tribolojik, farklı yüzey davranışları, optik gereksinim, görünüm iyileştirme ve bunlar gibi daha birçok fayda geniş uygulama yelpazesinde

sağlanabilmektedir (Cavelli ve diğerleri, 2016; Hoche, 2014; Korhonena ve diğerleri, 2018). Kesici takımlar muhtemelen bu biriktirme tekniğinin en yaygın uygulamalarından biridir (Gouveia ve diğerleri, 2016; Inspektor ve Salvador, 2014; Michailidis, 2016; Momeni ve Tillmann, 2016), bazen ömürlerini uzatmak için Kimyasal Buhar Biriktirme (CVD) ile birlikte kullanılır (Damm ve diğerleri, 2017; Silva ve diğerleri, 2003; Trucchi ve diğerleri, 2017). Daha çok kesici takım ile parça arasındaki sürtünmeyi azaltmak ve termal özellikleri iyileştirmek için uygulanmaktadır (Hu ve diğerleri, 2017; Kim ve diğerleri, 2017; Maity, 2017; Silva ve diğerleri, 2012; Silva ve diğerleri, 2017).

PVD kaplama methodu ile bilinen yöntemlerin dışına çıkılarak ilk kez seri şartlarda termal evaporasyon ile polimer malzemeye Gold-Rose kaplama yapılacaktır. Uygun homojen karışımın elde edilmesinde ekipman tasarımında değişiklik yapılarak, farklı alaşımların sıralı olarak kaplama tekniği termal evaporasyon için ilk defa denenecektir. Alt film tabakasının alüminyum olması fotometrik anlamda yüzeyde yüksek yansıtma özelliği sağlayacaktır. Ayrıca parçaya ısı yansıtıcı etki ile ısıya karşı direnç sağlayacaktır. Farklı alaşımların ötektik noktaları analiz edilerek PVD prosesi için uygun alaşım kesri belirlenecektir. Alaşımın ötektik noktaya yakın kompozisyonda olması evaporasyon esnasında tel atığı, renk bozukluğu ya da homojenitede bozuklukları ortadan kaldıracaktır.

Proses parametrelerinin, evaporasyon eğrisi, pompa devri, planet dönme hızı ve basınç optimizasyonu yapılacaktır. Bunun dışında ortam basıncı, vakum süresi ve evaporasyon profili parça üzerindeki homojeniteyi etkilemektedir. Tungsten filaman ve alaşım tel geometrilerinin en uygun ısı yayılımı için optimizasyonu CFD analizleri ile gerçekleştirilecektir.

Farklı metal ince film kaplamalarının, optik gereksinimlerin sağlanması için farklı LED ve PCB yapıları tasarlanacak ve regülasyonlara uygun aydınlatma fonksiyonları yerine getirilecektir. Pozisyon ve stop işlevi için altın sarısı ya da gold-rose reflektörün kırmızı rengi vermesi için çalışmalar yürütülecektir.

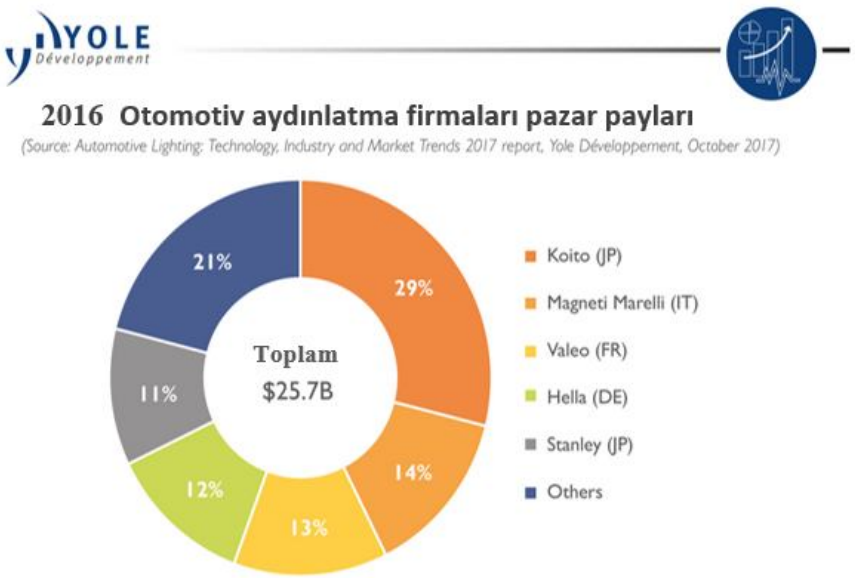
Ağırlaştırılmış neme dayanım, termal çevrim ve adezyon testleri parçaya uygulanarak, otomotivde kullanılması için tüm şartların sağlandığı doğrulanacaktır. Mikro-elektronik uygulamalar ve optik yüzeylerin kaplanmasında silikon oksit filmler yaygın olarak kullanılmaktadır (Engel ve diğerleri, 1985; Kakimato ve diğerleri, 1986; Kubono ve diğerleri, 1993).

Günümüzde hiçbir model far ya da arka stop aydınlatma ünitesi reflektörlerinde, alüminyum dışında farklı alaşım ya da ışık yansıtma özelliği bulunan boya teknolojisi kullanılarak farklı renkte reflektör üretilememektedir. Bu proje ile farklı görevler üstlenen reflektörlerin farklı alaşım ile kaplanarak farklı renkte üretilebilmeleri, tüm fonksiyonları ECE ve SAE yasal düzenlemeleri ve otomotiv aydınlatma gereksinimlerini karşılayan yeni bir ürünün çıkarılması hedeflenmektedir.

Otomotiv aydınlatma endüstrisinde geçmişten bugüne, far ve arka stop aydınlatmalarının en önemli parçası olan reflektör yüzeylerini oluşturmak için:

1. Metal reflektör + astarlama + alüminyum metalizasyon
2. BMC malzeme + astarlama + alüminyum metalizasyon
3. Polimer malzeme + alüminyum metalizasyon prosesleri uygulanmıştır.

Otomotiv aydınlatma sektöründe yer alan firmaların pazar payları Şekil 1.1'de gösterilmiştir. Büyük firmaların paylarından kendi firmamıza katabilmek için yapılan çalışmalar büyük önem arzetmektedir. Sektörde farklı renk reflektör üretilmesi ile bu sağlanabilecektir.



Şekil 1.1. Otomotiv aydınlatma firmaları pazar payı

Işık yansıtma değeri oldukça yüksek olduğu için otomotiv aydınlatma endüstrisinde alüminyum kaplama kullanılmaktadır. Farklı alaşımlar ile yapılan reflektör kaplama denemelerinde, yansıtma değerlerinde kayıp ve özellikle reflektör yüzeyinde yeterli homojenite sağlanamamasından dolayı ürünün nihai ışık değerlerinde bölgesel parlama ve karanlık bölgeler elde edilmiş, ışık değerleri ECE ve SAE yasal düzenlemelerini karşılayacak seviyeye taşınamamıştır.

Optik ve yasal gereklilikleri sağlayan ve seri üretim şartlarını yerine getiren aydınlatma ürünlerinde alüminyum malzeme haricinde farklı bir alaşım rutin olarak kullanılmamaktadır. Küresel alanda pazara liderlik eden, yönlendiren ve güçlü araştırma merkezlerine sahip Koito, Magneti Marelli, Hella, Valeo ve diğer firmaların örnek ürünlerinin yer aldığı alüminyum kaplama ile ilgili rutin uygulamalar aşağıdaki gibidir. Optik için optimize edilmiş birçok yeni malzeme (poli-amidler, polieter sülfonlar, siklool n polimerleri ve kopolimerleri son birkaç yıl içinde geliştirilmiştir (Minami, 2005).

Reflektörlerin alüminyum harici farklı alaşım ile kaplanmış olduğu bir uygulanma bulunmamaktadır. Dış lensin kırmızı olması ya da iç lensin renkli olması ile farklı renkler elde edilmiş, ancak ünite çalışmaz haldeyken farklı renkte olması şu ana kadar hayata

geçirilememiştir. Reflektörün farklı alaşım ile seri üretim koşullarında kaplanacak olması otomotiv aydınlatma sektörü için kesinlikle ilk olacaktır.

Tez çalışmaları "Kaynak Araştırması" ile başlamaktadır. Özellikle yakın tarihlerde yapılan çalışmalara yer verilmeye çalışılmıştır. Daha önce alınmış patent hakları da incelenmiş, tez sonunda ortaya çıkarılacak ürünün ticarileşmesinde engel olup olmadığı araştırılmıştır. Edinilen bilgiler ile proseste kullanılan malzemelerin incelenmesi "Materyal ve Yöntem" kısmında sağlanmıştır. Nihai rengi elde edeceğimiz alaşımın belirlenmesi ve bu alaşımın homojen şekilde evaporasyonunun sağlanması için gereklilikler belirlenmiştir. Tezin sonraki "Proses Parametreleri ve Etkileri" kısmında proses üzerinde etkisi daha fazla olan parametreler üzerinde durulmuştur. Bu parametreler "Deneysel Tasarım ve Modelleme" kısmında incelenmiş ve simülasyonlar yardımıyla vakum ortamında çan içi buhar dağılımı gözlemlemlenmiştir. "Bulgular ve Optimizasyon Çalışmaları" kısmında simülasyon analizleri sonrası çıkan sonuçlara göre optimizasyon çalışmalarına yer verilmiştir. Prosesin iyileştirilmesi için yapılan çalışmalar ve simülasyon sonuçlarının doğrulanabilmesi için yapılanlar anlatılmıştır. Kaplama sonrası gözle homojenitesi en uygun olarak gözlemlenen plakalar "Spektrometre Ölçümleri" kısmında yansıtıcılık özellikleri olarak değerlendirilmiştir. Uygun yansıtıcılık ve renk homojenitesi sonuçlarının olduğu ispatlandıktan sonra elde edilen alt parçalar ile bitmiş ürün montaj sırası "Montaj Konsepti" kısmında detaylı anlatılmıştır. Farklı versiyonlar için ayrımlar irdelenmiştir. Elde edilen komple ürünlerin regülasyona uygunlukları "Fotometri Ölçümleri" kısmında değerlendirilmiştir. SAE ve ECE için uygunluk sağlandığı ispat edilmiştir. Tez çalışmalarında elde edilen sonuçlar "Tartışma ve Sonuçlar" kısmında özetlenerek değerlendirilmiş ve ileride tez için yapılabilecek diğer çalışmalardan bahsedilmiştir (Şekil 1.2).



Şekil 1.2. Otomotiv aydınlatma ürünleri rutin reflektör yüzeyleri alüminyum metalizasyon uygulamaları

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

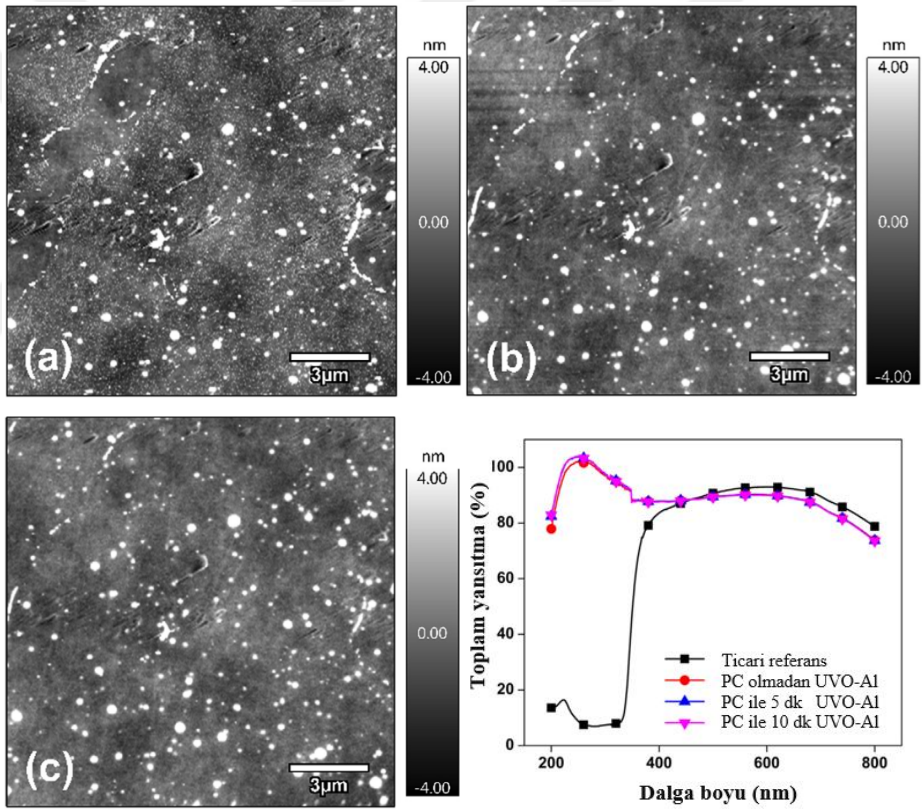
Alaşım kaplamalarında yaygın olarak sıçratma (sputtering) metodu kullanılmaktadır, sıçratma prosesinde buharlaşma neredeyse ideale yakın seviyededir ve homojen kaplamaya olanak sağlamaktadır (Fancey, 1994). Bu durumun tersine termal evaporasyon PVD metodu, homojen alaşım kaplamaya ve farklı çevrimlerde tekrar edilebilirlik gerçekleştirilemesine zorluklar getirmektedir.

Literatürde yüksek yansıtma değerlerine ihtiyacı olan optik elemanların fiziksel buhar biriktirme sistemleri (termal evaporasyon ve sıçratma) geliştirmeleri için çalışmalar yürütülmüştür. Yüksek yansıtma kabiliyeti olan metaller ve proses anının farklı modellemeleri yapılmış, sonuçlar testlerle doğrulanmıştır. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (CFD) ve Direkt Monte Karlo (DSMC) modellemeleri ile çan içi difüzyon mekanikleri de simülasyonlar desteği ile incelenmiştir. Bu çalışmalara ek olarak, farklı metallerin ya da alaşımların buharlaştırılması için kullanılan tungsten filamanlar ve tungsten filamanların farklı sıcaklılarda mekanik özelliklerinin iyileştirilmeleri için optimizasyon çalışmaları da literatürde ilgi gören konuların başında gelmektedir. Bu tez çalışmasında tüm alanlar için de literatür araştırması yapılmış, özet olarak aktarılmaya çalışılmıştır.

2.1 Fiziksel Buhar Biriktirme Sistemleri ve Optik Elemanların Yüksek Yansıtma Değerlerine Sahip Olması İle İlgili Çalışmalar

Nathaly Arias ve Franklin Jaramillo (2019) alüminyumun polimer yüzeyler üzerinde hafif ve esnek ince film oluşturulması için geliştirme çalışmalarında bulunmuşlardır. Çeşitli teknolojik uygulamalarda kullanılacak esnek aynalar; örneğin güneş yoğunlaştırma teknolojileri, mikro elektronik, yarım küre aynalar ve teleskop aynalarına geliştirmeler fayda sağlamaktadır. İyi korozyon direnci, düşük maliyet ve yüksek yansıtma davranışı öne çıkmaktadır. İnce alüminyum film tabakası vakum ortamında termal buharlaşma ile elde edilebilir ve homojenite ile uyumluluk, polimerik substratın uygun yüzey aktivasyonu ile sağlanabilir. Bu çalışmada polikarbonat (PC) levha üzerine yüksek saflıkta alüminyum ince film tabakası halinde biriktirilmiştir. Polimer yüzeyine biriktirme

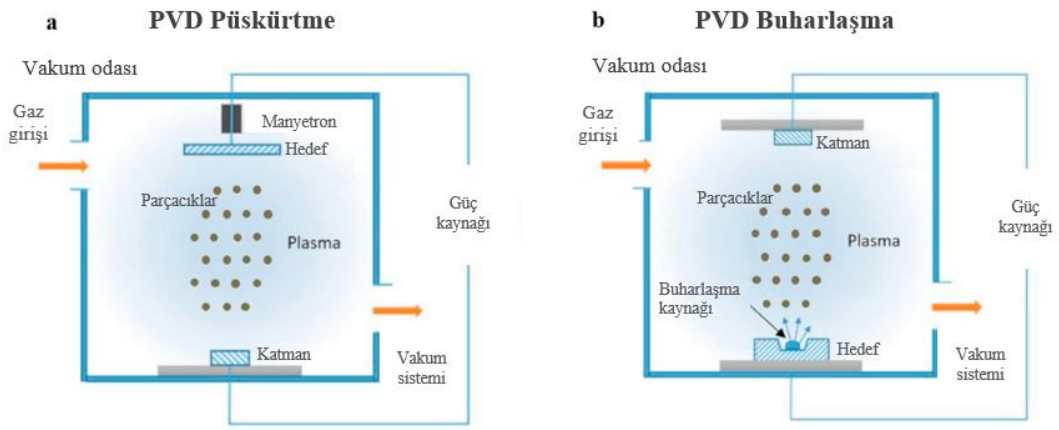
öncesi UVO (ultraviyole ve ozon) 5 ve 10 dakika FTIR ile aktive edilmiştir. UVO uygulamasının PC yüzeyi üzerindeki etkisini doğrulamak için su temas açısı ve AFM analizi yapılmıştır. Toplam yansıtma ve X-ışını farklılığı film tabakasının kalitesini değerlendirmek için kullanılır. Sonuçlar, UVO işleminin ıslaklığı büyük ölçüde iyileştirdiğini gösterdi. Substratların ıslanabilirliği ve alüminyum film homojenitesi artmıştır. Polimerik substrat ile yüzey arasındaki yapışma kuvvetinin iyileştirilmesi için UVO işlem süreleri belirlenmiş ve yansıtıcılık artmıştır. Polimerik substratlar üzerine biriktirilen esnek yansıtıcı ince alüminyum film ile %90 yansıtma elde edilmiştir. %93 yansıtma oranına sahip tipik güneş toplama, ticari rijit ayna ile karşılaştırıldığında, elde edilen değer en yüksek değerlerden birini temsil etmektedir (Şekil 2.1) (Hummel, 1981).



Şekil 2.1. PC numunelerinin yüzey topografisi (a) işlenmemiş, (b) 5 dakika UVO, (c) 10 dakika UVO ve yansıtma toplam eğrileri karşılaştırması grafiği (Arias ve Jaramillo, 2019).

A. Baptista, F. J. G. Silva, J. Porteiro, J.L. Míguez, G. Pinto ve L. Fernandes (2018) gelişmiş kaplama biriktirme prosesinin evriminin eleştirel incelemesini yapmışlardır. Fiziksel buhar biriktirme (PVD) sürecinde, özellikle elektromanyetik sıçratma tekniğine

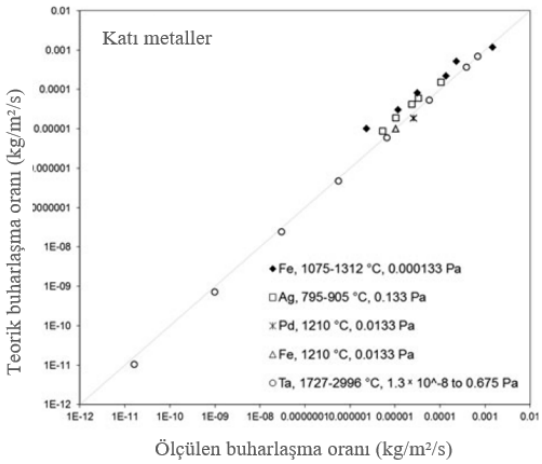
incelemeler odaklanmıştır. Daha düşük sıcaklıklar kullanarak pürüzsüz yüzeyler elde edilmekte, mükemmel mekanik ve tribolojik özellikler sağlanmaktadır. Substrata çok iyi adezyon sağlanması ile kullanılan metalin ana malzemelere çok iyi yapışması gerçekleşmektedir. Gelişmiş kaplamalar çok çeşitli endüstriyel uygulamalarda önemli bir rol oynamakta ve yaygın olarak kullanılmaktadır. İşleme takımlarında yüksek sertlik ve aşınma dirençleri ihtiyaçlarını karşılamakta, öte yandan takı ve dekoratif amaçlı olarak da kullanılabilmektedir. Biriktirme teknikleri, doğrudan ilişkili cihazlar, kontrol gelişimi ve yazılımın bir sonucu olarak güçlü bir evrim geçirmiştir. Ana teknikler etrafında çeşitli varyantlar geliştirilmiştir: ark evaporasyon ve sıçratma. Kaplamalar yapısal, mekanik özellikler ve yüzey morfolojisi açısından önemli farklılıklar göstermektedir. Substrat malzemesine ve uygulamaya bağlı olarak, biriktirme prosesinin belirli karakteristikleri sağlamaları için uygun şekilde seçilmesi gerekmektedir (Şekil 2.2) (Baptista ve diğerleri, 2018).



Şekil 2.2. PVD (a) püskürtme ve (b) buharlaştırma kaplama yöntemlerinin şematik diyagramı (Mattox, 2003)

Jafar Safarian ve Thorvald A. Engh (2012) saf maddelerin buharlaşmasıyla ilgili teorileri gözden geçirmiş ve vakum çalışmalarında saf metallerin buharlaşması üzerine çalışmalar yürütmüşlerdir. Farklı yoğun buharlaşma koşulları altında, farklı teoriler arasında zayıf buharlaşma için uyuşmalar olduğu gösterilmiştir. Zayıf buharlaşma denkleminde Hertz-Knudsen buharlaşma katsayısı 1,66 'dır. Buhar basıncının bir fonksiyonu olarak hız, birkaç teori uygulanarak hesaplanır. Eğer buharlaşma yüzeyi ile yoğunlaşma yüzeyi

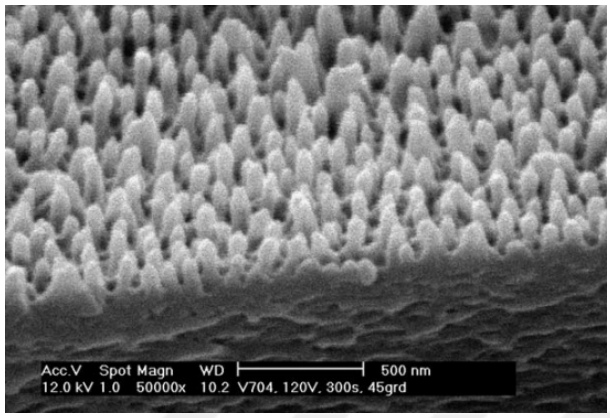
arasındaki mesafe çarpışma mesafesinden daha az ise Hertz-Knudsen denklemleri geçerlidir. Yoğuşma yüzeyinin buharlaşmaya yakın olmadığı bir durum için yoğun buharlaşma "Efektif Vakum Basıncı" denilen basınç kriteri ile tanımlanır. Basınç saf metalin buhar basıncının bir fraksiyonudur. Vakum buharlaşma oranı, "Efektif Vakum Basıncı" altındaki basınç değişikliklerinden etkilenmemelidir, böylece daha düşük basınçlarda buharlaşma akısı sabittir ve Hertz-Knudsen denklemi ile verilen maksimum 0,844 katsayısına eşittir. Katı metallerin buharlaşmasına ilişkin deneysel veriler ve literatürde bulunan çalışmalar karşılaştırılmıştır (Şekil 2.3) (Decher ve Schlenoff, 2003; Safarian ve Thorvald, 2013; Wasa ve diğerleri, 2004).



Şekil 2.3. Katı metallerin Hertz-Knudsen denklemine n=1'e göre buharlaşma hızları ve literatürdeki deneysel ölçümleri ile karşılaştırılması (Hirth ve Pound, 1957).

Ulrike Schulz ve Norbert Kaiser (2006) polimer yüzeyler üzerine optik gereksinimi olan kaplamaların biriktirilmesi için vakum teknolojileri üzerine çalışmalar yürütmüşlerdir. Termoplastikten kalıplanmış hassas optik elemanlar ve tüketici optiği için büyüyen bir pazar bulunmaktadır. Polimerler, yüksek yansıtma özellikleri ve dayanım için sert kaplamaya ihtiyaç duymaktadırlar. Polimer kaplamalarının kimyasal ve optik gereksinimleri karşılaması için farklı tür plastiklere farklı uygulamalar gerekmektedir (Schulz, 2005). Bu makalede vakum ortamında plastiğe uygulanan özel kaplama teknolojilerinin ve değerlendirme prosedürlerinin incelemesi yapılmıştır. Düşük basınç plazma uygulamaları ile çeşitli polimer malzemeler arasındaki karmaşık etkileşimler daha iyi anlaşılmıştır. Bu bulgular dayanıklı optik plastik elemanları için önemli bir faktör

olacaktır (Şekil 2.4) (Langmuir ve Malter, 1939; Lowe, 1964; Schulz ve Kaiser, 2006; Tsuchiyama ve Fujimoto, 1995; Xiong ve Hewins 2000).

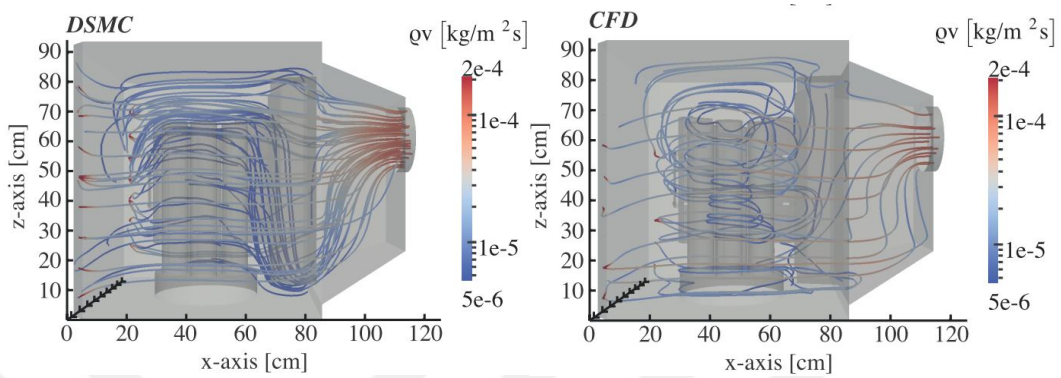


Şekil 2.4. PMMA'da stokastik antiretif yapıların taranan elektron mikroskobu görüntüsü (Kaless ve diğerleri, 2005)

2.2 Kaplama Homojenitesi ve PVD Reaktörü İçi Gaz Akışının Modellemesi ile İlgili Çalışmalar

Kirsten Bobzin, Ralf Peter Brinkmann, Thomas Mussenbrock, Nazlim Bagcivan, Ricardo Henrique Brugnara, Marcel Schafer ve Jan Trieschmann (2014) endüstriyel ölçekli bir plazma sıçratma reaktörü içindeki nötr argon ve moleküler nitrojen gazı akışını, hem akışkan modeli hem de Doğrudan Simülasyon Monte Carlo modeli kullanarak simüle etmişlerdir. Fiziksel buhar biriktirme işlemleri için kullanılan elektromanyetik sıçratma, genellikle 1 Pa'ın çok altında gaz basıncı gerektirir. Bu koşullar altında reaktördeki gaz akışı genellikle şu şekilde belirlenir; 1'e yakın bir Knudsen sayısı, yani hidrodinamik ve seyreltilmiş gaz rejimi arasında geçiş rejimi. İlk olarak, gaz akışı Navier-Stokes denklemleriyle uygun açıklanmaktadır, sonrasında Boltzmann denklemi aracılığıyla kinetik bir yaklaşım gereklidir. Her iki model sonucu karşılaştırılarak akışkan modelinin geçerliliği kontrol edilmiştir. Her iki modelde de nötr parçacıkların Maxwell-Boltzmann enerji dağılımına uygun olmasına rağmen gaz akışı sonuçları önemli ölçüde farklılık göstermektedir. Akışkan model açıklaması bozulmaktadır çünkü akış sürekliliği varsayımı bozulmaktadır. Bunun nedeni lokal olmayan etkiler, çok boyutlu ortamda gaz ve yapısallar arasındaki etkileşimdir. Sadece kinetik modeli, geçiş rejimindeki gaz akışının doğru fiziksel tanımını sağlayabilir. Analizde yerel Knudsen sayısının farklı

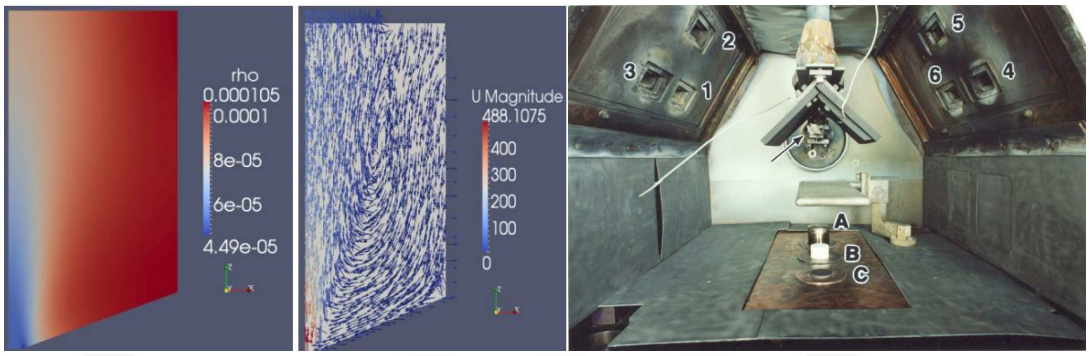
tanımlarına yer verilmiştir. En belirleyici parametrenin mekansal ölçeği L olduğu sonucuna varılmıştır. Bu parametre gaz akışı rejimini tahmin edebilmek için çok dikkatli seçilmelidir (Şekil 2.5) (Bobzin ve diğerleri, 2014).



Şekil 2.5. Farklı 2 model için kütle akısının renk ölçekli akış çizgileriyle görüntüleri (Bobzin ve diğerleri, 2014)

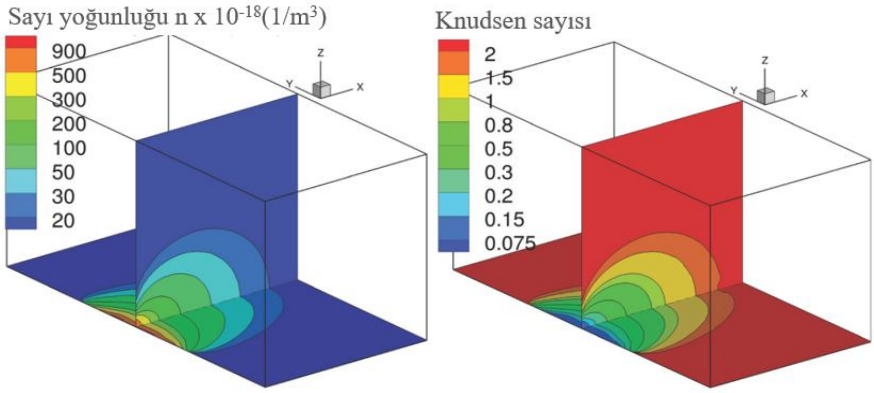
Kevin Gott, Anil Kulkarni ve Jogender Singh (2013) PVD prosesinde tahmin edilen biriktirme profiline akış rejimi seçiminin etkisini anlamaya çalışmaktadır. Gelişmiş Fiziksel Buhar Biriktirme (PVD) ile ince film kaplamalar üretilebilir, nano yapı ve nano kimya uyarlanabilir. Çan içinde gerçekleşen fizik bilgisi tam olarak bilinemediği için daha çok deneme yanılma yöntemleriyle veya ufak parametre artışlarıyla ilerlenmektedir. PVD teknolojilerinin başarılıyla modellenmesi ile kaplamalar imalattan önce tasarlanmış, önemli ölçüde üretim potansiyeline katkı sağlanmış ve üretim verimliliği arttırılmış olacaktır. Önceki çalışmalarda üç farklı üretim basıncına göre PVD fiziksel modellemeler gerçekleşmiştir. Yüksek basınç akışları için süreklilik mekaniği, orta basınç akışları için Doğrudan Simülasyon Monte Carlo (DSMC) modelleme ve düşük basınç akışları için serbest moleküler (FM) dinamikleri kullanılmıştır. Ön buharlaşma sürecinin hesaplamaları göstermiştir ki, üç modeli de içeren çok yönlü modelleme ancak PVD kaplama işlemlerini doğru bir şekilde simüle edebilmektedir. Bu durum yüksek vakum ve moleküller arası kuvvetlerden kaynaklanmaktadır. Evaporasyon hemen sonrası metal buharı yoğun sürekli rejim bölgesi oluşturmakta, sonrasında hedef yüzeye ulaşmadan önce seyrekleşmiş bölgeye genişlemiş olmaktadır. Geliştirilen model ile CFD, DSMC ve FM modelleri ayrı olarak kullanılarak kaplama süreci simüle edilmiş ve biriktirme profilleri karşılaştırılmıştır. Kütle biriktirme oranları ve her modelin gaz akışları kaplama

profili ile karşılaştırılarak modellerin doğrulukları değerlendirilmiştir. Sonuçlar gelecekte yapılacak PVD simülasyonları için uygun akışkan fiziği seçimini sağlayacaktır (Şekil 2.6) (Gott ve diğerleri, 2013).



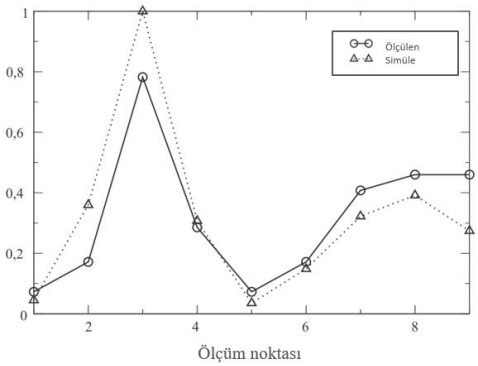
Şekil 2.6. Sırasıyla CFD yoğunluk alanı (kg / m^3) - hız alanı (m/s) ve PVD doğrulamalarının yapıldığı reaktör (Gott ve diğerleri, 2013)

A. Venkattraman, Alina A. Alexeenko (2011) üç boyutlu Doğrudan Simülasyon Monte Carlo ile mekansal sıcaklık varyasyonlarının ince film tabakası üzerine etkisinin incelenmesini sağlamışlardır. Tipik bir elektron ışını fiziksel buhar biriktirme sisteminde, yüksek güçlü elektron ışını parça yüzeyini az kontrol edilebilir şekilde ısıtır, termal düzensizliklere yol açar. Kaynaktan çıkan sıcaklık dağılımı, tipik biriktirme sürecinde çeşitli kütle akış hızları için Monte Carlo simülasyonları ile çözümlenmiştir. Sıcaklık ve doygunluk (yoğunluk) arasındaki doğrusal olmayan ilişki nedeni ve dolayısıyla kütlesel akı sebebiyle, tüm kütle akış hızlarını çözümlemek için alan ortalamalı sıcaklık değeri kullanılması yetersizdir. Kütle akış hızı eşdeğer sıcaklığı tespit edilmiş ve bu sıcaklık ile yapılan simülasyonlar düzgün olmayan gerçek sıcaklık dağılımı ile karşılaştırılmıştır. Düşük kütle akış hızları için büyüme oranları, eşdeğer olduğu sıcaklığın mekansal değişimine çok zayıf şekilde bağlıdır. Ancak, kütle akış hızı artarsa, bu yaklaşımla ilgili hata artmaktadır. Biriktirme prosesinde Knudsen sayıları 0,05'ten küçük ise, mekansal düzensizlikleri önemli hatalar olmaksızın hesaba katmak mümkün değildir. Belirli bir kütle akış hızı için, eşdeğer bir sıcaklık düşüşünün kullanılmasıyla ilgili hatalar artan toplayıcı yüzeyi ile akışın daha da genişlemesine izin verdiğinden, sıcaklık düzensizlikleri etkileri azalır (Şekil 2.7) (Venkattraman ve Alexeenko, 2011).



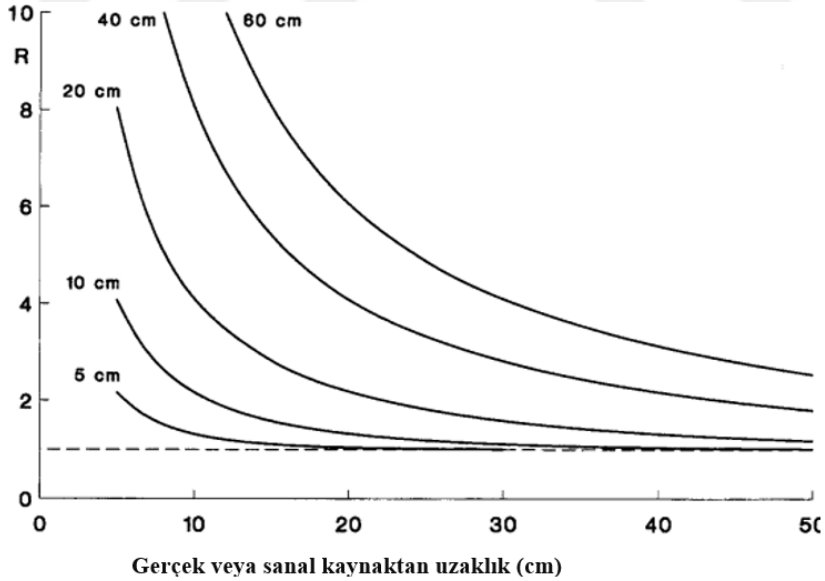
Şekil 2.7. Sayı yoğunluğu ve Knudsen sayı konturları (Venkattraman ve Alexeenko, 2011)

E. Lugscheider, K. Bobzin, N. Papenfuh-Janzen, D. Parkot (2005) karmaşık substratlar üzerinde biriktirilen filmlerin kalınlık dağılımını ve biriken parçacıkların kinetik özelliklerini incelemiştir. Üç boyutlu Monte Carlo yöntemleri kullanılarak, PVD sıçratma işleminde malzemenin taşınması tek element ve alaşım külçeleri için simüle edilmiştir. Simülasyonların sonuçları deneysel olarak işlenmiş filmlerle karşılaştırılmıştır. Karmaşık substrat geometrisinde biriktirilen alüminyum film kalınlık dağılımının hesaplanması CrAl filminin kompozisyon hesaplamaları ile birlikte yapılmıştır. Radyal bileşim dağılımı GD-OES yöntemi kullanılarak ölçülmüştür. Simülasyon sonuçları deneysel olarak biriktirilmiş filmler ile önlemli bir uyum içindedir. Çok bileşenli malzemelerin kompleks geometride substratlar üzerine PVD kaplama işlemi için DSMC simülasyonu umut verici bir araç gibi görünmektedir (Şekil 2.8) (Lugscheider ve diğerleri, 2005).



Şekil 2.8. Ölçülmüş ve simüle edilmiş film kalınlığı karşılaştırması (Lugscheider ve diğerleri, 2005)

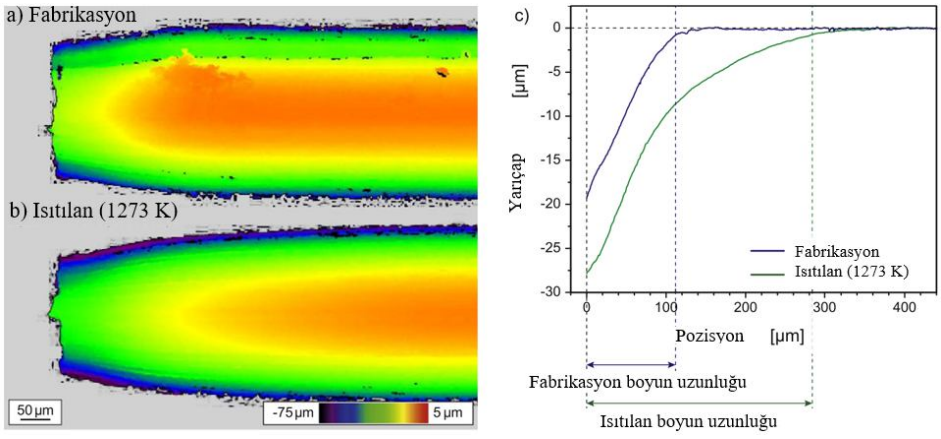
K.S. Fancey (1995) düşük basınçlı ortamda fiziksel buhar biriktirme (PVD) için kaplama kalınlığı homojenlik modeli tarif edebilme araştırmalarını sürdürmüştür. Evaporasyon kaynağına bakan ve bu kaynaktan uzaktaki yüzeyler için kaplama kalınlığı oranı, s (kaynak-substrat mesafesi) ve l (ortalama serbest yol) ile R = coth(s/21) formülüne göre ilişkilidir. Yapılan modelin doğruluğunu test etmek için deneysel çalışmalar yapılmış ve modelin farklı biriktirmeler güncellenmesi sağlanmıştır. Sonuçlar modelin simülasyon için uygulanabileceğini göstermektedir. Termal buharlaştırma (evaporasyon kulesi) ve elektromanyetik kullanan plazma tabanlı sıçratma veya katodik ark buharlaşma kaynaklarına model uyum göstermektedir. Biriktirme yaklaşımları ideal gaz kaynakları için Kosinüs Yasasından türetilmiştir (Pulker, 1984). Ancak Kosinüs Yasası aşağıdaki sebeplerden geçerliliğini kaybeder: (a) Proseste gerçekleşen buhar kaynakları geçerli emisyon oranlarında nadiren ideal davranış sergiler ve (b) birçok PVD sistemi kaba vakum altında çalışır. Buhar partiküllerinin kaynak ve parça arasındaki ortam gazı varsayılan doğrusal hareket olasılığını azaltır. Çalışmanın bir diğer amacı da model üzerinde son zamanlardaki bazı çalışma parametreleri ile gazın etkisi arasında ilişki kurmaktır (Şekil 2.9) (Jamieson ve Windle, 1983).



Şekil 2.9. Kaplama kalınlığının grafik temsili homojenlik modeli, çeşitli l değerleri için, R=coth(s/2l) (Jamieson ve Windle, 1983)

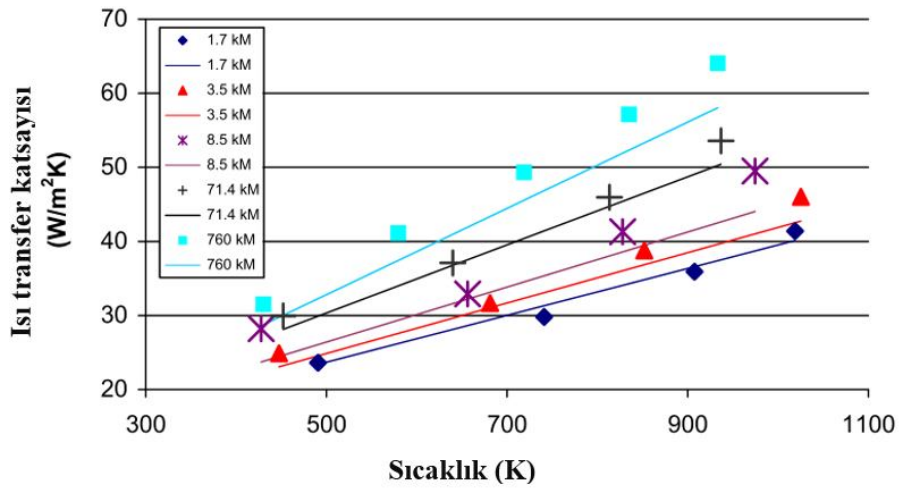
2.3 Tungsten Filamanlar ve Farklı Sıcaklılarda Mekanik Özelliklerinin İyileştirilmeleri ile İlgili Çalışmalar

P. Zhao, J. Riesch, T. Höschen, J. Almanstötter, M. Balden, J.W. Coenen, R. Himml, W. Pantleon, U. von Toussaint ve R. Neu (2017) tungsten telin plastik deformasyonunun engellenmesi ve dayanımının arttırılması için çalışmalarda bulunmuşlardır. Fiber takviyeli tungsten kompozitler (Wf/W) optimizasyon sağlanması açısından etkilidir. Bu kompozitlerin geliştirilmesi için katkısız-saf tungsten tel mikro yapı, mekanik davranış ve kırılma modu incelenmek üzere çeşitli ısıl işlemlere maruz bırakılmıştır. Yüksek dislokasyon yoğunluğunun neden olduğu büyük itici kuvvet nedeniyle yeniden kristalleşme nispeten düşük 1273 °K sıcaklıkta gerçekleşmiştir. 30 dakika 1900 °K'de temperleme yeniden kristalleşmeye sebep vermiş ancak oldukça farklı bir mikro yapı elde edilmiştir. Telin 1273 °K'de 3 saat yeniden kristalize edilmiş olması yüksek en-boy farkı olan ince taneli moleküler yapıya ve fazlaca plastik deforme olabilirliğe sahip olduğunu göstermiştir. 1900 °K'de temperleme yapılmışlar ise düşük en-boy farkı olan neredeyse eş eksenli geniş tanelere sahiptir ve oldukça farklı kırılgan özellikler göstermektedir. Tungsten telin sünek davranışı önerilmekte, bu nedenle tanelerin yüksek en-boy farkı olmasına rağmen 1273 °K daha uygun sonuç vermektedir, kırılganlığına göre daha önemlidir. Çekme testi sırasında plastik deformasyon davranışının detaylı değerlendirilmesi ile tasarım çalışmalarına rehberlik ve fiber takviyeli tungsten kompozitlerin optimizasyonu için bilgi sağlanmıştır. (Şekil 2.10) (Zhao ve diğerleri, 2017).



Şekil 2.10. Kopma bölgelerinin yükseklik dağılımları (Zhao ve diğerleri, 2017)

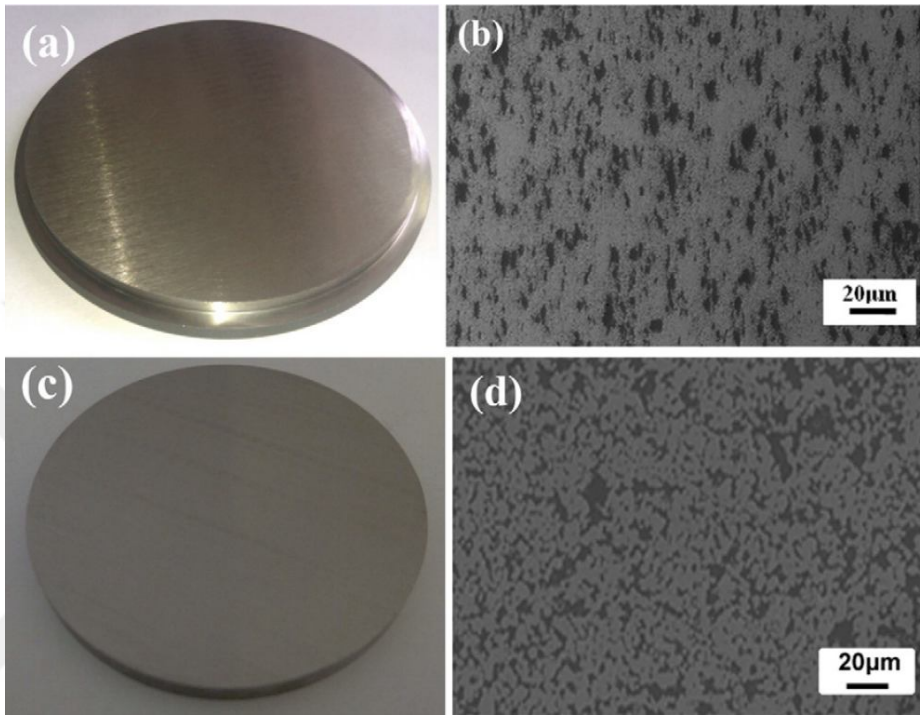
N.G. Chondrakis ve F.V. Topalis (2011) düşük basınç ve yüksek sıcaklıkta tungsten filamanların ısı transfer katsayısının değerlendirilmesi için deneysel çalışmalarda bulunmuşlardır. Bu amaçla bir T5 floresan elektrotu lamba, başlangıç koşullarının belirlenebilmesi için düşük basınç altında eşzamanlı ısıtılarak test edilmiştir, basıncın 1 kM (kilomikron) ile 760 kM arasında değiştiği kapalı bir reaktöre yerleştirilmiştir. Elektroda uygulanan voltaj normal lamba çalışma şartlarındadır ve çalışma frekansı DC ile 50 kHz arasında değişmektedir. Deney, ısıtma işlemi başlatıldıktan sonraki ilk ve dokuzuncu saniyenin sonunda elektrotun sıcaklığını belirlemeyi hedeflemiştir. Ardından ısı transferi katsayısı belirli deney koşullarında hesaplanmıştır. Isı transfer katsayısını tahmin eden matematiksel model geliştirilmiştir. Çalışmalar göstermiştir ki filamanın sıcaklığı büyük ölçüde basınca bağlıdır (Şekil 2.11) (Chondrakis ve Topalis, 2011).



Şekil 2.11. Örnek 1/14W: genel ısı transfer katsayısının değişimi farklı tel sıcaklık ve basınçlarda, 50 kHz'de, ateşleme 9 saniye sonra (Chondrakis ve Topalis, 2011)

Yang Yu, Jiupeng Song, Feng Bai, Ailong Zheng ve Fusheng Peng (2015) yaptığı bu çalışmada seri üretim için oldukça verimli ve maliyet tasarrufu sağlayan 6N W tozu geliştirilmiştir. HID lambaların elektrotları için 5N ve 6N W çubuk ve telleri bu toz ile üretilerek geliştirilmiştir. Yüksek saflıkta (>99.999 wt.%, 5N) veya ultra yüksek saflıkta (N99.9999 wt.%, 6N) tungsten (W) elektrotlar, yüksek yoğunluklu deşarj (HID) lambaların performansı ve ömrü açısından çok önemlidir. Öte yandan, yüksek saflığa dayanan alaşımlar (>99.99 wt.% veya 99.995 wt.%, 4N veya 4N5) W, yarı iletken filmlerin biriktirmesi için sıçratma külçeleri olarak kullanılmaktadır. Ayrıca, 4N5

tungsten-titanyum (W-Ti) ve 4N tungsten-silikon (W-Si) sıçratma külçelerinin hazırlanması için vakumlu sıcak presleme kullanılmıştır. Geliştirilen saf ve mikro yapıları uygun W ürünleri üzerine çalışılmış ve aydınlatma, yarı iletken ve fotovoltaik uygulamalar için kullanım imkanı sağlanmıştır (Şekil 2.12) (Yang ve diğerleri, 2015).



Şekil 2.12. Vakum ortamında sıcak preslenmiş 4N 5W – 10Ti ve 4N W – 30Si sıçratma külçeleri (a) W–10Ti külçe fotoğrafı (b) W–10Ti mikroskop görüntüsü (c) W–30Si külçe fotoğrafı (d) W–30Si mikroskop görüntüsü (Yang ve diğerleri, 2015)

2.4 Patent Araştırması

Daha önce tamamlanan en yakın patent çalışması yine reflektör kaplanması ile ilgili ve ayrıca korozyon direncini arttırmaya yöneliktir. Yansıtma kontrol katmanı sağlamak için transparan ya da %80 gümüş esaslı üst film tabaka ile sağlanmıştır (Şekil 2.13) (Macleod, 2001).

(19)日本国特許庁（ＪＰ）　(12) 特　許　公　報（Ｂ２）　(11)特許番号
特許第3301638号
(P3301638)

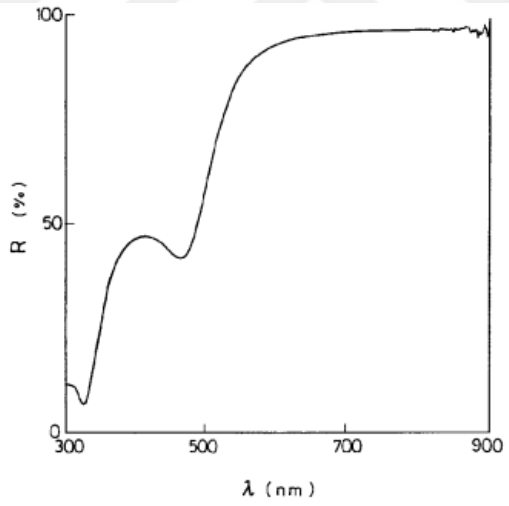
(45)発行日　平成14年７月15日(2002.7.15)　(24)登録日　平成14年４月26日(2002.4.26)

(51)Int.Cl.⁷	識別記号	Ｆ Ｉ	
Ｃ２３Ｃ　14/06		Ｃ２３Ｃ　14/06	Ａ
Ｃ０１Ｂ　33/02		Ｃ０１Ｂ　33/02	Ｄ
33/12		33/12	Ｃ

請求項の数８(全　７　頁)

Şekil 2.13. Japonya Alınan Patent Bilgileri

Yansıtma kontrol katmanı oluşturulduğunda, yansıtılan dalga boyu dağılımı yansıtma kontrol katmanında kontrol edilir. % R olarak yansıtma değeri, λ ise görünen ışık bölgesinde nm cinsinden ışığın dalga boyunu belirtmektedir (λ : 450 ile 800nm arasındadır). Yansıtma kontrol katmanı, sıçratma metodu ile vakum ortamında aynı cam üzerinde oluşturulduğu gibi girişim buhar biriktirilmesi ile oluşturulmaktadır (Şekil 2.14) (Schulz, 2006).



Şekil 2.14. Yansıtma kontrol katmanı; yansıtma değeri-ışık dalgaboyu

Araştırmalara göre “altın görünümlü / kaplamalı” reflektör üretip komple arka stop kombinasyon lambasının ürün olarak sunulmasının bir sakıncası bulunmamaktadır. Yapılacak çalışma sonucunda elde edilecek ürün pazarda ilk olabilecektir. Normalde farklı renkte alt parça içeren aydınlatma ürünleri mevcuttur, ancak bu parçalar reflektör

görevi görmemektedir. Çalışma sonucunda ortaya çıkan ürün farklı renkte olup yine optik açıdan gereksinimleri tam olarak karşılamaktadır.

2.5 Tez Çalışmasının Literatüre Katkısı ve Diğer Çalışmalardan Farkı

Fiziksel buhar biriktirme (PVD) tekniği 60'larda ortaya çıkmış ve son on yıldır üzerine birçok varyant ve geliştirme konmuştur. Yaygın olarak kaplama özellikleri ve biriktirme oranı iyileştirilmektedir (Martinho ve diğerleri, 2011; Silva ve diğerleri, 2009). Elektrik, plazma teknolojisi, vakum, manyetizma, gaz kimyası, termal buharlaşma ve sıçratma teknolojilerinin geliştirilmesi ile daha da ilerletilecektir (Powell ve diğerleri, 1966). Yapılan bu tez çalışmasında evaporasyon kulesi iyileştirmeleri ve tungsten filaman optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. PVD reaktörünün geliştirilmesinde alınan bu yol diğer tüm reaktör tasarımlarına öncü olacaktır.

PVD yöntemi özellikle nanokompozit kaplamalarda, karbür ve metal nitrürleme uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır (Martinho ve diğerleri, 2009; Musil, 2015; Silva ve diğerleri, 2014; Veprek ve diğerleri, 2005; Yang ve Zhao, 2005). Bunun yanı sıra aydınlatma endüstrisinde optik yansıtıcı gereksinimi olan alt parçaların üretiminde de kullanılmaktadır. Endüstriyel bağlamda, biriktirme oranı muhtemelen optimize edilecek en iyi parametredir, ancak yapılan bilimsel çalışmalar daha çok kaplama özelliklerini iyileştirmeye odaklanmıştır (Musil, 2015; Rubshtein ve 2017; Silva ve diğerleri, 2012). Yapılan bu tez çalışmasında biriktirme oranının arttırılmasının yanında homojenitesi sağlanmaya çalışılmaktadır. Düzensiz birikimler istenmemektedir. Otomotiv standartlarını karşılayacak şekilde kaplama özelliklerinde yüksek dayanım elde edilmiştir. Tüm dayanım testlerinden başarı ile geçilmiştir, yapılan çalışmalar farklı reaktörlerin proses parametrelerinin belirlenmesinde öncü olacaktır.

Monte Carlo yöntemlerine dayalı bilgisayar simülasyonları özellikle elektromanyetik sıçratma kullanılan külçe özelliklerine ve proses parametrelerine bağlı olarak substrat üzerindeki kalınlık dağılımını hesaplamak için kullanılmaktadır. (Gillen ve diğerleri, 2002; Herec ve diğerleri, 2001; Macak ve diğerleri, 1999). Tek element ile sıçratma püskürtme birçok makalede araştırılmıştır, çok bileşenli alaşım külçelerinin

püskürtülmesi üzerine son yıllarda çeşitli çalışmalar yapılmıştır (Miyagawa ve Mijagawa S. 2002; Sigmund ve diğerleri, 1982). Ancak termal evaporasyon ile özellikle büyük çana sahip reaktörler için herhangi alaşım ile kaplama ve renk homojenitesi elde edilmesi açısından bir çalışma bulunmamaktadır. Yapılan bu tez çalışmasında elde edilen sonuçlar büyük hacimdeki termal evaporasyon PVD makinaları içerisindeki fiziksel gaz akış rejiminin anlaşılmasında öncülük edecektir.

Üretilen far ya da arka stop alt parçaları yansıtıcı ve estetik gereksinimlerin sağlanması için yansıtıcılığı yüksek alüminyum ile kaplanmaktadır. PVD termal buharlaştırma yöntemiyle bakır alaşımları kaplama yapılarak plastik alt parçalar altın sarısı ve bronz renkte olması sağlanabilmektedir ancak renk homojenitesi ve optik gereksinimler sağlanamamaktadır. Yapılan bu doktora çalışması sonrasında aynı çevrimde 2,84 m^3 hacmindeki vakum çanında kaplanan tüm parçalarda gerekli yansıtıcılık özelliği korunarak homojenite sağlanmış ve aynı renk tonu elde edilmiştir. İstenilen kalite gereksinimi çan içerisindeki farklı bölgelerdeki tüm parçalar için sağlanmıştır.

Daha önce yapılan farklı renk kaplama çalışmalarında elektromanyetik sıçratma yöntemi kullanılmış ve %90 bakır oranlı alaşım külçeleri ile sadece altın sarısı rengi elde edilebilmiştir. Sıçratma makinaları 1 m^3'den daha küçük çana sahip ve tek altlıklı makinelerdir, bu sebeple üretim çıktısı otomotiv seri imalatı için uygun değildir. Geliştirilen yeni durum ile plastik alt parçalar 2,84 m^3 çana sahip makine ile PVD termal buharlaştırma yöntemiyle altın sarısı ve bronz renklerde kaplanabilmekte ve aynı zamanda da gerekli optik değerler (yansıtıcılık özelliği) sağlanabilmektedir. Sıçratma yönteminde kullanılan külçeler yerine tel evaporantlar kullanılmaktadır. Farklı bakır alaşım kompozisyonlarıyla üretim yapmak için ağır külçeler yerine birkaç gramlık evaporant teller kullanılmaktadır. Yüksek vakum ortamında tungsten filamanlar yardımı ile bakır alaşımlı teller buharlaştırılmakta ve ortamda oluşan bakır alaşım buharı plastik alt parçalar üzerinde biriktirilmektedir.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

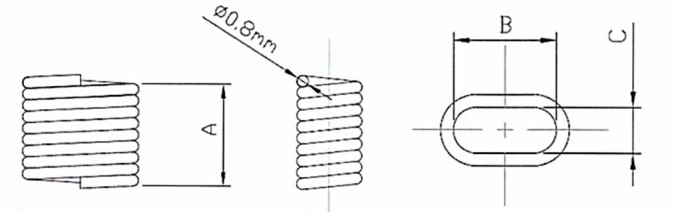
Mevcut üretim prosesinde kullanılan alüminyum tel ve tungsten filaman özellikleri detaylı şekilde incelenmiştir. Özellikle proses noktasının detay analizinin yapılabilmesinde ve simülasyona prosesin aktarılabilmesinde büyük önem arzetmektedir. Buharlaşma mekaniğinin tam olarak çözümlenebilmesi için kullanılacak malzemeler için literatür araştırması yapılmıştır. Nihai rengi elde edeceğimiz alaşım belirlenmiş ve bu alaşımın homojen şekilde evaporasyonunun sağlanması için gereklilikler tespit edilmiştir. Malzeme kompozisyonu ve saflık değerlerinin önceki çalışmalardaki etkileri incelenmiştir.

Proseste kullanılacak malzemelerin belirlenmesi sonrası proses parametrelerinin etkileri incelenmiştir. Buharlaşma mekaniğinin simülasyona aktarılması yardımıyla vakum ortamında çan içi buhar dağılımı gözlemlemlenmiştir. Bu analizler sonrası çıkan bulgulara göre optimizasyon çalışmaları yürütülmüştür. İyileştirmelerin ve farklı parametre gruplarının prosese etkisi deneyler ile doğrulanmıştır. Gelinen son noktada homojenitenin doğrulanması ve yansıtıcılık özelliklerinin öğrenilebilmesi için spektrometre ölçümleri yapılmıştır. Soğuk görünüm sonrası elde edilen altın sarısı ve rose-gold renklerin regülasyona uygun şekilde kırmızı renk verebilmesi için uygun renkte renk seçimi yapılmıştır. Yansıtıcılık değerlerinin düşmesini telafi etmesi için mevcut üründe kullanılan ledlerin ışık şiddeti arttırılmıştır. Elde edilen komple ürünlerin regülasyona uygunlukları fotometri ölçümleri ile doğrulanmıştır. SAE ve ECE için uygunluk sağlandığı ispat edilmiştir.

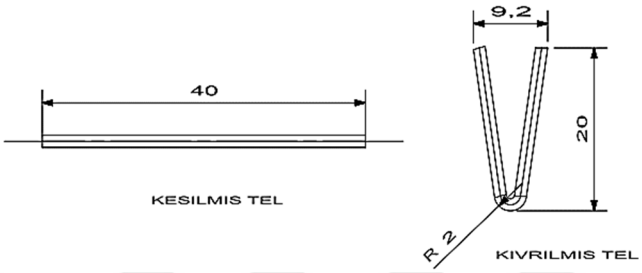
3.1 Proseste Kullanılan Alüminyum Tel ve Tungsten Filaman Özellikleri

3.1.1 Alüminyum tel boyut, geometri, saflık

Evapore edilecek olan telin boyutsal ölçüleri ve geometrisi, ısı transfer yüzey alanını, evaporasyon hızını, aktif buhar yayılma alanını doğrudan etkilemektedir. Kullanılacak olan telin düz, sarmal (Şekil 3.1) ya da V şekil (Şekil 3.2) vb. yapılarda bulunması kaplama kalitesinde önemli bir değişkendir.



Şekil 3.1. Sarmal tel yapısının teknik çizimi



Şekil 3.2. Düz ve V şekil yapısına sahip tel yapısı

Alüminyum tel ya da kullanılacak alaşımın saf olmaması farklı elementlerin farklı evaporasyon profili gerçekleştirmesinden dolayı risk arzetmektedir (Çizelge 3.1). PVD metodunda doğrudan parça kalitesi etkilenecek olup bu durum tel atığı, renk bozukluğu ya da homojenitede olumsuz etki gösterecektir. Kullanılacak olan tel her çevrim için standart olmalıdır ve yeterliliği yapılmış olmalıdır (Çizelge 3.2).

Çizelge 3.1. Alüminyum telin kütlece yapısal içeriği

Aluminyum Teli 0.8mm çap / 99.99% saflık

Çap	Gerilme direnci (N/mm2)	Uzama (%)	Kimyasal analiz (%)								
			Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
0.8mm	95	7	0.001	0.001	0.001	-	-	-	-	-	99.997

Çizelge 3.2. Kullanılan telin ölçüsel ve gramaj olarak test sonuçları

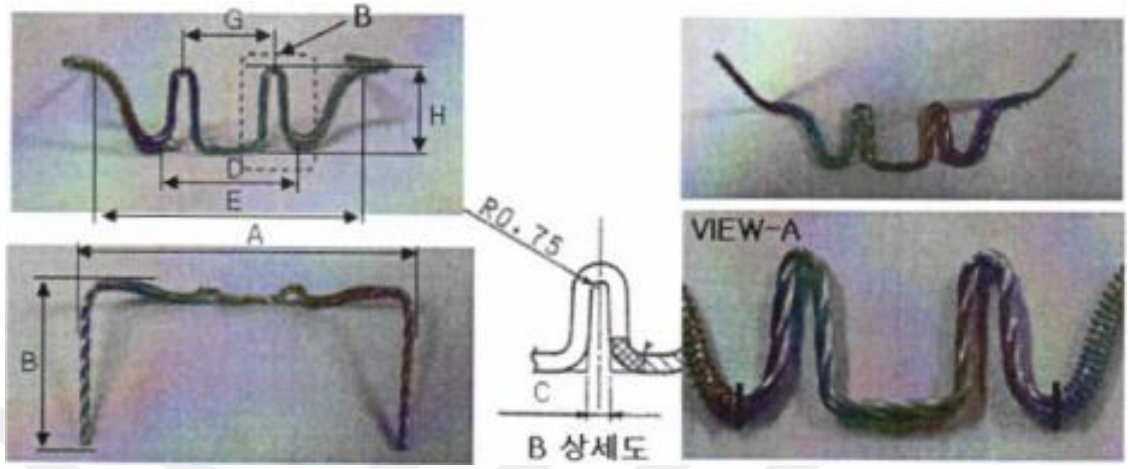
No.	A	B	C	Ağırlık	Sonuç
	7.2mm±0.2	6.4mm±0.2	3mm±0.2	225mg±4	
1	7.2	6.4	3.0	225	OK
2	7.2	6.4	3.1	225	OK
3	7.1	6.4	3.0	225	OK
4	7.2	6.4	3.0	225	OK
5	7.2	6.4	3.0	225	OK
6	7.2	6.4	3.1	225	OK
7	7.2	6.4	3.1	225	OK
8	7.2	6.4	3.0	225	OK
9	7.2	6.4	3.0	225	OK
10	7.2	6.3	3.1	225	OK
Max	7.2	6.4	3.1	225	
Min	7.1	6.3	3.0	225	
Ortalama	7.2	6.4	3.0	225	

3.1.2 Tungsten flaman boyut, geometri, elektrod açıklığı, saflık

Çok yüksek erime noktası ve üstün yüksek sıcaklığı mukavemeti sebebiyle tungsten yüksek sıcaklık uygulamaları için çekici bir malzemedir (Coenen ve diğerleri, 2016). Bununla birlikte, doğasında bulunan kırılganlığı ve çalışma sonrasında gevrekleşmesi sebebiyle tungstenin sertleştirilmesi ya da dayanıklılığının arttırılması gereklidir (Pintsuk, 2012). Son zamanlarda, tungstenin güçlendirilme kavramı özellikle gevrekleşmenin neden olduğu enerji dağılımının üçlü mekanizmaları tel saflığı, matris yapısı ve arayüz katmanı ile ilgilidir (Coenen ve diğerleri, 2016; Du ve diğerleri, 2010; Du ve diğerleri, 2011; Neu ve diğerleri, 2016; Riesch ve diğerleri, 2013; Riesch ve diğerleri, 2014). Bu yapılar 1980'lerden bu yana seramik matris kompozitlerinde (CMC) kullanılmaktadır. (Curtin, 1991; Donald ve Mcmillan, 1976; Marshall ve Evans, 1985). Tungsten fiber takviyeli tungsten kompozitler (Wf/W) tungsten telin olası plastik deformasyonu sebebi olarak gösterilebilir (Pink ve Bartha, 1989; Riesch ve diğerleri, 2016).

Filaman boyutu elektrik direncini değiştirmektedir ve evaporasyon fazında önemli rol oynamaktadır. Filamanın akkorlaşma kabiliyeti, kopmadan ve kırılganlaşmadan uzun süre kullanımı, hem çevrim süreleri hem de kalite açısından önemlidir. Tel yapısına ve

özel koşullara bağlı olarak filamanlar, düz, W şekil, W şekil + sarmal yay, sarmal yay, batch tipi vb. yapılara sahiptir (Şekil 3.3).



Şekil 3.3. W tipi filaman yapısının teknik çizimi

Ayrıca yüksek vakum altında filamanın geometrisi (Çizelge 3.3) konveksiyonel hava akışını ve metal buharının derin bölgelere nüfuzunu etkilemektedir. Özellikle alaşıma aktarılan ısı tel geometrisi ile doğrudan alakalıdır.

Çizelge 3.4. Filaman telinin ölçüsel yeterliliği

No.	A	B	C	D	G	H	Sonuç
	60±2.0mm	**31±2.0mm**	**2.5-0.5mm**	**30±2.0mm**	**15±1.0mm**	**13.5±0.5mm**	
1	60.2	31.3	2.2	30.3	15.3	13.5	OK
2	60.2	31.3	2.5	30.5	15.2	13.2	OK
3	60.5	31.5	2.3	30.2	15.3	13.3	OK
4	60.3	31.2	2.3	30.5	15.3	13.5	OK
5	60.5	31.3	2.5	30.3	15.2	13.5	OK
6	60.2	31.5	2.3	30.3	15.3	13.3	OK
7	60.5	31.2	2.4	30.5	15.2	13.2	OK
8	60.3	31.3	2.2	30.2	15.3	13.3	OK
9	60.3	31.5	2.3	30.5	15.3	13.5	OK
10	60.5	13.5	2.3	30.3	15.3	13.2	OK
Max	60.5	31.5	2.5	30.5	15.3	13.5	
Min	60.2	13.5	2.2	30.2	15.2	13.2	
Ortalama	60.35	29.56	2.33	30.36	15.27	13.35	

Ön ısıtma rampasında telin tam olarak tavlanması ve düşük güç ile evaporasyon öncesi sıcaklığa getirilmesi, sonrasında ise ortaya çıkan ısının en iyi şekilde tele bütünüyle aktarılması gerekmektedir. Buharlaştırılacak tel gibi tungsten filaman saflığı da dayanım ve ısı aktarımı için önem arzetmektedir (Çizelge 3.4).

Çizelge 3.4. Tungsten telin kütlece yapısal içeriği

Tungsten Teli : 0.85mm çap

Çap	W (%)	K (ppm)	Si (ppm)	Al (ppm)	Ca (ppm)	Mg (ppm)	Fe (ppm)	Mo (ppm)
0.85mm	99.95	82	9	10	10	4	20	8

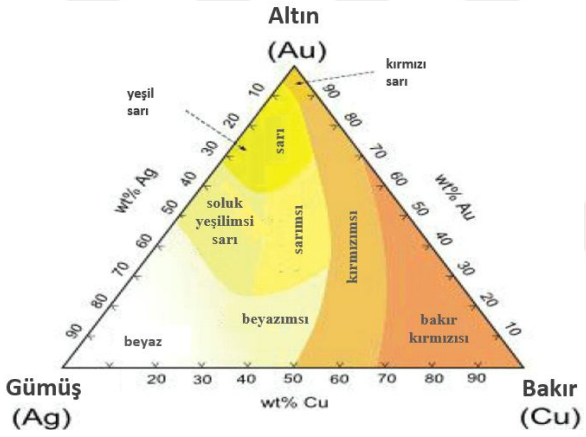
Filamanların parçaya yakın veya uzak olması oluşacak metal buharının başlangıç konumunu belirlemektedir. Parçaların buhar içerisindeki hareketi esnasında çarpışma sonucu parçalar üzerinde dekompozisyon olmaktadır (süblimleşme tersi-gaz fazdan katı faza geçiş). Parça parlaklığı, parçanın planetteki pozisyonu, kaplanan film kalınlığı ve optik değerlerine göre filaman ile planet arasındaki uzaklık değişmektedir (Şekil 3.4).



Şekil 3.4. Elektrot çubuğunun ve flamanların çan içerisindeki konumu

3.2 Uygun Kompozisyonda Alaşım Belirlenmesi

Kullanılacak telin içerik yapısı; evaporasyon için gerekli enerji miktarını, kaplama renk kalitesini, çan içerisindeki buhar homojenitesini ve tekrarlanabilirliği doğrudan etkilemektedir. Kullanılacak telin erimesi, buhar haline geçişindeki hızı ve kompozisyonu homojen buhar oluşması açısından çok önemlidir. Kullanılacak olan tel alaşımlarının karışım oranları, faz diyagramında yer alan ötektik noktasına yakın seçilerek bu oranın evaporasyon fazında da yaklaşık aynı kalması beklenmektedir. Bu durum kaplama renk kalitesini doğrudan etkileyeceğinden, farklı alaşımların farklı karışım oranları ile en uygun sonuçlar alınmaya çalışılacaktır. Farklı elementlerin farklı kompozisyonları ile karışımında ortaya çıkacak renkler aşağıdaki renk skalasında gösterilmiştir (Şekil 3.5).



Şekil 3.5. Ag-Cu-Au karışım kütle oranlarına göre renk skalası

Temin edilecek tellerin saflığını, homojenitesini ve tekrarlanabilirliğini garanti altına almak için kaynak ya da lehim teli üreten Magmaweld, Oerlikon ve Askaynak firmaların ürünleri incelenmiştir. Ürün gamında bulunan teller arasından bakır, alüminyum, çinko, kalay, fosfor elementlerini içeren CuSi3, CuAl8, CuP8, CuZn ve CuZn39Sn gibi farklı kimyasal formülde alaşımlar denenmiştir. Altın sarısı, rose-gold ve farklı diğer renklerin ortaya çıkması öngörülmüştür. Özellikle CuAl8 sarı renkli olup, gemi pervanelerinde kullanılmaktadır (Şekil 3.6).

Belirlenen alaşımların uygun evaporasyon profilinde olması için yapılan literatür araştırmaları sonucunda ötektik alaşım bölgesine yakın, PVD prosesi için uygun alaşım

kesrine sahip teller belirlenmiştir. İki metalin en düşük erime noktasına sahip karışımını oluşturacak oranlarda bulunduğu alaşım, evaporasyon esnasında tel atığı, renk bozukluğu ya da homojenitede var olan bozuklukları ortadan kaldıracaktır.



Şekil 3.6. CuAl8 alaşımından üretilmiş gemi pervanesi

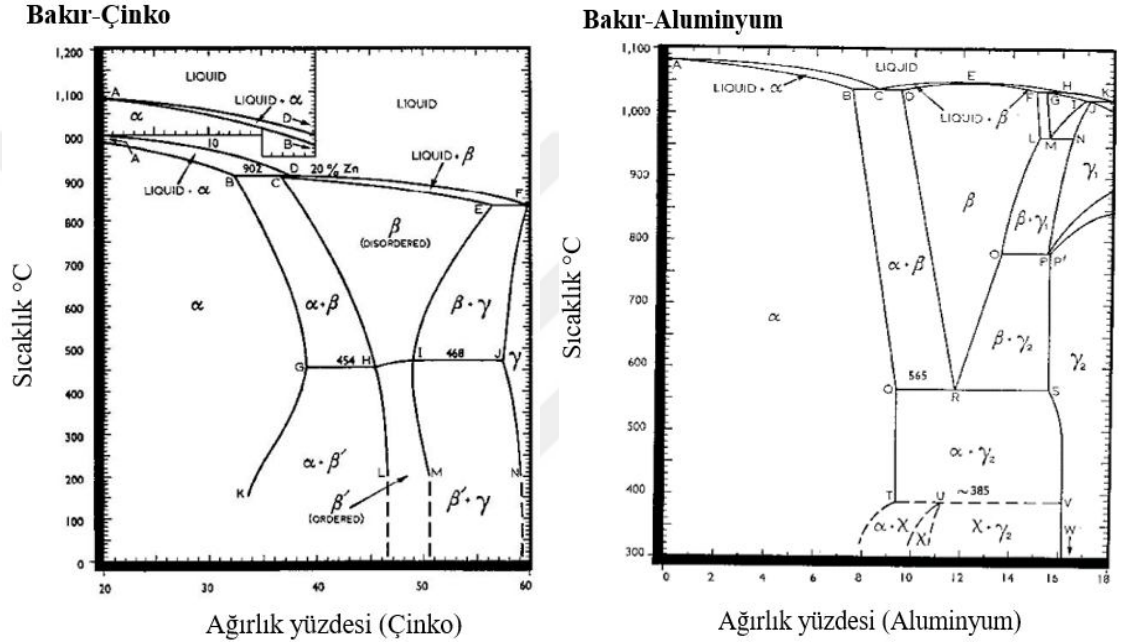
Mevcut evaporasyon parametrelerinde elementlerin buharlaşma sıcaklıkları Çizelge 3.5'deki gibidir. Bununla birlikte alüminyum-bakır ve çinko-bakır ötektik grafiklerinden ötektik noktalarına yakın olan alaşımların kompozisyonlarından seçim yapılmıştır. Seçim sonucunda bakır-çinko alaşımı için 902°C, buharlaşma sıcaklığı için %32,5 ile %37,6 çinko kompozisyonunda olan teller; bakır-alüminyum alaşımı için ise 1037°C, buharlaşma sıcaklığı için %7,5 ile %9,5 alüminyum kompozisyonunda olan teller seçilmiştir.

Çizelge 3.5. Mevcut evaporasyon parametrelerinde elementlerin buharlaşma sıcaklıkları

Element	**10^{-4} Torr=0.00013332237 milibar**	
	°C	°F
Aluminyum	808	1486
Çinko	248	478
Bakır	1035	1895

Seçilecek alaşım ile yapılacak olan kaplama sonrası mikro çatlakların oluşması muhtemeldir. Bu mikro çatlaklardan kaplama içerisine doğru gaz geçişine müsaade edebilir ve korozyon başlangıcı tetiklenebilir. Koruyucu film kalınlığının artması ile alüminyum kaplama üzerinde yer alan mikro çatlaklar ve gözeneklerin kapanması ve gaz permabilitesinin azalması beklenmektedir (Jamieson ve Windle, 1983).

Çeşitli uygulamalar, substrat nedeniyle biriktirme işlemi açısından sıcaklık sınırlamasına takılmaktadır. Polimerin erime sıcaklığı veya soğutma işlemi sırasında oluşan istenmeyen stresler olarak örneklendirilebilinir (Holmberg ve Matthews, 2009; Martin, 2010; Mattox, 2010; Tracton, 2006). Alaşım kaplama sonrasında ortaya çıkan sonuçlar bu bağlamda da değerlendirilmiştir. CuAl (Çizelge 3.6) ve CuZinc (Çizelge 3.7) alaşımlarının ötektik grafikleri (Şekil 3.7) gösterilmektedir. Alaşım kompozisyonunda birbirine yakın buharlaşma sıcaklıkları homojen buharlaşma sağlayacaktır (Osterman ve Antes, 2010).



Şekil 3.7. CuAl ve CuZinc alaşımları ötektik grafikleri (Osterman ve Antes, 2010)

Çizelge 3.6. CuAl alaşımlarının ötektik noktaları için kompozisyonları

Nokta	**A**	**B**	**C**	**D**	**E**	**F**	**G**	**H**
°C	1083	1037	1037	1037	1048	1036	1036	1036
Al,%	0	7.5	8.5	9.5	12.4	14.95	15.25	16
Nokta	**I**	**J**	**K**	**L**	**M**	**N**	**O**	**P,P[1]**
°C	1022	1022	1022	963	963	963	780	780
Al,%	16.9	17.1	18	15.1	15.45	16.40	13.6	~15.6
Nokta	**Q**	**R**	**S**	**T**	**U**	**V**	**W**	
°C	565	565	565	~385	~385	~385	0	
Al,%	9.4	11.8	15.6	9.4	<11.3	16.2	16.2	

Çizelge 3.7. CuZinc alaşımlarının ötektik noktaları için kompozisyonları

Nokta	**A**	**B**	**C**	**D**	**E**	**F**	**G**
°C	1083	902	902	902	834	834	454
Zn,%	0	32.5	36.8	37.6	56.6	60.0	39.0
Nokta	**H**	**I**	**J**	**K**	**L**	**M**	**N**
°C	454	468	468	150	200	200	200
Zn,%	45.5	48.9	57.5	33.6	46.6	50.6	59.1

Firmalar ile yapılan görüşmeler sonrasında belirlenen tellerin listesi aşağıda yeralmaktadır (Çizelge 3.8). İlk etapta uygun ötektik kompozisyonunda olan aynı tellerin daha düşük çapta olanları tercih edilmiştir ancak kalın olan ve evaporasyonda problem çıkartacak olanlar tekrar ekstrüzyon işlemine tabi tutulmuş ve çap daraltmasına gidilmiştir (Çizelge 3.9).

Çizelge 3.8. Lehim-kaynak telleri listesi

Firma	**Kod**	**Adı**	**Açıklama**	**Ebat (Ø)**
Magmaweld	8010803W01	BR 1211	Pirinç Sert L. Tel L-CuZn39Sn	1.50 x 1000 mm
Magmaweld	8012004W15	BR 1211 H	Pirinç Sert L. Tel EN 1044 CuZn40	2.00 x 1000 mm
Magmaweld	8021526K05	A 1214	Bakır Sert L. Tel (SG-CuAl8)	2.40 x 1000 mm
Magmaweld	2500303M15	MCUAL8	Bakır Mig Tel (SG-CuAl8)	1.00 mm
Oerlikon	8022104W05	BR 1208	Bakır Sert L. Tel L-CuP8	2.00 x 500 mm
Askaynak	3452782	-	CuSi3	1mm
Askaynak	7362800	-	CuAl8	1,60 mm

Çizelge 3.9. Lehim-kaynak telleri kompozisyonları

	Al	**Zn**	**P**	**Mn**	**Si**	**Sn**	**Cu**
L-CuZn39Sn		> 37.8			< 0.2	< 1.0	61.0
L-CuZn40		> 38.8			< 0.2	< 1.0	60.0
M Cu Al8	6.00 - 8.50			< 0.50			> 91,5
A 1214 Cu Al8	8	< 0,01		< 0,30	< 0,10		> 91,68
Br-1208			8				92-94

3.3 Proses Parametreleri ve Etkileri

3.3.1 Ortam basıncı ve vakum süresi

Mümkün olduğunca düşük basınçlarda ($1x10^{-4}$ mbar) çalışmak PVD kaplama prosesi açısından istenen bir durumdur. Fakat düşük basınca ulaşma için ekipman gerekliliği ve çevrim süreleri dikkate alındığında optimum koşullarda tutulması gerekmektedir.

Ortam basıncının düşük olması kaplanacak malzemenin erime sıcaklığını düşürmektedir. Bu sayede yüksek akım değerlerine ulaşılmadan erime ve buharlaşma gerçekleştirilmektedir. Yüksek vakum altında ($P< 10^{-3}$) su molekülleri vb. kontaminantlar ortamda bulunamamaktadır, bu durum kaplama kalitesini doğrudan etkilemektedir. Evaporasyon sonrası iyonların oksitlenme riski kararma gibi renk bozukluklarını tetiklemektedir.

Yüksek vakum altında ortalama molekül hızı dramatik bir şekilde artmaktadır. Mekanik çarpışma enerjisi artmakta ve adezyon güçlenmektedir. Polimerlerin plazma işleminde yüzey etkileşimi sonrası yüzey kimyası da adezyon üzerinde fazlaca etkilidir (Hollander ve diğerleri, 1999). Adezyon geliştirilmesi için polimerlerin plazma yüzey modifikasyonu proses şartlarının değiştirilmesi ile sağlanabilir, vakum basınç değeri ve elde edilen gerilim yapışma için önemlidir (Liston ve Martinu, 1993).

İlgili basınç ölçer sensörlerin set edilen değeri görmesi ile proses devam etmemekte, stabilizasyon zamanı ile vakum süresi garanti altına alınmaktadır. Diğer basınçölçerlerin tersine vakum ortamı ölçümü yapan geyçler kirlendikçe daha yüksek (daha iyi) vakum değerleri ölçmektedir. Bu sayede kirlilikten kaynaklanacak ölçüm hataları elimine edilmektedir. Vakum süresi ile basıncın etkin olacağı aralık belirlenmektedir.

3.3.2 Ön ısıtma voltajı ve ön ısıtma süresi

Ön Isıtma Voltajı; elektrot üzerinde yer alan tungsten filamanlara uygulanacak olan gerilimi belirler, üzerinden akım geçen filaman hafifçe akkorlaşmaya başlar ve üzerinde

bulunan kaplama telini veya çubuğunu ısıtır. Ön ısıtma süresi etkin olacağı aralığı belirlemektedir.

Buharlaşma Voltajı; elektrot üzerinde yer alan tungsten filamanlara uygulanacak olan gerilimi belirler, üzerinden akım geçen filaman akkorlaşmış haldedir, çıkan ısı enerjisi üzerinde bulunan kaplama teli veya çubuğuna mekanik olarak iletilerek, erimesini ve buharlaşmasını sağlamaktadır.

3.3.3 Evaporasyon rampası ve süresi

Ön ısıtmada uygulanan voltaj değeri ile buharlaşma fazında uygulanan voltaj değerlerine geçişin eğimi rampa olarak adlandırılmaktadır. Evaporasyon süresi buharlaşma fazının etkin olacağı aralığı belirlemektedir.

3.3.4 Ön denemeler ve deneme sonuçlarının değerlendirilmesi

Ön deneme için tedarik edilen 1.5 mm pirinç tel ile mevcut parametreler denenmiştir. İlk olarak alaşımı eritmek için yeterli enerjinin sağlanıp sağlanmadığı ve vakum değerlerinin yeterliliği gözlemlenmiştir. Deneme parametreleri Çizelge 3.10'da yer almaktadır.

Deneme sonuçları aşağıdaki gibi sıralanabilir.

1. Tel sıçraması: Malzemenin buhar faza geçişinde enerji transferi düzensiz (İç patlamalar olmaktadır).
2. Renk uygunluğu: İstenilen gold-rose renk aralığına uygunluğu. (görsel kriter)
3. Buharlaşma: Mevcut güç kaynağı ve filaman ile buharlaşmanın gerçekleşme durumu.
4. Parça renk homojenitesi: Parçanın görsel yüzeylerinin aynı renk tonuna sahip olması. (görsel kriter)
5. Planet renk homojenitesi: Çan içi her parçanın aynı renk tonuna sahip olması. (görsel kriter)
6. Esmerlik: Kaplama kalınlığının yetersiz olması. (altlık rengini kapatması)
7. Derin bölgelere nüfus: Parça geometrisine bağlı olarak derin bölgelerin düzgün kaplanması.

Çizelge 3.10. Deneme parametreleri

Deneme-1		
Pirinç		
Buharlaştırma Fazı		
Stabilizasyon Süresi	450	sn
Ön ısıtma Süresi	10	sn
Ön ısıtma Gerilimi	5	Volt
Ön ısıtma Rampası	10	sn
Buharlaştırma Süresi	22	sn
Buharlaştırma Gerilimi	7	Volt
Buharlaştırma Rampası	10	sn
Planet Rotasyon Sayısı	5	rpm
Root Pompa Hızı	3000	rpm
Yüksek Vakum SP	2.50E-4	mbar
Argon Valfi	0	sccm

Deneme-2		
Pirinç		
Buharlaştırma Fazı		
Stabilizasyon Süresi	450	sn
Ön ısıtma Süresi	10	sn
Ön ısıtma Gerilimi	5	Volt
Ön ısıtma Rampası	10	sn
Buharlaştırma Süresi	17	sn
Buharlaştırma Gerilimi	7	Volt
Buharlaştırma Rampası	10	sn
Planet Rotasyon Sayısı	5	rpm
Root Pompa Hızı	3000	rpm
Yüksek Vakum SP	2.50E-4	mbar
Argon Valfi	0	sccm

Deneme-3		
Pirinç		
Buharlaştırma Fazı		
Stabilizasyon Süresi	450	sn
Ön ısıtma Süresi	5	sn
Ön ısıtma Gerilimi	5	Volt
Ön ısıtma Rampası	5	sn
Buharlaştırma Süresi	17	sn
Buharlaştırma Gerilimi	7	Volt
Buharlaştırma Rampası	10	sn
Planet Rotasyon Sayısı	5	rpm
Root Pompa Hızı	3000	rpm
Yüksek Vakum SP	2.50E-4	mbar
Argon Valfi	0	sccm

Deneme-4		
Pirinç		
Buharlaştırma Fazı		
Stabilizasyon Süresi	450	sn
Ön ısıtma Süresi	5	sn
Ön ısıtma Gerilimi	6	Volt
Ön ısıtma Rampası	5	sn
Buharlaştırma Süresi	17	sn
Buharlaştırma Gerilimi	7	Volt
Buharlaştırma Rampası	10	sn
Planet Rotasyon Sayısı	5	rpm
Root Pompa Hızı	3000	rpm
Yüksek Vakum SP	2.50E-4	mbar
Argon Valfi	0	sccm

Yapılan denemelerin sonuçlarına bakıldığında mevcut proses koşulları ile istenilen proses çıktıları elde edilememektedir. Denemeler sonrası elde edilen uygunsuzluklar Çizelge 3.11'de gösterilmiştir.

Çizelge 3.11. Sonuç matrisi

Proses Çıktısı	**D1**	**D2**	**D3**	**D4**
Buharlaşma	OK	OK	NG	OK
Tel Sıçraması	NG	NG	NG	NG
Renk Uygunluğu	NG	NG	NG	NG
Parça Renk Homoienitesi	NG	NG	NG	NG
Planet Renk Homoienitesi	NG	NG	NG	NG
Esmerlik	NG	NG	NG	NG
Derin Bölgelere Nufus	NA	NA	NA	NA

Denemeler sonrası elde edilen parçalar ve görselleri aşağıda yeralmaktadır. Tüm parçalarda farklı hatalar bulunmaktadır. Buharlaşma sonrası parça derin bölgelerine (reflektif yüzeylere) nüfuziyetin yetersiz olduğu gözlemlenmektedir. Derin bölgeler yeterli kaplanamayı alamamaktadır (Şekil 3.8). Parça rengi derin bölgelere göre kenar ve sivri kısımlarda koyulaşmaktadır. Homojenite uygun değildir.



Şekil 3.8. Reflektör parçası

Diğer denemede ise ilk parçaya kıyasla derin olmayan et kalınlığı düşük parçalar kaplanmıştır (Şekil 3.9). Derin parçalara göre ton farkı azalmıştır ancak istenen homojenite tam anlamıyla sağlanamamıştır. Parça kaplama karmaşıklığına göre tonda farklılaşma meydana gelmiştir. Soldaki parçada herhangi maskeleme yoktur ancak optik çerçevelerin görüldüğü üzere şeffaf kısmı kaplanmamaktadır. Bu maskeleme yine farklı plastik parça yüzeyine tam uyan maskeler ile yapılmaktadır ve alaşımın parçaya ulaşmasını engellemiştir. Buharlaşma esnasında tungsten filamandan düzenli ve sabit akış sağlanması bu gibi renk farklılıklarını elemine edecektir. Yapılan çalışmalar ile farklı parça geometrileri homojenite farklılıkları ortadan kaldırılmıştır.



Şekil 3.9. Tamamı kaplanan kapatıcı panel ve kısmi kaplı optik çerçeveler

Rose-gold rengini verecek alaşım ile yapılan denemede özellikle optik reflektör yüzeylerinde homojenite farklılığı gözlemlenmektedir (Şekil 3.10). İlk reflektörlerde kaplama parlaklığı mevcut iken, aynı dönme yönüne sahip diğer reflektörlerde esmerlik hâkimdir. Buharlaşma esnasında alaşımın bir üst tungsten filamana göre farklı hareketi farklılaşmalara sebebiyet vermektedir.



Şekil 3.10. Reflektör ve çerçeve parçası

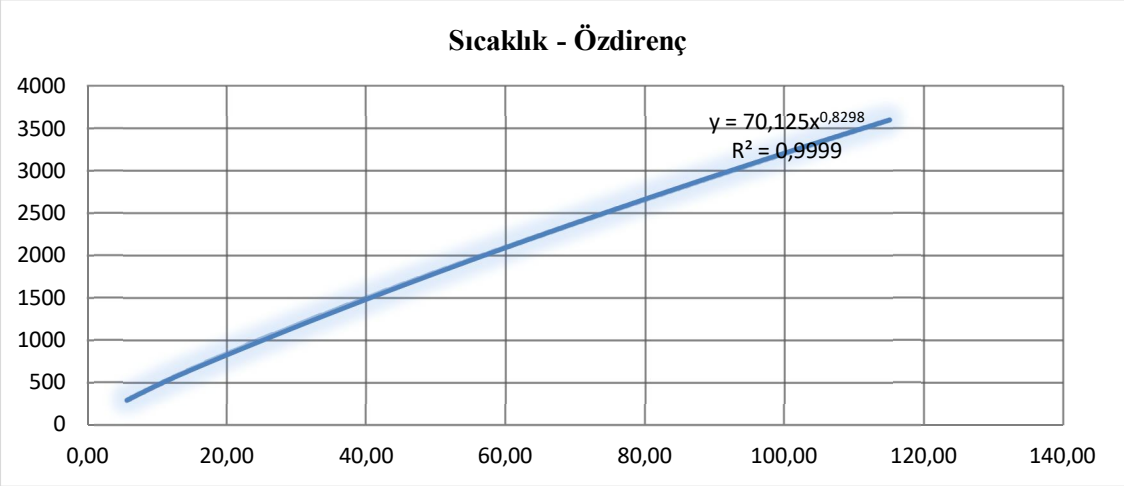
3.3.5 Proses ön fizibilite çalışmaları ve ön kabuller

Alüminyumun buharlaşması için yeterli olan proses parametreleri detaylı olarak incelenerek, mevcut durumun farklı alaşımlar için yeterliliği belirlenecektir. Çalışmalar sonucunda CFD modelleme çalışma koşulları için ilk girdiler oluşturulacaktır.

Mevcut proses koşullarında tungsten filamanın ulaştığı sıcaklık değerleri belirlenerek, farklı alaşımlar için yeterliliği belirlenecek. Ön kabuller aşağıdaki gibi sıralanabilir;

1. Her bir tungsten filamanın %100 saf olduğu kabul edilmiştir.
2. Sıcaklığa bağlı genleşme ihmal edilerek L/A sabit kabul edilmiştir.
3. Kullanılan bakır elektrotlarında ve filaman bağlantı noktalarında yaşanan enerji kayıpları ihmal edilmiştir.
4. Her filaman üzerinden eşit akım geçtiği kabul edilmiştir.

Tungsten filaman teorik sıcaklık hesaplamaları ve grafiği (Şekil 3.11) ve özdirence bağlı sıcaklık çizelgesi (Çizelge 3.12) aşağıda verilmiştir (Desai ve diğerleri, 1984). Elimizdeki alüminyum metalize makinasından saniyelik olarak alınan tüm değerler Çizelge 3.13'de verilmiştir.



Şekil 3.11. Tungsten filaman sıcaklık-özdirenç grafiği (Desai ve diğerleri, 1984)

Çizelge 3.12. Tungsten Sıcaklığının özdirence bağlı olarak değişimi

R/R_{300K}	Özdirenç	Sıcaklık	R/R_{300K}	Özdirenç	Sıcaklık	R/R_{300K}	Özdirenç	Sıcaklık	R/R_{300K}	Özdirenç	Sıcaklık
	μΩ·cm	[K]		μΩ·cm	[K]		μΩ·cm	[K]		μΩ·cm	[K]
1,00	5,65	300	5,48	30,98	1200	10,63	60,06	2100	16,29	92,04	3000
1,43	8,06	400	6,03	34,08	1300	11,24	63,48	2200	16,95	95,76	3100
1,87	10,56	500	6,58	37,19	1400	11,84	66,91	2300	17,62	99,54	3200
2,34	13,23	600	7,14	40,36	1500	12,46	70,39	2400	18,28	103,30	3300
2,85	16,09	700	7,71	43,55	1600	13,08	73,91	2500	18,97	107,20	3400
3,36	19,00	800	8,28	46,78	1700	13,72	77,49	2600	19,66	111,10	3500
3,88	21,94	900	8,86	50,05	1800	14,34	81,04	2700	20,35	115,00	3600
4,41	24,93	1000	9,44	53,35	1900	14,99	84,70	2800			
4,95	27,94	1100	10,03	56,67	2000	15,63	88,33	2900			

Ön ısıtma fazı. Proses ön ısıtma fazında alüminyumun erime sıcaklığı olan 660 ºC ye gelindiğinde filaman üzerinde alüminyumun faz değiştirmeye başlaması ve ön ısıtma fazının sonunda kütle kaybı olmadan eriyik hale geçmesi istenir. Bu aşamada dikkat edilmesi gereken noktalardan bir tanesi eriyik malzemenin filaman üzerinden damlamadan buharlaştırma fazına geçiş yapmasıdır. Bu yüzden ön ısıtma süresi ve rampası optimize edilmelidir.

Buharlaştırma fazı. Alüminyumun 2,5 x 10 -4 mbar ortam basıncı altında 820 - 1000 Cº sıcaklık değerlerinde buharlaşmaya başlaması beklenmektedir. Bu aşamada buharlaşmanın sadece yüzeyde olması istenmektedir. Ani sıcaklık artışı kaynamaya sebep olmakta ve filaman üzerinde yer alan alüminyumun tamamının buhar fazına geçemeden iç patlama sonucunda ortama sıçramasına sebep olmaktadır. Buna bağlı olarak buharlaştırılmak istenen alüminyum miktarında kütle kaybı yaşanmaktadır.

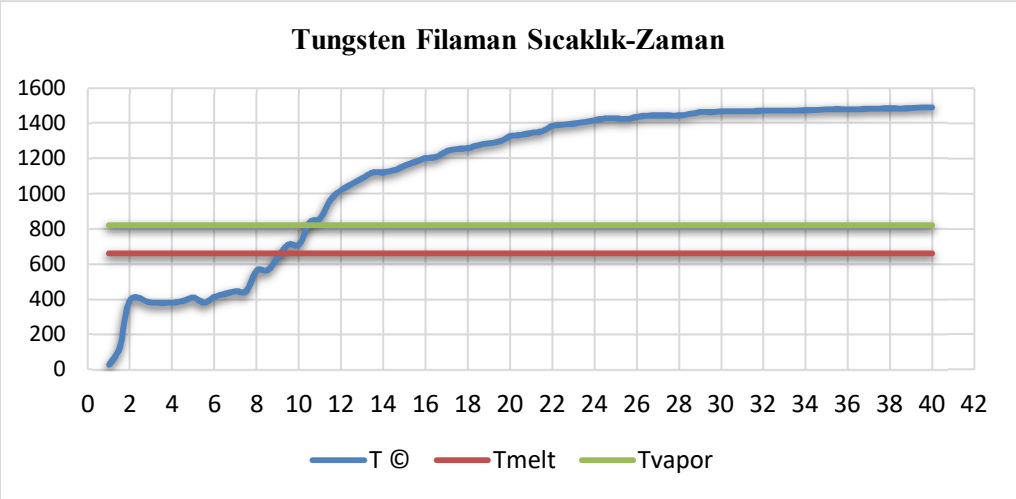
Tungsten teorik sıcaklık değerlerine bakıldığında, buharlaştırma fazının 2. saniyesinden sonra filaman üzerindeki alüminyumun buharlaşmaya başladığı söylenebilir. Bu aşama için bilmediğimiz nokta alüminyumun buharlaşması ile ortamda biriken alüminyum buharının ortam basıncını ne oranda arttırdığıdır. Ortam basıncının artması ile Al buharlaşma sıcaklığı artacaktır. Bu yüzden prosesin 12. saniyesi ile 22. saniyesindeki Al buharlaşma miktarı aynı veya farklı olabilir, bu aşamada yorum yapılamamaktadır (Şekil 3.12). CFD çalışmalarına girdi oluşturması için kütlesel akış hızının zamana bağlı fonksiyonu ilerleyen çalışmalarda belirlenebilir.

Çizelge 3.13. Ön ısıtma ve buharlaştırma fazlarında tungsten filaman sıcaklığı

Arzuffi-5 Analizi	Ön Isıtma Süre				10 sn	Buharlaşma		30 sn			
	Ön Isıtma Rampa				10 sn	B. Rampası		12 sn			
Proses Fazı	**t (s)**	**V**	**i**	**i/21**	**R(Ohm)**	**P(W)**	**L/A(Akı)**	**Özdirenç(ρ)**		**T(K)**	**T(C⁰)**
Ön Isıtma	1,0	0,30	2,7	0,1	2,3	0,04	0,417	5,600	x10-8	300	27
Ön Isıtma	1,5	3,60	22,4	1,1	3,4	3,84	0,417	8,100	x10-8	397	124
Ön Isıtma	2,0	6,50	21,6	1,0	6,3	6,69	0,417	15,167	x10-8	668	395
Ön Isıtma	3,0	7,70	26,3	1,3	6,1	9,64	0,417	14,756	x10-8	653	380
Ön Isıtma	4,0	7,70	26,3	1,3	6,1	9,64	0,417	14,756	x10-8	653	380
Ön Isıtma	4,5	10,30	34,6	1,6	6,3	16,97	0,417	15,003	x10-8	662	389
Ön Isıtma	5,0	12,10	39,2	1,9	6,5	22,59	0,417	15,557	x10-8	683	410
Ön Isıtma	5,5	16,00	54,7	2,6	6,1	41,68	0,417	14,742	x10-8	653	380
Ön Isıtma	6,0	18,30	58,9	2,8	6,5	51,33	0,417	15,659	x10-8	686	413
Ön Isıtma	6,5	19,90	62,3	3,0	6,7	59,04	0,417	16,099	x10-8	702	429
Ön Isıtma	7,0	21,50	65,5	3,1	6,9	67,06	0,417	16,544	x10-8	718	445
Ön Isıtma	7,5	21,50	65,5	3,1	6,9	67,06	0,417	16,544	x10-8	718	445
Ön Isıtma	8,0	27,20	68,9	3,3	8,3	89,24	0,417	19,897	x10-8	837	564
Ön Isıtma	8,5	27,20	68,9	3,3	8,3	89,24	0,417	19,897	x10-8	837	564
Ön Isıtma	9,0	29,70	67,8	3,2	9,2	95,89	0,417	22,078	x10-8	913	640
Ön Isıtma	9,5	32,00	66,7	3,2	10,1	101,64	0,417	24,180	x10-8	984	**711**
Ön Isıtma	10,0	32,00	66,7	3,2	10,1	101,64	0,417	24,180	x10-8	984	**711**
Buharlaşma	10,5	35,80	64,6	3,1	11,6	110,13	0,417	27,931	x10-8	1109	836
Buharlaşma	11,0	36,20	63,6	3,0	12,0	109,63	0,417	28,687	x10-8	1134	861
Buharlaşma	11,5	39,20	61,8	2,9	13,3	115,36	0,417	31,969	x10-8	1241	968
Buharlaşma	12,0	40,10	60,1	2,9	14,0	114,67	0,417	33,656	x10-8	1295	1022
Buharlaşma	12,5	41,60	60,4	2,9	14,5	119,65	0,417	34,713	x10-8	1329	1056
Buharlaşma	13,0	42,90	60,5	2,9	14,9	123,59	0,417	35,738	x10-8	1361	1088
Buharlaşma	13,5	44,40	60,8	2,9	15,3	128,55	0,417	36,805	x10-8	1395	1122
Buharlaşma	14,0	44,40	60,8	2,9	15,3	128,55	0,417	36,805	x10-8	1395	1122
Buharlaşma	14,5	45,40	61,5	2,9	15,5	132,96	0,417	37,206	x10-8	1407	1134
Buharlaşma	15,0	46,70	61,9	2,9	15,8	137,65	0,417	38,024	x10-8	1433	1160
Buharlaşma	15,5	47,90	62,3	3,0	16,1	142,10	0,417	38,751	x10-8	1456	1183
Buharlaşma	16,0	49,10	62,8	3,0	16,4	146,83	0,417	39,405	x10-8	1476	1203
Buharlaşma	16,5	50,00	63,6	3,0	16,5	151,43	0,417	39,623	x10-8	1483	1210
Buharlaşma	17,0	51,60	63,9	3,0	17,0	157,01	0,417	40,699	x10-8	1516	1243
Buharlaşma	17,5	52,10	63,9	3,0	17,1	158,53	0,417	41,093	x10-8	1528	1255
Buharlaşma	18,0	53,20	65,0	3,1	17,2	164,67	0,417	41,250	x10-8	1533	1260
Buharlaşma	18,5	54,40	65,6	3,1	17,4	169,94	0,417	41,795	x10-8	1550	1277
Buharlaşma	19,0	55,40	66,2	3,2	17,6	174,64	0,417	42,178	x10-8	1562	1289
Buharlaşma	19,5	56,40	66,9	3,2	17,7	179,67	0,417	42,490	x10-8	1571	1298
Buharlaşma	20,0	57,90	67,2	3,2	18,1	185,28	0,417	43,425	x10-8	1600	1327
Buharlaşma	20,5	58,70	67,7	3,2	18,2	189,24	0,417	43,700	x10-8	1608	1335

Çizelge 3.13. Ön ısıtma ve buharlaştırma fazlarında tungsten filaman sıcaklığı (devam)

Arzuffi-5 Analizi	Ön Isıtma Süre				10 sn	Buharlaşma		30 sn			
	Ön Isıtma Rampa				10 sn	B. Rampası		12 sn			
Proses Fazı	**t (s)**	**V**	**i**	**i/21**	**R(Ohm)**	**P(W)**	**L/A(Akı)**	**Özdirenç(ρ)**		**T(K)**	**T(C⁰)**
Buharlaşma	21,0	59,20	67,7	3,2	18,4	190,85	0,417	44,072	x10-8	1620	1347
Buharlaşma	21,5	60,40	68,6	3,3	18,5	197,31	0,417	44,376	x10-8	1629	1356
Buharlaşma	22,0	62,10	69,0	3,3	18,9	204,04	0,417	45,360	x10-8	1659	1386
Buharlaşma	22,5	62,30	68,8	3,3	19,0	204,11	0,417	45,638	x10-8	1667	1394
Buharlaşma	23,0	62,90	69,2	3,3	19,1	207,27	0,417	45,812	x10-8	1673	1400
Buharlaşma	23,5	63,60	69,5	3,3	19,2	210,49	0,417	46,121	x10-8	1682	1409
Buharlaşma	24,0	64,40	69,9	3,3	19,3	214,36	0,417	46,434	x10-8	1691	1418
Buharlaşma	24,5	65,10	70,1	3,3	19,5	217,31	0,417	46,805	x10-8	1703	1430
Buharlaşma	25,0	65,10	70,1	3,3	19,5	217,31	0,417	46,805	x10-8	1703	1430
Buharlaşma	25,5	65,10	70,3	3,3	19,4	217,93	0,417	46,672	x10-8	1699	1426
Buharlaşma	26,0	65,80	70,4	3,4	19,6	220,59	0,417	47,107	x10-8	1712	1439
Buharlaşma	26,5	66,10	70,4	3,4	19,7	221,59	0,417	47,322	x10-8	1718	1445
Buharlaşma	27,0	66,70	71,0	3,4	19,7	225,51	0,417	47,348	x10-8	1719	1446
Buharlaşma	27,5	66,70	71,0	3,4	19,7	225,51	0,417	47,348	x10-8	1719	1446
Buharlaşma	28,0	66,70	71,0	3,4	19,7	225,51	0,417	47,348	x10-8	1719	1446
Buharlaşma	28,5	67,10	71,0	3,4	19,8	226,86	0,417	47,632	x10-8	1727	1454
Buharlaşma	29,0	67,80	71,2	3,4	20,0	229,87	0,417	47,993	x10-8	1738	1465
Buharlaşma	29,5	67,80	71,2	3,4	20,0	229,87	0,417	47,993	x10-8	1738	1465
Buharlaşma	30,0	68,00	71,2	3,4	20,1	230,55	0,417	48,135	x10-8	1743	1470
Buharlaşma	30,5	68,00	71,2	3,4	20,1	230,55	0,417	48,135	x10-8	1743	1470
Buharlaşma	31,0	68,10	71,3	3,4	20,1	231,22	0,417	48,138	x10-8	1743	1470
Buharlaşma	31,5	68,10	71,3	3,4	20,1	231,22	0,417	48,138	x10-8	1743	1470
Buharlaşma	32,0	68,50	71,5	3,4	20,1	233,23	0,417	48,285	x10-8	1747	1474
Buharlaşma	32,5	68,40	71,4	3,4	20,1	232,56	0,417	48,282	x10-8	1747	1474
Buharlaşma	33,0	68,50	71,5	3,4	20,1	233,23	0,417	48,285	x10-8	1747	1474
Buharlaşma	33,5	68,50	71,5	3,4	20,1	233,23	0,417	48,285	x10-8	1747	1474
Buharlaşma	34,0	68,70	71,6	3,4	20,1	234,23	0,417	48,359	x10-8	1749	1476
Buharlaşma	34,5	68,80	71,6	3,4	20,2	234,58	0,417	48,429	x10-8	1751	1478
Buharlaşma	35,0	69,10	71,8	3,4	20,2	236,26	0,417	48,505	x10-8	1754	1481
Buharlaşma	35,5	69,20	71,8	3,4	20,2	236,60	0,417	48,575	x10-8	1756	1483
Buharlaşma	36,0	69,00	71,7	3,4	20,2	235,59	0,417	48,502	x10-8	1754	1481
Buharlaşma	36,5	69,10	71,8	3,4	20,2	236,26	0,417	48,505	x10-8	1754	1481
Buharlaşma	37,0	69,30	71,8	3,4	20,3	236,94	0,417	48,645	x10-8	1758	1485
Buharlaşma	37,5	69,30	71,8	3,4	20,3	236,94	0,417	48,645	x10-8	1758	1485
Buharlaşma	38,0	69,60	72,0	3,4	20,3	238,63	0,417	48,720	x10-8	1760	1487
Buharlaşma	38,5	69,40	71,9	3,4	20,3	237,61	0,417	48,648	x10-8	1758	1485
Buharlaşma	39,0	69,60	71,9	3,4	20,3	238,30	0,417	48,788	x10-8	1762	1489
Buharlaşma	39,5	69,70	71,9	3,4	20,4	238,64	0,417	48,858	x10-8	1764	1491
Buharlaşma	40,0	69,70	71,9	3,4	20,4	238,64	0,417	48,858	x10-8	1764	1491



Şekil 3.12. Analiz sonuçlarına göre elde edilen tungsten filaman sıcaklık-zaman grafiği

Enerji hesabı. Mevcut proses koşullarında alüminyumun faz geçişleri Çizelge 3.14'de verilmiştir.

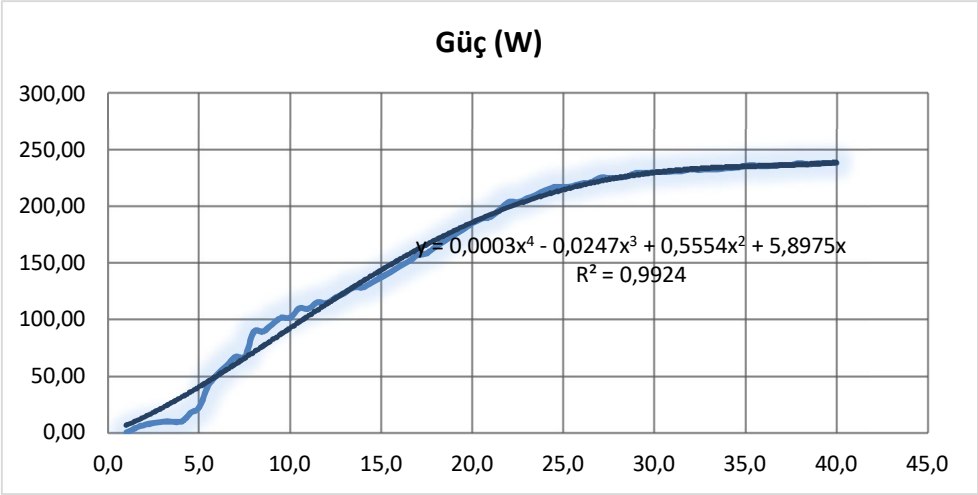
Çizelge 3.14. Alüminyum tel farklı fazlar için spesifik ortamda özısı değerleri

No	Malzeme	Kütle(g)	Birim	Celcius	Celcius	J/gK	J/gK	J/gK	J/gK
			Basınç	2,5 x e-4					
			T (Katı)	T (Erime)	T (Buhar)	Cp (Katı)	L (Erime)	Cp (Sıvı)	L (Buharlaşma)
1	Aluminium	0,48	27,0	660,0	820,0	0,9	321,0	1,2	10530,0
2	Bakır	0,48	27,0	1083,0	1100,0	0,4	207,0	0,5	4730,0

0,48 gram alüminyum için faz geçişleri için ihtiyaç duyulan enerji miktarları Çizelge 3.15'de verilmiştir. Ayrıca güç hesabından ortaya çıkan grafik Şekil 3.13'de yer almaktadır.

Çizelge 3.15. Filaman başına düşen alüminyum tel faz değişimi için gerekli enerji miktarı

Joule Q=m*Cp*dT Q K-K	Joule Q=m*L Q S-L	Joule Q=m*Cp*dT Q L-L	Joule Q=m*L Q L-V	Total Q (Joule)
274,3	152,9	89,9	5014,3	5531,3
196,1	98,6	4,0	2252,4	2551,0



Şekil 3.13. Güç-zaman grafiği

Sisteme verilen toplam enerjinin belirlenmesi için gücün zamana bağlı değişimi grafik haline getirilerek altta kalan alan hesaplanarak toplam enerji hesaplanmaktadır (Çizelge 3.16).

Çizelge 3.16. Ön ısıtma ve buharlaştırma periyodunda açığa çıkan toplam enerji ve alüminyum fazı

Zaman (s)	Güç (W)	Toplam Enerji (Joule)	Al Enerji İhtiyacı (Joule)	Faz	Sıcaklık (°C)	Bakır
1	0,04	3	271	Katı	27	193
1,5	3,84	7	267	Katı	124	189
2	6,69	13	261	Katı	395	183
3	9,64	31	243	Katı	380	165
4	9,64	57	217	Katı	380	139
4,5	16,97	74	200	Katı	389	122
5	22,59	93	181	Katı	410	103
5,5	41,68	115	160	Katı	380	82
6	51,33	138	136	Katı	413	58
6,5	59,04	165	109	Katı	429	31
7	67,06	194	80	Katı	445	2
7,5	67,06	226	49	Katı	445	-29
8	89,24	260	14	Katı	564	35
8,5	89,24	297	-22	Katı+Sıvı	564	-2
9	95,89	336	91	Katı+Sıvı	640	-38
9,5	101,64	378	49	Katı+Sıvı	711	-80
10	101,64	423	4	Katı+Sıvı	711	2128

Çizelge 3.16. Ön ısıtma ve buharlaştırma periyodunda açığa çıkan toplam enerji ve alüminyum fazı (devam)

Zaman (s)	Güç (W)	Toplam Enerji (Joule)	Al Enerji İhtiyacı (Joule)	Faz	Sıcaklık (°C)	Bakır
10,5	110,13	471	46	Katı+Sıvı	836	2080
11	109,63	521	-4	Sıvı	861	2030
11,5	115,36	574	4957	Sıvı	968	1977
12	114,67	630	4902	Sıvı	1022	1921
12,5	119,65	688	4844	Sıvı	1056	1863
13	123,59	749	4783	Sıvı	1088	1802
13,5	128,55	812	4719	Sıvı	1122	1739
14	128,55	878	4654	Sıvı	1122	1673
14,5	132,96	946	4585	Sıvı	1134	1605
15	137,65	1017	4514	Sıvı	1160	1534
15,5	142,1	1090	4441	Sıvı	1183	1461
16	146,83	1166	4365	Sıvı	1203	1385
16,5	151,43	1244	4287	Sıvı	1210	1307
17	157,01	1324	4207	Sıvı	1243	1227
17,5	158,53	1407	4124	Sıvı	1255	1144
18	164,67	1492	4040	Sıvı	1260	1059
18,5	169,94	1579	3953	Sıvı	1277	972
19	174,64	1668	3864	Sıvı	1289	883
19,5	179,67	1759	3773	Sıvı	1298	792
20	185,28	1852	3680	Sıvı	1327	699
20,5	189,24	1947	3585	Sıvı	1335	605
21	190,85	2043	3488	Sıvı	1347	508
21,5	197,31	2142	3389	Sıvı	1356	409
22	204,04	2242	3289	Sıvı	1386	309
22,5	204,11	2344	3187	Sıvı	1394	207
23	207,27	2448	3083	Sıvı	1400	103
23,5	210,49	2553	2978	Sıvı	1409	-2
24	214,36	2660	2871	Sıvı	1418	-109
24,5	217,31	2769	2763	Sıvı	1430	-218
25	217,31	2878	2653	Sıvı	1430	-327
25,5	217,93	2989	2542	Sıvı	1426	-438
26	220,59	3102	2429	Sıvı	1439	-551
26,5	221,59	3216	2316	Sıvı	1445	-665
27	225,51	3331	2201	Sıvı	1446	-780
27,5	225,51	3447	2085	Sıvı	1446	-896
28	225,51	3564	1967	Sıvı	1446	-1013
28,5	226,86	3683	1849	Sıvı	1454	-1132

Çizelge 3.16. Ön ısıtma ve buharlaştırma periyodunda açığa çıkan toplam enerji ve alüminyum fazı (devam)

Zaman (s)	Güç (W)	Toplam Enerji (Joule)	Al Enerji İhtiyacı (Joule)	Faz	Sıcaklık (°C)	Bakır
29	229,87	3802	1729	Sıvı	1465	-1251
29,5	229,87	3923	1608	Sıvı	1465	-1372
30	230,55	4045	1487	Sıvı	1470	-1494
30,5	230,55	4167	1364	Sıvı	1470	-1616
31	231,22	4291	1240	Sıvı	1470	-1740
31,5	231,22	4416	1116	Sıvı	1470	-1865
32	233,23	4542	990	Sıvı	1474	-1990
32,5	232,56	4668	863	Sıvı	1474	-2117
33	233,23	4796	735	Sıvı	1474	-2245
33,5	233,23	4925	607	Sıvı	1474	-2374
34	234,23	5054	477	Sıvı	1476	-2503
34,5	234,58	5185	346	Sıvı	1478	-2634
35	236,26	5317	215	Sıvı	1481	-2766
35,5	236,6	5450	82	Sıvı	1483	-2899
36	235,59	5584	-52	Buhar	1481	-3033
36,5	236,26	5719	-187	Buhar	1481	-3168
37	236,94	5855	-324	Buhar	1485	-3304
37,5	236,94	5993	-461	Buhar	1485	-3442
38	238,63	6132	-600	Buhar	1487	-3581
38,5	237,61	6272	-741	Buhar	1485	-3721
39	238,3	6414	-883	Buhar	1489	-3863
39,5	238,64	6557	-1026	Buhar	1491	-4006
40	238,64	6702	-1171	Buhar	1491	-4151

Hesaplamalar sonrası belirlenen değerler ön ısıtma için uygulanmış ve alüminyumun ergiyerek tungsten filamana tam olarak sıvandığı ancak hiçbir şekilde kütle kaybı olmadığı doğrulanmıştır (Şekil 3.14). Bu sayede modellemeler için gerekli girdiler tam olarak belirlenmiş olmaktadır. Öncelikle oluşturulan simülasyon doğrulanacak ve aynı sonucun alındığına emin olunacaktır. Sonrasında da alüminyum yerine farklı kompozisyonda alaşımlar yüklenerek uygun parametreler belirlenecektir.



Şekil 3.14. Tungsten filamana sıvanmış ergimiş alüminyum

3.4. Deneysel Tasarım ve Modelleme

Evaporasyon fazında moleküler dinamiklerin anlaşılması ile simülasyon yöntemlerinin kullanılması sağlanmıştır. Literatürde, akışkanlar dinamiğinin mekanizmasını anlamak için kullanılan 3 yöntem vardır (Gott ve diğerleri, 2013).

1. Hesaplamalı akışkanlar dinamiği (CFD)
2. Monte Carlo'nun Doğrudan Simülasyonu (DSMC)
3. Serbest Moleküler Dinamiği (FMD)

Her şeyden önce, PVD metalleşme süreci için hangi tip simülasyon yönteminin daha doğru olduğunu anlaşılmalıdır. Bu yüzden mevcut proses koşulları (Çizelge 3.17), en etkili simülasyon yöntemini uygulamak için belirleyicidir.

Çizelge 3.17. Mevcut proses koşulları

Parametreler	**Değer**	**Birim**
Basınç	2,5 x 10^-4	mbar
Sıcaklık	50	ºC
Evaporasyon Süresi	10	s
Kütle	0,5	g
Ortalama Kütle Akış Hızı	0,05	g/s
Malzeme	%99,99	Alüminyum

3.4.1 Ortalama serbest yol (Mean free path)

Ortalama serbest yol, bir molekülün diğer molekül ile çarpışmadan önce katettiği mesafedir. Ya da başka bir deyişle, bir parçacağın yaşadığı ardıl iki çarpışma arasında katettiği mesafeye denir. Atmosferdeki partiküllerin davranışlarını modellemek için kullanılır. En etkili simülasyon yönteminin belirlenmesi için öncelikle ortalama serbest yol (mean free path) hesaplanmalıdır. Ortalama serbest yol denklemi aşağıdaki gibidir (Huang, 2019).

$$I \,.\, p = \frac{k.T}{\sqrt{2}.\pi.d_m^2} \tag{3.1}$$

P: Basınç (0,02 Pascal) ($2x10^{-4}$ mbar)

k: Boltzman Sabiti ($1,38x10^{-23}$)

T: Sıcaklık (323 °K)

dm: Alüminyum Çapı ($2,86x10^{-10}$)

I: Ortalama Serbest Yol (Mean Free Path) (m)

3.4.2 Knudsen sayısı

PVD prosesleri katodik arc evaporasyonu (CAE) ve elektromanyetik sıçratma (DC-MS) ya da yüksek güç atımlı elektromanyetik sıçratma (HPPMS ya da HiPIMS) teknolojileri ile sert koruyucu kaplamalar ve aşınma rezistansına dayanaklı kaplamalar uygulanabilir. (Bobzin ve diğerleri, 2008; Sanders ve Anders, 2000; Theiß ve diğerleri, 2010). Bu kaplamaların sağlandığı ortam analizlerinde kullanılan gaz akışı rejimini en çok etileyen parametre Knudsen sayısıdır (Kn) (Sazhin ve Serikov, 1997). Belirli sistem kurgusunda gaz akış rejimi gaz seyrelme derecesi belirtileren Kn ile yaklaşık olarak tahmin edilebilir (Bird, 1983).

Ortalama serbest yol hesaplandıktan sonra Knudsen sayısı hesaplanır. Literatürde farklı Knudsen sayısı değerlerine göre akış rejimine uygun analiz metodları belirlenmiştir. Mevcut PVD makinası çan duvarı ile evaporasyon kulesi arası mesafe 0,9 m'dir. Knudsen sayısı denklemi aşağıdaki gibi ifade edilebilir. (Dongari ve Agrawal, 2012)

Knudsen sayısı hesaplamalarına göre;

Kn=Mean Free Path / Mekansal Ölçek (Spatial Scale) (3.2)

Kn= 0,6135852 m / 0,9 m

Kn= 0,681761

I: 0,6135852 m

Kn 'ye dayalı akış rejiminin analizi ile ilgili olarak aşağıdaki ayrımlar yapılabilir;

Kn $\leq$ 0,1 olduğu durumlar için, Navier-Stokes denklemlerine dayalı sürekli modeller Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (CFD) ile çözümlendiğinde genellikle gaz akışı için kesin bir açıklamaya izin verir (Lugscheider ve diğerleri, 2005).

Kn> 0,1 gibi tersine olduğu durumlarda, Navier-Stokes denklemlerinin nadirde olsa gaz akışlarının tanımlama için yetersiz kaldığı, seyrek gaz akış halleri olabilir (Dongari ve Agrawal, 2012). Örnek olarak mikro/nano ölçekte gaz akışlarının analizi ya da yaygın olarak kullanılan düşük basınç PVD uygulamaları çözümlemeleri verilebilir.

Kimi gaz akışı çözümlemesine uygun olmaması durumu, çok boyutlu hız alanındaki lokal gelişen uygunsuz molekül etkileşimlerinden kaynaklanmaktadır.

PVD evaporasyon süreci ve metal buharı yoğuşması için hangi tip simülasyon yönteminin daha doğru olduğu iyi anlaşılmalıdır. Yapılacak analizler ile evaporasyon proses noktası detaylı şekilde irdelenebilecek ve mevcut proses koşulları, en etkili simülasyon yöntemi için belirleyici olacaktır. Farklı yöntemlerin kıyaslama tablosu Çizelge 3.18'de verilmiştir.

Çizelge 3.18. Moleküler dinamiğinin analizi için kullanılan yöntemlerin kıyaslanması (Gott ve diğerleri, 2013)

	Sonlu-Hacim	**DSMC**	**Serbest Moleküler**
Gereklilikler	● Ayrık Mesh Modeli ● Stabilizasyon Yöntemleri	● Çarpışma Modeli ● Moleküler Özellikler ● Zaman-Ortalama Çözüm	● Buharlaşma Profili ● Zaman-Ortalama Çözüm
Avantajlar	● En Yaygın Yöntem ● Ölçümlerle Kolayca Karşılaştırılması	● İstikrar Sorunu Olmaması ● Gerçek Vakum Çözümü	● En Hızlı Model ● Az Malzeme Özelliği Gerekliliği
Kn Aralığı	Kn $\leq$ 0.1	0.1 < Kn < 1	Kn $\geq$ 1

Öte yandan plazma işlemlerinde sürekli akış muhtemel değildir (Maxwell-Boltzmann enerji dağıtımı ima ediliyor). Nötr gaz partiküllerinin benzer olmayan türlerle (ağır parçacık ya da elektron) etkileşimi nedeniyle genel olarak denge dışı durumlar ortaya çıkmaktadır. Genellikle sadece Boltzman formüllerine dayandırılan kinetik modellemeler doğru bir tanım sağlamaktadır. Bu gibi senaryolar için Bird tarafından Direk Simülasyon Monte Carlo (DSMC) metodu önerilmektedir.

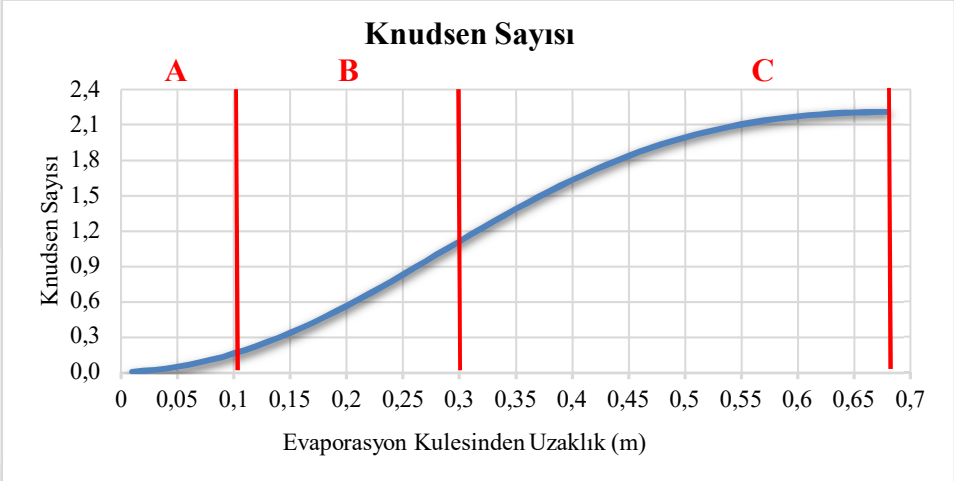
Öte yandan ABACUS kullanılarak çok yüksek Knudsen sayısına sahip çoklu buharlaşma modelleri çözümlenebilir (Malhotra ve diğerleri, 2007). Termal Evaporasyon PVD, darbeli lazer ablasyon ve katodik ark biriktirme yöntemleri gibi çok düşük Knudsen sayılarına sahip işlemler için sürekli sonlu hacimler çözümleyici Fluent programı birden fazla araştırmacı tarafından kullanılmıştır. (Hamadi ve diğerleri, 2008; Nastac ve diğerleri, 2004; Singh, 2008). Orta seviyede Knudsen sayıları için Doğrudan Simülasyon Monte Carlo (DSMC) yöntemini kullanarak çok sayıda model tamamlanmıştır. İtriyum, titanyum ve itriyum, baryum ve bakırın birlikte buharlaşmasını inceleyen Boyd, çok sayıda simülasyon sonuçlarını içeren makaleler yazmıştır (Balakrishnan ve diğerleri, 2000; Fan ve diğerleri, 2000; Fan ve diğerleri, 2000).

3.4.3 PVD prosesi ve modelleme stratejisi

Fiziksel Buhar Depolama prosesi ile gerçekleştirilen kaplama işlemlerinde önemli olan film kalınlığı ve yapışma kuvveti gibi önemli parametrelerin kontrolünü, iyileştirmesini sağlamak, prosesin basamaklarını ve doğasını anlamakla mümkündür. Bu amaçla Odelo bünyesindeki PVD cihazlarının tasarımı kullanılarak PVD simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Simülasyonlarda alüminyum buharının vakum çanı içerisindeki akışı incelenmiş, daha homojen buhar dağılımı vermek için gerekli olan işlem yolları belirlenmiş ve analizler için belirlenen yollar tartışılmıştır.

Odelo bünyesinde gerçekleştirilen PVD prosesi metalin termal buharlaştırılması yöntemi ile gerçekleştirilmektedir. Set edilen vakum koşulları için hesaplanan Knudsen sayısının çan içi farklı bölgeler için hesaplamaları gösterilmektedir (Şekil 3.15). İki filaman arasında kalan “a” bölgesinde Knudsen sayısının 0,1’den küçük olması “Sonlu Hacimler”

yöntemiyle simüle edilebilir olduğunu göstermektedir. Bununla beraber filaman ile parça arasındaki "b" bölgesinde geçiş rejimi olduğu öngörülebilir ve "Sonlu Hacimler" yöntemiyle doğrulanabilecek şekilde yine simüle edilebilecektir (Lugscheider ve diğerleri, 2005). Altlıklar ile filaman arasında kalan "c" bölgesi için "Serbest Moleküler" yöntemiyle çözülmesi daha doğru sonuçlar verecektir, ancak anlatılacağı üzere o bölge çan içerisinde altlıkların hareketiyle sınırlandırılmaktadır. Çalışma alanı içerinde yer almamaktadır.



Şekil 3.15. Buhar kaynağından uzaklaştıkça Knudsen Sayısının değişimi a) iki filaman arasında kalan bölge, b) filaman ile parça arasında kalan bölge, c) altlıklar ile çan duvarı arasındaki bölge

Filamanlara yakın bölgelerde (a bölgesi) Newton fizik modelleri hâkimken, uzak bölgelerde (b bölgesi) moleküler dinamik fiziği hâkimdir. Bu açıdan, literatür incelendiğinde PVD simülasyon ve modellemesinde hem Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (CFD) hem de Monte Karlo (DSMC) yaklaşımlarının kullanıldığı görülmektedir (Yang ve diğerleri, 1996). Ancak iki farklı bölgenin mevcudiyeti düşünüldüğünde, seçilen herhangi bir teknikte (CFD veya DSMC) belirli stratejik yaklaşımların olması gerekmektedir. Zira moleküler dinamiğin hâkim olduğu bölgede CFD simülasyonları, yüksek Knudsen sayısından dolayı, fiziksel olayı açıklayamayacak ve geçersiz olacaktır. Ayrıca geometrik yapıya bağlı kalmak şartı ile $0,05<Kn<1,5$ aralığında geçiş akış rejimi süreklilik modelinde geçerliliğini korumaktadır (Bobzin ve diğerleri, 2013). Bu nedenle bu çalışmada özellikle gazların yoğun olduğu bölgenin (a

bölgesi) etkisini görmek için CFD tekniği kullanılmış ve ANSYS Fluent 15.0 simülasyon yazılımı kullanılarak modellenmiştir (Canonsburg, 2013).

3.4.4 Hesaplamalı akışkanlar dinamiği modelleri (CFD)

Analizin amacı konvansiyonel süreklilik modelinin geçerliliğini ortaya koymaktır. Bu çalışmada özellikle geçiş rejiminde gazların yoğun olduğu bölgenin etkisini görmek için CFD tekniği kullanılmış ve kullanılan yaklaşımlar aşağıda özetlenmiştir. Çan içerisindeki PVD prosesi düşünüldüğünde, iki çok önemli fiziksel olay göze çarpmaktadır;

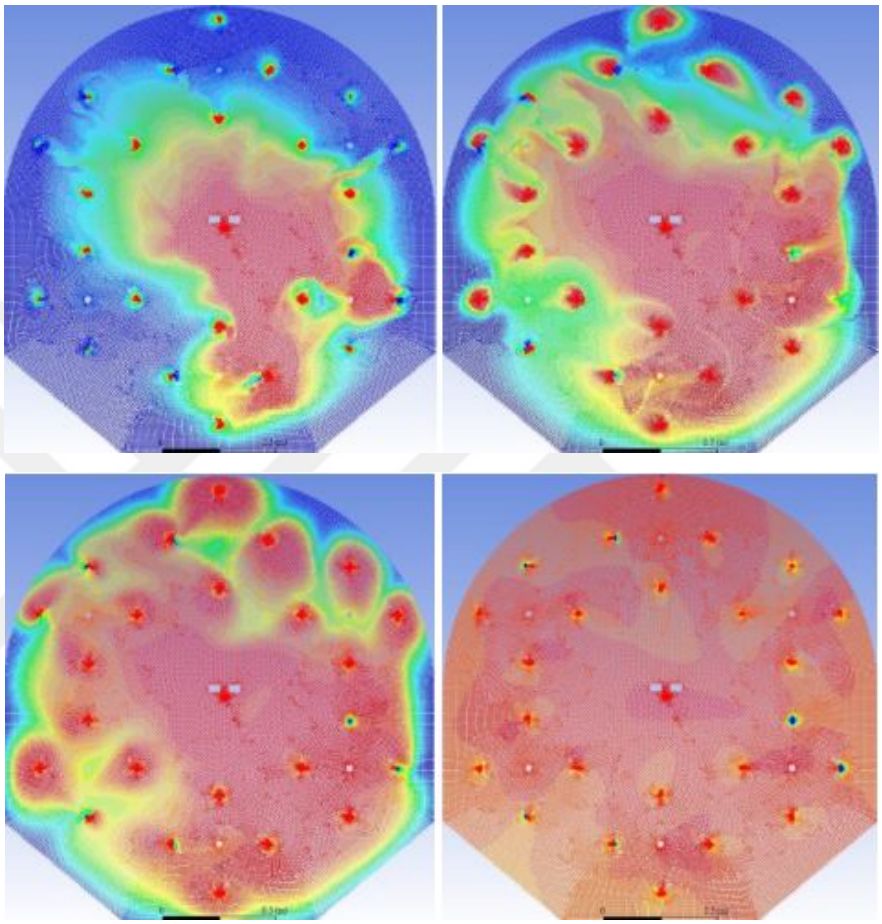
1. Filaman etrafında buharlaşan metal atomlarının birbirleri arasında ve komşu filamandan gelen buharın atomları arasındaki etkileşim
2. Buharın boşlukta difüze olması

PVD prosesinde çan içerisinde özellikle filamana uzak bölgelerde basıncın çok düşük seviyelerde olması boşlukta difüzyon olayı iken, filamana yakın bölgelerde atomlar arası çarpışmalar ve buna göre basınç gradyeni ve yön değiştirmeler olacağından, boşluk ortamı ile açıklanamayan fiziksel olaylar gerçekleşecektir. Bundan dolayı simülasyonlarda yukarıda bahsedilen iki farklı yaklaşım takip edilmiştir.

Vakumda difüzyon ve kütle transferi. Alüminyum buharının çan içerisindeki kütle transferi ve yayılması modellenmiştir. Alüminyum buharının yüksek vakum altında difüzyonunu 0,1-0,2-0,3 ve 0,4 ms için göstermektedir (Şekil 3.16). Kırmızı renk alüminyum buharınının yoğun olduğu bölgeleri göstermektedir. Alüminyum buharının çan içerisinde yayılımının 0,4 saniye geçmeden tamamlanmakta olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum sadece filamanlardan görece uzak bölgelerde mümkün olabilecektir. Filamanlara yakın bölgede ise yoğun molekül çarpışmalarının etkisi kaçınılmazdır. Tek bir filamanın ağırlığı 0.25 g olduğu ve buharlaşmanın 12 saniye sürdüğü düşünüldüğünde, buhar besleme hızı 0.25g/12 s olarak kabul edilmiştir.

Difüzyon simülasyonları metal buharının, seyrek gaz ortamında çok hızlı yayıldığını ve bu yayılmanın aslında impuls şeklinde olduğu gözlemlenmiştir. Altlık ile karşılaşan metal buharı anında faz değişimine uğrayarak katı faza geçecektir. Simülasyondaki kırmızı

yoğun gaz buharı reelde katı faza geçmiş alüminyumdur. Filamanlara uzak bölgelerde (b bölgesi) altlık olmadığı durumlarda homojen dağılım gözlemlenecektir. Ancak 0,1 ms ile 0,4 ms arası görüntüler incelendiğinde, vakum ağzına doğru ve elektrotların gölgelemesiyle kaotik yönelmelerin fazla olduğu görülecektir.

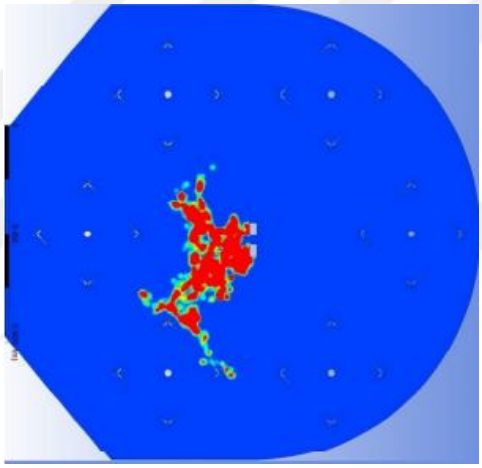


Şekil 3.16. Alüminyum buharının vakumda difüzyonu

Bununla birlikte altlıkların hem merkezden hem de kendi başlarına dönüyor olmaları, evaporasyon esnasında filamanlara yakın bölgeden geçen altlık yüzlerinde kalınlık farklarının oluşmasına sebep olmaktadır. Bu durum 22 sn evaporasyon süresi boyunca her 0,1 ms için tekrarlanacak ve farklılaşmalara yol açacaktır. Bu yüzden buhar kaynağına yakın bölgelere yapılacak müdehalelerin sonuç vereceği öngörülmüştür. Bu etkileri görebilmek için Ayrık Faz Modellemesi gerçekleştirilmiştir.

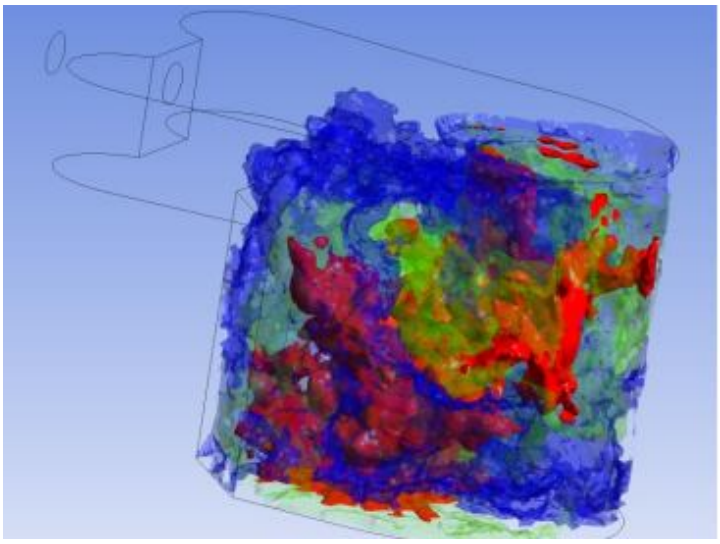
Ayrık faz modellemesi (Discrete phase modelling). Özellikle filamanı terk eden metal buharının yoğun olduğu bölgede parçacık hareketlerini görüntülemek için AFM metodu kullanılmıştır. Kullanılan metotta parçacıklar katı yüzeyine ulaştıklarında yok olma (yüzeye yapışma) yaklaşımı ilk 40 milisaniye için ele alınmıştır. Simülasyon sonucu elde edilen sonuçlar, parçacıkların birbirleriyle olan etkileşimlerinin prosesin belli bir bölgesinde buhara yön vermesine sebebiyet verdiğini göstermektedir. Bu yön kazanımları hem 2. boyutta, hemde 3. boyutta etkin olabilmektedir.

PVD çanı merkezinde 2 boyutlu düzlemde alüminyum buharının, parçacıkların çarpışmasından dolayı nasıl yön kazandığını göstermektedir (Şekil 3.17).



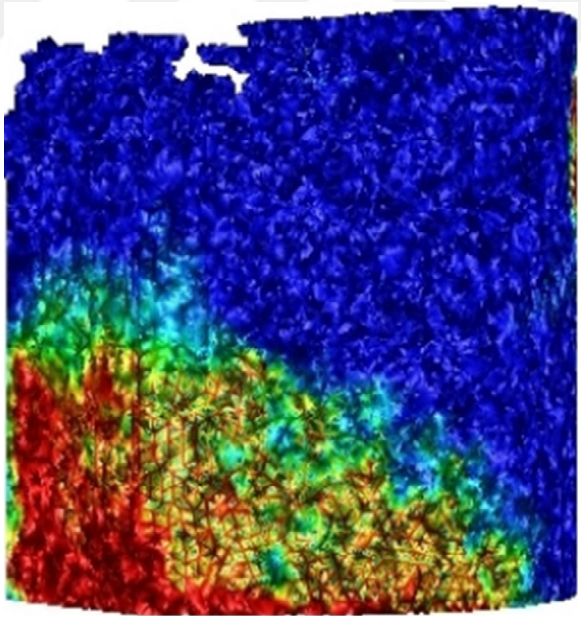
Şekil 3.17. Alüminyum buharının çarpışmalardan kaynaklı yön kazanması

Aşağıda 3 boyutta alüminyum buharının konsantrasyonunu gösterilmektedir (Şekil 3.18). Kırmızı renk konsantrasyonun maksimum olduğu, mavi renk ise minimum olduğu bölgeleri göstermektedir. Alüminyum buharının stokastik çarpışmaların etkisiyle rastgele yerlerde daha yoğun veya az olduğu görülmektedir.



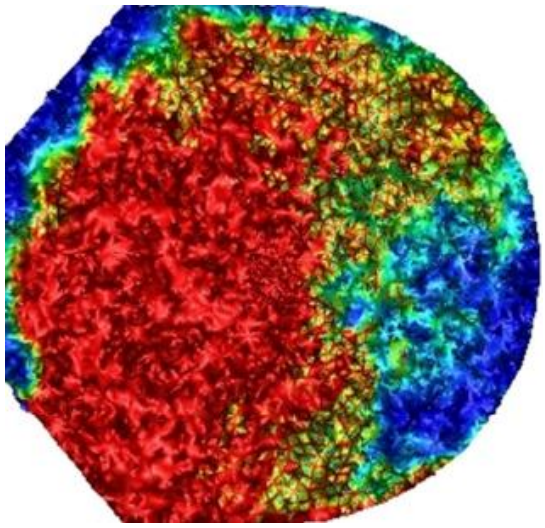
Şekil 3.18. Alüminyum buharının çan içerisindeki konsantrasyonu

İlk buharların aşağıya doğru yön aldığını gösterirken, bunun rastgele çarpışmalardan mı yoksa gravite/mikrogravitenin etkisinden mi kaynaklandığı açık değildir (Şekil 3.19).



Şekil 3.19. Alüminyum buharının çan içerisindeki konsantrasyonu - 3.boyutta yönlenmeler

2 boyutlu düzlemde de vakum ağzına doğru çan içi hava akışının yön alması kaynaklı düzensiz dağılımın varlığı görülmektedir (Şekil 3.20).

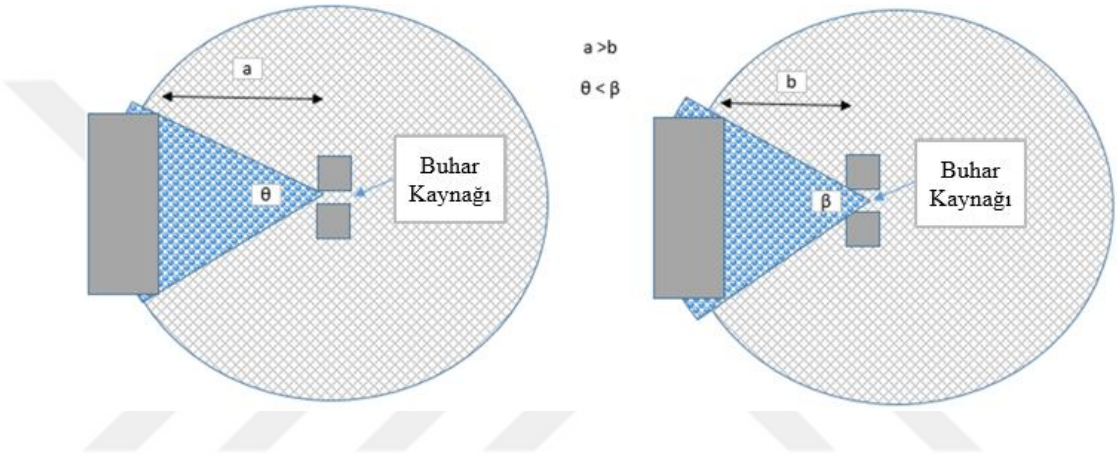


Şekil 3.20. Alüminyum buharının çan içerisindeki konsantrasyonu - 2.boyutta yönlenmeler

Değerlendirme ve sonuçlar. PVD çanı içerisinde oluşan iki farklı bölgeden kaynaklı kullanılan iki farklı metottan elde edilen bulgular göstermektedir ki, çarpışmaların etkili olduğu filaman yakınındaki bölgeler, PVD prosesinin ilk zamanlarında düzensiz bir dağılıma sebebiyet vermektedir. Bu durum filamanların sayısı ve birbirlerine yakınlıklarıyla ilgilidir. Uzak bölgelerdeki olayı açıklayan difüzyon modeli ise şayet bu çarpışmalar minimuma inerse, çok daha düzenli bir dağılımın gerçekleşebileceğini göstermektedir. Prosesin ilk zamanlarında oluşan bu rastgele yön kazanımlar, operasyonların tekrar edilebilmesini zorlaştırdığı gibi, film kalınlıklarında da heterojenliğe sebebiyet verebilecektir. Filaman etrafında oluşan gaz yoğunluğundan dolayı filamanlar etrafındaki bölgede yüksek basınç gradyenlerinin olması, çarpışmaların yoğun olması gibi etkenler prosesin başarısını doğrudan etkileyecektir. Bu çarpışmaları ve yön kazanımları etkileyen başlıca parametrelerin, filaman sayısı ve filamanların birbirlerine yakınlığı olduğu açıklık kazanmaktadır.

Mevcut PVD prosesinde çan içerisinde özellikle filamana uzak bölgelerde basıncın çok düşük seviyelerde olması boşlukta difüzyon modeli ile simüle edilmiştir. Öte yandan filamana yakın bölgelerde, atomlar arası çarpışmalar ve buna bağlı lokal basınç değişimleri ile atomların yön değiştirmesi söz konusu olacağından difüzyon modeli ile yorumlanamayacak durumlar söz konusudur. Simülasyonlar alüminyum için

gerçekleştirilmiştir, alaşım için de aynı yayılma karakteristiği olacağı öngörülmüştür. Bu sebeple altlıkların ölü bölgelerden (0,1 ms durumunda yayılımın en az olduğu bölge) uzak tutularak kaynağa yakınlaştırılması gerektiği öngörülmüş, PVD çanında bulunan elektrotların pozisyonunun kalınlık ve homojenite üzerindeki etkisinin olduğu gözlemlenmiştir. Çalışmalarda alüminyum miktarı sabit tutularak elektrotların planetlere olan yakınlığı arttırılmıştır (Şekil 3.21). Elektrotlar parçaya yaklaştıkça, altlıklar buhar kaynağı tarafından oluşturulan homojen yayılma alanını daha fazla kesmekte ve altlık yüzeyinde biriken atom sayısı homojen olarak artmaktadır.



Şekil 3.21. Elektrotun parçaya yaklaşması ile birim yüzeye gelen atom sayısının artması

Prosesin daha homojen film kalınlıklarına ve tekrar edilebilirliliğine ulaşmak için 2 temel öneri öne çıkmaktadır;

Basınç gradyenleri olan bölgenin sınırlarının düşürülmesi, mümkün olduğunca bu bölgenin dar olması. Bu bölgenin büyüklüğü tamamen filaman ağırlığı (çok kısa zamanda aynı noktadan buharlaşacak miktar) ve filamanların birbirlerine olan yakınlığı ile belirlendiği göz önüne alındığında;

a-) Mümkün olduğunca az filaman kullanımı,
b-) Mümkün olduğunca aynı filaman üzerinde tek deveboynu ve tek tel buharlaştırılması, prosesin başarısına katkı sağlayacaktır.

Elektrotların bu bölgeden çıkarılıp, moleküler dinamiğin etkin olduğu bölgeye çekilmesi. Buharın yoğun olduğu bölgede elektrotlar yoğun buharın yönünü doğrudan etkilemektedir. Şayet elektrotlar, moleküler dinamiğin baskın olduğu bölgeye çekilebilirse buharın homojen dağılmasına katkısı olacaktır.

Vardığımız sonuçların, aslında moleküler Dinamik bölgesini çözümleyemeyen CFD metodu ile elde edildiği gerçeği unutulmamalıdır. CFD simülasyonları filamanlara yakın bölgelerde fiziksel olayları açıklayabilecekken, yüksek vakum bölgesini modelleyebilme kapasitesine sahip değildir. Bir diğer husus ise, CFD modeli süreklilik alanında işleyebilir olduğundan, simülasyonlardaki moleküller, ayrı ayrı değil, ancak belirli gruplar halinde filamandan enjekte ettirilebilmektedir. Moleküllerin ayrı hareketleri ancak Direk Simülasyon Monte Carlo ve Moleküler Dinamik yaklaşımlarıyla modellenebilir. Bu açıdan bu sonuçları valide etmek ve ayrıca yüzey kaplama kalınlıkları/homojenitelerini anlayabilmek için Direk Simülasyon Monte Carlo modellemesi gerekmektedir.

Evaporasyon kulesi üzerinde sıralı 10 cm aralıklar ile 22 adet filaman bulunmaktadır. Filamanlar arasındaki Knudsen sayısı 0,1'den küçüktür. Buna bağlı her filamanın yarattığı lokal basınç değişimleri diğer filamanlar üzerinde etki yaratacak ve 3 boyutta kaotik yönelmelere sebebiyet verecektir. Filamanların evoparasyon esnasında birbirlerinden farklı ısı transferi yapması ile bu durum daha da karmaşık hale gelecek, her filamandan farklı evaporasyon sağlanması ile kaynaktan farklı beslemeler ve homojeniteyi bozan akış gerçekleşecektir. Bu düzensiz beslemelerin giderilmesi durumunda çok daha düzenli bir dağılım gerçekleşecektir. Filaman ile ergitilecek tel arasında en iyi ısı transferinin gerçekleştirilmesi doğrudan filaman geometrisi ile alakalıdır. Tungsten filaman geometrisinde optimizasyon sağlanacaktır.

3.4.5 Planet dönme hızı optimizasyon analizi

İdeal gaz, moleküllerin özhacimlerinin moleküllerin serbestçe dolaştıkları tüm hacim oranı çok küçük olan, moleküllerinin arasında çekme ve itme kuvvetleri bulunmayan, molekülleri arası çarpışmaların esnek olduğu gaz modelidir. Daha önce alaşım için

evaporasyon profiline en uygun paramatreler belirlenmişti. Bu analizlerde planet dönme hızının homojeniteye etkisi doğrulanmıştır.

2,5x10^{-4} mbar ortamda CFD analizleri yürütülmüştür. Bu gibi yüksek vakum ortamında elementlerden bağımsız farklı hammaddeler bünyesinde sahip oldukları fiziksel özellikleri göstermemekte, daha çok ideal gaz gibi davranmaktadırlar. Analizlerde kullanılan diğer kabuller ve sınır koşullar aşağıdaki gibidir;

1. Tek fazlı zamandan bağımsız bir model kullanılmıştır.
2. K-epsilon türbülans modeli kullanılmıştır (Sobachkin ve Dumnov, 2013; Wilcox, 1998).

Sonlu hacimler yöntemi ile çözümü gerçekleştirilen süreklilik ve momentum denklemi aşağıda belirtilmiştir.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla . (\rho \vec{v}) = S_m \tag{3.3}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{v}) + \nabla . (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla . (\bar{\bar{\tau}}) + \rho \vec{g} + \vec{F} \tag{3.4}$$

Hesaplar esnasında her iki gazın da viskozitesi standart hava viskozitesi kabul edilmiştir. Analizler problemin çözümünü daha pratik hale getirmek için çeşitli adımlarla yapılmıştır. Zamandan bağımsız tek fazlı 3D ve 2D analizler yapıldıktan sonra elde edilen bilgiler ışığında zamana bağlı çift fazlı akış analizi yapılmıştır. Zamana bağlı çift fazlı akış analizinde VOF (Volume of Fluid) modeli kullanılmıştır (Ranade, 2001). Sonlu hacimler yöntemi ile çözümü gerçekleştirilen süreklilik ve momentum denklemi aşağıdaki gibidir.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla . (\rho \vec{v}) = S_m \tag{3.5}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{v}) + \nabla . (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla \rho + \nabla . \left(\mu \left(\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^{\tau}\right)\right) + \rho \vec{g} + \vec{T}\, \vec{T}_{\sigma} \tag{3.6}$$

$$\rho: karışım\ yoğunluğu, \rho = \sum a_q \rho_q \tag{3.7}$$

$$\mu: karışım\ viskozitesi, \mu = \sum a_q \mu_q \tag{3.8}$$

$$\vec{v}: karışım\ hızı, \vec{v} = \frac{1}{\rho}\sum_{q=1}^{n} a_q \rho_q \vec{v}_q \quad (3.9)$$

$\vec{T}_\sigma: faz\ arayüzündeki\ yüzey\ gerilim\ kuvveti$

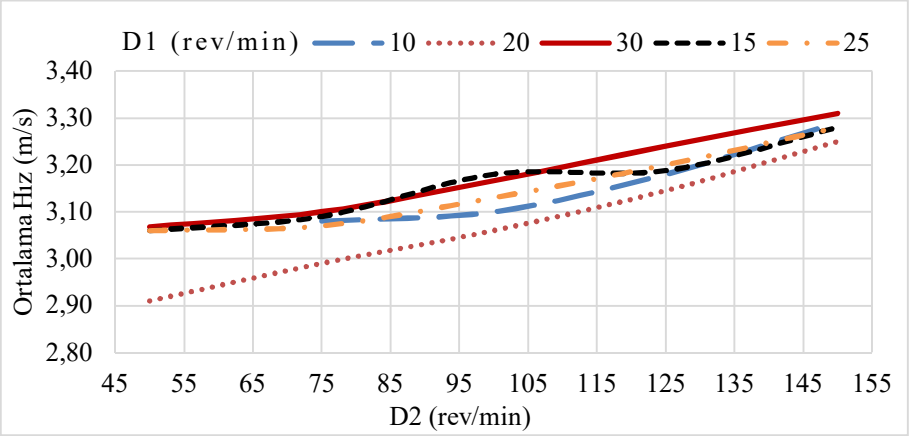
$a_\sigma: q\ fazının\ hacimsel\ oranı$

$$0 < a_q < 1\ ve \sum_{q=1}^{n} a_q = 1 \quad (3.10)$$

$\mu_q: q\ fazının\ viskozitesi$

$\vec{v}_q: q\ fazının\ hızı$

Zamandan bağımsız tek fazlı 3 boyutlu analiz. İlk olarak üç boyutlu ve zamandan bağımsız olarak çözüm yapılmıştır. Bu çözümde sadece tek faz kullanılmıştır. Amaç sistemdeki akış karakteristiğini ortaya koymaktır. D1 ve D2 değerleri değiştirilerek planeti (kaplanacak altlıkların yerleştirildiği taşıyıcı aparat) içine alacak hayali bir silindir etrafındaki hız büyüklükleri ve bu hızların kapladığı bölgenin hacimsel değeri hesaplanmıştır. D1 ve D2 birbirine göre zıt yönde döndüklerinden dolayı birbirlerine göre bağıl hızı D2'nin etrafındaki akışkanın hızını etkilemektedir (Şekil 3.22) (Sözer ve diğerleri, 2020).



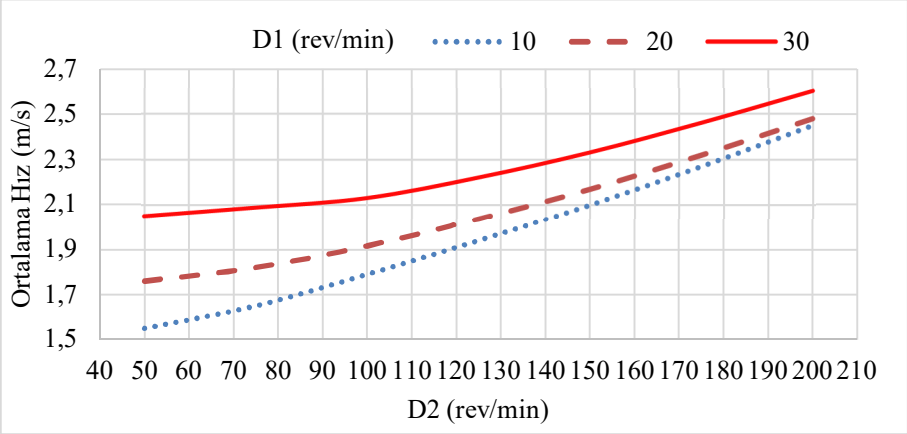
Şekil 3.22. 3 boyutlu analizde merkez ve altlık devirlerinin akışkan hızı ile ilişkisi (Sözer ve diğerleri, 2020)

D2'nin artışı ile ortalama hızın arttığı görülmektedir (Şekil 3.22). Bunun ile birlikte D1 değerinin artışı da genel olarak ortalama hızı arttırmaktadır. X ekseni dev/dak olarak

D2 değerini, Y ekseni m/s olarak ortalama hızı göstermektedir. Diğer değişken de dev/dak olarak D1 değerini temsil etmektedir (Sözer ve diğerleri, 2020).

Zamandan bağımsız tek fazlı 2 boyutlu analiz. Bu bölümde analizlere 2 boyutlu uygun bir kontrol hacmi ele alınarak devam edilmiş ve elde edilen sonuçlar 3 boyutlu durum ile karşılaştırılmıştır. Bu bölümdeki hesaplar zamandan bağımsız tek fazlı durum için incelenmiştir. Ortalama kütle akış hızı 0,05 g/s olarak alınmıştır (Sözer ve diğerleri, 2020).

Devir sayısı ile ortalama hız arasındaki ilişkiyi veren grafik gösterilmektedir (Şekil 3.23). 3 boyutta olduğu gibi burada da devir sayılarının artışı ile ortalama hız artmaktadır. X ekseni dev/dak olarak D2, Y ekseni m/s olarak ortalama hızı göstermektedir. Diğer değişken de dev/dak cinsinden D1 değerini temsil etmektedir (Sözer ve diğerleri, 2020).



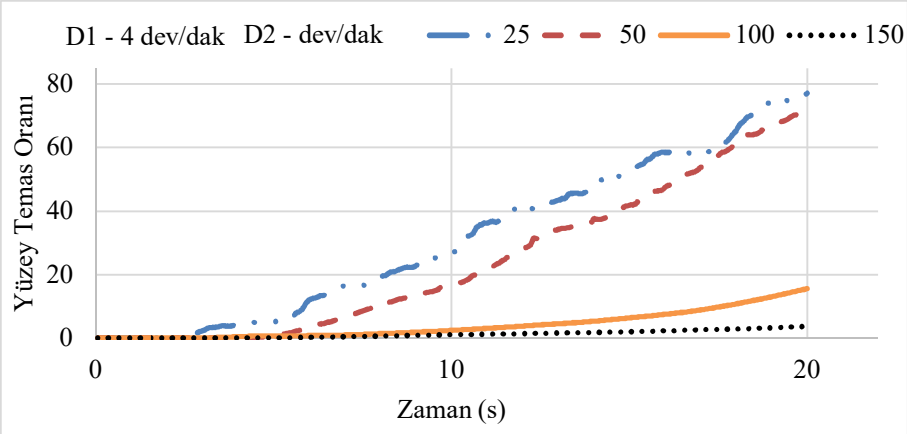
Şekil 3.23. 2 boyutlu analizde merkez ve altlık devirlerinin akışkan hızı ile ilişkisi (Sözer ve diğerleri, 2020)

Tek fazlı analizlere göre kaplanacak parçanın bağıl hızının artması etrafındaki akışkanın daha hızlı hareket etmesine sebep olmaktadır. Bu durum parçanın daha fazla akışkan ile temas etmesine olanak sağlamaktadır (Sözer ve diğerleri, 2020).

Zamana bağlı çift fazlı analiz. Bu bölümde zamana bağlı olarak, akışkan ve havanın akış karakteristiği belirlenmiştir. Analiz ilk 20 saniyelik durum için ele alınmıştır. Aşağıdaki grafiklerde yüzeye temas eden akışkan fazının hacimsel oranının devir sayılarına ve

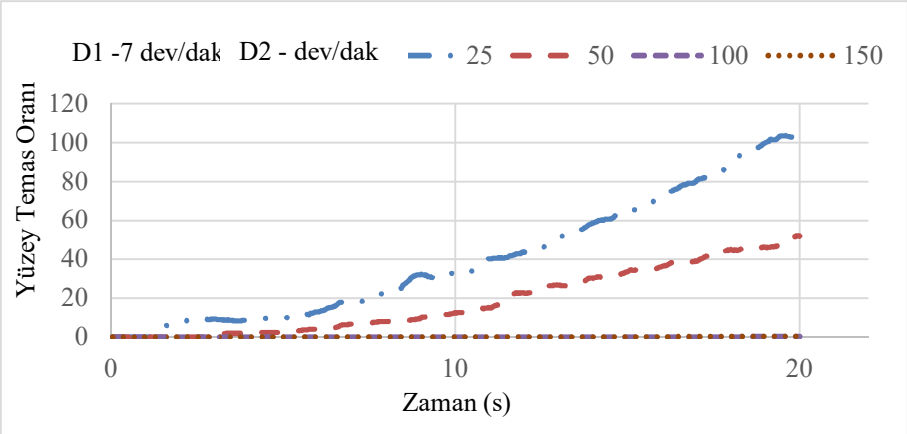
zamana göre değişimi gösterilmiştir. Grafiklerden de görüldüğü üzere devir sayılarının artışı sistem üzerinde olumsuz etki yaratmaktadır. Bu durum bir önceki bölümde elde edilen sonuçlarla çelişki oluşturmaktadır (Sözer ve diğerleri, 2020).

Grafiklere ek olarak akışkanın sistem içinde nasıl davrandığını göstermek amacıyla çeşitli devir sayılarındaki gaz fazı oranları gösterilmiştir. Şekiller 10. ve 20. saniyedeki durumları göstermektedir. Sistemde ilk başta akışkan olarak havanın olması ve akışkanın sisteme girmeden önce havanın bir bağıl hızının olması, akışkanın yüzeyler üzerine nüfus etmesini zorlaştırmaktadır. X ekseni saniyeyi, Y ekseni de normalize edilmiş halde akışkanın yüzeye temas etme miktarını, diğer değişken de dev/dak olarak D2 değerini göstermektedir. Merkez dönüş hızı 4 dev/dak (Şekil 3.24), 7 dev/dak (Şekil 3.25) ve 10 dev/dak (Şekil 3.26) için alınan sonuçlar aşağıda yer alan grafiklerde gösterilmiştir. Y eksenindeki değer normalize edildiği için 100 değeri tüm yüzeye akışkanın temas ettiği anlamına gelmemektedir (Sözer ve diğerleri, 2020).

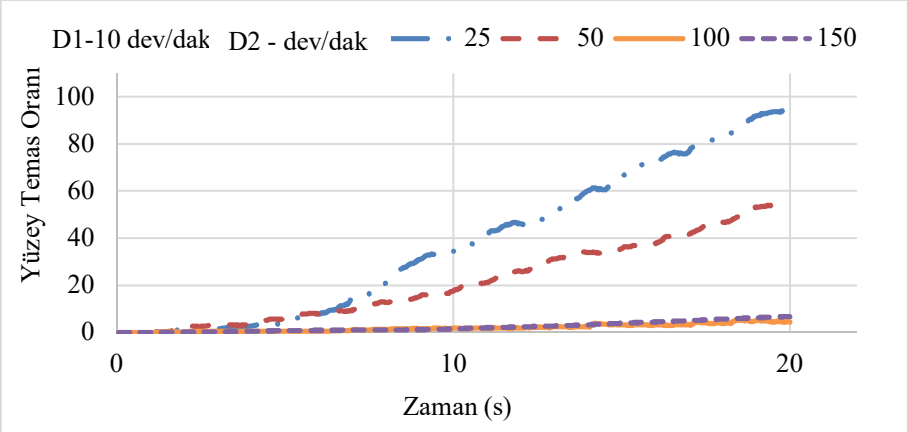


Şekil 3.24. 4 dev/dak merkez dönüşü ve altlık dönüş sayısının yüzey temas oranına etkisi

Analizler göz önüne alındığında optimum devir sayısı D1 için 7 dev/dak ve D2 devir sayısı ise düştükçe temas oranını arttırmaktadır. Bu sebeple olabilecek en düşük D2 devri için dişliler değiştirilerek D2 devri 29,2 dev/dak olması sağlanmıştır (Sözer ve diğerleri, 2020).



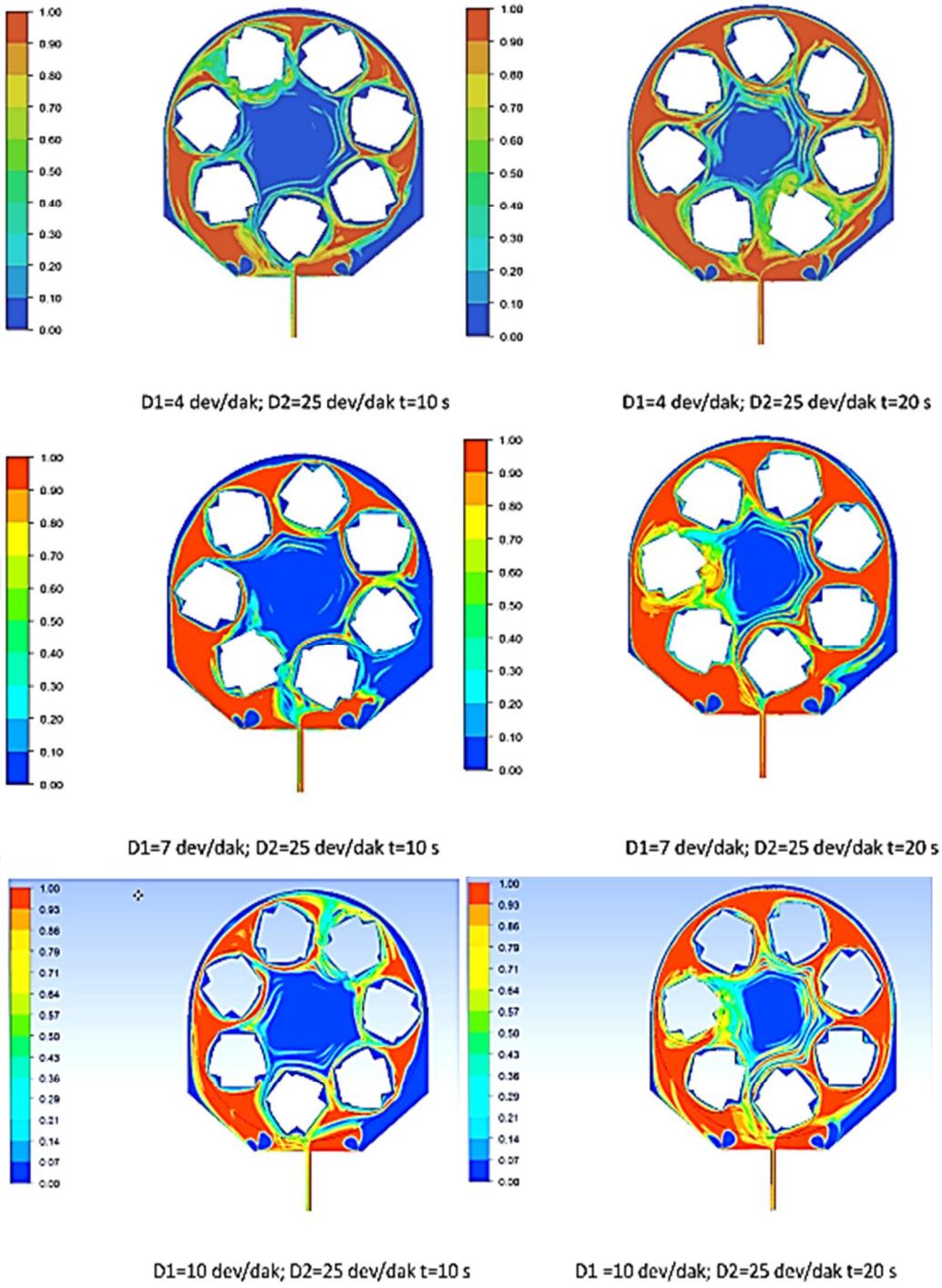
Şekil 3.25. 7 dev/dak merkez ve altlık dönüş sayısının yüzey temas oranına etkisi



Şekil 3.26. 10 dev/dak merkez ve altlık dönüş sayısının yüzey temas oranına etkisi

Şekilde akışkanın sistem içindeki hacimsel oranını belirtilmektedir (Şekil 3.27). Kırmızı renk (1 değeri) o bölgede tamamen akışkanın olduğunu, mavi renk (0 değeri) ise o bölgede tamamen hava olduğunu göstermektedir. Şekiller çeşitli zaman ve devir sayılarına göre temas oranını göstermektedir (Sözer ve diğerleri, 2020).

Sistemde tek bir akışkan olması halinde devir sayılarını artırmak akışkanın yüzeye temas etmesi açısından olumlu etki yaratmaktadır. Diğer taraftan sistemde iki farklı akışkan olduğunda bu etki sistemde başlangıçta hakim olan hava akışkanının belirli bir bağıl hızı olmasından dolayı farklılık göstermekte, sisteme entegre edilen akışkan fazının yüzey üzerindeki hava tabakasının yerini alması uzun sürmektedir. Bu bilgiler ışığında merkez dönüş sayısının teorik olarak optimum değeri D1 için 7 dev/dak ve D2 devir sayısı ise 29,2 dev/dak olarak belirlenmiştir (Sözer ve diğerleri, 2020).



Şekil 3.27. 10. ve 20. saniyelerde farklı devir değerlerinin CFD sonuçları

3.4.6 Çift katman film kaplamalar

Literatür araştırıldığında fiziksel buhar biriktirme prosesinde çan içerisinde buharın, parça üzerine yüzey enerjilerine bağlı olarak 3 farklı şekilde tutunabildiği görülmüştür;

1. Yüzeyden seker ve uzaklaşır,
2. Yüzeyde kayar ve belli bir yerde durur,
3. İlk çarptığı yere gömülerek kalır.

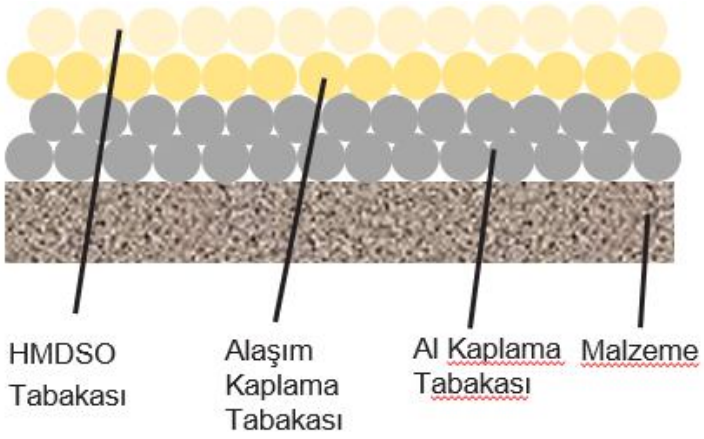
Evaporasyon profili PVD prosesi parametrelerine en olumlu sonuç veren ve renk olarak müşteri geri bildirimlerine en uygun olan 2 tel olan CuSi3 ve CuAl8 için, çıplak parça kaplamaları sonucunda homojenite elde edilememiştir. Buna sebep olarak yukarıdaki nedenler sıralanabilir. Literatür araştırması sonucunda benzer yapıya sahip kaplamanın önceden uygulanıyor olması yukarıda belirtilen olası sebeplerin etkilerini azaltacak ve alaşım iyonlarının parça üzerinde ilk çarptığı yere tutunma oranını arttıracaktır.

Çıplak parça üzerine önce 1. evaporasyon kulesine yüklenmiş alüminyum teller sonrasında ise 2. evaporasyon kulesine yüklenmiş alaşım telleri evapore edilmiş ve çift kat kaplama olması sağlanmıştır. Parça üzerinde homojenitede iyileşme sağlanmıştır, ancak;

1. Planette üst ve altta bulunan parçalar arasında,
2. Aynı planette farklı yüzler arasında,
3. Çan içerisinde farklı planetlerde kaplanan parçalar arasında

homojenitede farklılıklar bulunmaktadır.

PVD işlemlerini kullanmanın çok sayıda avantajı olup film boyunca sürekli olarak kaplama özelliklerinin değişmesine olanak sağlar. Bu sayede alaşım malzemelerinin biriktirilmesi, çok katmanlı film yapılar gibi (Şekil 3.28) özel yapıların elde edilmesi de sağlanabilir (Fox-Rabinovich ve diğerleri, 2016; Imbeni ve diğerleri, 2001; Skordaris ve diğerleri, 2016).



Şekil 3.28. Çift katman film tabakası kesit şematik görünümü

Homojeniteyi arttırmak için alüminyum ile doğrulama çalışmaları devam ettirilmiştir. Yapılan CFD analizleri sonuçlarına göre özellikle planet dönme hızı için deneysel yaklaşım yapılmıştır. Bunun dışında optimize edilen parametreler ile en uygun ısı yayılımı için tungsten filaman geometrisi optimizasyonu da gerçekleştirilmiştir. Yeni filaman ile tel sıçraması elimine edilerek renk homojenitesinde iyileşme elde edilmiştir.

4. BULGULAR ve TARTIŞMA

Alaşımın homojen yoğuşmasına fayda sağlayacak çift katman kaplama uygulanabilmesi için çan içi evaporasyon kulesi sayısı arttırılmıştır ve tungsten filaman optimizasyonu yapılarak alaşıma homojen ısı aktarımı sağlanmıştır. Yapılan iyileştirmelerin doğrulanabilmesi için prototip kaplama planeti tasarlanmış ve oluşturulan deney modelleri ile paratmetre denemeleri yürütülmüştür. Elde edilen homojen plakaların yansıtıcılık değerlerinden emin olunabilmesi için spektrometre ölçümleri yapılmıştır ve montaj konseptinin belirlenmesinden sonra fotometri ölçümleri ile bitmiş ürün ışık performansı gözlemlenmiştir.

4.1 PVD Metalize Makinesi Çift Evaporasyon Kulesi Adaptasyonu

Çok katmanlı biriktirme ile elde edilen ince film tabakaları, daha iyi bileşim kontrolü ve biriktirilecek malzeme türlerinde daha büyük esneklik sağlamaktadır (Decher ve Schlenoff, 2003; Wasa ve diğerleri, 2004). Şekilde görüleceği gibi PVD reaktörleri vakum çanı içerisinde yüksek voltajlı bir güç kaynağına bağlı iki bakır elektrottan oluşan termal evaporasyon kulesine sahiptir (Şekil 4.1) (Safarian ve Thorvald, 2013). Çoğunda tek kule mevcuttur ancak farklı uygulamalar için sayılarının arttırılması sağlanabilir.

PVD kaplama metodu ile bilinen yöntemlerin dışına çıkılarak ilk kez seri şartlarda polimer malzemeye Gold-Rose kaplama yapılmıştır. Uygun homojen karışımın elde edilmesinde ekipman tasarımında değişiklik yapılarak, farklı alaşımların sıralı olarak kaplama tekniği termal evaporasyon için ilk defa denenmiştir (Şekil 4.2). Alt film tabakasının alüminyum olması fotometrik anlamda yüzeyde yüksek yansıtma özelliği sağlamıştır.

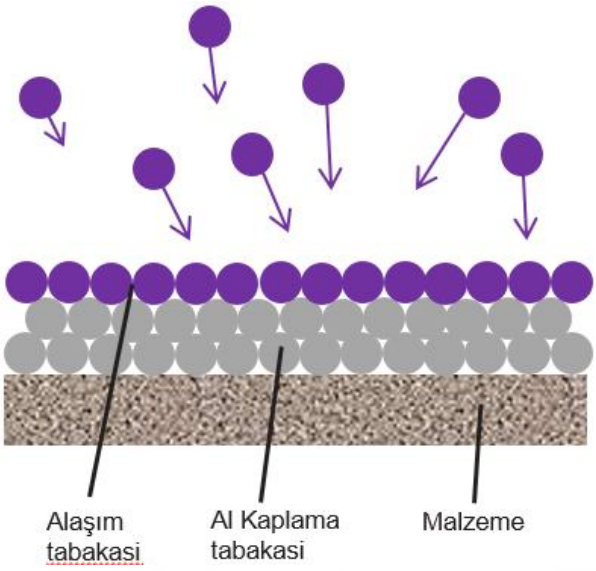


Şekil 4.1. Çift evaporasyon kulesi çizimi ve çan içerisinde görünümü

Çift evaporasyon kulesi ile farklı iki katman sıralı kaplama yapılmış (Şekil 4.3), mevcut dozaj iki katına çıkarılmış, alaşım değil saf element de evapore edilerek kaplama difüzyonunda esneklik de sağlanmıştır.



Şekil 4.2. Çift ve tek evaporasyon kulesi



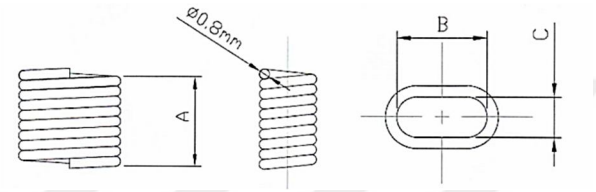
Şekil 4.3. İlk katman film tabakası üzerine ikinci katman kaplanması şematik görünümü

4.2 Tungsten Filaman Boyut ve Geometri Optimizasyonu

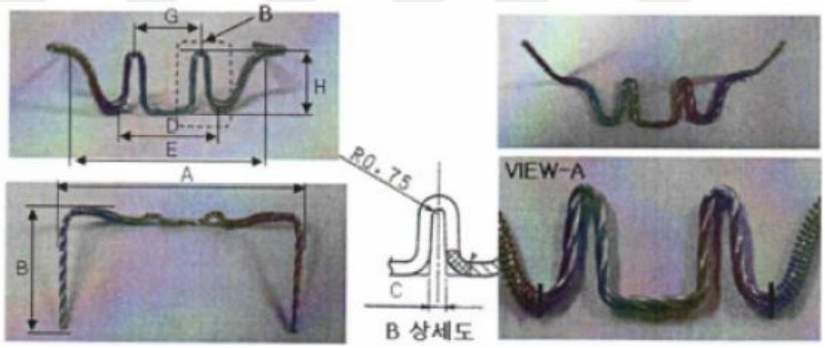
Evaporasyon esnasında filamanın, buharlaştırılacak tele ısıyı homojen şekilde aktaramıyor olması ve buharlaşan her molekülün iç enerjilerinin farklı olması homojeniteyi bozmaktadır. Kaynak olarak düşünülen her filamanın farklı beslemeye neden olması ile yine açıklanamayan fiziksel olaylar gerçekleşecektir. Tellerden ısı transferinin daha iyi anlaşılması gaza ya da metale aktarımının arttırılması önemli bir araştırma alanı olmuştur (Perovic ve diğerleri, 1996). Tungsten filaman geometrisinin iyileştirilerek evaporasyon esnasında homojen ısı transferinin gerçekleştirilmesi önem arzetmektedir.

Mevcut proseste buharlaşma olarak en uygun sonucun alınmasına karşın tel sıçramasında tam sonuç alınamamıştır. Tel sıçraması, ön ısıtma sonrası alaşımın tam olarak tele sıvanamaması ve bir kısmının faz değişimi ile çana düştüğü gözlemlenmektedir. Yapılan farklı denemelerde ilk başlarda bunun önüne geçilememiş olup öte yandan CFD analizleri sonrası bulk akışın azaltılabilmesi için ayrıca tel miktarının azaltılması da gerekmiştir. Şekil 4.4'de gösterilen mevcut deveboynu tipi W filamanlara ancak Şekil 4.5'deki sarmal tip alüminyum tel yüklenebilmektedir.

Mevcut tungsten filaman ve üzerine takılan alüminyum teller ile homojen ısı transferi sağlanamamakta, evaporasyon süresi boyunca yukarıdan aşağı olan 22 adet telde farklı evaporasyon profili gözlemlenmektedir. Tel ile filamanın farklı yerlerden pozisyonlanması ve akkorlaşan filamanın tele içeriden ısı vermesi homojen ısı transferini engellemektedir. Ayrıca tungsten filament ortamda oksijen bulunması halinde farklı sıcaklık aralıklarında farklı tepkimelere girerek yüzeyde sararma ve mavileşme etkisi yaratabilmektedir (Lassner ve Schubert, 1999). Şekil 4.5'de gösterilen mevcut deveboynu W filamanlara yine aynı şekilde olan sarmal tip alüminyum tel yüklenebilmektedir.



Şekil 4.4. Sarmal tip alüminyum tel



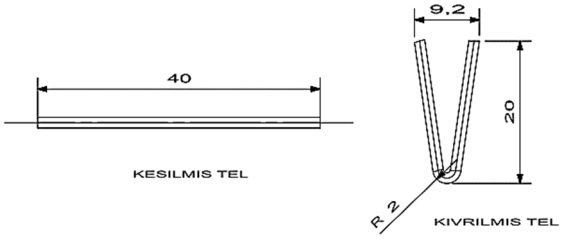
Şekil 4.5. W tipi filaman yapısı

Kaynak teli olarak piyasadan tedarik edilen teller ise Şekil 4.6'daki gibi sargı şeklinde alınabilmektedir. Bu teller istenilen ebatlarda Şekil 4.7'deki gibi kesildikten sonra V şeklinde kıvrılarak mevcut tungsten filamana takılmaktadır. Bu yöntem ile tele uygun ısı aktarımı belli noktalardan yapılabilmekte, faz değişimi filamanın teli taşıdığı noktalardan olur ve teması kesilir ise tel tam evapore olamadan belli miktarda sıçramaktadır.



Şekil 4.6. Sargı şeklinde kaynak teli

Yüksek vakum altında filamanın geometrisi konveksiyonel hava akışını etkileyebilmektedir. Özellikle alaşıma aktarılan ısı, ön ısıtma fazında tele tam olarak aktarılabilir. Mevcut yöntemde ısı, alaşıma içeriden aktarılmak yerine dışarıdan sarılması yoluyla aktarılabilirse telin tam olarak tavlanması ve faz değişimi ile tam olarak sıvanması sağlanabilecektir. Bu sebeple pota tipi filaman geometrisinin faydalı olacağı düşünülerek tungsten filaman tedarikçi firma ile iletişime geçilip, basket tip filaman tipi geliştirilmesi sağlanmıştır.

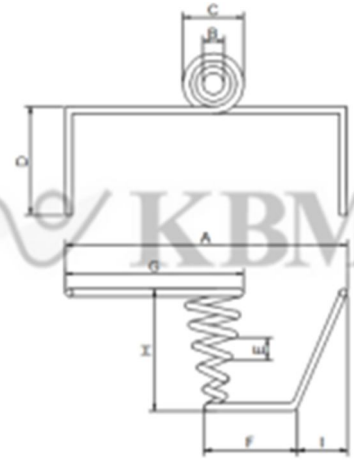


Şekil 4.7. Düz ve V şekil yapısına sahip tel yapısı

Alüminyum kaplama prosesinde bu gibi tel sıçramaları proses gereği normal görülmektedir ve kalınlığın 80 nm boyutunun geçmesi ile geçirgenlik, saydamlık elimine olduğu için renk anlamında farklılık yaratmamaktadır. Yapılan ilk gözlemlerde homojenitenin alaşımlardaki farklı elementlerin kompozisyonlarındaki değişiminin, ince film tabakasına direk etki ettiği ve renk farklılıklarını ortaya çıkardığı gözlemlenmiştir. Farklı elementlerin düşük güç ile evaporasyon öncesi sıvanma sıcaklığına getirilmesi ancak tel sıçramasının tam olarak giderilmesi ve sonrasında alaşıma aktarılacak ısının

bütünüyle en homojen şekilde aktarılması ile homojen evaporasyon sağlanacaktır (Willey, 2002). Bu da tel geometrisi ile doğrudan alakalıdır.

Tedarik edilen, ihtiyaçlara çözüm sağlayacak ilk tel geometrisi Şekil 4.8'deki gibidir. Tel ağırlığı, geometrisi ve ölçüleri Çizelge 4.1'de verilmiştir.



Şekil 4.8. Yeni sepet tipi filaman geometrisi

Çizelge 4.1. Yeni sepet tipi filaman ağırlığı ve ölçüleri

Ağırlık	6.69g	A	60mm+4.0
Bobin miktarı	3C (R)	B	8mm±1.0
Bobin aralığı	3.5mm	C	13mm±1.0
Her bobin çapı /Toplam bobin çapı	0.8/1.7	D	20mm±1.0
Bacak oluşumu	paralel	E	4.5mm±0.5
Dönüş yönü	L	F	
		G	35mm±2.0
		H	20mm±1.0

Yapılan deneme üretimlerinde, tedarikçi firma üretim tekniklerine uygun ihtiyaçlarımız dahilinde tasarlanmış yeni tungsten filaman için tespit edilen uygunsuzluklar aşağıda sıralanmıştır.

1- Normalde 8 saat dayanan ve vardiya sonlarında değiştirilen mevcut tungsten filamanlar 4 çevrim yaklaşık 2 saat sonrasında kırılgan hale gelmekte, yükleme esnasında kırılabilmektedir. Tel saflığı diğer tellerde olduğu gibi %99,95'tir.
2- Isı etkisiyle Şekil 4.9'daki gibi kimi tungsten filaman çarpılmakta ve alt kısımlar da büzüldüğünden kıvrılmış teller 3 çevrim (yaklaşık 1,5 saat) sonra yüklenemez hale gelmektedir.



Şekil 4.9. Sepet tipi filamanın ısı etkisiyle çarpılması

3- Mevcutta kullanılan 0,25 g alüminyum teller deveboynu filamanda 0,5 gramları bulabilmekte ve 0,25 g alüminyum teller dâhil tungsten filamana yüklendiğinde tam olarak kavranmamaktadır. Bu sebeple sepet ağzı "C" ölçüsü sabit tutulması ile spiral sayısı arttırılarak "H" ölçüsünde (derinlik) artış sağlanmalıdır.
4- Tungsten filaman sepet altı ölçüsü büyük olduğundan filamana tel yüklenmesi esnasında teller Şekil 4.10'daki gibi düşebilmekte ve düşmemesini sağlamak için yükleme operasyonu daha dikkatli şekilde yapılmaktadır. Bu durum yükleme operasyonunu da kolaylaştıracaktır. Bu sebeple sepet altı "B" ölçüsünün daraltılması sağlanmalıdır.

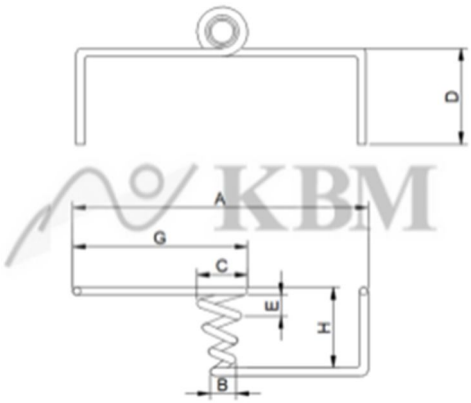


Şekil 4.10. Yeni sepet tipi filamandan tellerin düşmesi

Geliştirme sonrası gelen yeni teller ile yapılan deneme üretimlerinde sağlanan iyileşmeler aşağıda sıralanmıştır.

1- Tel sıçrama problemi kesinlikle gözlemlenmemiştir. Ön ısıtma fazı optimize edildikten sonra tungsten filamana tam sıvanma gerçekleşmiş, yüklenen telin tam evaporasyonu sağlanmıştır.
2- Tel geometrisinde ve ağırlığında yapılan değişiklik ile tel çarpılmaları engellenmiş, kırılma dayanımı arttırılmıştır.
3- Bu sebeple sepet ağzı "C" ölçüsü sabit tutulan, spiral sayısı arttırılarak "H" ölçüsünde (derinlik) artışı sağlanan yeni tungsten filamanlara yüklenen teller tam olarak kavranmaktadır.
4- Sepet altı "B" ölçüsünün daraltılması ile tellerin düşmesi ortadan kaldırılmış ve daha kolay yükleme operasyonu sağlanmıştır.

Geliştirilmiş nihai telin geometrisi Şekil 4.11'deki gibidir. Tel ağırlığı, geometrisi ve ölçüleri Çizelge 4.2'de verilmiştir. İlk geometriye olan değişimler kırmızı ile belirtilmiştir.



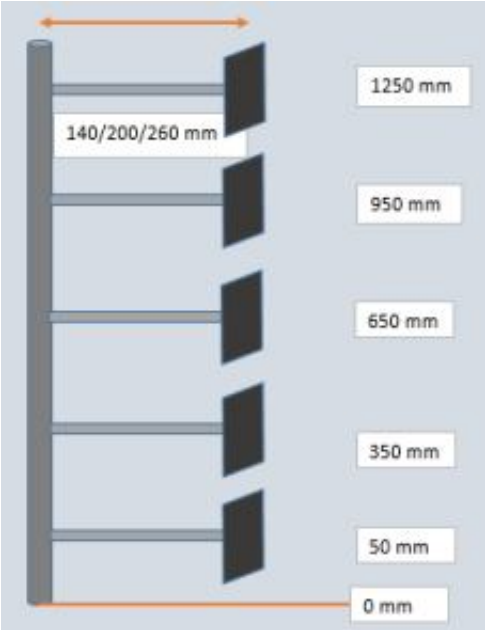
Şekil 4.11. Geliştirilmiş sepet tipi filaman geometrisi

Çizelge 4.2. Geliştirilmiş sepet tipi filaman ağırlığı ve ölçüleri

Ağırlık	6.69g→8.85g	A	60mm+2.0
Bobin miktarı	3C (R)	B	7mm±1.0→6.2mm±1.0
Bobin aralığı	3.5mm	C	13mm±1.0→14.5mm±1.0
Her bobin çapı /Toplam bobin çapı	0.8/1.7	D	20mm±1.0→25mm±2.0
Bacak oluşumu	paralel	E	4.5mm±0.5
Dönüş yönü	L	F	20mm±2.0
		G	35mm±2.0→40mm±2.0
		H	20mm±2.0→30mm±2.0
		I	12mm±2.0

4.3 Prototip Kaplama Planeti İmalatı

Simülasyon ile moleküllerin birbirlerinden etkileşerek ayrı hareketlere girmemesi için yapılacaklar belirlenmiştir. Filamanlar arası açılarak yapılan kaplama denemelerinde homojenitede iyileşme belirlenmiştir. Yaptırılan kaplama planeti prototipi (Şekil 4.12) ile deneyler yürütülerek farklı geometrilerde ve filamana farklı uzaklıklarda konumlandırılan plakalarda olan kaplama kalınlıkları Çizelge 4.3'e eklenecektir.



Şekil 4.12. İmal edilen prototip kaplama planeti

Çizelge 4.3. Deneyler sonrası farklı plakalarda alüminyum kaplama film kalınlığı

	Deney	Plaka No	Yükseklik (mm)	Filamandan Uzaklık (mm)	Pos-1 (Ω)	Pos-2 (Ω)	Pos-3 (Ω)	Pos-4 (Ω)	Pos-5 (Ω)
Çevrim-1	**Sonuç-1**	Plaka-1	1250	260					
	Sonuç-2	Plaka-2	950	260					
	Sonuç-3	Plaka-3	650	260					
	Sonuç-4	Plaka-4	350	260					
	Sonuç-5	Plaka-5	50	260					
Çevrim-2	**Sonuç-6**	Plaka-1	1250	200					
	Sonuç-7	Plaka-2	950	200					
	Sonuç-8	Plaka-3	650	200					
	Sonuç-9	Plaka-4	350	200					
	Sonuç-10	Plaka-5	50	200					
Çevrim-3	**Sonuç-11**	Plaka-1	1250	140					
	Sonuç-12	Plaka-2	950	140					
	Sonuç-13	Plaka-3	650	140					
	Sonuç-14	Plaka-4	350	140					
	Sonuç-15	Plaka-5	50	140					

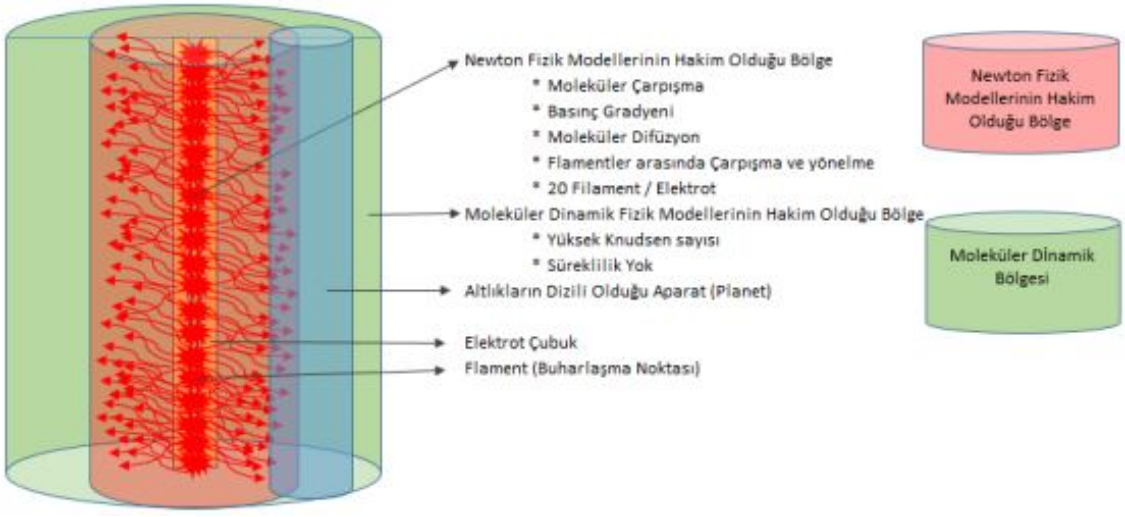
4.4 CFD Analiz Sonuçlarının PVD Prosesinde Doğrulanması

Daha önce CFD analizleri sonrasında PVD prosesinin daha homojen film kalınlıklarına ve tekrar edilebilirliğine ulaşmak için 2 temel öneri öne çıkmıştır.

1- Basınç gradyenleri olan bölgenin sınırlarının düşürülmesi, mümkün olduğunca bu bölgenin dar olması:

Bu bölgenin büyüklüğü tamamen filaman ağırlığı (çok kısa zamanda aynı noktadan buharlaşacak miktar) ve filamanların birbirlerine olan yakınlığı göze alındığında mutlaka bulk akış ortamı ortaya çıkacak ve bu düzensiz evaporasyon homojenite de düzensizliğe sebebiyet verecektir. Bunların giderilebilmesi için aşağıdakilerin sağlanması gerekmektedir. Şekil 4.13'de mevcut durum ve Şekil 4.14'de ise iyileştirilmiş durum şematik olarak da anlatılmaya çalışılmıştır.

a-) Mümkün olduğunca az filaman kullanımı.
b-) Mümkün olduğunca aynı filaman üzerinde tek deveboynu ve tek tel buharlaştırılması prosesin başarısına katkı sağlayacaktır.



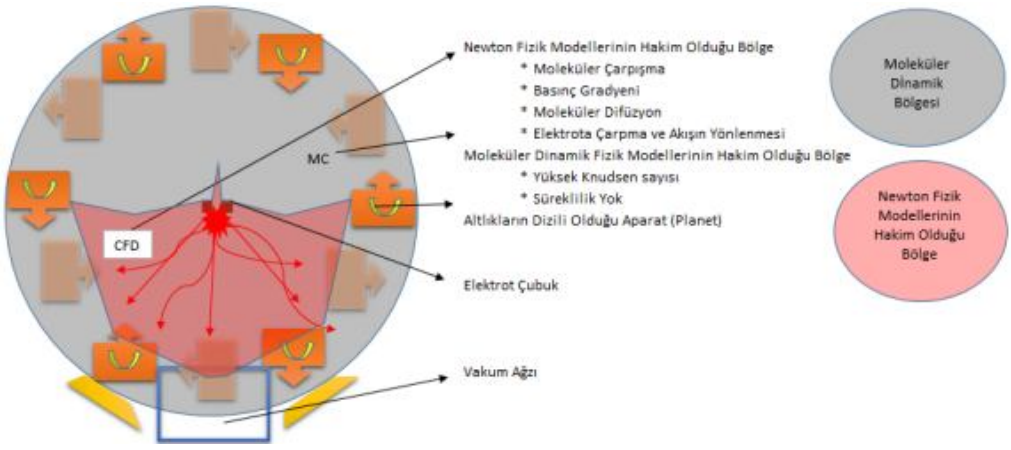
Şekil 4.13. Mevcut durum basınç gradyenleri olan bölgenin sınırları geniş



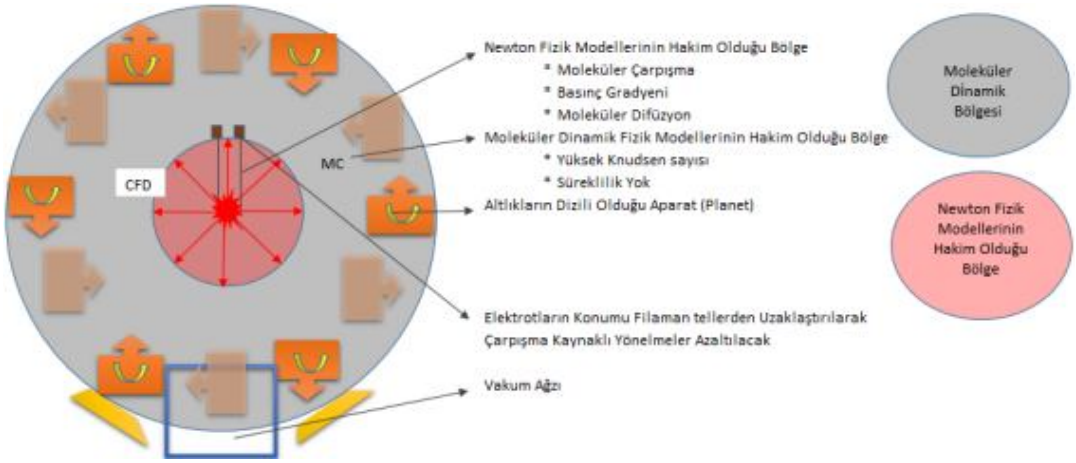
Şekil 4.14. İyileştirilmiş durum basınç gradyenleri olan bölgenin sınırlarının daraltılması

2- Elektrotların Newton Fizik Modellerinin hâkim olduğu bölgeden çıkarılıp, moleküler dinamiğin etkin olduğu bölgeye çekilmesi:

Buharın yoğun olduğu bölgede elektrotlar yoğun buharın yönünü doğrudan etkilemektedir. Şayet elektrotlar moleküler dinamiğin baskın olduğu bölgeye çekilebilirse, buharın homojen dağılmasına katkısı olacaktır. Şekil 4.15'de mevcut durum ve Şekil 4.16'da ise iyileştirilmiş durum şematik olarak da anlatılmaya çalışılmıştır.



Şekil 4.15. Mevcut durum elektrotların newton fizik modellerinin hakim olduğu ve merkezde, evaporasyona yakın bölgede olması



Şekil 4.16. İyileştirilmiş durum elektrotların newton fizik modellerinin hakim olduğu ve evaporasyona yakın bölgeden, merkezden uzaklaştırılması

4.4.1 CFD analiz sonuçlarının deney modeli

CFD analizlerini doğrulamak amacıyla sabit parametreler ile kaplama denemeleri yapılmıştır. Denemelerde CFD analizlerde ortaya çıkan yukarıda anlatılmış önerilerin etkisi görülmek istenmiştir. Filaman sayısı sabit tutulmak üzere, alüminyum tel miktarı azaltılarak hazırlanan deney planetinde 5 x 10 cm plakalar kaplanmış ve alüminyum film kalınlığı ölçümleri alınmıştır. Şekil 4.17'de yapılan planet görülmektedir.

Yapılan deneyde çan, merkezden dönme hızı değeri 7 dev/dak ve her planetin devir sayısı ise 29,2 dev/dak olarak belirlenmiştir. Bu haliyle çan 22 sn evaporasyon süresi boyunca toplamda 3 tam tur atmakta ve her planet ise kendi etrafında 11 tam tur dönmektedir. 3 çevrim boyunca farklı 4 deneme plakası Şekil 4.17'de görülen prototip kaplama planetine dikey konumlandırılarak kaplanmıştır.

Toplam 6 çevrimde 2 farklı alüminyum yüklenme kurgusu Şekil 4.17'deki evaporasyon kulesine yüklenmiş ve sonuçlar gözlemlenmiştir. Bu deneyler sonrasında CFD analizleri sonucu ortaya çıkan 2 öneri de doğrulanmıştır. Setuplar aşağıdaki gibidir.

1- Birbirine seri bağlı toplam 20 filamanın her birine çift tel yüklenmesi toplam 40 alüminyum tel (herbiri 0,25 gr)

2- Birbirine seri bağlı toplam 20 filamanın her 3 tanenin birine tek ve sonraki 4. filamana çift tel yüklenmesi toplam 40 tel alümiyum tel (herbiri 0,25 gr)



Şekil 4.17. Prototip kaplama planeti ve 20 filaman seri bağlı evaporasyon kulesi

Yapılan deneyler sonrası elde edilen ve Şekil 4.18'de gösterilen 5 x 10 cm plakaların her biri yine Şekil 4.18'de gösterilen ölçüm mastarı sayesinde ölçüm noktaları garanti edilmiş 5 ölçüm alınmasını sağlamıştır. Alüminyum film kalınlığı ölçümleri Şekil 4.19'da gösterilen Klaus Weiss Elektroanlagen Cihazı ile tamamlanmıştır.



Şekil 4.18. 5 x 10 cm plakaları ve 5 noktadan ölçüm mastarı

Bu cihaz ile film kalınlığı, cihaz probunda bulunan 5 yaylı iğnenin yüzeye temas ettirilmesi ile önceden referans olarak tanıtılmış alüminyum elementinin elektrik iletkenliğinden yola çıkılarak ölçülebilmektedir. Şekil 4.20'de probun alüminyum kaplı yüzeye dokundurulduğu ölçüm anı görülmektedir.



Şekil 4.19. Klaus Weiss Elektroanlagen cihazı



Şekil 4.20. Probun alüminyum yüzeyine dokundurularak ölçüm alınması

4.4.2 Değerlendirme ve sonuçlar

Plakalar üzerinden 5 farklı noktadan alınan nanometre alüminyum kalınlıkları Çizelge 4.4'de yer almaktadır. Sonuçlar aşağıda sıralanmıştır.

Çizelge 4.4. Deneyler sonrası farklı plakalarda alüminyum kaplama film kalınlığı

		3 Tek 1 Çift Alüminyum					Çift Tel Aluminyum				
		1. Çevrim	2. Çevrim	3. Çevrim	Ortalama	Sapma	1. Çevrim	2. Çevrim	3. Çevrim	Ortalama	Sapma
1	Ö-1	79,3	75,3	77	77,2	1,6	121,3	131,9	134,4	129,2	5,7
1	Ö-2	90,2	85,2	88	87,8	2,0	123,7	133,5	135,9	131,0	5,3
1	Ö-3	84,5	80,5	82,5	82,5	1,6	124,5	134,2	137,8	132,2	5,6
1	Ö-4	88,5	85	85	86,2	1,6	125,5	135,0	138,2	132,9	5,4
1	Ö-5	91,3	86,8	86,8	88,3	2,1	120,9	132,0	134,6	129,2	5,9
2	Ö-1	94,7	90	90	91,6	2,2	126,9	141,0	139,8	135,9	6,4
2	Ö-2	104,5	99,6	99,6	101,2	2,3	126,0	142,4	140,6	136,3	7,3
2	Ö-3	116,2	112	112	113,4	2,0	125,4	142,4	139,2	135,7	7,4
2	Ö-4	101,4	96	96	97,8	2,5	125,4	143,0	140,3	136,2	7,7
2	Ö-5	97,8	91,8	91,8	93,8	2,8	120,7	136,8	136,3	131,3	7,5
3	Ö-1	101,7	96	96	97,9	2,7	123,8	144,9	141,4	136,7	9,2
3	Ö-2	99,8	92,8	92,8	95,1	3,3	121,1	143,6	140,6	135,1	10,0
3	Ö-3	109,5	102,5	102,5	104,8	3,3	120,8	144,7	140,6	135,4	10,4
3	Ö-4	98,8	92,7	92,7	94,7	2,9	118,3	141,0	140,1	133,1	10,5
3	Ö-5	101,5	96,3	96,3	98,0	2,5	116,1	135,7	135,1	129,0	9,1
4	Ö-1	94,1	90	90	91,4	1,9	122,1	143,6	140,6	135,4	9,5
4	Ö-2	100,2	96	96	97,4	2,0	122,5	144,0	139,2	135,2	9,2
4	Ö-3	97,5	93	93	94,5	2,1	121,9	142,6	138,0	134,2	8,9
4	Ö-4	97,8	92,3	92,3	94,1	2,6	120,3	143,4	138,0	133,9	9,9
4	Ö-5	92,7	88,7	88,7	90,0	1,9	117,9	138,8	133,4	130,0	8,9
Çan Ortalama		97,1	92,1	92,5	93,9	2,3	122,3	139,7	138,2	133,4	8,0

1- 3 tek 1 çift tel alüminyum yükleme setupı ile çift tel alüminyum yükleme setupı karşılaştırıldığında CFD analizleri sonrası öneri 1'de verilen durumun geçerliliği gözlemlenmektedir. Filaman sayısı azaltılmamış ancak alüminyum tel miktarı azaltılarak bulk akış durumu aza indirgenmiş olup, sapmalara bakıldığında gözle görülür (%70 civarında) azalma tespit edilmiştir.

Beslenen tel 10 gramdan 5,75 grama düşürülmüş, yaklaşık % 42 dozaj azalması % 30 civarında ortalama kalınlık azalmasına sebebiyet vermiştir.

2- Öte yandan plakaların kalınlıkları 3 çevrimde de farklılık göstermektedir. Elde edilen ölçüm sonuçları alüminyum tellerin buharlaşmaya başladığı andaki planet pozisyonlarının kaplama kalınlıklarını etkilediğini daha önceki CFD analizlerindeki 2. önerinin doğruluğunu kanıtlamaktadır.

Buharlaşma anında plakalar elektrotlara en yakın konumdayken film kalınlıkları yüksek, uzak konumdayken de kaplama kalınlıklarının düşük olması beklenir. Elektrotların Newton Fizik Modelleri'nin hakim olduğu evaporasyona yakın bölgeden yani merkezden uzaklaştırılması fayda sağlayacaktır. Ancak 1. önerinin yukarıda doğrulanmış ve

düzensizliğin azaltılarak homojenitenin yeterli seviyede olması, bu aksiyonun alaşım denemelerinden sonuç alınamaması, sonrasında tamamlanması kararını aldırmıştır.

3- Plakalar planete Şekil 4.19'da görülen siyah bölge üzerinden sabitlenmektedir. Bu bölgeye en yakın olan Ölçüm Noktası-5'te çift alüminyum tel beslenen durumda alüminyum kaplama kalınlıklarının daha düşük seviyede olduğu görülmektedir. Bunun nedeni, siyah bölgedeki metal yapının, planetin kendi ekseni etrafında dönüş hareketiyle girdap etkisi oluşturup alüminyum buharını bölgeden uzaklaştırması olarak yorumlanmıştır.

4- İnce film tabakası kalınlığın 80 nm boyutunu geçmesi ile geçirgenlik, saydamlık elemine olduğu için alüminyum kaplama sonrasında renk anlamında farklılık yaratmamaktadır. Yapılan ilk gözlemlerde homojenitenin, alaşımlardaki farklı elementlerin kompozisyonlarındaki değişimin ince film tabakasına direk etki ettiği ve renk farklılıklarını ortaya çıkardığı gözlemlenmiştir. Farklı elementlerin düşük güç ile evaporasyon öncesi sıvanma sıcaklığına getirilmesi ancak alaşıma aktarılacak ısının bütünüyle homojen şekilde aktarılması ve homojen evaporasyon ile sağlanacaktır. Bu da tel geometrisi ile doğrudan alakalıdır.

4.5 Alaşım Malzemeleri ile Yeterlilik Çalışmaları ve Yapılan Deneyler

Alüminyum metalize makinası çanı içerisinde toplamda 6 planet yer almaktadır. Planetler telli açık planetler ya da 2 ile 4 gözlü kısmi kaplama kapalı (kapaklı) planetler olabilmektedir. 4 gözlü planetler dış çap olarak 2 gözlülere göre daha büyük çaptadır ve kapalı olmaları çan içerisindeki alaşım buharının kaplanacak parçalar üzerine gelmesi ihtimalini düşürmektedir. Analizler sonucunda kapalı planetlerin rotasyonu sırasında oluşan türbülans ve girdap etkisiyle kısmi kaplama planetlerinin homojenite anlamında en zor olan planetler olmasıdır. Bu sebeple yeterlilik çalışmalarında öncelik bu planetlere verilmektedir.

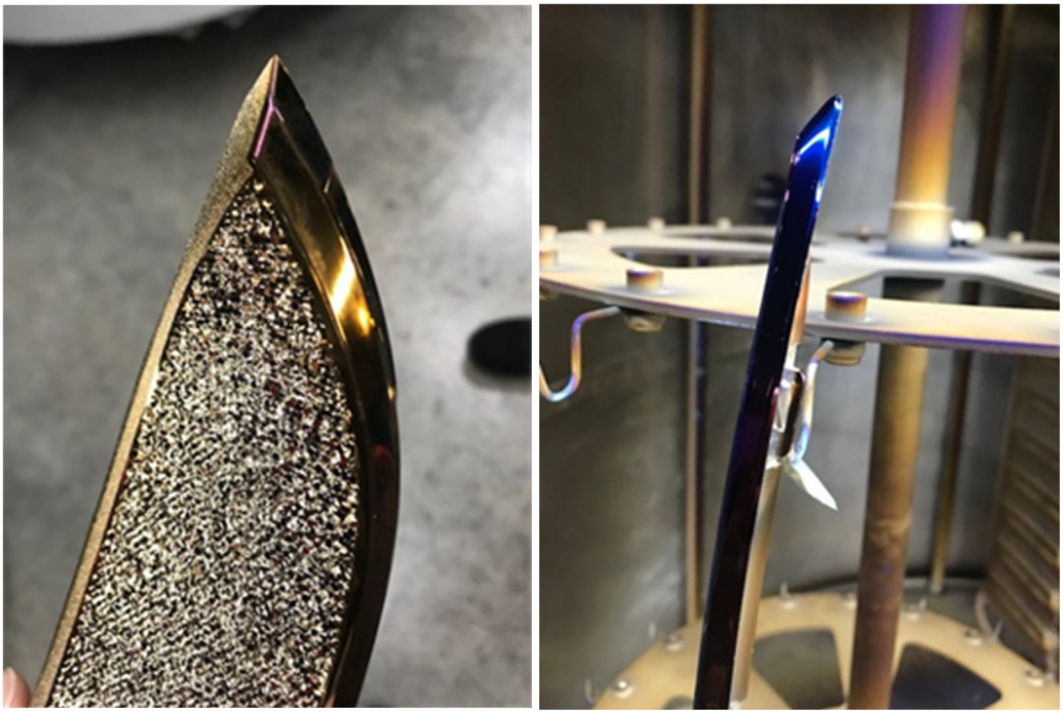
Evaporasyon profili PVD prosesi parametrelerine en olumlu sonuç veren ve çıkan renk olarak müşteri geribildirimlerine en uygun olan 2 tel CuSi3 (%97 Cu + %3 Si) ve CuAl8

(%92 Cu + %8 Al) için PVD prosesinde yeterlilik çalışmaları başlatılmıştır. Deneyler ve gözlemler aşağıda sıralanmıştır.

Filamana yüklenen tel miktarlarında değişiklik oldukça, proses parametrelerinde ayrıca değişiklik yapılarak tellerin tam olarak evapore olması ya da fazla akım ve hızlı evoprasyon profili ile tel atığı olmaması sağlanmış, olgunlaştırılan parametreler üzerinden tüm denemeler yürütülmüştür.

4.5.1 Deneme 1

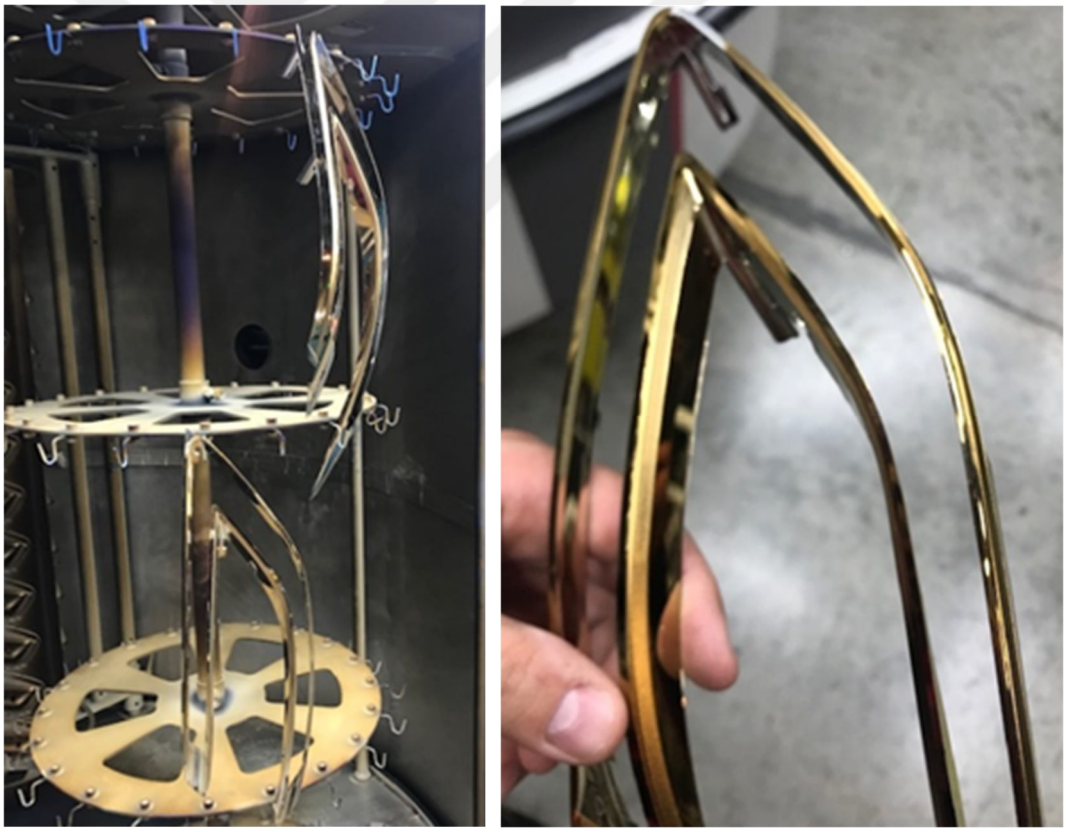
Parçalar tek bir çevrimde önce alüminyum, ardından bakır alaşımı CuAl8 tel ile açık planetler kullanılarak kaplanmıştır. 22 adet filamana 18 cm CuAl8 alaşımından yüklenmiştir. Parça yüzeylerinde homojen renk elde edilememiştir. Özelikle uç kısımlarda koyuluk ve gökkuşağı efekti gözlemlenmiştir. Tel miktarının fazla olması, açık planetlerin kullanılması ile çan içerisindeki yüzey alanının, ayrıca parça sayısının da az olması ile renkte koyulaşma, özellikle dönme yönüne göre kenar kısımlarda akümülasyon tetiklenmiş ve koyulaşmalar meydana gelmiştir (Şekil 4.21).



Şekil 4.21. Renklenme ve koyulaşma meydana gelen parçalar

4.5.2 Deneme 2

Parçalar tek bir çevrimde önce alüminyum, ardından bakır alaşımı CuAl8 tel ile açık planetler kullanılarak kaplanmıştır. Filaman sayısı düşürülerek analiz sonuçları doğrulanmaya çalışılmıştır. 14 adet filamana 18 cm CuAl8 alaşımından yüklenmiştir. Çıkan parçalarda homojenitede gelişme kaydedilmiştir ancak dönme yönüne ve özellikle flaman hizasına gelen dikey kısımlarda koyulaşma tespit edilmiştir. Filaman hizalarında koyulaşma olması filamanlara fazla malzeme yüklenmiş olması olarak yorumlanabilir. Bu sebeple, bir sonraki denemede filamanlara yüklenen malzeme miktarı düşürülmüştür. Parça yan yüzeylerinde dikine kısımlarda ton farklılığını azaltabilmek amacıyla filaman sayısında artış yapılarak homojenite problemlerinin azalması hedeflenmektedir (Şekil 4.22).



Şekil 4.22. Filaman hızlarına göre koyulaşma olan parçalar

4.5.3 Deneme 3

Parçalar tek bir çevrimde önce alüminyum, ardından bakır alaşımı CuAl8 tel ile açık planetler kullanılarak kaplanmıştır. Filaman sayısı arttırılmıştır, filamana yüklenen alaşım tel miktarı azaltılmıştır. 18 adet filamana 12 cm CuAl8 alaşımından yüklenmiştir. Parça homojenitesi en iyi seviyeye gelmiştir ancak dönme yönüne göre dikine homojenite farklılıkları az da olsa gözlemlenmektedir (Şekil 4.23). Bunların giderilmesi için tel miktarı sabit tutularak filaman sayısı birer birer arttırılmıştır. En uygun homojenite 20 filaman ile sağlanmıştır. 20 filaman üstüne çıkıldıkça lokal koyulaşmaların arttığı gözlemlenmiştir.

20 filaman ile kaplanan çan sayısı arttırılarak 30 kapakta dikine homojenite yeterliliği aranmıştır. Sabit parametreler ve açık planetler ile dikine kenar kısımlarda ve ayrıca dönme yönüne göre farklılık gözlemlenmemektedir. Bundan sonraki yapılacak çalışmalarda renk tonunun ayarlanması yani kalınlığın azaltılarak belirlenen tonun yakalanması sağlanmıştır.



Şekil 4.23. Filaman sayısı belirlenmiş dikine homojenite sağlanmış parçalar

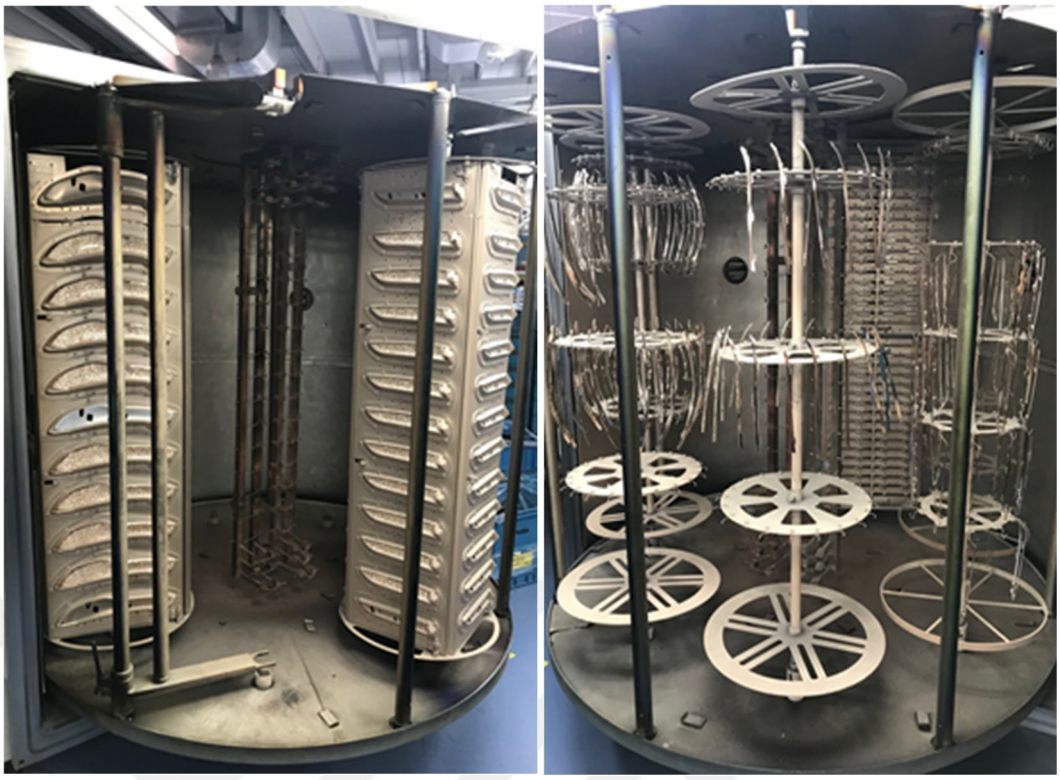
4.5.4 Deneme 4

Parçalar tek bir çevrimde önce alüminyum, ardından bakır alaşımı CuAl8 tel ile açık planetler kullanılarak kaplanmıştır. Filaman sayısı arttırılmıştır, filamana yüklenen alaşım tel miktarı azaltılmıştır. 20 adet filamana 10 cm CuAl8 alaşımından yüklenmiştir. Parça homojenitesinde değişiklik bulunmamaktadır. Ton istenilen şekilde olmadığından 1'er cm azaltılarak çalışmalar yürütülmüştür. Denemeler sonunda en uygun renk tonu elde edilen alaşım besleme miktarları Çizelge 4.5'de verilmiştir. Farklı alt komponentlerin hepsinin renk homojenitesine uygun olması için aynı anda tüm alt parçaların mümkün olduğunca aynı çanda üretilmesi için de denemeler de ayrıca tamamlanmıştır (Şekil 4.24).

Çizelge 4.5. En uygun renk tonu ve homojenite için alüminyum ve alaşım besleme miktarları

Rose Gold (CuSi3) (240 cm=16,85gr) (1cm=0,0702 gr)			**Alüminyum (5 g)**		
1. Flaman	12	cm	1. Flaman	0,25	g
2. Flaman	12	cm	2. Flaman	0,25	g
3. Flaman	12	cm	3. Flaman	0,25	g
4. Flaman	12	cm	4. Flaman	0,25	g
5. Flaman	12	cm	5. Flaman	0,25	g
6. Flaman	12	cm	6. Flaman	0,25	g
7. Flaman	12	cm	7. Flaman	0,25	g
8. Flaman	12	cm	8. Flaman	0,25	g
9. Flaman	12	cm	9. Flaman	0,25	g
10. Flaman	12	cm	10. Flaman	0,25	g
11. Flaman	12	cm	11. Flaman	0,25	g
12. Flaman	12	cm	12. Flaman	0,25	g
13. Flaman	12	cm	13. Flaman	0,25	g
14. Flaman	12	cm	14. Flaman	0,25	g
15. Flaman	12	cm	15. Flaman	0,25	g
16. Flaman	12	cm	16. Flaman	0,25	g
17. Flaman	12	cm	17. Flaman	0,25	g
18. Flaman	12	cm	18. Flaman	0,25	g
19. Flaman	12	cm	19. Flaman	0,25	g
20. Flaman	12	cm	20. Flaman	0,25	g

Gold (CuAl8) (120 cm=7,34gr) (1 cm=0,0612gr)			**Alüminyum (5 g)**		
1. Flaman	6	cm	1. Flaman	0,25	g
2. Flaman	6	cm	2. Flaman	0,25	g
3. Flaman	6	cm	3. Flaman	0,25	g
4. Flaman	6	cm	4. Flaman	0,25	g
5. Flaman	6	cm	5. Flaman	0,25	g
6. Flaman	6	cm	6. Flaman	0,25	g
7. Flaman	6	cm	7. Flaman	0,25	g
8. Flaman	6	cm	8. Flaman	0,25	g
9. Flaman	6	cm	9. Flaman	0,25	g
10. Flaman	6	cm	10. Flaman	0,25	g
11. Flaman	6	cm	11. Flaman	0,25	g
12. Flaman	6	cm	12. Flaman	0,25	g
13. Flaman	6	cm	13. Flaman	0,25	g
14. Flaman	6	cm	14. Flaman	0,25	g
15. Flaman	6	cm	15. Flaman	0,25	g
16. Flaman	6	cm	16. Flaman	0,25	g
17. Flaman	6	cm	17. Flaman	0,25	g
18. Flaman	6	cm	18. Flaman	0,25	g
19. Flaman	6	cm	19. Flaman	0,25	g
20. Flaman	6	cm	20. Flaman	0,25	g

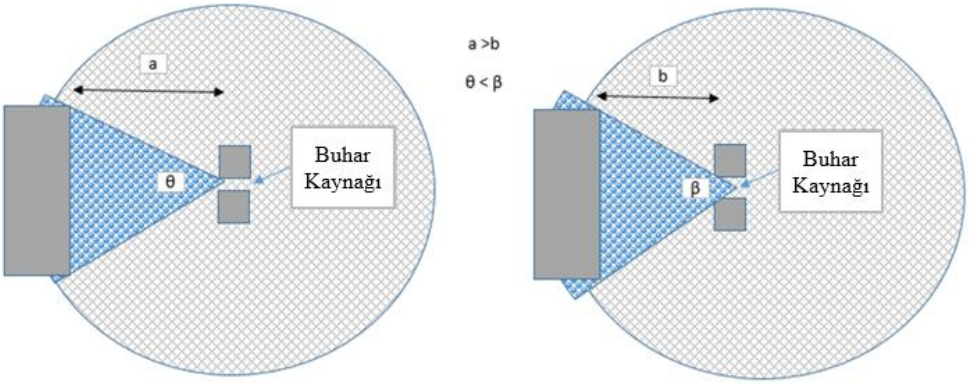


Şekil 4.24. Tüm alt parçaların aynı çanda kaplanması için belirlenmiş planet yerleşimi

Denemeler sonucunda en uygun renk tonu ve homojenite için kararlaştırılan proses çıktısı için evaporant tel ve filaman dizilimi yukarıdaki gibidir.

4.5.5 Deneme 5

Daha önce belirlenen filaman sayısı ve her filamana yüklenecek alaşım tel miktarı sabit tutularak elektrot pozisyonunun renk üzerindeki etkisinin incelenmesi amacıyla denemeler yürütülmüştür (Şekil 4.25). Daha önce belirlenen proses parametreleri kullanılmıştır.



Şekil 4.25. Elektrotun parçaya yaklaşması ile birim yüzeye gelen atom sayısının artması

Alüminyum ve bakır alaşımlı tel miktarları sabit tutularak makine çanı içerisindeki elektrotların planetlere olan yakınlığı arttırılmıştır. 20 adet filamana 6 cm CuAl8 alaşımından yüklenmiştir. Bu deneme sonrasında yine homojen ancak bir önceki denemeye göre farklı bir tonda renk elde edilmiştir. Böylece elektrotların parçaya olan uzaklığının renk tonuna etkisi olduğu kanıtlanmıştır. Elektrotlar parçaya yaklaştıkça renk tonunda koyulaşma meydana gelmektedir. Elektrotlar parçaya yaklaştıkça, buhar kaynağı tarafından oluşturulan yayılma alanını daha fazla kesmektedir ve birim yüzeye depozit olan atom sayısı artmaktadır (Şekil 4.26).



Şekil 4.26. Elektrotun parçaya yakınlık uzaklığa göre farklı konumlandırılması

4.6. Spektrometre Ölçümleri

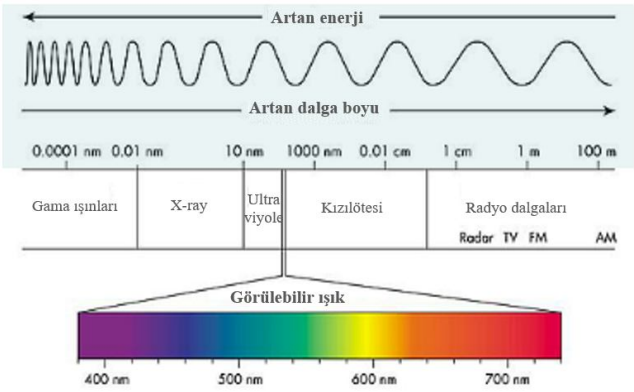
4.6.1 Işık için dalgaboyu tanımı

Dalga boyu, bir dalga şeklinin tekrarlayan birimleri (iki tepe noktası) arasındaki mesafeyi belirtir. Dalga boyu, Yunanca'daki lamda (λ) harfi ile gösterilmektedir. Dalga boyu metre, mikrometre ve nanometre cinsinden ölçülür. Dalga boyu ne kadar küçükse, frekans o kadar yüksek demektir (Yılmaz, 2019).

Işık bir elektromanyetik dalgadır. Işık, küçük enerji paketlerinin bir noktadan diğerine gitmesiyle hareket halindedir. Bu hareket esnasında parçacıklar bir dalga şeklini izler. Bu dalga şeklinin iki zirvesi arasındaki yatay mesafe dalga boyunu belirtir (Yılmaz, 2019).

Işığın yalnızca küçük bir bölümü (dalga boyu) çıplak gözle görülür. 400-750 nm aralığında dalga boyuna sahip ışığı görebiliriz ve bu yüzden belirtilen aralıktaki ışığa görünür ışık adı verilir. Bundan daha uzun dalga boyları kızılötesi; daha kısa dalga boyları ise ultraviyole olarak adlandırılır (Şekil 4.27) (Yılmaz, 2019).

Gama ışınları, röntgen ışınları, mikrodalgalar ve radyo dalgaları da aslında birer ışıktır. Işığın farklı dalga boyları, onları farklı renkte algılamamıza yardımcı olur. Yani dalga boyu aslında ışığın rengini belirler (Yılmaz, 2019).



Şekil 4.27. Elektromanyetik spektrum (Yılmaz, 2019)

Mavi: 450-500 nm

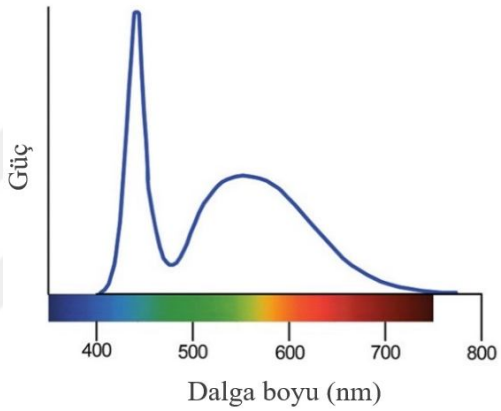
Yeşil: 500-570 nm

Sarı: 570-590 nm

Turuncu: 590-620 nm

Kırmızı: 620-750 nm

Belirtilen dalga boyu aralığında yer alan renkler birbiriyle aynı değildir. Mesela 500 nm dalga boyundaki yeşil, maviye daha yakın bir renktedir. 570 nm dalga boyundaki yeşil ise sarı renge daha yakın bir tondadır (Şekil 4.28) (Yılmaz, 2019).



Şekil 4.28. Beyaz ışık standart spektrometresi (Yılmaz, 2019)

4.6.2 Yüksek yansıtıcı değere sahip metaller

Gümüş, görülebilir kızılötesi bölgesinde tüm metaller içerisinde %93 gibi en yüksek yansıtıcılığa sahiptir. Bu sebeple yüksek yansıtma ihtiyacı olan güneş yoğunlaştırıcı olarak kullanılmaktadır. Düşük demir içeren yüksek saflıkta camlar, sistemin yansıtma verimliliğini düşürmemek için substrat olarak kullanılır. Camdaki demir radyasyon emilimi arttırmaktadır (Boccas ve diğerleri, 2006; García-Segura ve diğerleri, 2016; Luciano ve Onofrio, 2015; Shen ve diğerleri, 2016; Wang ve diğerleri, 2017). Ağır, kırılgan ve pahalı aynalar yerini polimerik substratlar yüzeyine kaplanmış alüminyum yansıtıcılı aynalara bırakmaktadır. (García-Segura ve diğerleri, 2016).

Vakum ortamında termal buharlaşma ile polimerik alüminyum aynalar elde edilebilmesi için yıllardır birçok çalışma yürütülmektedir (An ve diğerleri, 2013; Hou ve diğerleri, 2007; Lampert, 1981; Li ve diğerleri, 2014; Society of Vacuum Coaters, 2015; Struller ve diğerleri, 2014). Cam ayna üretimi ile kıyaslandığında gereksinimin az olması düşük üretim maliyetleri getirmektedir (Hernández ve diğerleri, 2009). Bunun yanında alüminyum gümüşe oranla daha düşük korozyon direncine sahiptir ve nispeten ucuzdur (Cushing, 2011). Polikarbonat malzeme üzerine kaplanmış alüminyum kaplaması %90 yansıtma oranına kadar yükselebilir. Bu değer, dalga boyuna göre biraz değişebilir. Rose-Gold alaşımı CuSi3; %97 Cu + %3 Si ve Gold alaşımı CuAl8 %92 Cu + %8 Al kompozisyonları için herhangi yansıtma değeri bilinmemektedir. Spektrometre ölçümleri ile bu değerler ortaya çıkarılmıştır.

Spektrometre ölçüm metodu ve beklentiler. Üretilmiş plakaların spektrometre ölçümlerinden beklentiler aşağıda sıralanmıştır.

1- Kaplamalar tüm yüzeylerde homojenliğe sahiptir, bu da kaplama kalınlığının tüm yüzey noktalarında aynı olması gerektiği anlamına gelir. Başlıca farklılıklar olmamalıdır.

2- Kaplama rengi her noktada aynı olmalıdır. Bu da yine homojenlikle ilgilidir, bu nedenle renk ölçümleri spektrometrik yöntemle yapılacaktır.

3- Kaplama rengi kırmızı ışıkta Al ile aynı reflektans değere sahip olup ortalama %65 civarındadır. Kaplama kalitesine (esmer ya da parlak olmasına) göre ± %15 toleransta değişebilir. Yansıtma değeri kayıbının az olması gerekli ışık değerlerinin sağlanması için avantaj sağlayacaktır.

Kalibre edilmiş spektrometre ve standart ışık kaynağı ile yansıtma ölçümleri Sakarya Üniversitesi laboratuvarında iki ana renk numuneleri için tamamlanmıştır (Şekil 4.29).



Şekil 4.29. Spektrometre ölçüm metodu

Altın sarısı ve rose-gold altın sarısı için belirlenen proses şartlarına göre üretilen toplam 24 numune laboratuvara ulaştırılmıştır. Yeterliliğin tüm çanda gözlemlenebilmesi ve ispatı için aşağıdaki kabullere göre numuneler pozisyonlandırılmıştır (Şekil 4.30).



Şekil 4.30. Plakaların planet üzerine pozisyonlandırılmaları ve kaplanmış halleri

1- Toplam 2 planet çan içerisine birbirine en uzak ve simetrik olacak şekilde konumlandırılmıştır. “P1” ve “P2” olacak şekilde adlandırılmıştır.

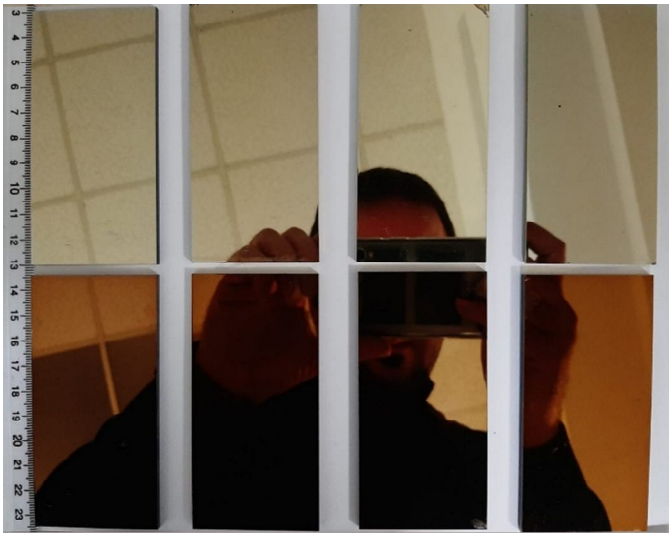
2- Her planette yukarıdan aşağıya aynı yüzde 12 numune konumlanabilmektedir. Bunları her biri “S1” - “S12” olarak adlandırılmıştır.

3- Her planette maksimum 4 yüz olabilmektedir. Her yüz için “Y1” - “Y4” olarak adlandırma sağlanmıştır.

Ölçüm sonuçları birbirlerine uzak 2 planet, planet üzerinde yukarıdan aşağıya farklı sıralar ve her planetin farklı yüzeyindeki parçalar için karşılaştırılmıştır. Kalınlık olarak elde edilmiş homojenite, alaşım kaplaması sonrasında elde edilen renklerin görsel homojenitesi sonrası spektrometre ölçümleri ile nicel gözlem olarak karşılaştırılmıştır. Numuneler ve adlandırılmaları Çizelge 4.6 ‘da paylaşılmıştır. 10 x 5 cm boyundaki her plaka için 4 köşeden ölçümler alınmıştır (Şekil 4.31). Bu değer dalga boyuna göre biraz değişebilir.

Çizelge 4.6. Spektrometre ölçümüne girecek numunelerin pozisyonları

Renk	Altın Sarısı	Rose-Gold
No	Numune Adı	Numune Adı
1	P1-Y1-S2	P1-Y1-S7
2	P2-Y1-S2	P1-Y2-S7
3	P1-Y1-S4	P1-Y3-S7
4	P2-Y1-S4	P1-Y4-S7
5	P1-Y1-S6	P2-Y1-S7
6	P2-Y1-S6	P2-Y2-S7
7	P1-Y1-S12	P2-Y3-S7
8	P2-Y1-S12	P2-Y4-S7
9		P1-Y1-S12
10		P1-Y2-S12
11		P1-Y3-S12
12		P1-Y4-S12
13		P2-Y1-S12
14		P2-Y2-S12
15		P2-Y3-S12
16		P2-Y4-S12



Şekil 4.31. Spektrometrede ölçülecek 20 x 10 cm plakalar

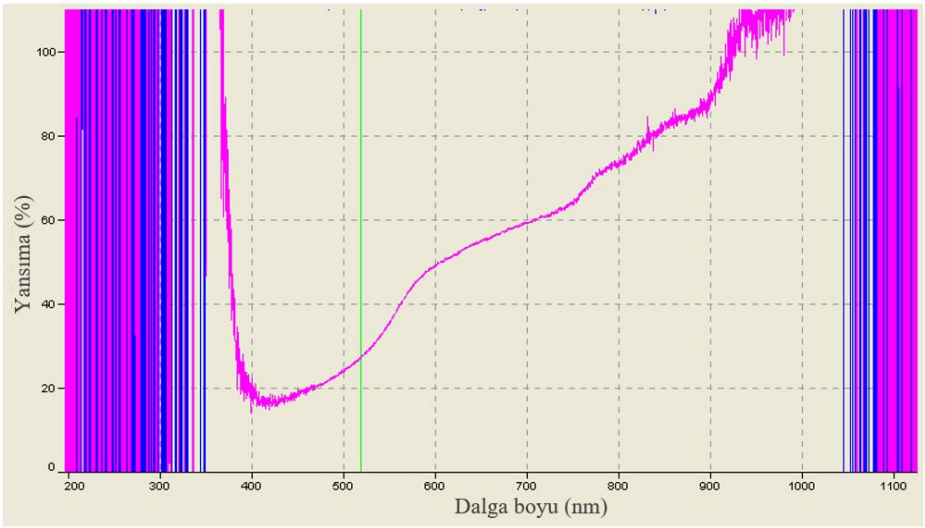
Spektrometre ölçüm sonuçları ve değerlendirme. AC238 ve mevcut diğer ürünlerde ışık kaynağı olarak beyaz ışık "B BIN" kodu kullanılmaktadır. Pozisyon ve fren fonksiyonu için gerekli kırmızı renk, dış lensin renkli olmasıyla sağlanmaktadır.

Yeni üründe ise dış lens şeffaf olup, kırmızı renk reflektöre sağlanacak ışık kaynağı ile sağlanmıştır. Alüminyuma göre yansıtma değerinin düşmesi söz konusudur. Yansıtma değeri düşüşünden meydana gelecek ışık şiddeti düşüşü "OSRAM super-red "C BIN" kodlu ledler kullanılarak giderilmiştir. BIN kodu değişimi ile elektronik devrede herhangi bir şey değişmeden %20'ye yakın ışık şiddeti artışı sağlanmıştır. Yeni süper-red ışık sağlayan ledler için dalgaboyu 632 ve 633 nm'dir. Yapılacak tüm ölçümler 632nm dalgaboyu için değerlendirilmiştir.

Yeşil ile işaretlenmiş numunelerin kaplama yüzeyleri yansıtıcılığı, plakalar kendi içlerinde değerlendirildiğinde mükemmel homojenliğe ve yansıtıcılığa sahiptir. Farklı plakalar için kaplama yansıtma değerleri göz önüne alındığında %30,61 ile %62,95 arasında farklılık göstermektedir. Bu %32,34'lük değişiklik demektir ve üst kabul sınırıdır. Geniş bir yüzeyde yansıtıcılık en düşük seviyede seyreder iken, aynı alanda keskin şekilde yüksek yansıtıcı yüzey olması gözle belirgin şekilde farkedilme sağlar (mat yüzeyden parlak yüzeye keskin geçiş gibi). Ancak 5 x 10 cm plakalarda maksimum yansıtma farkı %13,17 olduğu için reflektör yüzeyinde yansıtıcılık değeri gözle

hissedilemeyecek farkta olarak yorumlanabilir. Bu değer optik açıdan çok düşük bir değerdir, alümiyum kaplama sonrası %15'e kadar farklılıklar yine oluşabilmektedir. İnsan için ışık şiddeti farkı farkedilebilirlik sınırı %30'dur, kimi kayıp olan gözlerde bu fark %50'lere kadar çıkmaktadır. Homojenite doğrulaması komple ürünün fotometri ölçümleri yapıldıktan sonra regülasyon değerlerine karşılaştırılması ile doğrulanacaktır.

Farklı 2 planet ve dikine sıralarda (S7 ve S12) ortalama ölçüm değerleri karşılaştırıldığında parça pozisyonu aşağıya yaklaştıkça yansıtıcılık değerinin düştüğü tespit edilmiştir. Tungsten filamanların parçalara yakınlaştırılması ile yansıtıcılık değerleri üstlere taşınabilir (Şekil 4.32).



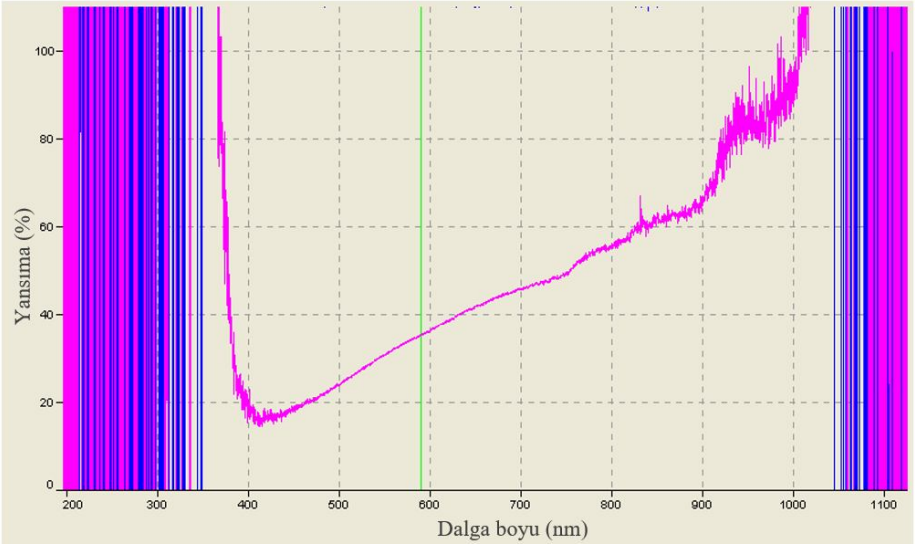
Şekil 4.32. Rose-gold spektrometre ölçümü sonrası 1 nokta için ortaya çıkan grafik

Çizelge 4.7'de yeşil ile işaretlenmiş numunelerin kaplama yüzeylerinin yansıtıcılığı plakalar kendi içlerinde değerlendirildiğinde mükemmel homojenliğe ve yansıtıcılığa sahiptir. Farklı plakalar için kaplama yansıtma değerleri göz önüne alındığında %30,00 ile %56,07 arasında farklılık göstermektedir. Bu %26,07'lük değişiklik demektir ve üst kabul sınırı %30'un altında kalmıştır.

Çizelge 4.7. Rose-gold renk plakalar spektrometre ölçüm sonuçları

Rose-gold	**CuSi3**		**Yansıtma @632nm**			
Numune Adı	**Nokta1**	**Nokta2**	**Nokta3**	**Nokta4**	**Ortalama**	**Fark**
P1-Y1-S7	%53,00	%57,00	%55,00	%54,00	%54,80	%4,00
P1-Y2-S7	%52,8	%**62,95**	%51,25	%49,78	%53,20	%**13,17**
P1-Y3-S7	%38,20	%37,85	%44,32	%42,96	%40,80	%6,47
P1-Y4-S7	%37,68	%42,83	%47,26	%43,32	%42,80	%9,58
P2-Y1-S7	%36,11	%40,86	%43,00	%40,98	%40,20	%6,89
P2-Y2-S7	%39,71	%35,03	%39,91	%39,08	%38,40	%4,88
P2-Y3-S7	%52,28	%47,50	%48,15	%59,00	%51,70	%**11,50**
P2-Y4-S7	%37,68	%42,83	%42,27	%43,31	%42,80	%5,63
P1-Y1-S12	%40,18	%39,60	%35,56	%39,72	%38,80	%4,62
P1-Y2-S12	%32,60	%32,11	%32,25	%32,47	%32,40	%0,49
P1-Y3-S12	%34,90	%33,14	%**30,61**	%30,87	%30,90	%4,29
P1-Y4-S12	%31,54	%36,00	%34,06	%31,49	%32,00	%4,51
P2-Y1-S12	%35,61	%35,85	%37,27	%37,16	%36,50	%1,66%
P2-Y2-S12	%39,23	%44,95	%42,56	%38,87	%41,40	%6,08
P2-Y3-S12	%41,13	%46,67	%43,79	%41,08	%41,40	%5,59
P2-Y4-S12	%35,18	%38,13	%35,09	%32,55	%34,50	%5,58
Ortalama	%39,86	%42,08	%41,40	%41,04	%40,79	%5,93
				Min	**Max**	**Max fark**
				%**30,61**	%**62,95**	%**32,34**

Rose-gold ile karşılaştırıldığında maksimum yansıtıcılık değeri %56,07 olarak elde edilmiştir. Daha açık renkte olması ile daha iyi yansıtıcılık özelliği beklenirken daha kötü değerlerin çıkmasının sebebi kırmızı rengi elde elde etmek için süper-red ledler kullanılacak olması ve plakaların 632 nm dalga boyundaki yansıtıcılık değerlerinin ölçülmesidir (Şekil 4.33). Başka bir deyiş ile rose-gold kaplama kırmızıya daha yakın bir renk olduğu için daha esmer (karanlık) olmasına rağmen daha yüksek yansıtıcılık özelliği Çizelge 4.8'de göstermiştir.



Şekil 4.33. Gold spektrometre ölçümü sonrası 1 nokta için ortaya çıkan grafik

Farklı 2 planet ve dikine sıralarda (S2, S4, S6 ve S12) ortalama ölçüm değerleri karşılaştırıldığında parça pozisyonu aşağıya yaklaştıkça gold için yansıtıcılık değerinin düşmediği tespit edilmiştir. Rose-Gold alaşımı CuSi3; %97 Cu + %3 Si ve Gold alaşımı CuAl8 %92 Cu + %8 Al kompozisyondan oluşmaktadır. Atomik ağırlıklarına bakıldığında bakırın AMUsunun en yüksek olduğu söylenebilir. Rose-gold renginin aşağıya doğru koyulaşması için aşağıdaki yorumlar yapılmıştır.

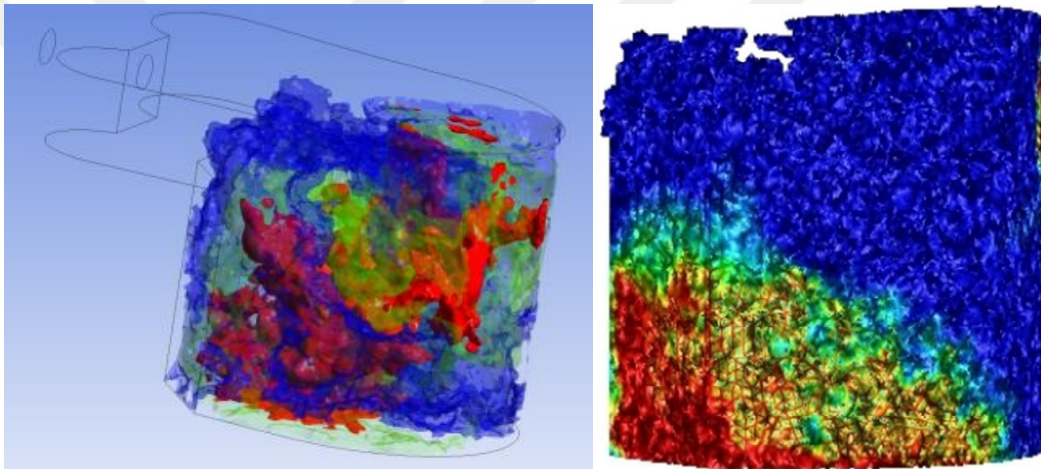
Çizelge 4.8. Gold renk plakalar spektrometre ölçüm sonuçları

Gold	CuAl8		Yansıtma @632nm			
Numune Adı	Nokta1	Nokta2	Nokta3	Nokta4	Ortalama	Fark
P1-Y1-S2	%31,98	%39,78	%38,96	%40,06	%35,95	%8,08
P2-Y1-S2	%49,92	%51,14	%48,69	%50,56	%50,08	%2,45
P1-Y1-S4	%37,66	%37,55	%39,94	%46,19	%39,09	%8,64
P2-Y1-S4	%44,54	%49,36	%44,63	%52,41	%47,74	%7,87
P1-Y1-S6	%36,09	%34,21	%30,40	%30,93	%32,91	%5,69
P2-Y1-S6	%32,30	%34,77	%32,74	**%30,00**	%32,45	%4,77
P1-Y1-S12	%51,97	%53,04	**%56,07**	%50,26	%52,84	%5,81
P2-Y1-S12	%46,91	%45,62	%47,94	%40,00	%44,97	%7,94
Ortalama	%41,42	%43,18	%42,42	%42,55	%42,00	%6,41
				Min	**Max**	**Max fark**
				%30,00	**%56,07**	**%26,07**

1- Rose-gold için 16,85 gr (240cm) ve gold için 7,34 gr (120cm) beslenmektedir.

2- Daha önce analiz kesit görüntülerinde vakum ağzına doğru çökme gerçekleştiği gözlemlenmiştir ve alüminyum için yapılan analizler bakırda daha yoğun gözlemlenmiştir (Şekil 4.34).

1 Atomik Kütle Birimi = 1.661 x 10^-24 gram
26.9815 AMU Aluminum Al
28.0855 AMU Silicon Si
63.546 AMU Copper Cu



Şekil 4.34. Alüminyum buharının çan içerisindeki konsantrasyonu ve vakum ağzına aşağı doğru çökme

Spektrometre ölçüm sonuçları aşağıdaki gibi özetlenebilir.

1- Rose gold minimum yansıtma değeri: %30,61
Maksimum yansıtma değeri : %62,95
Maksimum fark : %32,34

2- Gold minimum yansıtma değeri: %30,00
Maksimum yansıtma değeri : %56,07
Maksimum fark : %26,07

3- Tüm yüzey-sıra ve farklı planetlerde kaplı parçalar için max yansıtma farkı %32,34'dür. Keskin geçiş söz konusu değil ise kaplama homojenliği göz ile fark edilemeyeceği için homojen olarak kabul edilebilir.

4- Alt sıralara inerken rose-gold için yansıtma azalmaktadır. Bakır konsantrasyonu ve belirlenen dozaj daha fazladır. Bunun etkisi olduğu düşünülmektedir.

5- Rose-gold kaplama kırmızıya daha yakın bir renk olduğundan daha esmer (karanlık) olmasına rağmen daha yüksek yansıtıcılık özelliği göstermiştir.

6- Mevcut AC238 serisinde çamurluk için HV'de toplam 5,5 cd ışık şiddeti mevcuttur ve alüminyum yansıtma değeri ortalama %65 olarak öngörülmüştür. Gold yansıtma değeri daha düşük ve minimum-maksimum ortalamasından %43 yansıtma değeri üzerinden hesap yenilenir ise 3,64 cd ışık şiddeti öngörülebilir. ECE ve SAE minimum kabul değeri 4 cd ışık şiddetidir. Bitmiş üründe fotometri ölçümleri ile sonuçlar doğrulanmıştır.

4.7. Montaj Konsepti

AC238 Mercedes E Coupe Cabrio araç için iki farklı arka lamba versiyonunun üretim için konsept çalışılmıştır. Daimler AG ile yapılan görüşmeler ile aşağıda belirlenen 2 versiyon kosept tasarımı tamamlanmıştır.

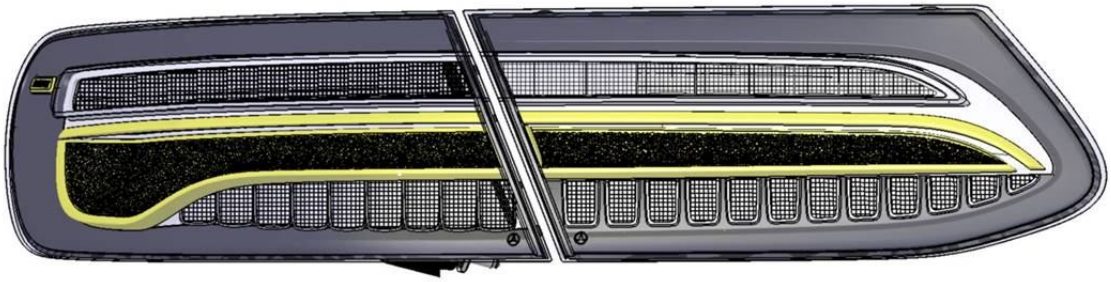
4.7.1 ECE ve SAE regülasyonuna uygun altın sarısı komponentlere sahip arka stop lambası

Alt bileşenler;

1- Şeffaf dış lens, normalde kırmızı ve şeffaf olmak üzere 2 renktir.
2- Pozisyon fonksiyonu reflektörü (stardust), pozisyon üstündeki çıta ve Mercedes-Benz" amblemi altın sarısı renkte olmalıdır. Normalde belirtilen 3 parça alüminyum kaplıdır.
3- Gövde arduvaz grisi (schiefergrau) olmalıdır. Normalde gövde siyah malzemeden üretilmektedir. Bu lazer kaynak prosesinde de farklılık gösterecektir.

4- Arka stop, kusursuz kalitede ve tüm fonksiyonlar çalışır halde üretilecektir. Seri üretim kalite kriteleri gözetilecek ve özellikle altın sarısı altın kaplamalı elemanlarda herhangi bir kusur ya da kaplamada yeterlilik alınmış parametreler ile homojenlikte farklılık olmaması sağlanacaktır.

Komple hale getirilmiş ürün aşağıdaki gibi görülecektir (Şekil 4.35).



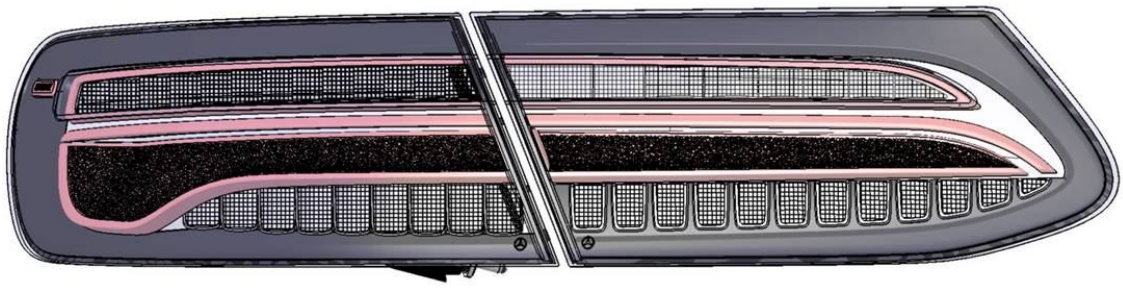
Şekil 4.35. Altın sarısı komponentlere sahip arka stop lambası

4.7.2 ECE ve SAE regülasyonuna uygun rose-gold altın sarısı komponentlere sahip arka stop lambası

Alt bileşenler;

1- Şeffaf dış lens, normalde kırmızı ve şeffaf olmak üzere 2 renktir.
2- Pozisyon fonksiyonu reflektörü (stardust), pozisyon üstündeki çıta, Mercedes-Benz" amblemi ve en üstte kalan sinyal fonksiyonu etrafındaki çıta rose-gold altın sarısı renkte olmalıdır. Normalde belirtilen 3 parça alüminyum kaplıdır.
3- Gövde arduvaz grisi (schiefergrau) olmalıdır. Normalde gövde siyah malzemeden üretilmektedir. Bu lazer kaynak prosesinde de farklılık gösterecektir.
4- Arka stop kusursuz kalitede ve tüm fonksiyonlar çalışır halde üretilecektir. Seri üretim kalite kriteleri gözetilecek ve özellikle altın sarısı altın kaplamalı elemanlarda herhangi bir kusur ya da kaplamada yeterlilik alınmış parametreler ile homojenlikte farklılık olmaması sağlanacaktır.

Komple hale getirilmiş ürün aşağıdaki gibi görülecektir (Şekil 4.36).



Şekil 4.36. Rose-Gold altın sarısı komponentlere sahip arka stop lambası

2 versiyon için de yeterlilikler yürütüleceğinden minimum 30 set yukarıda belirtilen kritelere uygun çamurluk ve bagaj; sağ-sol parçalar üretilecektir. Bu ürünlerin komple hale getirilmesi sağlanarak daha önce ispatlanmış kaplama ve renk homojenitesi bitmiş üründe gözlemlenecektir.

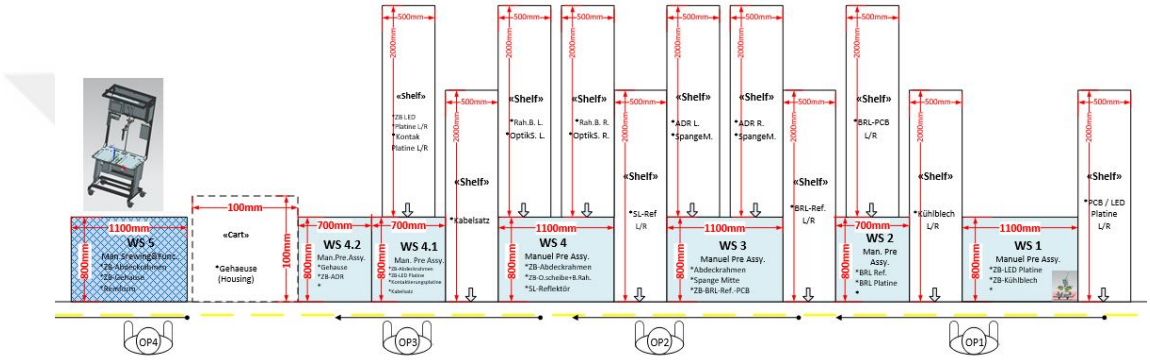
Bu ürünlere ayrıca yaşlandırma testleri uygulanacaktır. Fonksiyonel açıdan optik gereksinimlerin yanı sıra alt komponentlerin dayanımı da sağlanmaya çalışılmıştır. Daha önce HMDSO film tabakasının dayanımını arttırmak için sürdürülmüş çalışmalar bu çalışmada kullanılacaktır, özellikle HMDSO tabakasının alüminyum üzerine adezyonu sağlanmıştır (Vallon ve diğerleri, 1996). Bu sebeple Tetraetoksilan (TEOS) ya da heksametildisiloksan (HMDSO) silisyum-oksit film, biriktirme amacıyla, polimerizasyon reaksiyonu için besleme hammaddesi olabilir (Ebihara ve diğerleri, 1993).

4.7.3 Belirlenen dış lensi şeffaf olan üründe kırmızı ışığın elde edilmesi

AC238 ve mevcut diğer ürünlerde ışık kaynağı olarak beyaz ışık "BIN B" kodu kullanılmaktadır. Poziyon ve fren fonksiyonu için gerekli kırmızı renk, dış lensin renkli olmasıyla sağlanmaktadır. Yeni üründe dış lensin şefaf olması ile kırmızı renk reflektöre sağlanacak ışık kaynağı ile elde edilecektir. "OSRAM super-red "BIN C" kodu ledler kullanılacaktır. Bu Ledler için dalga boyu 632 ve 633 nm'dir.

4.7.4 Çamurluk montaj üretimi

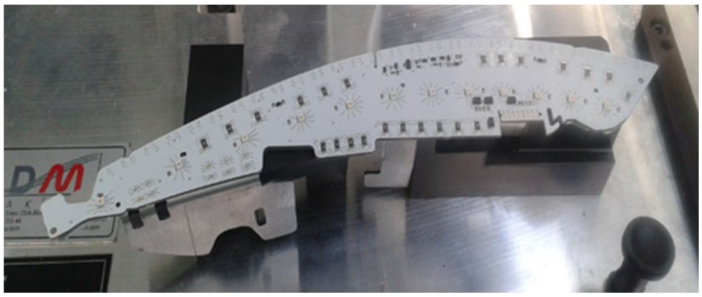
AC238 hattında üretilen SWL (Çamurluk) ve HDL (Bagaj) parçalarında gri renk malzeme ile kaplanan SL reflektör, orta çıta (spange mitte) ve çerçeve (rahmen) parçaları kullanılmaktadır. Yapılan deneme kapsamında, seride kullanılan gri renk kaplı parçaların yerine, rose gold renk malzeme ile kaplanan SL reflektör, orta çıta ve çerçeve parçaları kullanılmış ve seri şartlar ile karşılaştırmaları yapılmıştır. Seri üretim ile aynı koşullarda parça montajı yapılmıştır (Şekil 4.37). Üretim parametreleri aynı tutulmuştur.



Şekil 4.37. AC238 çamurluk hattı ön montaj layoutu

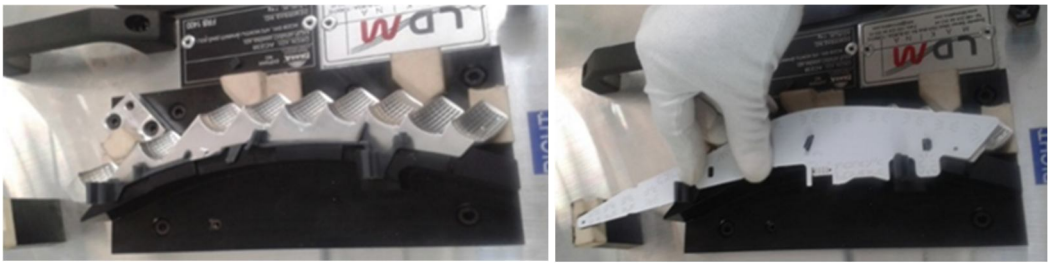
4.7.4.1 Ön montaj adımları. Deneme kapsamında işlem adımlarında değişiklik yapılmamıştır.

WS1: PCB üzerine soğutucu plaka yapıştırma işlemi yapılmaktadır (Şekil 4.38).



Şekil 4.38. WS1 operasyonu

WS2: BRL reflektör üzerine BRL PCB montajı yapılmaktadır (Şekil 4.39).



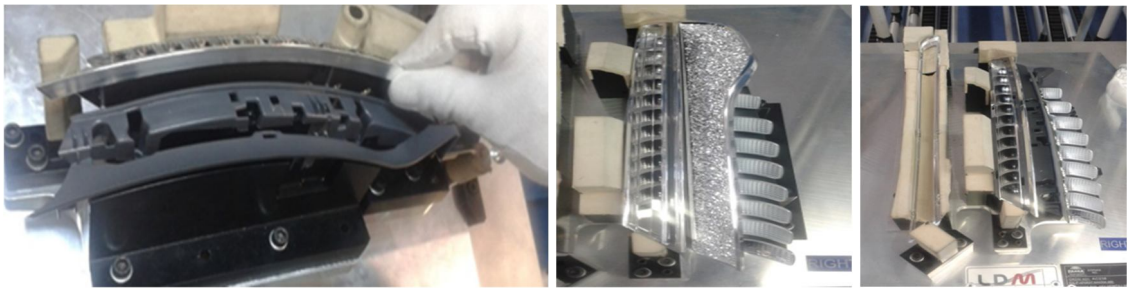
Şekil 4.39. WS2 operasyonu

WS3: Ara çerçeve üzerine BRL reflektör montajı yapılmaktadır (Şekil 4.40).



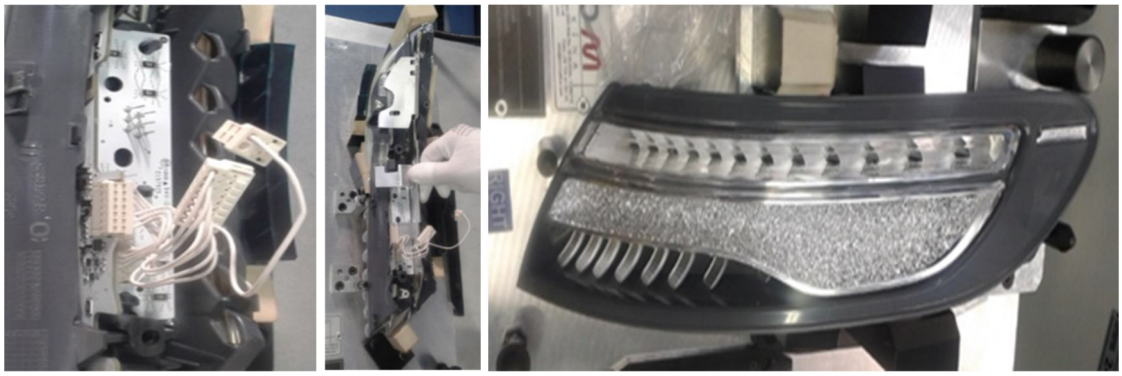
Şekil 4.40. WS3 operasyonu

WS4: Orta çıta, SL reflektör, çerçeve, iç lens montajı yapılmaktadır (Şekil 4.41). Deneme kapsamında orta çıta, SL reflektör, çerçeve parçaları yerine, seriden farklı olarak rose gold renkli malzeme ile kaplanmış parçalar kullanılmıştır.



Şekil 4.41. WS4 operasyonu

WS4.1-4.2: PCB montajı, kablolama ve gövde montajının yapılması (Şekil 4.42).



Şekil 4.42. WS4.1-4.2 operasyonu

WS5: Gövde vidalama ve akım kontrol işlemleri yapılmaktadır (Şekil 4.43).



Şekil 4.43. WS5 operasyonu

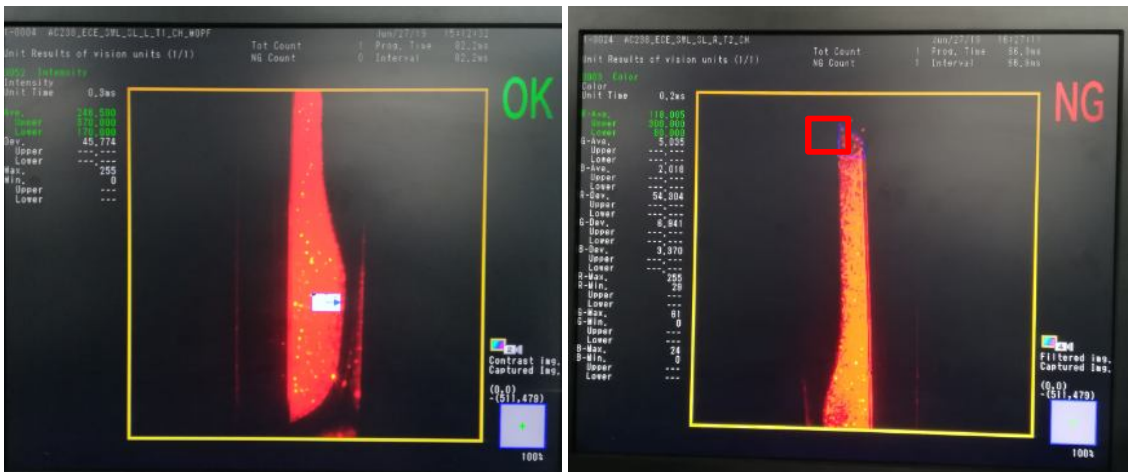
Hat sonu ışık değeri kontrolü. Tüm üretilen ürünler sevkiyat öncesinde montaj hattında %100 fonksiyonel kontrolden geçmektedir. 30 takım montajı yapılmış ürünler ECE ve SAE regülasyonlarına uygun optik değerlere göre kontrol edilmiştir. Sol parça EOL'deki

tüm fonksiyonel kontrollerden OK alarak geçmiştir, pozisyonlanması aşağıdaki gibidir (Şekil 4.44).



Şekil 4.44. Alüminyum ve Rose-Gold ürünlerin hat sonu makinasında pozisyonlanması

Kamera kontrolleri seri parça ile benzerlik göstermektedir. Sağ parça EOL'deki SL fonksiyon kontrolünde hata vermiştir. Hata alınan bölge üstteki fotoğrafta işaretlenmiştir. Alt sınır 170.000 iken, rose gold kaplı parçada 167.000 ile hata alınmıştır. Diğer bölgeler seri parça ile benzerlik göstermektedir (Şekil 4.45).

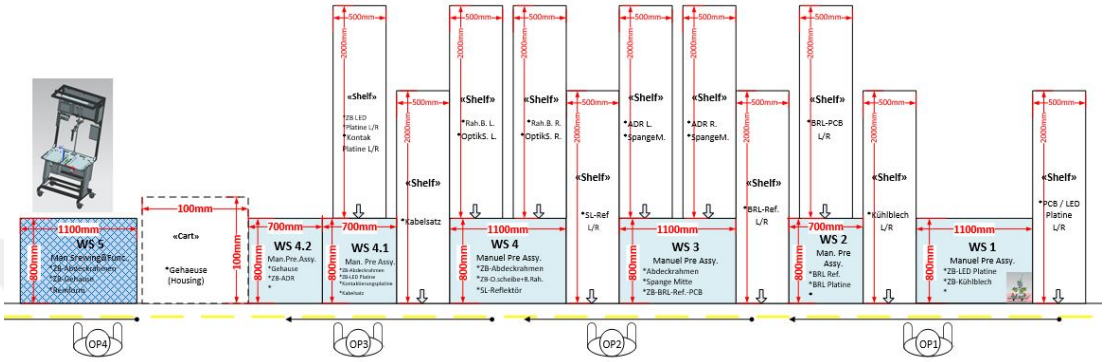


Şekil 4.45. Sırasıyla sol ve sağ EOL kontrolü

4.7.5 Bagaj montaj üretimi

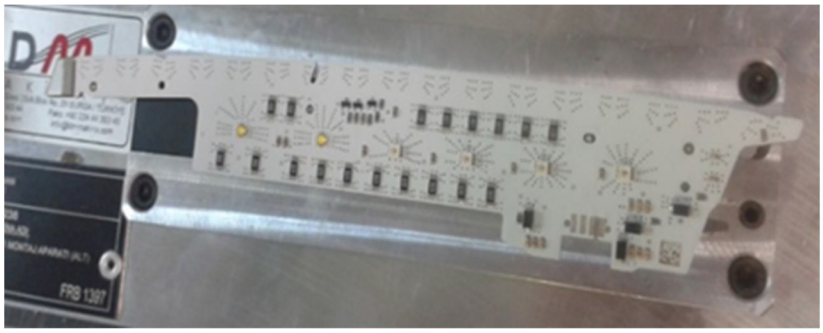
Seri üretim ile aynı koşullarda parça montajı yapılmıştır (Şekil 4.46). Üretim parametreleri aynı tutulmuştur.

Ön montaj adımları. Deneme kapsamında işlem adımlarında değişiklik yapılmamıştır.



Şekil 4.46. AC238 çamurluk hattı ön montaj layoutu

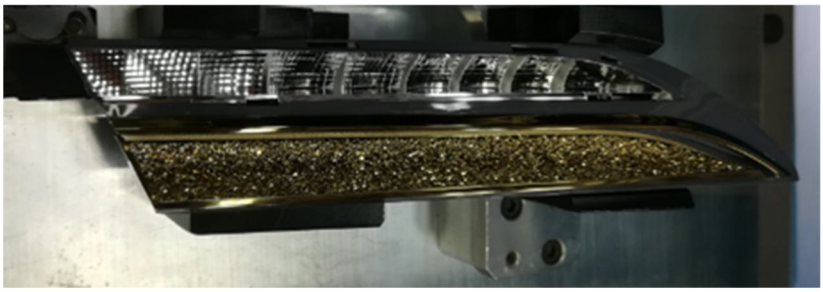
WS1: PCB üzerine soğutucu plaka yapıştırma işlemi yapılmaktadır (Şekil 4.47).



Şekil 4.47. WS1 operasyonu

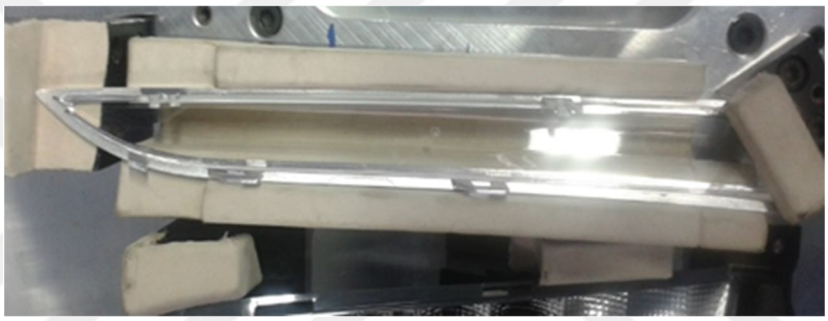
WS2: HDL üretimlerinde WS2 istasyonu kullanılmamaktadır.

WS3: Ara çerçeveye orta çıta (spange mitte), SL reflektör montajı yapılmaktadır. Deneme kapsamında orta çıta, SL reflektör seriden farklı olarak rose gold renkli malzeme ile kaplanmış parçalar kullanılmıştır (Şekil 4.48).



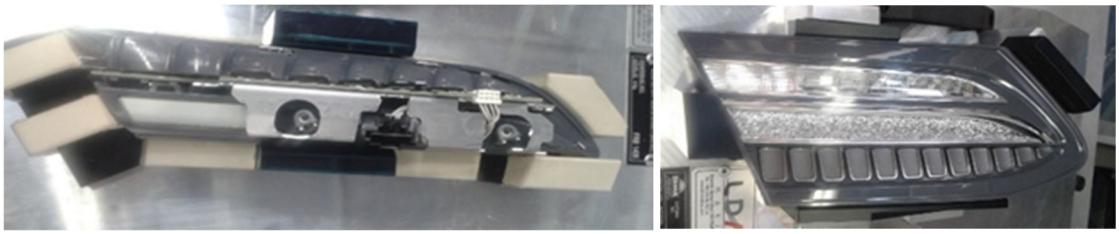
Şekil 4.48. WS3 operasyonu

WS4: Çerçeveye optik lens montajı yapılmaktadır. Deneme kapsamında çerçeve seriden farklı olarak rose gold renkli malzeme ile kaplanmış parçalar kullanılmıştır (Şekil 4.49).



Şekil 4.49. WS4 operasyonu

WS 4.1-4.2: PCB montajı, kablolama ve gövde montajının yapılması (Şekil 4.50).



Şekil 4.50. WS4.1-4.2 operasyonu

WS5: Gövde vidalama ve akım kontrol işlemleri yapılmaktadır (Şekil 4.51).



Şekil 4.51. WS5 operasyonu

Hat sonu ışık değeri kontrolü. Tüm üretilen ürünler sevkiyat öncesinde montaj hattında %100 fonksiyonel kontrolden geçmektedir. 30 takım montajı yapılmış ürünler ECE ve SAE regülasyonlarına uygun optik değerlere göre kontrol edilmiştir, pozisyonlanması aşağıdaki gibidir (Şekil 4.52).



Şekil 4.52. Alüminyum ve Rose-Gold ürünlerin hat sonu makinasında pozisyonlanması

Sol parça EOL'deki tüm fonksiyonel kontrollerden OK alarak geçmiştir (Şekil 4.53). Kamera kontrolleri seri parça ile benzerlik göstermektedir. Sağ parça EOL'deki tüm fonksiyonel kontrollerden OK alarak geçmiştir. Kamera kontrolleri seri parça ile benzerlik göstermektedir.



Şekil 4.53. Sırasıyla sol ve sağ EOL kontrolü

4.8 Fotometri Ölçümleri

2 farklı versiyon rose-gold ve gold için fotometri ölçümleri tamamlanmıştır. Amerika versiyonu için yan refleksler dış lensi şeffaf olarak üretilen versiyonda basılmamıştır. Bu sebeple ölçümler ECE ve SAE versiyon için yapılmıştır.

Ürün fotometri aparatıyla birlikte Ganiometre üzerine spesifik aparat yardımıyla, tabla üzerine civatalar yardımıyla sabitlenir. Arka stop fotometri ve renk ölçümlerinde ön 1. fotoseller kullanılır. 3,5 metre uzaklıkta konumlandırılmış sensör komple ürünün belirli açılardaki ışığını ölçmektedir (Şekil 4.54). Homojenite ölçümü yapılamamaktadır ancak müşteri %30 ile %50 arası talep etmektedir. Ölçüm sonuçları için tanımlar aşağıdaki gibi sıralanabilir:

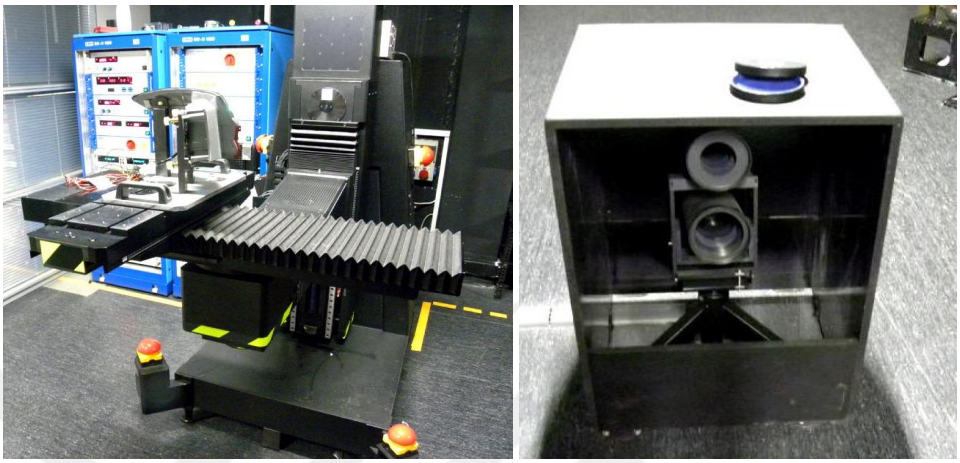
U: yukarıya
D: aşağıya
R: sağa

L: sola

V: dikey

H: yatay

HV: araç üzerindeki yatay ile dikey kesişim noktası



Şekil 4.54. Ganiometre ve 1. ön fotosel

4.8.1 Altın sarısı fotometri ölçümü

Çamurluk pozisyon (SL) 30 dakika fotometri ölçümleri. Işık şiddeti altın sarısı reflektörler için seri ile karşılaştırıldığında %30 düşüş ile gerçekleşmiştir. ECE ve SAE regülasyonuna uygun minimum değer sağlanmış ancak Daimler KLH şartnamesinde istenen değerlere ulaşılamamıştır (Çizelge 4.9).

Çizelge 4.9. Seri ve altın sarısı çamurluk pozisyon (SL) 30 dakika ölçüm karşılaştırılması

10U - 5L	.8	17	4.93
10U - 5R	.8	17	6.00
5U - 20L	.4	17	2.42
5U - 10L	.8	17	3.85
5U - V	2.8	17	5.25
5U - 10R	.8	17	7.54
5U - 20R	.4	17	8.07
H - 10L	1.4	17	3.97
H - 5L	3.6	17	4.40
H - V	.4	17	4.99
H - 5R	3.6	17	5.92
H - 10R	1.4	17	6.73
5D - 20L	.4	17	1.90
5D - 10L	.8	17	2.91
5D - V	2.8	17	4.64
5D - 10R	.8	17	5.55
5D - 20R	.4	17	8.45
10D - 5L	.8	17	3.11
10D - 5R	.8	17	5.02
Geo.Vis.Inward			
15U - 45 Inner	0.05	17	0.50
10U - 45 Inner	0.05	17	0.36
5U - 45 Inner	0.05	17	0.23
H - 45 Inner	0.05	17	0.19
5D - 45 Inner	0.05	17	0.30
10D - 45 Inner	0.05	17	0.42
15D - 45 Inner	0.05	17	0.17
GeoVis.Outward			
15U - 80 Outer	0.05	17	10.37
10U - 80 Outer	0.05	17	10.59
5U - 80 Outer	0.05	17	10.59
H - 80 Outer	0.05	17	10.42
5D - 80 Outer	0.05	17	9.30
10D - 80 Outer	0.05	17	9.95
15D - 80 Outer	0.05	17	9.38

Nr.	Funktion	Min	Max	Wert	Einheit	N.i.O.
1	GeoSi					
2	45° innen					
3	15O-45°	0.05	17	0.21	cd	
4	10O-45°	0.05	17	0.17	cd	
5	5O-45°	0.05	17	0.13	cd	
6	HV-45°	0.05	17	0.10	cd	
7	5U-45°	0.05	17	0.11	cd	
8	10U-45°	0.05	17	0.07	cd	
9	15U-45°	0.05	17	0.06	cd	
10	80°außen					
11	15O-80°	0.05	17	6.27	cd	
12	10O-80°	0.05	17	7.28	cd	
13	5O-80°	0.05	17	7.46	cd	
14	HV-80	0.05	17	7.32	cd	
15	5U-80°	0.05	17	6.57	cd	
16	10U-80°	0.05	17	6.20	cd	
17	15U-80°	0.05	17	6.54	cd	
18	10O-5L	0.8	17	3.28	cd	
19	10O-5R	0.8	17	4.13	cd	
20	5O-20L	0.4	17	1.40	cd	
21	5O-10L	0.8	17	2.40	cd	
22	5O-V	2.8	17	3.41	cd	
23	5O-10R	0.8	17	5.21	cd	
24	5O-20R	0.4	17	5.63	cd	
25	H-10L	1.4	17	2.65	cd	
26	H-5L	3.6	17	3.02	cd	*
27	H - V	4	17	3.44	cd	*
28	H-5R	3.6	17	4.06	cd	
29	H-10R	1.4	17	4.72	cd	
30	20L-5U	0.4	17	1.17	cd	
31	10L-5U	0.8	17	1.88	cd	
32	5U-V	2.8	17	2.98	cd	
33	10R-5U	0.8	17	3.96	cd	
34	20R-5U	0.4	17	6.02	cd	
35	5L-10U	0.8	17	2.39	cd	
36	5R-10U	0.8	17	3.49	cd	

KBA ECE ve SAE onay kurumu ECE ve SAE regülasyon ölçümlerinde çamurluk ve bagaj ölçümlerini aynı anda yapacağı için set (çamurluk + bagaj) ölçümlerinde uygun sonuç alınacaktır. Aynı anda ölçümde gerekli ışık şiddeti farklı 2 kaynaktan alınmaktadır.

"C BIN" kodu ledler kullanılması Daimler KLH şartnamesi için yeterli olmamıştır. Müşteri ile bu konuda anlaşılabilir ya da elektronik devrede değişiklik yapılmadan "D BIN" kodlu ledler sisteme entegre edilebilir. Her BIN kodu değişimi ile %10 fazla ışık şiddeti elde etmek mümkündür. Bunun dışında yine elektronik devre (PCB) de değişikliğe gidilerek akım şiddeti arttırılabilir ve %10 ışık şiddeti yine arttılarak çözüme ulaşılabilir.

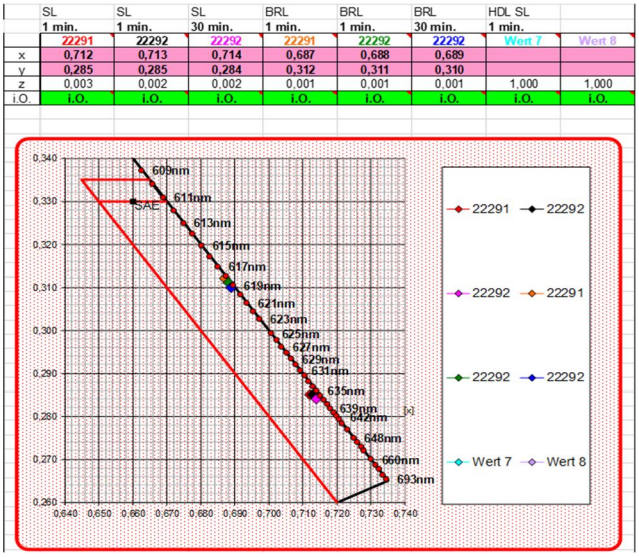
Çamurluk fren-stop pozisyon (BRL) 1 dakika fotometri ölçümleri. Işık şiddeti, altın sarısı reflektörler için kullanılan kırmızı yerine şeffaf dış lens ile %12 artış sağlamıştır. Daimler KLH şartnamesi değerleri %22 aşılmıştır (Çizelge 4.10). Pozisyon ölçümleri 30 dk, fren ölçümleri 1 dk yapılmıştır. 30 dakikada ledler ısındığı için bir miktar ışık şiddeti düşecektir ancak bu %20'yi geçmeyecektir. Oldukça emniyetli olduğu için 30 dk ölçüme gerek duyulmamıştır.

Çizelge 4.10. Seri ve altın sarısı çamurluk fren-stop (BRL) 1 dakika ölçüm karşılaştırılması

Nr.	Funktion	Min	Max	Wert	Einheit	N.i.O.
1	GeoSi li					
2	15O-45L	0,3	730	1,10	cd	
3	10O-45L	0,3	730	1,84	cd	
4	5O-45L	0,3	730	2,47	cd	
5	H-45L	0,3	730	2,10	cd	
6	5U-45L	0,3	730	1,37	cd	
7	10U-45L	0,3	730	1,05	cd	
8	15U-45L	0,3	730	1,59	cd	
9	GeoSi re					
10	15U-45R	0,3	730	11,97	cd	
11	10U-45R	0,3	730	9,79	cd	
12	5U-45R	0,3	730	7,83	cd	
13	H-45R	0,3	730	6,95	cd	
14	5O-45R	0,3	730	6,07	cd	
15	10O-45R	0,3	730	5,39	cd	
16	15O-45R	0,3	730	4,90	cd	
17	Punktmessung					
18	10O-5L	12	730	70,65	cd	
19	10O-5R	12	730	69,65	cd	
20	5O-20R	6	730	46,99	cd	
21	5O-10R	12	730	148,30	cd	
22	5O-V	42	730	162,50	cd	
23	5O-10L	12	730	135,10	cd	
24	5O-20L	6	730	77,63	cd	
25	H -10L	21	730	150,10	cd	
26	H-5L	54	730	177,10	cd	
27	H-V	60	730	195,50	cd	
28	H-5R	54	730	173,50	cd	
29	H -10R	21	730	166,90	cd	
30	5U-20R	6	730	62,77	cd	
31	5U-10R	12	730	159,10	cd	
32	5U -V	42	730	187,30	cd	
33	5U-10L	12	730	139,30	cd	
34	5U-20L	6	730	79,70	cd	

Nr.	Funktion	Min	Max	Wert	Einheit	N.i.O.
1	GeoSi					
2	15O-45°innen	0,30	260	1,44	cd	
3	10O-45°innen	0,30	260	2,13	cd	
4	5O-45°innen	0,30	260	2,73	cd	
5	HV-45°innen	0,30	260	2,30	cd	
6	5U-45°innen	0,30	260	1,44	cd	
7	10U-45°innen	0,30	260	1,51	cd	
8	15U-45°innen	0,30	260	3,06	cd	
9	15O-45°außen	0,30	260	5,84	cd	
10	10O-45°außen	0,30	260	6,08	cd	
11	5O-45°außen	0,30	260	6,74	cd	
12	HV-45°außen	0,30	260	7,74	cd	
13	5U-45°außen	0,30	260	8,86	cd	
14	10U-45°außen	0,30	260	10,70	cd	
15	15U-45°außen	0,30	260	13,97	cd	
16	10O-5L	12	260	78,87	cd	
17	10O-5R	12	260	80,85	cd	
18	5O-20L	6	260	86,11	cd	
19	5O-10L	12	260	146,62	cd	
20	5O-V	42	260	179,11	cd	
21	5O-10R	12	260	166,85	cd	
22	5O-20R	6	260	54,55	cd	
23	H - 10L	21	260	162,48	cd	
24	H-5L	54	260	191,20	cd	
25	H-V	60	260	217,14	cd	
26	H-5R	54	260	183,66	cd	
27	H - 10R	21	260	176,33	cd	
28	5U-20L	6	260	88,24	cd	
29	5U-10L	12	260	149,35	cd	
30	5U -V	42	260	184,76	cd	
31	5U-10R	12	260	169,30	cd	
32	5U-20R	6	260	68,47	cd	
33	10U-5L	12	260	89,04	cd	
34	10U-5R	12	260	88,96	cd	

Çamurluk pozisyon (SL), fren-stop pozisyon (BRL) kalorimetre ölçümleri. Renk 2 koordinat ile belirtilmiş ve renk ölçüm değerleri grafiğe işlenmiştir. Yukarıya doğru açık, aşağıya gidildikçe koyu kırmızı renk gösterilmektedir. Kırmızı ile çerçevelenmiş kısım ECE ve SAE için gereksinimleri belirtmiştir. Regülasyon için yeterli kırmızı renk alınmıştır. Daimler KLH şartnamesi taleplerini de karşılamaktadır. Fren renk ölçümleri uygundur ancak rengin açık kırmızıya kaydığı gözlemlenmektedir (Şekil 4.55).



Şekil 4.55. Çamurluk pozisyon (SL), fren-stop pozisyon (BRL) kalorimetre ölçümleri

4.8.2 Rose-gold fotometri ölçümü

Çamurluk pozisyon (SL) 30 dakika fotometri ölçümleri. Işık şiddeti, rose-gold reflektörler için seri ile karşılaştırıldığında %10 düşüş ile gerçekleşmiştir. ECE ve SAE regülasyonuna uygun minimum değer sağlanmıştır ve Daimler KLH şartnamesinde istenen değerlerin %10 üzerinde değerlere ulaşılmıştır (Çizelge 4.11).

Çizelge 4.11. Seri ve rose gold çamurluk pozisyon (SL) 30 dakika ölçüm karşılaştırılması

10U - 5L	.8	17	4.93
10U - 5R	.8	17	6.00
5U - 20L	.4	17	2.42
5U - 10L	.8	17	3.85
5U - V	2.8	17	5.25
5U - 10R	.8	17	7.54
5U - 20R	.4	17	8.07
H - 10L	1.4	17	3.97
H - 5L	3.6	17	4.40
H - V	4	17	4.99
H - 5R	3.6	17	5.92
H - 10R	1.4	17	6.73
5D - 20L	.4	17	1.90
5D - 10L	.8	17	2.91
5D - V	2.8	17	4.64
5D - 10R	.8	17	5.55
5D - 20R	.4	17	8.45
10D - 5L	.8	17	3.11
10D - 5R	.8	17	5.02
Geo.Vis.Inward			
15U - 45 Inner	0.05	17	0.50
10U - 45 Inner	0.05	17	0.36
5U - 45 Inner	0.05	17	0.23
H - 45 Inner	0.05	17	0.19
5D - 45 Inner	0.05	17	0.30
10D - 45 Inner	0.05	17	0.42
15D - 45 Inner	0.05	17	0.17
GeoVis.Outward			
15U - 80 Outer	0.05	17	10.37
10U - 80 Outer	0.05	17	10.59
5U - 80 Outer	0.05	17	10.59
H - 80 Outer	0.05	17	10.42
5D - 80 Outer	0.05	17	9.30
10D - 80 Outer	0.05	17	9.95
15D - 80 Outer	0.05	17	9.38

Nr.	Funktion	Min	Max	Wert	Einheit	N.i.O.
1	GeoSi					
2	45° innen					
3	15O-45°	0,05	17	0,27	cd	
4	10O-45°	0,05	17	0,22	cd	
5	5O-45°	0,05	17	0,15	cd	
6	HV-45°	0,05	17	0,13	cd	
7	5U-45°	0,05	17	0,12	cd	
8	10U-45°	0,05	17	0,09	cd	
9	15U-45°	0,05	17	0,07	cd	
10	80°außen					
11	15O-80°	0,05	17	8,29	cd	
12	10O-80°	0,05	17	9,64	cd	
13	5O-80°	0,05	17	9,36	cd	
14	HV-80	0,05	17	9,42	cd	
15	5U-80°	0,05	17	8,36	cd	
16	10U-80°	0,05	17	7,97	cd	
17	15U-80°	0,05	17	8,47	cd	
18	10O-5L	0,8	17	4,35	cd	
19	10O-5R	0,8	17	5,35	cd	
20	5O-20L	0,4	17	1,91	cd	
21	5O-10L	0,8	17	3,12	cd	
22	5O-V	2,8	17	4,44	cd	
23	5O-10R	0,8	17	7,02	cd	
24	5O-20R	0,4	17	7,44	cd	
25	H-10L	1,4	17	3,53	cd	
26	H-5L	3,6	17	4,04	cd	
27	H - V	4	17	4,48	cd	
28	H-5R	3,6	17	5,30	cd	
29	H-10R	1,4	17	6,05	cd	
30	20L-5U	0,4	17	1,49	cd	
31	10L-5U	0,8	17	2,46	cd	
32	5U-V	2,8	17	3,86	cd	
33	10R-5U	0,8	17	5,06	cd	
34	20R-5U	0,4	17	7,48	cd	
35	5L-10U	0,8	17	3,01	cd	
36	5R-10U	0,8	17	4,70	cd	

Çamurluk fren-stop pozisyon (BRL) 1 dakika fotometri ölçümleri. Işık şiddeti, rose-gold reflektörler için kullanılan kırmızı yerine şeffaf dış lens ile %14 artış sağlamıştır. Daimler KLH şartnamesi değerleri %23 aşılmıştır (Çizelge 4.12). Pozisyon ölçümleri 30 dk, fren ölçümleri 1 dk yapılmıştır. 30 dakikada ledler ısındığı için bir miktar ışık şiddeti düşecektir ancak bu %20'yi geçmeyecektir. Oldukça emniyetli olduğu için 30 dk ölçüme gerek duyulmamıştır.

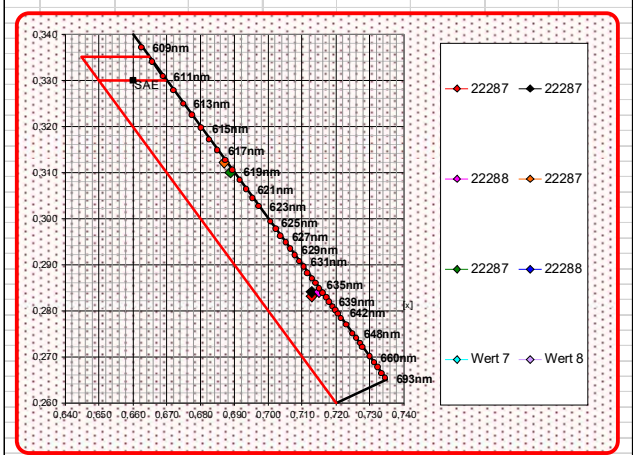
Çizelge 4.12. Seri ve rose gold çamurluk fren-stop (BRL) 1 dakika ölçüm karşılaştırılması

Nr.	Funktion	Min	Max	Wert	Einheit	N.i.O.
1	GeoSi li					
2	15O-45L	0,3	730	1,10	cd	
3	10O-45L	0,3	730	1,84	cd	
4	5O-45L	0,3	730	2,47	cd	
5	H-45L	0,3	730	2,10	cd	
6	5U-45L	0,3	730	1,37	cd	
7	10U-45L	0,3	730	1,05	cd	
8	15U-45L	0,3	730	1,59	cd	
9	GeoSi re					
10	15U-45R	0,3	730	11,97	cd	
11	10U-45R	0,3	730	9,79	cd	
12	5U-45R	0,3	730	7,83	cd	
13	H-45R	0,3	730	6,95	cd	
14	5O-45R	0,3	730	6,07	cd	
15	10O-45R	0,3	730	5,39	cd	
16	15O-45R	0,3	730	4,90	cd	
17	Punktmessung					
18	10O-5L	12	730	70,65	cd	
19	10O-5R	12	730	69,65	cd	
20	5O-20R	6	730	46,99	cd	
21	5O-10R	12	730	148,30	cd	
22	5O-V	42	730	162,50	cd	
23	5O-10L	12	730	135,10	cd	
24	5O-20L	6	730	77,63	cd	
25	H -10L	21	730	150,10	cd	
26	H-5L	54	730	177,10	cd	
27	H-V	60	730	195,50	cd	
28	H-5R	54	730	173,50	cd	
29	H -10R	21	730	166,90	cd	
30	5U-20R	6	730	62,77	cd	
31	5U-10R	12	730	159,10	cd	
32	5U -V	42	730	187,30	cd	
33	5U-10L	12	730	139,30	cd	
34	5U-20L	6	730	79,70	cd	
35	10U-5L	12	730	80,50	cd	
36	10U-5R	12	730	84,00	cd	

Nr.	Funktion	Min	Max	Wert	Einheit	N.i.O.
1	GeoSi					
2	15O-45°innen	0,30	260	1,38	cd	
3	10O-45°innen	0,30	260	2,05	cd	
4	5O-45°innen	0,30	260	2,66	cd	
5	HV-45°innen	0,30	260	2,19	cd	
6	5U-45°innen	0,30	260	1,39	cd	
7	10U-45°innen	0,30	260	1,34	cd	
8	15U-45°innen	0,30	260	2,68	cd	
9	15O-45°außen	0,30	260	5,98	cd	
10	10O-45°außen	0,30	260	6,20	cd	
11	5O-45°außen	0,30	260	6,85	cd	
12	HV-45°außen	0,30	260	7,83	cd	
13	5U-45°außen	0,30	260	9,01	cd	
14	10U-45°außen	0,30	260	11,00	cd	
15	15U-45°außen	0,30	260	14,04	cd	
16	10O-5L	12	260	76,45	cd	
17	10O-5R	12	260	77,44	cd	
18	5O-20L	6	260	84,58	cd	
19	5O-10L	12	260	146,87	cd	
20	5O-V	42	260	179,70	cd	
21	5O-10R	12	260	166,32	cd	
22	5O-20R	6	260	56,15	cd	
23	H - 10L	21	260	161,69	cd	
24	H-5L	54	260	188,56	cd	
25	H-V	60	260	222,64	cd	
26	H-5R	54	260	183,57	cd	
27	H - 10R	21	260	176,85	cd	
28	5U-20L	6	260	88,24	cd	
29	5U-10L	12	260	149,01	cd	
30	5U -V	42	260	184,34	cd	
31	5U-10R	12	260	170,16	cd	
32	5U-20R	6	260	70,90	cd	
33	10U-5L	12	260	91,92	cd	
34	10U-5R	12	260	92,84	cd	

Çamurluk pozisyon (SL), fren-stop pozisyon (BRL) kalorimetre ölçümleri. Renk 2 koordinat ile belirtilmiş ve renk ölçüm değerleri grafiğe işlenmiştir. Yukarıya doğru açık, aşağıya gidildikçe koyu kırmızı renk gösterilmektedir. Kırmızı ile çerçevelenmiş kısım ECE ve SAE için gereksinimleri belirtmiştir. Regülasyon için yeterli kırmızı renk alınmıştır. Daimler KLH şartnamesi taleplerini de karşılamaktadır. Fren renk ölçümleri uygundur ancak rengin açık kırmızıya kaydığı gözlemlenmektedir (Şekil 4.56).

	SL	SL	SL	BRL	BRL	BRL	HDL SL	
	1 min.	30 min	1 min.	1 min.	30 min.	1 min.	1 min.	
	22287	22287	22288	22287	22287	22288	Wert 7	Wert 8
x	0,713	0,713	0,715	0,687	0,689	0,487		
y	0,283	0,284	0,284	0,312	0,310	0,312		
z	0,004	0,003	0,001	0,001	0,001	0,201	1,000	1,000
i.O.	i.O.	i.O.	i.O.	i.O.	i.O.	i.O.	i.O.	i.O.



Şekil 4.56. Çamurluk pozisyon (SL), fren-stop pozisyon (BRL) kalorimetre ölçümleri

5. SONUÇ

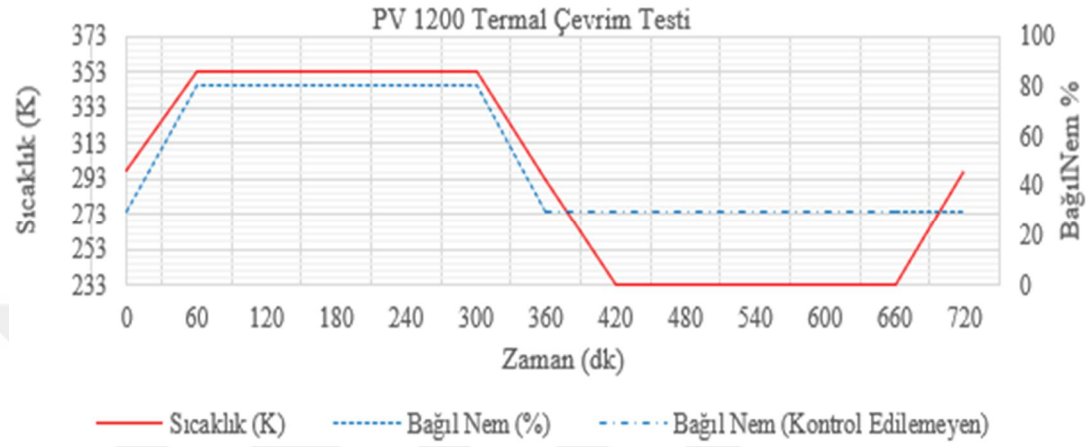
Üretilen far ya da arka stop alt parçaları yansıtıcı ve estetik gereksinimlerin sağlanması için yansıtıcılığı yüksek alüminyum ile kaplanmaktadır. PVD termal buharlaştırma yöntemiyle bakır alaşımları kaplama yapılarak plastik alt parçalar altın sarısı ve bronz renkte olması sağlanabilmektedir, ancak renk homojenitesi ve optik gereksinimler sağlanamamaktaydı. Yapılan bu doktora çalışması sonrasında aynı çevrimde 2,84 m^3 hacmindeki vakum çanında kaplanan tüm parçalarda gerekli yansıtıcılık özelliği korunarak homojenite sağlanmış ve aynı renk tonu elde edilmiştir. İstenilen kalite gereksinimi çan içerisindeki farklı bölgelerdeki tüm parçalar için sağlanmıştır.

Sıçratma makinaları 1 m^3'den daha küçük çana sahip ve tek altlıklı makinelerdir, bu sebeple üretim çıktısı otomotiv seri imalatı için uygun değildir. Geliştirilen yeni durum ile plastik alt parçalar 2,84 m^3 çana sahip makine ile PVD termal buharlaştırma yöntemiyle altın sarısı ve bronz renklerde kaplanabilmekte ve aynı zamanda da gerekli optik değerler (yansıtıcılık özelliği) sağlanabilmektedir. Sıçratma yönteminde kullanılan külçeler yerine tel evaporantlar kullanılmaktadır. Farklı bakır alaşım kompozisyonlarıyla üretim yapmak için ağır külçeler yerine birkaç gramlık evaporant teller kullanılmaktadır. Yüksek vakum ortamında tungsten filamanlar yardımı ile bakır alaşımlı teller buharlaştırılmakta ve ortamda oluşan bakır alaşım buharı plastik alt parçalar üzerinde biriktirilmektedir.

Yapılan nümerik analizler sonrasında elde edilen çıktılar yorumlanarak prosesin en kritik noktalarından biri olan buhar kaynağının yayılmasında iyileştirmeler yapılmıştır. Doğrulama deneyleri bakır alaşım kaplamanın farklı çevrimler içerisinde bile homojen kalınlıkta olduğunu göstermektedir. Bu sayede yapılan çalışma sonrasında arka stoplar için ilk kez termal evaporasyon PVD prosesi ile alaşım kaplama gerçekleştirilmiştir.

Otomotiv aydınlatma ürünleri için uygulanan en ağır testlerden biri olan VW TL207 şartnamesi de başarıyla karşılanmıştır. Özellikle yeni alaşımın polimere adezyonu ve üst koruyucu katman ile uyumu testlerde sorun çıkmamasını sağlamıştır. Kaplamanın kalitesi, VW (Volkswagen - TL 207) test standartlarına ve bu standardın şart koştuğu

optik, termal, kimyasal test sonuçlarında herhangi bir deformasyon (kılcal çatlak, oksitlenme) olmaması ile sağlanmaktadır (Doerner ve Nix, 1988). VW şartnamesinde yer alan PV1200 (VW, 2020) termal çevrim testi bu alanda geçilmesi gereken en önemli testlerden biridir. PV1200 termal test şartını anlatan grafikler Şekil 5.1'de gösterilmiştir.



Şekil 5.1. PV1200 termal test ortam koşulları sırasıyla sıcaklık ve bağıl nem –zaman grafikleri

Öte yandan ürünün bütünü düşünüldüğünde, normalde alüminyum kaplı reflektörler yerini alaşım kaplamaya bırakmış ve bitmiş üründe farklı renkte reflektörler elde edilmiştir. Arka stop yanmaz iken (soğuk hal) rose-gold renkte görünmekte, yanar haldeyken ECE regülasyonuna uygun kırmızı renk elde edilmiştir. Eski halinde kırmızı rengi dış lens vermekte iken, çalışma sonrası kırmızı renk şeffaf dış lens ve kırmızı renk LED ler ile gerçekleştirilmiştir.

Plakalar üzerinden kalınlık doğrulamaları ve ayrıca bitmiş ürün üzerinden yapılan optik ölçümlerde homojenitede yeterlilik sağlandığı gözlemlenmiştir. ECE ve SAE regülasyonlarına uygun farklı renkte reflektör içeren arka stoplar elde edilmiştir. Orijinal alt parçalar ile üretilen arka stop yanmaz (soğuk hal) ve tüm fonksiyonları yanar (sıcak hal) hali Şekil 5.2'de, gold-rose renkli alt parçalar ile üretilen arka stop yanmaz (soğuk hal) ve tüm fonksiyonları yanar (sıcak hal) hali Şekil 5.3'de gösterilmektedir.



Şekil 5.2. Orijinal alt parçaları ile üretilen arka stop lambası (sırasıyla soğuk ve sıcak halde)



Şekil 5.3. Rose-Gold renkli alt parçalar ile üretilen arka stop lambası (sırasıyla soğuk ve sıcak halde)

Elde edilen farklı renkte reflektör içeren yeni nesil bitmiş ürünler müşteri beğenisine sunulmuştur. Daimler MB AMG "Special Edition" araçlarda kullanılması fikri görüşülmekte, ticarileştirme çalışmları sürdürülmektedir. Belirlenen proses parametreleri, geliştirilmiş tungsten filaman ve tel geometrisi, evaporasyon kulesi pozisyonu ile seri üretim konfigürasyonları belirlenmiştir.

Bu çalışmada elde edilen sonuçlar şunu göstermektedir ki; teorik bilgilerin bilgisayar destekli simülasyonlar ile analiz edilmesi ve yorumlanması, pratik uygulamalarda karşılığını göstermekte ve faydalı bir model oluşturmaktadır.

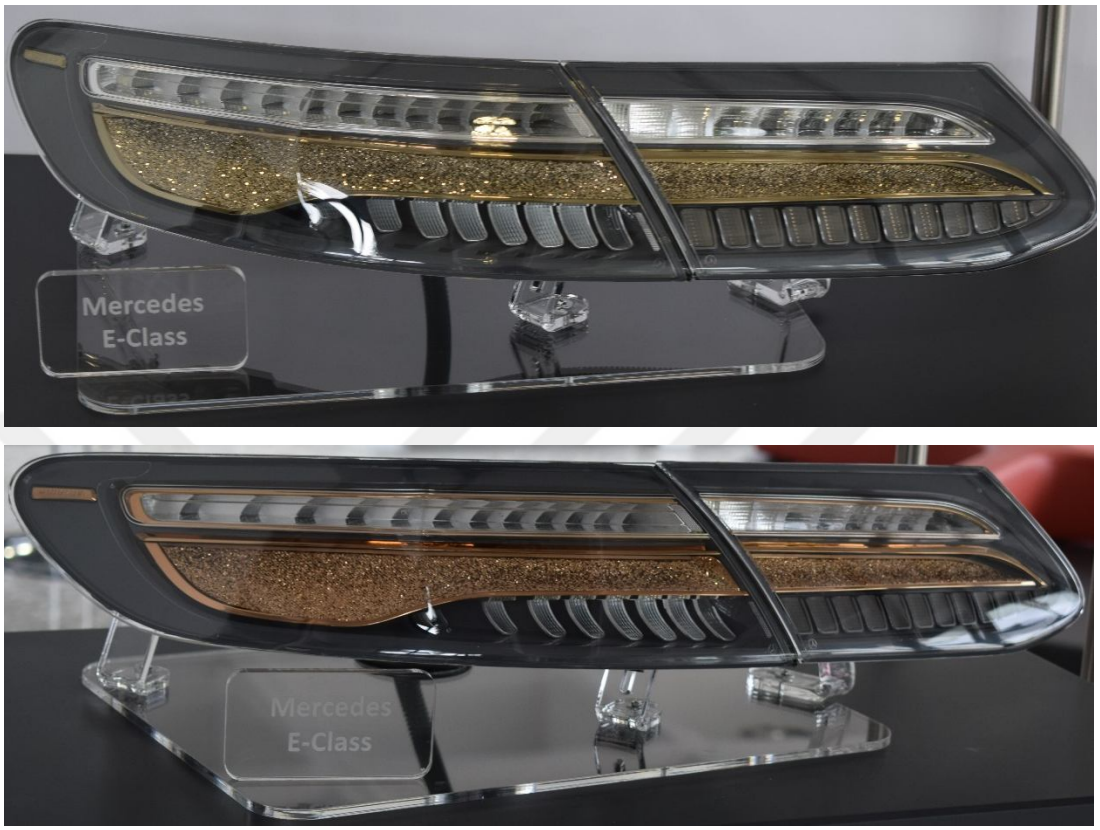
Gelecek çalışmalarda, tez ile elde edilen bilgi havuzu sayesinde ileri seviyede hesaplama gücü olan bilgisayarlar ile ayrık faz modeli veya DSMC yöntemi kullanılarak kaplama kalınlığı ve farklı geometrilere sahip substratlar için simülasyonlar yürütülebilir. Homojenitenin sağlanması için evaporasyon anı bütünüyle geliştirilmiştir, farklı geometriler de simülasyona yüklenerek ürün tasarımı fazında farklı ihtiyaçlar ortaya çıkarılabilir. Daha rekabetçi ve daha verimli üretim proselerinin oluşturulmasında fayda sağlanacaktır.

Ayrıca bu çalışmadan elde edilen renk tonları haricinde farklı alaşımlar ile mavi, süper-red gibi renkler elde edilebilir ve gelişmekte olan elekrikli araç endüstrisinde fark yaratmak için kullanılabilir. Alaşım hammaddesinin simülasyon üzerinde değiştirilmesi ve pratikte doğrulanması gerekecektir. Aynı evaporasyon kulesi kurgusu farklı alaşım için hemen iyi sonuçlar ortaya çıkarmayabilir.

Yapılan birkaç çalışmada sıçratma prosesi için plazma/duvar etkileşimleri incelenmiştir (Mussenbrock, 2012; Sigmund, 1969; Thompson ve Harwell, 1968). Çalışmalarda bir adım ileriye gidilerek püskürtülmüş malzemenin alt parçalar ve çan duvarları üzerinde birikmesi sonrası gaz fazı türleri ile kimyasal etkileşimi de incelenmiştir (Berg ve ark. 1987; Berg ve Nyberg, 2005). Yapılacak ileri analizlerde bu esaslar da simülasyona girilerek, simülasyonun daha etkin hale getirilmesi üzerine çalışmalar yapılabilir. Çıkan bulgular değerlendirilerek, proses iyileştirmelerine faydalı olacak yeni esaslar belirlenebilir.

Yapılan tüm denemeler AC238 projesi iç parçaları için uygulanmıştır. Bu projede yer alan tüm parçalar polikarbonatdır. Aydınlatma endüstrisinde ayrıca PC-ABS, PMMA, ABS ve PA'da kullanılmaktadır. Tüm hammadde çeşitleri için ayrıca denemeler yürütülerek uygun parametre ve kurgu ortaya konulabilir. Farklı hammaddelerden oluşan alt parçaların vakum ortamında üzerlerinde buhar birikme mekaniklerinde farklılıklar

oluşabilir. Tüm bunların analizleri literatüre katkı sağlayacak ve diğer çalışmalara ışık tutacaktır.



Şekil 5.4. Gold ve Rose-Gold renkli alt parçalar ile üretilen arka stop lambası (soğuk halde)

KAYNAKLAR

An, N., Tandon, G.P., Pochiraju, K.V. (2013). *Thermo-oxidative performance of metal-coated polymers and composites.* Surface Coatings Technology. 232:166–172.

Arias, N., Jaramillo, F. (2019). *Highly reflective aluminum films on polycarbonate substrates by physical vapor deposition.* Applied Surface Science. Medellin, Colombia, 1–7.

Balakrishnan J., Body I.D., Braun D.G. (2000). *Monte Carlo simulation of vapor transport in physical vapor deposition of titanium.* Journal of Vacuum Science and Technology. 18, A: 907-916.

Baptista, A., Silva, F.J.G., Porteiro, J., Míguez, J.L., Pinto, G., Fernandes, L. (2018). *On the Physical Vapour Deposition: Evolution of Magnetron Sputtering Processes for Industrial Applications.* 28th International Conference on Flexible Automation and Intelligent Manufacturing. Columbus, OH, USA.

Beckmann, R., Nauenburg, K.D., Naumann, T., Patz, U., Ickes, G., Hagedorn, H., Snyder, J. (2001). *A new high-rate deposition process for scratch- and wipe-resistant coatings for optical and decorative plastic parts.* Proceedings 44th Annual Technology Conference. Society of Vacuum Coaters. 288–294.

Berg, S., Blom, H. O., Larsson, T., Nender, C. (1987*). Modeling of reactive sputtering of compound materials.* Journal of Vacuum Science & Technology A. A 5, 202.

Berg, S., Nyberg, T. 2005*. Fundamental understanding and modeling of reactive sputtering processes.* Thin Solid Films. 476, 215.

Bird, G.A. (1983). *The Physics of Fluids.* 26th International Symposium on Rarefied Gas Dynamics. RGD26 : Kyoto, Japan, 26, 3222.

Bobzin, K., Bagcivan, N., Immich, P., Bolz, S., Cremer, R., Leyendecker, T. (2008). Thin Solid Films 517, 1251.

Bobzin, K., Brinkmann, R.P., Mussenbrock, T., Bagcivan, N., Brugnara, R. H., Schafer, M,. Trieschmann, J. (2014). *Continuum and Kinetic Simulations of the Neutral Gas Flow in an Industrial Physical Vapor Deposition Reactor*. Physics.comp-ph, Bochum, Germany, 1-21.

Bobzin, K., Brinkman, R., Mussenbrock, T., Bagcivan Papenfuss-Janzen, N., Brugnara, R. (2013). *Continuum and kinetic simulations of the neutral gas flow in an industrial physical vapor deposition reactor.* Journal Surface and Coatings Technology. 237: 176-181.

Boccas, M., Vucina, T., Araya, C., Vera, E., Ahhee, C. (2006). *Protected-silver coatings for the 8-m Gemini telescope mirrors.* Thin Solid Films. 502: 275–280.

Canonsburg PA. (2013). *Ansys Inc.* ANSYS Fluent Theory Guide. Release 15.0, 39-132.

Cavelli, D., Yamamoto, K., Dosbaeva, G., Veldhuis, S. (2016). *Control of self-organized criticality through adaptive behavior of nano-structured thin film coatings.* Journal of Entropy. 18 :290.

Chondrakis, N.G., Topalis, F.V. (2011). *Evaluation of heat transfer coefficient of tungsten filaments at low pressures and high temperatures*. Applied Thermal Engineering. 31: 258-267.

Coenen, J.W., Antusch, S., Aumann, M., Biel, W., Du, J., Engels, J., Heuer, S., Houben, A., Höschen, T., Jasper, B., Koch, F., Litnovsky, A., Mao, Y., Neu, R., Pintsuk, G., Riesch, J., Rasinski, M., Reiser, J., Rieth, M., Unterberg, B., Weber, T., Wegener, T., You, J.-H., Linsmeier, C. (2016). *Materials for DEMO and reactor applications-boundary condition and new concepts*. Phys. Scr. T167: 014002.

Coenen J.W., Riesch J., You J.-H. (2016). *Advanced materials for a damage resilient divertor concept for DEMO.* 29th Symposium on Fusion Technology, September 5-9 2016, Czech Republic, Prague.
Curtin, W.A. (1991). *Theory of mechanical properties of ceramic-matrix composites.* Journal of American Ceramics Society. 74:2837–2845.
Cushing, D. (2011). 6.3 Silver Mirrors, Enhanced Optical Filter Design.
Damm, D.D., Contin, A., Barbieri, F.C., Trava-Airoldi, V.J., Barquete, D.M., Corat E.J. (2017). *Interlayers applied to CVD diamond deposition on steel substrate*. A review, Coatings, 1-25.
Decher G., Schlenoff, J.B. (2003). *Multilayer Thin Films - Sequential Assembly of Nanocomposite Materials.* Wiley-Vch Verlag GmbH & Company KGaA. Weinheim, ISBN: 3-527-30440-1.
Depla, D., Heirwegh, S., Mahieu, S., Gryse, R. D. (2007). *Towards a more complete model for reactive magnetron sputtering.* Journal of Physics D: Applied Physics. 40.
Desai, P. D., Chu, T. K., James H. M., Ho, C. Y. (1984). *Electrical Resistivity of Selected Elements*. Journal of Physical and Chemical Reference Data. 13, 1069.
Doerner, M.F., Nix, W.D. (1988). *Stresses and deformation processes in thin films on substrates*. CRC Criticals Revievs in Solid State Material Science. 14, 3: 225–268.
Donald, I.W., Mcmillan, P.W. (1976). *Ceramic-matrix composites*. Journal of Material Science. 11: 949–972.
Dongari, N., Agrawal, A. (2012). *Modeling of Navier-Stokes equations for high Knudsen number gas flows*. International Journal of Heat and Mass Transfer. 55: 4352-4358.
Du, J., Hoeschen, T., Rasinski, M., You, J.-H. (2011). *Shear debonding behavior of a carbon-coated interface in a tungsten fiber-reinforced tungsten matrix composite*. Journal of Nuclear Materials. 417: 472–476.
Du, J., Hoeschen, T., Rasinski, M., You, J.-H. (2010). *Interfacial fracture behavior of tungsten wire/tungsten matrix composites with copper-coated interface*. Materials Science and Engineering. A 527: 1623–1629.
Ebihara, K., Fujishima, T., Kojyo, D. and Murata, M. (1993). *Silicon oxide film preparation by RF plasma-enhanced MOCVD using hexamethyldisiloxane*. Plasma Sources Science and Technology. 2, 1: 14.
Engel, A.K., Yoden, T., Sanui, K., Ogata, N. (1985). *Synthesis of aromatic Schiff base oligomers at the air/water interface*. Journal of American Chemical. 107: 8308-8310.
Fan J., Boyd, I.D., Shelton, C. (2000). *Monte Carlo modeling of electron beam physical vapor deposition of yttrium*. Journal of Vacuum and Science Technology 18. A: 2937-2945.
Fan J., Boyd, I.D., Shelton, C. (2000). *Monte Carlo Modelling of YBCO Vapor Deposition*. Rarefied Gas Dynamics: 22nd International Symposium. Sydney, Australia.
Fancey, K.S. 1994. *A coating thickness uniformity model for physical vapor deposition systems: overwiew*. Surface and Coating Technology. 71:16-29.
Fox-Rabinovich G., Paiva J. M., Gershman I., Aramesh M., Abdullah M. Z. B., Ahmad M. A., Abdullah A. N., Othman M. H., Hussain P., Zainuddin A. (2016). *Metal release of multilayer coatings by physical vapour deposition, PVD.* Procedia Engineering. 148: 254-260.
García-Segura, A., Fernández-García, A., Ariza, M.J., Sutter, F., Valenzuela, L. (2016). *Durability studies of solar reflectors: A review.* Renewable and Sustainable Energy Reviews. 62: 453–467.

Gillen, D.R., Graham, W., Goelich, A. G. (2002). *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*. 194, 409.
Gott, K., Kulkarni, A., Singh J. (2013). *A Comparison of Contınuum, DSMC and Free Molecular Modeling Techniques for Physical Vapor Deposition*. Proceedings of the ASME 2013 International Mechanical Engineering Congress and Exposition IMECE2013. San Diego, California, USA.
Gott, K., Kulkarni, A., Singh, J. (2013). *A comparison of continiuum, DSMC and free moleculer modelling techniques for physical vapor deposition*. In Advanced Manufacturing. American Society of Mechanical Engineers, ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Proceedings IMECE-66433.
Gouveia, R. M., Silva, F.J.G., Reis, P., Baptista, A.P.M. (2016). *Machining duplex stainless steel: Comparative study regarding end mill coated tools.* Journal of Coatings. 1-30.
Grünwald, H., Dicken, W., Nauenburg, K.D., Adam, R., Bartella, J., Gebele, T., Mitzlaff, S., Patz, U., Snyder, J. (2001). in: K.L. Mittal Ed., Metallized Plastics 7: Fundamental and Applied Aspects. VSP BV, Utrecht.
Hamadi F., Amara E.H., Mezaoui D. (2008). *Heat Transfer and Vapor Dynamics Induced By Nanosecond Laser Ablation of Titanium Target*. AIP Conference Proceedings. 1047: 155-158.
Hegemann, D., Brunner, H., Oehr, C. (2003). *Plasma treatment of polymers for surface and adhesion improvement*. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B. 208, 281-286
Herec, J., Sielanko, J., Wronski, J. (2001). *Monte Carlo Simulations*. Vacuum. 63, 507.
Hernández, P., Martínez, I., Mazari, M. (2009). *Development and mean life of aluminum first-surface mirrors for solar energy applications*. Solar Energy Materials and Solar Cells. 93: 1647–1651.
Hirth, J.P., Pound, G.M. (1957). *The Journal of Chemical Physics.* Hirth and Pound Volume 5, 1957 649–53.
Hoche, H., Groß, S., Oechsner, M. (2014). *Development of new PVD coatings for magnesium alloys with improved corrosion properties*. Surface & Coatings Technology. 259: 102-108.
Hollander, A., Wilken, R., Behnisch, J. (1999). *Subsurface chemistry in the plasma treatment of polymers*. Surface Coating Technology. 116–119: 788–791.
Holmberg, K., Matthews, A. (2009). *Coatings tribology – Properties, mechanisms, techniques and applications in Surface Engineering*. B.J. Briscoe, Elsevier. Netherlands, UK, ISBN: 978-0-444-52750-9.
Hou, A., Liu, H., Sun, J., Zhang, D., Yi, M. (2007). *Measurement of the electro-optic coefficient of polymer thin films with better spatial resolution*. Optics and Laser Technology. 39: 411–414.
Hu, N., Khan, M., Wang, Y., Song, X., Lin, C., Chang, C., Zeng, Y. (2017). *Effect of Microstructure on the Thermal Conductivity of Plasma Sprayed Y 2 O 3 Stabilized Zirconia %8 YSZ*. Journal of Coatings. 1-9.
Huang, D. (2019*). A new turbulance analysis method based on the mean speed and mean free path theory of the molecule thermal motion*. Physica A 523: 66-74.
Hummel, R.E. (1981). *Reflectivity of silver- and aluminium-based alloys for solar reflectors*. Solar Energy Materials and Solar Cells. 27: 449–455.
Imbeni, V., Martini, C., Lanzoni, E., Poli, G., Hutchings, I. M. (2001). *Tribological behaviour of multi-layered PVD nitride coatings*. Wear, 251: 997-1002.

Inspektor, A., Salvador, P.A. 2014. *Architecture of PVD coatings for metalcutting applications*. A review, Surface & Coatings Technology. 257 :138-153.
Jamieson, E., H., H., Windle, A.H. (1983). *Structure and oxygen-barrier properties of metallized polymer film*. Journal of Material. Sciences. 18, 1: 64-80.
Kaless, A., Schulz, U., Munzert, P., Kaiser, N. (2005). *NANO-motheye antireflection pattern by plasma treatment of polymers*. Surface Coating Technology. 200, 1–4: 58–61.
Kakimato, M., Suzuki, M., Konishi, T., Imai, Y., Iwamoto, M., Hino, T. (1986). *Preparatıon of mono- and multılayer fılms of aromatıc polyımıdes usıng Langmuır–Blodgett technıque*. CSJ Journals Chemistry letters. 15, 5: 823-826.
Kim, M., Kim, S., Kim, T., Lee, D. K., Seo, B. K, Lim, C., S. (2017). *Mechanical and thermal properties of epoxy composites containing zirconium oxide impregnated halloysite nanotubes*. Journal of Coatings. 1-9.
Korhonena, H., Syväluoto, A., Leskinen, J.T.T., Lappalainen, R. (2018). *Optically transparent and durable Al2O3 coatings for harsh environments by ultra short pulsed laser deposition*. Optics & Laser Technology. 98 :373-384.
Kubono, A., Higuchi, H., Umemoto, S., Okui, N. (1993). *Molecular orientation of alkyl-aromatic polyimide thin films prepared by vapour deposition polymerization*. Thin Solid Films. 229, 1: 133-136.
Lampert, C.M. (1981). *Heat mirror coatings for energy conserving Windows*. Solar Energy Materials and Solar Cells. 6: 1–41.
Lalauze, R.L., Meunier, J.H. (1979). *Kinetics interpretation of NiO electrical conductivity under low oxygen pressures*. Oxidation of Metals 13: 301-309.
Lalauze, R.L., Meunier, J.H. (1978). *Experimental study of NiO electrical conductivity changes under low oxygen pressures*. Oxidation of Metals 12, 2: 183-190.
Langmuir, D,B., Malter, L. (1939). *Materials Advisory Board Report of the Committee on Refractory Metals: Panel reports*. Physical Review, volume 55. 748–49.
Lassner E., Schubert, W.D. (1999). *Properties, Chemistry, Technology of the Element, Alloys, and Chemical Compounds*. Vienna University of Technology. 31-89.
Li, D., Tai, Q., Feng, Q., Li, Q., Xu, X., Li, H., Huang, J., Dong, L., Xie, H., Xiong, C. (2014). *Highly reflective and adhesive surface of aluminized polyvinyl chloride film by vacuum evaporation*. Applied Surface Science. 311: 541–548.
Liston, E.M., Martinu, L., Wertheimer, M.R. (1993). *Plasma surface modification of polymers for improved adhesion: A critical review.* Journal of Adhesion Science and Technology. 7: 1091–1127.
Lowe, R.M. 1964. *The Journal of Chemical Physics,* Lowe Volume 12. 1111–18.
Luciano, L., Onofrio, P. (2015). *10.3 development of solar con-centrators*. Innovative Materials and Systems for Energy Harvesting Applications.
Lugscheider, E., Bobzin, K., Papenfuh-Janzen, N., Parkot, D. (2005). *Monte Carlo simulation of the PVD transport process for alloys*. Surface & Coatings Technology. 200: 913–915.
Lugscheider, E., Bobzin, K., Papenfuss-Janzen, N., Parkot,D. (2005). *Continuum and kinetic simulations of the neutral gas flow in an industrial physical vapor deposition reactor*. Surface & Coating Technology. 200: 913-915.
Macak, K., Macak, P., Helmersson, U. (1999). *Computer Physics Communications.* 120, 238.
Macleod, A. (2001). *Optical Thin Film Production With Continuous Reoptimization of Layer Thicknesses*. Thin-Film Optical Filters, Institute of Physics Publishing. Bristol.

Maity, S. (2017). *Optimization of processing parameters of in-situ polymerization of pyrrole on woollen textile to improve its thermal conductivity*. Progress in Organic Coatings. 107: 48-53.
Malhotra, C. P., Mahajan, R., Sampath, W. (2007). *High Knudsen Number Physical Vapor Deposition: Predicting Deposition Rates and Uniformity*. Journal of Heat Transfer. 129: 1546-1553.
Marshall D.B., Evans A.G. (1985). *Failure mechanisms in ceramic-fiber/ceramic-matrix composites*. Journal of American Ceramics Society. 68: 225–231.
Martin, P. M. (2010). *Handbook of Deposition Technologies for films and coatings.* W. Andrew, Elsevier. UK, USA, ISBN-13: 978-0-8155-2031-3.
Martinho, R. P., Andrade, M. F. C., Silva, F. J. G., Alexandre, R. J. D. , Baptista, A. P. M. (2009). *Microabrasion wear behaviour of TiAlCrSiN nanostructured coatings*. Wear. 267: 1160-1165.
Martinho, R.P., Silva, F.J.G., Alexandre, R.J.D., Baptista, A.P.M. (2011). *TiB2 Nanostructured coating for GFRP injection moulds*. Journal of Nanoscience and Nanotechnology. 11:5374-5382.
Mattox, D. M. (2010). *Handbook of physical vapor deposition Processing*. Editors: W. Andrew, Elsevier, UK, USA, ISBN: 978-0-81-552037-5.
Mattox, D.M. (2003). *The foundations of Vacuum Coating Technology*. W. Andrew, Noyes Publications. UK, USA, ISBN: 0-8155-1495-6.
Mattox, D.M. (1998). *Handbook of physical vapor deposition processing*. Society of vacuum coaters. 410-423.
Michailidis, N. (2016). *Variations in the cutting performance of PVD-coated tools in milling Ti6Al4V, explained through temperature-dependent coating properties*. Surface & Coatings Technology. 304: 325-329.
Minami, K. (2005). *Optical plastics*. Handbook of Plastic Optics. Wiley-VCH, Frankfurt, 109–147.
Miyagawa, Y., Mijagawa S. (2002). *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*. Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. 190 :256.
Momeni, S., Tillmann, W. (2016). *Investigation of these lf-healing sliding wear characteristics of NiTi-based PVD coatings on tool steel*. Wear. 368-369: 53-59.
Musil, J. (2015). *Advanced hard nanocomposite coatings with enhanced toughness and resistance to cracking*. S. Zhang, CRC Press Taylor & Francis Group. USA, 377-463, ISBN: 978-1-4822-2291-3.
Musil, J. (2015). *Flexible hard nanocomposite coatings*. RSC Advances. 5: 60482-60495.
Mussenbrock, T. (2012). *Modeling and Simulation of Ion Energy Distribution Functions in Technological Plasmas*. Contribution to Plasma Physics. 52, 571.
Nastac, L., Dax F.R., Hanusiak, W. (2004). *Methodology for modeling the EB-PVD coating process*. Journal of Physics IV. France, 120: 307-314.
Neu R., Riesch J., Coenen J., Brinkmann J., Calvo A., Elgeti S., Garcia-Rosales C., Greuner H., Höschen T., Holzner G., Klein F., Koch F., Linsmeier C., Litnovsky A., Wegener T., Wurster S., You J.-H. (2016). *Advanced tungsten materials for plasma-facing components of DEMO and fusion power plants*. Fusion Engineering and Design. 109: 1046–1052.
Osterman, V., Antes, H., Jr. 2010. *Critical Melting Points and Reference Data for Vacuum Heat Treating*. Solar Atmospheres Inc. 4-42.

Perovic N.L., Maglic K.D., Vukovic G.S. (1996). *Thermophysical properties of tungsten electrodes by subsecond pulse calorimetry*. International Journal of Thermophysics. 17, 5: 1047-1055.
Pink, E., Bartha, L. (1989). *The Metallurgy of Doped/Non-Sag Tungsten*. Springer. 75–79, 109–111.
Pintsuk, G. (2012). *Tungsten as a plasma-facing material*. Compar. Nuclear Materials. 4: 551–581.
Powell, C.F., Oxley, J.H., Blocher, J.M. (1966). *Vapour Deposition*. John Wiley & Sons, Inc. USA, ISBN-10: 1-11413-513-5.
Pulker, H.K. (1984). *Adhesion Measurement of Thin Films, Thick Films and Bulk Coatings*. American Society. Coatings on Glass, Elsevier, Amsterdam.
Ranade V. (2001). *Computational Flow Modelling for Chemical Reactor Engineering*. Vol 5, Academic Press. Ch. 20, 1-108.
Riesch, J., Han, Y., Almanstötter, J., Coenen, J.W., Höoschen, T., Jasper, B., Zhao, P., Linsmeier, C., Neu, R. (2016). *Development of tungsten fibre-reinforced tungsten composites towards their use in DEMO-potassium doped tungsten wire*. Phys. Scr. T167: 014006.
Riesch, J., Buffiere, J.Y., Hoeschen, T., Michiel, M., Scheel, M., Linsmeier, C., You, J.-H. (2013). *In situ synchrotron tomography estimation of toughening effect by semi-ductile fibre reinforcement in a tungsten-fibre-reinforced tungsten composite*. Acta Materials. 61: 7060–7071.
Riesch, J., Höschen, T., Linsmeier, C., Wurster, S., You, J.-H. (2014). *Enhanced toughness and stable crack propagation in a novel tungsten fibre-reinforced tungsten composite produced by chemical vapour infiltration*. Phys. Scr. T159: 014031.
Rubshtein, A. P., Vladimirov, A. B., Korkh, Y. V., Ponosov, Y. S., Plotnikov, S. A. (2017). *The composition, structure and surface properties of the titanium-carbon coatings prepared by PVD technique*. Surface & Coatings Technology. 309: 680-686.
Safarian J,, Thorvald, A. E. (2013). *Vacuum Evaporation of Pure Metals*. Metallurgical and Materials Transactions A. Volume 44A., 753 Springerlink.com, DOI: 10.1007/s11661-012-1464-2, 1–7.
Sanders, D.M., Anders, A. (2000). *DLC film deposition by laser-arc and study of properties*. Surface Coating Technology. 133-134, 78.
Sazhin, S.S., Serikov, V.V. (1997). *Planetary and Space Science*. 45, 361
Schulz, U. (2006). *Review of modern techniques to generate antireflective properties on thermoplastic polymers*. Applied Optics. 45, 1608–1618.
Schulz, U. (2005). *Coating on plastics, in: S. Baumer Ed.*. Handbook of Plastic Optics, Wiley-VCH, Frankfurt,2005, 149–180.
Schulz, U., Kaiser, N. (2006). *Vacuum coating of plastic optics*. Progress in Surface Science 81. Jena, Germany, 387–401.
Shen Z., Du G., Wang P., Wang P. (2016). *The thermal stability of silver-based high reflectance coatings*. Thin Solid Films. 616: 122–125.
Sigmund, P., Olivia, A., Falcone, G. (1982). *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research.* Physical Review 194. 541.
Sigmund, P. (1969). *Theory of sputtering*. I. Sputtering yield of amorphous and polycrystalline targets. Physical Review. 184, 383.
Silva, F.J.G., Casais, R.C.B., Martinho, R.P., Baptista, A.P.M. (2012). *Mechanical and tribological characterization of TiB2 thin films*. Journal of Nanoscience and Nanotechnology. 12: 9187-9194.

Silva, F.J.G., Fernandes, A.J.S., Costa, F.M., Teixeira, V., Baptista, A.P.M., Pereira, E. (2003). *Tribological behaviour of CVD diamond films on steel substrates.* Wear. 255:846-853.
Silva, F.J.G., Martinho, R.P., Andrade, M., Baptista, A.P.M., Alexandre, R. (2017). *Improving the wear resistance of moulds for the injection of glass fibre–reinforced plastics using PVD coatings*. A comparative study, Journal of Coatings. 1-11.
Silva, F. J. G., Martinho, R. P., Baptista, A. P. M. (2014). *Characterization of laboratory and industrial CrN/CrCN/diamond-like carbon coatings*. Thin Solid Films. 550: 278-284.
Silva, F. G., Martinho, R. P., Alexandre, R., Baptista, A. M. (2012). *Wear resistance of TiAlSiN thin coatings*. Journal of Nanoscience and Nanotechnology. 12: 9094-9101. A. Baptista et al. / Procedia Manufacturing 17 746–757 755.
Silva, F. G., Neto, M.A., Fernandes, A.J.S., Costa, F.M., Oliveira, F.J., Silva, R.F. (2009). *Adhesion and wear behaviour of NCD coatings on Si3N4 by micro-abrasion tests*. Journal of Nanoscience and Nanotechnology. 9: 3938-3943.
Singh L. (2008). *A Model for Deposition of Metal Vapors from Multiple Targets on a Rotating Substrate.* Masters Paper. The Pennsylvania State University.
Skordaris, G., Bouzakis, K.D., Kotsanis, T., Charalampous, P., Bouzakis, E., Lemmer, O., Bolz, S. (2016). *Film thickness effect on mechanical properties and milling performance of nano-structured multilayer PVD coated tools*. Surface & Coatings Technology. 307: 452-460.
Sobachkin, A. and Dumnov G. (2013). *Numerical basis of CAD-embedded CFD*. NAFEMS World Congress. 7-11.
Society of Vacuum Coaters. (2015). *SVC - 57th Annual Technical Conference Proceedings*. Chicago, IL USA, in: Society of Vacuum Coaters.
Sözer, İ. E., Geçim, S., Kıdık, G., Çakır, M. C. (2020). *Process optimisation of HMDSO polymerisation in PVD vacuum medium by numerical analysis for automotive industry*. Journal of The Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University. 36-1, 119-132 . DOI: 10.17341/gazimmfd.656258.
Struller, C.F., Kelly, P.J., Copeland, N.J. (2014). *Aluminum oxide barrier coatings on polymer films for food packaging applications*. Surface Coatings Technology. 241: 130–137.
Theiß, S., Bibinov, N., Bagcivan, N., Ewering, M., Awakowicz, P., Bobzin, K. (2010). Journal of Physics. D: Applied Physics 43: 075205.
Thompson, M.W. Harwell, A.E.R.E. (1968). *The energy spectrum of ejected atoms during the high energy sputtering of gold*. Philosophical Magazine. 18, 377.
Tracton, A. A. (2006). *Coatings technology handbook*. CRC Press Taylor & Francis Group, USA, ISBN-10: 1-57444-649-5, ISBN-13: 978-1-57444-649-4.
Trucchi, D. M., Bellucci A., Girolami M., Mastellone M., Orlando S. (2017). *Surface texturing of CVD diamond assisted by ultra short laser pulses*. Coatings. 1-18.
Tsuchiyama, A., Fujimoto, S. (1995). *Proceedings NIPR Symposium.* Antarctic Meteorites. Vol. 8, 205–13.
Vallon, S., Hofrichter A., Dre´villon, B., Klemberg-Sapieha, J., Martinu, L., Poncin-Epaillard, F., Schalchi, A., Benattar, J. (1996). *Adhesion mechanism of silica layers on plasma-treated polymers*. I. Polycarbonate, Journal of Adhesion Science and Technology. 10: 1287–1311.
Venkattraman, A., Alexeenko, A. (2011). *Direct simulation Monte Carlo Study of Effects of Thermal Nonuniformities In Electron-Beam Physical Vapor Deposition*. Journal of Vacuum Science & Technology A. 29, 041509; doi: 10.1116/1.3592890.

Veprek, S., Heijman, M. G. J. V., Karvankova, P., Prochazka, J. (2005). *Different approaches to superhard coatings and nanocomposites*. Thin Solid Films, 476: 1-29.
VW PV1200. (2020). *Testing of Resistance to Environmental Cycle Test*. +80/-40 °C https://www.testxchange.com/standard/pv-1200/ Erişim Tarihi: 04.05.2020
Wasa, K., Kitabatake, Adachi, M., H. (2004). *Thin film materials technology - Sputtering of Compound Materials*. William Andrew, Inc. UK, USA, ISBN: 0-8155-1483-2.
Wang C., Wang S., Cai W., Shao X. (2017). *Silver mirror for enhancing the detection ability of near–infrared diffuse reflectance spectroscopy*. Talanta. 162: 123–129.
Wilcox D.C. (1998). *Turbulence modeling for CFD*. DCW industries, Vol. 2. La Canada, CA, 137-140.
Willey, R. (2002). *Practical Design and Production of Thin Films*. Marcel Dekker. Basel.
Xiong, Y., Hewins, R. (2000). *Coatings of Optical Surfaces.* 63rd Annual Meteoritical Society Meeting. Chicago, 5089.
Yang, Q., Zhao, L. R. (2005). *Microstructure, mechanical and tribological properties of novel multi-component nanolayered nitride coatings*. Surface and Coatings Technology. 200: 1709-1713.
Yang, Y., Jiupeng, S., Feng, B., Ailong, Z., Fusheng, P. (2015). *Ultra-high purity tungsten and its applications*. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. 53: 98–103.
Yang, Y.G., Johnson, R.A., Wadley, H.G.N. (1996). *a Monte Carlo simulation of the phsycal vapor depasation of nickel*. Acta Metallurgica Inc. 45:1455-1468.
Yasuda, T., Kando, M. 2007. *Improvement of the luminous run-up characteristics in ballast-integrated compact fluorescent lamps covered with outer globes*. Leukos 4. 57-70.
Yılmaz, E. (2019). *Dalga Boyu.* Aydınlatma Portalı, Aydınlatma Sözlüğü. Trabzon, Internet Source, https://www.aydinlatma.org/dalga-boyu.html.
Zhao, P., Riesch, J., Höschen, T., Almanstötter, J., Balden, M., Coenen, J.W., Himml, R., Pantleon, W., Toussaint U., Neu, R. (2017). *Microstructure, mechanical behaviour and fracture of pure tungsten wire after different heat treatment*. International Journal of Refractory Metals & Hard Materials. 68:29–40.