



**AKIŞKAN YATAK REAKTÖRDE HELİKOPTER TRANSMİSYON TORK
ŞAFTINA POLİAMİD KAPLAMA UYGULAMASI VE KAPLAMANIN
KARAKTERİZASYONU**

Selim KEVRAN

**DOKTORA TEZİ
KİMYA MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

KASIM 2018

Selim KEVRAN tarafından hazırlanan “AKIŞKAN YATAK REAKTÖRDE HELİKOPTER TRANSMİSYON TORK ŞAFTINA POLİAMİD KAPLAMA UYGULAMASI VE KAPLAMANIN KARAKTERİZASYONU” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Gazi Üniversitesi Kimya Mühendisliği Anabilim Dalında DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Prof. Dr. Atilla Mirati MURATHAN

Kimya Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum.



Başkan: Prof. Dr. Zarife MISIRLIOĞLU

Kimya Ana Bilim Dalı, Ankara Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum.



Üye: Prof. Dr. Nursel DİLSİZ

Kimya Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum.



Üye: Prof. Dr. Atilla BIYIKOĞLU

Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum.



Üye: Doç. Dr. Abdurrahman ASAN

Kimya Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Hitit Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum.



Tez Savunma Tarihi: 30 /11 /2018

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Doktora Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

.....

Prof. Dr. Sena YAŞYERLİ
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Selim KEVRAN

30/11/2018

AKIŞKAN YATAK REAKTÖRDE HELİKOPTER TRANSMİSYON TORK ŞAFTINA POLİAMİD KAPLAMA UYGULAMASI VE KAPLAMANIN KARAKTERİZASYONU

(Doktora Tezi)

Selim KEVRAN

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Kasım 2018

ÖZET

Havacılıkta kullanılan parçaların bir çoğu yurtdışından tedarik edilen yüksek maliyetli parçalardır. Bu parçaların tedarik maliyetlerinin yanısıra bakım, onarım ve yenileştirme maliyetleri oldukça yüksektir. Bu tez çalışmasında helikopter torkmetre şaftına poliamid kaplamanın uygulanabilirliği araştırılmıştır. Poliamid-11 kaplamanın uygulanması için iki farklı boyutta akışkan yatak reaktör tasarlanarak imal edilmiştir. Akışkan yatak reaktörde yatak boşluk kesri, akışkanlaşma hızları, basınç düşmesi değeri gibi akışkanlaşma prosesine ait parametreler hesaplanmıştır. Torkmetre şaft için fırında gerekli değişiklikler yapılmış ve kaplama için gerekli maskeleme aparatları imal edilmiştir. Aynı zamanda şaftın üç boyutlu çizimleri SolidWorks programıyla yapılarak ANSYS programında termal analiz uygulanmıştır. Parçanın 2 saat boyunca yapılan analiz sonunda en yüksek 193 °C'ye sıcaklığa ulaştığı görülmüştür. Poliamid kaplama ve kaplama öncesi metal yüzeye uygulanan astarın termal özelliklerinin belirlenmesi amacıyla Termogravimetrik Analiz Cihazı (TGA) ve Diferansiyel Taramalı Kalorimetre (DSC) ile termal analizler yapılmıştır. DSC analizlerinden polimerin camsı geçiş sıcaklığının 46 °C, erime sıcaklığının ise 186 °C olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca astarın DSC spektrumundan içerisinde yaklaşık kütlece % 50 su bulunduğu tespit edilmiştir. TGA analizlerinden polimer ve astarın bozunma sıcaklıkları sırasıyla 415 °C ve 395 °C olarak bulunmuştur. Fourier Dönüşümlü Infrared Spektrometre (FTIR) cihazıyla poliamid-11 ve astarın yapısında bulunan bağ yapıları belirlenmiştir. Polimerik kaplamanın yüzey morfolojisinin incelenmesi amacıyla kaplama yüzeyinden 10 µm² yüzey alanı Atomik Kuvvet Mikroskopuyla (AFM) taranmış ve ortalama yüzey pürüzlülüğü 0,148 µm olarak tespit edilmiştir. Astar-polimer ve metal-astar arayüzlerinde kaplamanın yapışma durumunun belirlenmesi amacıyla Taramalı Elektron Mikroskopuyla (SEM) farklı büyütme oranlarında görüntüler elde edilmiştir. Polimerik kaplamanın korozyon dayanımının belirlenmesi amacıyla Al-2024 ve St-37 çelik plakalar farklı kalınlıklarda poliamid-11 ile kaplanmıştır. Plakalara 360 saat ve 720 saat boyunca tuz püskürtme testi uygulanmış ve herhangi bir korozyon görülmediği tespit edilmiştir. Ayrıca polimerik kaplamanın sıcak yağ dayanımı da test edilmiştir. Mekanik aksamalarda kullanılan parçalara bu kaplamanın uygulanabilirliğinin belirlenmesi amacıyla poliamid kaplamanın mekanik dayanım testleri yapılarak sonuçların iyi seviyede olduğu gözlenmiştir.

Bilim Kodu : 91218
Anahtar Kelimeler : Poliamid-11, Astar, TGA, Camsı Geçiş Sıcaklığı, Bozunma Sıcaklığı, FTIR, AFM, Yüzey Pürüzlülüğü, SEM, Al-2024, St-37, Korozyon ve Mekanik Dayanım
Sayfa Adedi : 81
Danışman : Prof. Dr. Atilla Mirati MURATHAN

APPLICATION OF POLYAMIDE COATING TO HELICOPTER TRANSMISSION
TORQUE SHAFT IN A FLUIDIZED BED REACTOR
AND COATING CHARACTERIZATION

(Ph. D. Thesis)

Selim KEVRAN

GAZİ UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

November 2018

ABSTRACT

Most of the parts used in aviation industry are procured from abroad and they are high priced parts. Besides the procurement cost overhaul, maintenance and modernization costs are also very high. In this thesis, the applicability of polyamide coating to helicopter torque shaft was investigated. For the application of polyamide-11 coating, two different sized fluidized bed reactor were designed and manufactured. For fluidized bed reactor, some fluidization parameters such as bed void fraction, fluidization velocities and pressure drop value were calculated. The oven was modified for heating torque shaft and for coating process masking parts were manufactured. In addition, the 3D drawing was made by using Solid Works and thermal analysis was carried out with ANSYS program. After 2 hours thermal analysis, the shaft reached to maximum 193 °C. To determine the thermal properties of polyamide coating and primer that applied before polymer coating on metal surface, thermal analyses were performed with Thermogravimetric Analysis and Differential Scanning Calorimeter. Glass transition temperature and melting temperatures of polymer were found as 46 °C and 186 °C respectively from DSC spectrum. Furthermore, it was obvious that primer contains 50 % percent by weight water. Decomposition temperatures of polymer and primer were found 415 °C and 395 °C respectively with TGA analyses. The molecular bonds of polyamide-11 coating and primer were characterized by FTIR spectrometer. To examine the polymeric coating, surface morphology 10 µm² surface area was scanned by Atomic Force Microscope and average surface roughness value was found as 0,148 µm. The images of primer-polymer and primer-metal interfaces at different magnification ratios were obtained by Scanning Electron Microscope (SEM) to evaluate the adhesion of coating to interfaces. To identify the corrosion resistance of polymeric coating, Al-2024 and St-37 test plates were coated with different coating thickness. After 360 and 720 hour salt spray test any corrosion defect and failure was not observed. To determine the applicability of coating to dynamic mechanical parts, some mechanical strength tests were performed and it was observed that coating mechanical test results were fine.

Science Code : 91218

Key Words : Polyamide-11, Primer, TGA, Glass Transition Temperature, Decomposition Temperature, FTIR, AFM, Surface Roughness, SEM, Al-2024, St-37, Corrosion and Mechanical Resistance.

Page Number : 81

Supervisor : Prof. Dr. Atilla Mirati MURATHAN

TEŞEKKÜR

Bu tezin her aşamasında bana yol gösteren ve desteğini benden esirgemeyen kıymetli tez hocam Sayın Prof. Dr. Atilla Mirati MURATHAN'a ve tez süresi boyunca değerli katkılarıyla beni yönlendiren Prof. Dr. Nursel DİLSİZ'e ve Prof. Dr. Atilla BIYIKOĞLU'na teşekkürlerimi sunmayı bir borç bilirim.

Ayrıca tezim yürütülmesi aşamasında deneysel çalışmalarda yaptıkları yardımlarla bana destek olan Erhan KÜÇÜK'e, Mümtaz KARARTI'ya, 5'inci Ana Bakım Fabrika Müdürlüğü çalışanlarına ve laboratuvar çalışmalarında desteklerini esirgemeyen Gazi Üniversitesi Fotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi çalışanlarına teşekkür ederim.

Bana tez süresi boyunca her türlü desteği veren ve gösterdiği anlayış ile doktorayı bitirmem konusunda beni teşvik eden sevgili eşim Cansu KEVRAN'a, çalışmalar sırasında onunla vakit geçiremediğim dünya tatlısı kızım İpek Nur KEVRAN'a, hayatımın her anında yanımda olan ve desteklerini benden esirgemeyen babam Hayrettin KEVRAN'a, annem Ruhuşen KEVRAN'a ve abim Fatih KEVRAN'a teşekkürü borç bilirim.

Yaptığım bu tez çalışmasını Türk milletinin bekası ve vatanın bölünmez bütünlüğünü korumak uğruna canlarını seve seve veren aziz şehitlerimize ve onların değerli ailelerine ithaf ediyorum.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	x
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xi
RESİMLERİN LİSTESİ	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xv
1. GİRİŞ.....	1
2. POLİMERİK KAPLAMALAR.....	3
2.1. Poliamid-11 Kaplama	4
2.1.1. Kaplama öncesi yüzey temizleme yöntemleri	5
2.1.2. Poliamid-11 kaplama yöntemleri.....	9
2.2. Literatür Çalışmaları	13
3. MALZEME VE YÖNTEM	21
3.1. Akışkan Yatak İmalatı ve Akışkanlaşma Parametrelerinin Bulunması	21
3.2. Maskeleme Aparatları, Isıtma ve Soğutma Ekipmanları	23
3.3. Termal Analizler	26
3.4. ATR-FTIR Analizleri.....	27
3.5. ANSYS Programıyla Sistemin Isıl Modellenmesi	27
3.6. Kaplamanın Yüzey Morfolojisi ve Arayüzey Yapışma Performansının İncelenmesi.....	28
3.7. Kaplamanın Korozyon, Kimyasal ve Mekanik Dayanımı Testleri.....	29
3.7.1. Tuz püskürtme testi	29
3.7.2. Sıcak yağa dayanım testi	31

	Sayfa
3.7.3. Çizik testleri.....	31
3.7.4. Sertlik testleri.....	33
3.7.5. Darbe (ağırlık düşürme) testi.....	34
3.7.6. Bükme testi.....	34
3.7.7. Aşınma dayanımı testi	35
4. DENEY VE ANALİZ SONUÇLARI	37
4.1. Akışkan Yatak Parametreleri	38
4.2. Termal Analizler	39
4.2.1. DSC analizleri	39
4.2.2. TGA analizleri	43
4.3. ATR-FTIR Analizi.....	44
4.4. ANSYS Programıyla Şaftın Isıl Modelleme Sonuçları.....	46
4.5. Kaplamanın ve Kaplama Öncesi Metalin Yüzey Morfolojisi.....	48
4.6. Kaplamanın Metal Yüzeye Yapışma Performansı.....	50
4.7. Kaplamanın Korozyon, Kimyasal ve Mekanik Dayanımı Testleri.....	51
4.7.1. Tuz püskürtme testi	51
4.7.2. Sıcak yağa dayanım testi	52
4.7.3. Çizik testleri.....	52
4.7.4. Sertlik testleri.....	58
4.7.5. Darbe (ağırlık düşürme) testi.....	59
4.7.6. Bükme testi	60
4.7.7. Aşınma dayanımı testi	60
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	63
KAYNAKLAR	69
EKLER.....	75
EK-1. Sıvı Astara Ait MSDS Formu	76

Sayfa

EK-2. Poliamid-11'e Ait MSDS Formu.....	80
ÖZGEÇMİŞ	81



ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Metallerin aktiflik serisi.....	6
Çizelge 2.2. Dairesel bir parçacığa ait teriminal hız değerleri.....	13
Çizelge 3.1. Farklı daldırma sıcaklıklarında kaplama numuneleri	30
Çizelge 3.2. Farklı ısıtma sürelerinde kaplama numuneleri	31
Çizelge 4.1. Akışkanlaşma parametrelerinin hesaplanmasında kullanılan değerler	38
Çizelge 4.2. Polimer ve astara ait ATR-FTIR spektrumu.....	45
Çizelge 4.3. Poliamid kaplama yapılmamış çelik numunenin yüzey pürüzlülük parametreleri	49
Çizelge 4.4. Kaplamanın yüzey pürüzlülük parametreleri.....	50
Çizelge 4.5. Poliamid-11 kaplamanın shore sertlik testi sonuçları.....	58

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Hint yağından aminoundekanoikasit eldesi	4
Şekil 2.2. Aminoundekanoikasitin polimerizasyon reaksiyonu.....	5
Şekil 2.3. Akışkan yatak	10
Şekil 2.4. Akışkan yatak davranışları	10
Şekil 2.5. Akışkan yataklı reaktörde akışkan hızı-basınç düşmesi eğrisi	11
Şekil 3.1. Ansys programına yüklenen şaftın üç boyutlu çizimi	28
Şekil 4.1. Polimerin -100 ile 350 °C sıcaklık aralığına ait DSC spektrumu.....	39
Şekil 4.2. Polimerin 30°C ile 80 °C sıcaklık aralığına ait DSC spektrumu.....	40
Şekil 4.3. Polimerin 140 °C ile 250 °C sıcaklık aralığına ait DSC spektrumu.....	41
Şekil 4.4. Astarın -100 °C ile 350 °C sıcaklık aralığına ait DSC spektrumu.....	41
Şekil 4.5. Astarın -30 °C ile 50 °C sıcaklık aralığına ait DSC spektrumu.....	42
Şekil 4.6. Astarın 20 °C ile 200 °C sıcaklık aralığına ait DSC spektrumu.....	42
Şekil 4.7. Polimer numunesinin TGA spektrumu.....	43
Şekil 4.8. Astar numunesinin TGA spektrumu.....	44
Şekil 4.9. Polimerin ATR-FTIR spektrumu.....	44
Şekil 4.10. Astarın ATR-FTIR spektrumu.....	45
Şekil 4.11. Torkmetre şaftın en sıcak noktasının zaman-sıcaklık grafiği	47
Şekil 4.12. Torkmetre şaftın tamamının zaman-sıcaklık dağılımı	47
Şekil 4.13. Poliamid kaplama yapılmamış çelik numunenin üç boyutlu yüzey görüntüsü.....	48
Şekil 4.14. Poliamid kaplanmış çelik numunenin üç boyutlu yüzey görüntüsü	49
Şekil 4.15. Kaplama-metal arayüzeyinin farklı büyütme oranlarındaki SEM görüntüleri.....	50
Şekil 4.16. Metal-astar arayüzeyinin 100 ve 750 büyütme oranında SEM görüntüleri.....	51
Şekil 4.17. 5 N'a kadar yapılan çizik testine ait sürtünme kuvveti-yük grafiği	53

Şekil	Sayfa
Şekil 4.18. 5 N'a kadar yapılan çizik testine ait akustik emisyon grafiği	53
Şekil 4.19. 5 N'a kadar yapılan çizik testine ait penetrasyon derinliği grafiği.....	54
Şekil 4.20. 25 N'a kadar yapılan çizik testine ait sürtünme kuvveti-yük grafiği	54
Şekil 4.21. 25 N'a kadar yapılan çizik testine ait akustik emisyon grafiği	55
Şekil 4.22. 25 N'a kadar yapılan çizik testine ait penetrasyon derinliği ölçümü	55
Şekil 4.23. 25 N'a kadar yapılan çizik testinin optik mikroskop görüntüsü	55
Şekil 4.24. Manuel tip çizik test cihazıyla 20 N kuvvet ile oluşturulan çizik testine ait SEM görüntüsü.....	56
Şekil 4.25. Manuel tip çizik test cihazıyla 40 N kuvvet ile oluşturulan çizik testinin farklı büyütme oranlarındaki SEM görüntüleri	58

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 2.1. Kaplama yapılmış metal yüzey SEM görüntüsü	7
Resim 2.2. Kumlama makinesinde kullanılan plastik medya ve cam tozu.....	8
Resim 2.3. Hava aracı gövdesine uygulanan kumlama işlemi.....	8
Resim 3.1. Küçük ölçekli akışkan yatak	21
Resim 3.2. Büyük ölçekli akışkan yatak	22
Resim 3.3. İmal edilen dağıtıcı plaka.....	22
Resim 3.4. As-532 Cougar helikopteri	23
Resim 3.5. Helikopter torkmetre şaftı.....	24
Resim 3.6. Helikopterden sökülen torkmetre şaftın kaplaması yıpranmış dişli bölümü	24
Resim 3.7. İmal edilen maskeleme aparatları	25
Resim 3.8. İmal edilen platform ve soğutma ekipmanları	26
Resim 3.9. a) Termogravimetrik analiz cihazı b) Diferansiyel taramalı kalorimetre	26
Resim 3.10. SEM analizi için hazırlanan poliamid kaplı çelik test numuneleri	29
Resim 3.11. Tuz püskürtme testi kabin içi görüntüsü.....	30
Resim 3.12. Mikro çizik cihazı	32
Resim 3.13. Manuel tip çizik cihazı.....	33
Resim 3.14. Persoz pendulum sertlik ölçüm cihazı	33
Resim 3.15. Kalem sertlik ölçüm cihazı	34
Resim 3.16. Aşınma test cihazı.....	35
Resim 4.1. İmal edilen şaftın kaplama görüntüsü.....	48
Resim 4.2. 200 µm kalınlıkta poliamid-11 kaplı Al-2024 plakanın 336 saat tuz testi sonrası görüntüsü	51
Resim 4.3. Poliamid-11 kaplı St-37çelik plakaların 720 saat tuz testi sonrası görüntüsü	52

Resim	Sayfa
Resim 4.4. Poliamid-11 kaplı St-37çelik plakaların $60\pm 20^{\circ}\text{C}$ sıcaklıkta 10W-40 motor yağına daldırma testi sonuçları	52
Resim 4.5. Manuel tip çizik test cihazıyla yapılan test sonuçları	56
Resim 4.6. Farklı ağırlıklarla gerçekleştirilmiş darbe testi sonuçları	59
Resim 4.7. Bükme testi sonrası plakaların görüntüleri a) 102 μm kalınlıkta poliamid 11 kaplı plaka, b) 170 μm kalınlıkta poliamid-11 kaplı plaka	60
Resim 4.8. Aşındırma testi sonrası poliamid-11 kaplı DKP plakanın yüzey görüntüsü	61



SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	Açıklamalar
d_p	Partkül çapı
u_{mf}	Minimum hava hızı
u_t	Terminal hava hızı
ϵ_{mf}	Minimum akışkanlaşma anında yatak boşluk kesri
A_c	Yatağın kesit alanı
h	Yatak yüksekliği
h_a	Konveksiyonla ısı aktarım katsayısı
L_{c1}	Kaplamada ilk çatlağın oluştuğu kritik yük değeri
L_{c2}	Kaplamanın kırıldığı kritik yük değeri
L_{c3}	Kaplamanın yüzeyden koptuğu yük değeri
S_a	Yüzey pürüzlülüğü aritmetik ortalama değeri
S_{ku}	Yüzey pik keskinliği
S_q	Yüzey pürüzlülüğü karekök ortalama değeri
S_{sk}	Yüzey çarpıklığı
u	Hava hızı
W_s	Akışkan yatakta bulunan partiküllerin toplam ağırlığı
ϵ	Yatak boşluk kesri
ρ_g	Gazın yoğunluğu
ϕ	Parçacık şekil faktörü
ρ_c	Katı partiküllerin yoğunluğu

Kısaltmalar	Açıklamalar
AFM	Atomik kuvvet mikroskobu
AISI	Amerikan demir ve çelik ensititüsü
AlN	Aluminyum nitrit
AlSiN	Aluminyum silisyum nitrit

Kısaltmalar**Açıklamalar**

ATR	Attebuated total reflectance
DMA	Dinamik mekanik analiz
DSC	Diferansiyel taramalı kalorimetre
FTIR	Fourier dönüşümlü kızılötesi spektrometresi
MSDS	Malzeme güvenlik bilgi formu
SEM	Taramalı elektron mikroskobu
TGA	Termogravimetrik analiz cihazı
XRD	X ışını difraktometresi



1. GİRİŞ

Dünyada havacılık sektörü filo, personel, bakım-onarım tesisleri bakımından gün geçtikçe büyümektedir. Ancak hava araçlarında kullanılan parçalar genelde yurt dışı firmalardan tedarik edilmeleri sebebiyle ülke ekonomisine maddi açıdan büyük kayıplar yaşatmaktadır. Havacılık alanında Türkiye'yi daha ileri taşımak ve ülke ekonomisine katkı sağlamanın yolu, öncelikle bu parçaların yerli imkanlarla bakım-onarım ve üretimini sağlayacak teknoloji ve bilgi birikiminin ülkeye kazandırılmasıdır. Bu kabiliyeti kazanmak kadar malzemelerin kullanım ömürlerinin uzatılması da oldukça önemlidir. Korozyon, metal malzemelerin ömürlerini kısaltan en önemli etkidir. Havacılık sektöründe korozyonun malzeme ömrüne etkisinden belki daha önemlisi, uçuş güvenliğine olan etkisidir [1]. Mal ve can kaybına sebep olan korozyonu engellemenin yolu, korozyon mekanizmasını iyi tanımak ve önceden tedbir almaktan geçer.

Genel olarak korozyon; çevre etkileri sebebiyle metal ve metal alaşımların kimyasal ve fiziksel çözünme şeklinde aşınmasıdır [2]. Platin, gümüş ve altın gibi soymetaller dışında kalan metaller için korozyon önemli bir tehdittir. Ancak korozyon sadece metal malzemeler için değil metal olmayan malzemelerinde yapısını olumsuz yönde etkilemektedir. Örneğin günümüzde geniş kullanım alanı bulunan plastik malzemelerin genelde güneş, nem karşısında zamanla sarardığını veya yumuşadığını görürüz.

Korozyon metal ile ortam ara yüzeyinde gerçekleşmesinden dolayı, korozyondan korunmak için bu ara yüzeye müdahale ederek metal ortam ilişkisini kesmek gerekir. Genelde metali başka metallerle kaplamak anodik veya katodik koruma sağlamaktadır

[3-5]. Ancak metal kaplama havuzlarından doğaya yapılan ağır metal içeren atık su deşarjları insan sağlığına ve doğaya önemli zararlar vermektedir. Deşarj edilen bu atıksular siyanür vb. bir çok zehirli ve kanserojen kimyasal içermektedir. Bu sebeple son yıllarda doğaya ve insan sağlığına zarar veren bu kaplamalar yerine alternatif kaplamaların etkinliği araştırılmakta ve tamamen organik maddelerden elde edilen polimerik kaplamalar üzerine çalışmalar yapılmaktadır [6-10].

Monomer adı verilen küçük yapıların art arda bağlanarak uzun bir zincir oluşturdukları yapılara polimer denilmektedir. Sahip oldukları üstün özellikleri sayesinde polimerler

inşaat, otomotiv, elektronik, tekstil, uzay teknolojileri, savunma sanayi, ev eşyaları gibi bir çok alanda kullanılmaktadır. Polimer yapılar hafif, kolay işlenebilir ve korozyon dayanımları yüksektir. Kimyasal bileşimlerine göre organik ve inorganik olmak üzere iki türü vardır. Isıya karşı davranışlarına göre de termoset ve termoplastik olmak üzere ikiye ayrılırlar. Termoset polimerler ısıyla şekil almazken, termoplastik polimerler ısıyla yumuşayarak şekil değiştirebilirler. Günlük hayatta ve endüstride en çok kullanılan polimerler; polietilen, polipropilen, poliüretan, polistiren, poliamid ve polivinilklorüddür. Araba tekerleri, plastik şişeler, pencereler, köpükler, ısı yalıtım malzemesi, gözlükler, bandaj vb. birçok malzeme polimerlerden elde edilmektedir. Korozyon dayanımı yüksek polimerik kaplama üretimi için çalışmalar yapılmaktadır [11-13].

Fransadan tedarik edilmiş olan ve halen kullanılan As-532 Cougar model helikopterlerine ait yurt dışından tedarik edilen torkmetre şaft isimli parça yurt içinde onarılamamaktadır ve tedariki yurtdışından çok yüksek maliyetlerle gerçekleştirilmektedir. Bu şaft, helikopterin transmisyona (güç aktarma grubu) içinde bulunarak motordan elde edilen anlık tork değerinin ölçülerek pilot gösterge paneline aktarılması işlevini sağlamaktadır. Motordan transmisyona gelen gücün yüksek olması sebebiyle şaftın dişli kısmını korumak amacıyla dişli yüzeyi poliamid11 ile kaplanmıştır. Helikopter yenileştirmeye geldiği zaman bu şaft sökülerek dişli kısmında hasar gören kaplamalı yüzeylerin bulunması halinde şaft yurtdışından tedarik edilen yeni şaftla değiştirilmektedir. Bu tez çalışmasında bu şaftın yurtdışından yenisinin tedarik edilmesi yerine, helikopterden sökülen parçanın poliamid11 kaplamasının yurt içi imkanlarla yapılarak ülke ekonomisine katkı sağlanması hedeflenmiştir. Bu amaçla kaplama prosesi için gerekli akışkan yatak, maskeleme aparatları, soğutma sistemi gibi ekipmanların imalatı, poliamid11 kaplamanın helikopter torkmetre şaftına uygulanabilirliği ve kaplamanın karakterizasyonu incelenmiştir.

2. POLİMERİK KAPLAMALAR

Polimerler, monomer isimli uzun, tekrar eden moleküllerden oluşan yapılardır. Polimerik yapılar üç boyutlu veya iki boyutlu dizilim gösterebilirler. Yapılarında karbon, oksijen ve hidrojen atomu bulundurlar. Polimeri oluşturan monomerler doğrusal dizilim gösterdikleri durumda bu yapılara termoplastik polimerler, çapraz bağlanmaları durumunda oluşturdıkları yapılara ise termoset polimerler denmektedir. Termoplastik polimerler, ısı altında molekül zincirleri arasında bağların uyarılması sonucunda eriyebilmekte iken, termoset polimerler ise ısı altında sertleşerek kırılğan özellikler göstermektedirler. Polimerler çevrede doğal olarak bulunabildikleri gibi, laboratuvar ortamında da sentezlenebilmektedir. Doğal ortamda canlı varlıkların bünyelerinde oluştuğu düşünülen polimerlere örnek olarak; pamuk, nişasta, selüloz ve doğal kauçuk gösterilebilir. Polietilen, polipropilen, poliester ve poliamidler endüstride sentezlenen ve sıklıkla kullanılan polimelere örnek gösterilebilir. Polimerler yapılarına göre organik ve inorganik yapıda olmaktadır. Genelde inorganik polimerler metal ve ametallerden oluşurken, organik polimerler sentetik veya doğal olabilirler.

Son yüzyılda sentetik polimerlerin üretimi ve geliştirilmesine yönelik bilim ve teknoloji hızla gelişmektedir. Polimer teknolojisi yalnız gelişmiş ülkelerde değil gelişmekte olan ülkelerde de hızla büyümektedir. Önümüzdeki yıllarda dünyada yıllık polimer üretiminin 300-400 milyon ton olması ve polimerik malzemelerin birçok uygulamada diğer malzemelerin yerine alternatif malzemeler olarak kullanılması beklenmektedir.

Endüstride kullanılan polietilen, polipropilen, polisitiren ve polivinil klorür gibi polimerlerin yanında spesisik ve üstün özellikleri sebebiyle poliamid polimerleri de farklı amaçlarla kullanılmakta ve son yıllarda yapılan çalışmalara araştırma konusu olmuşlardır. Polimerik malzemelerin kaplama sektöründe rolü her geçen yıl daha fazla önem kazanmaktadır.

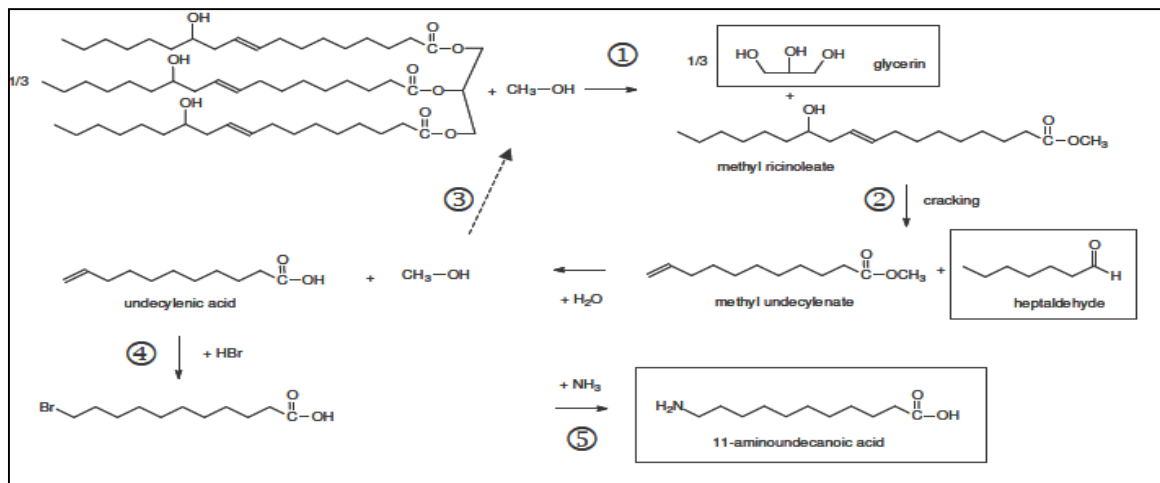
Etkin ve verimli bir şekilde kullanılabilmesi için polimerik kaplamaların kaplama yapılacak yüzeylerde bir film tabakası oluşturarak;

- Yüzeye iyi tutunması,
- Kolaylıkla yüzeyden kopmaması,
- Isı, nem, tuz ve çeşitli kimyasallar sebebiyle bozunmaması gerekmektedir.

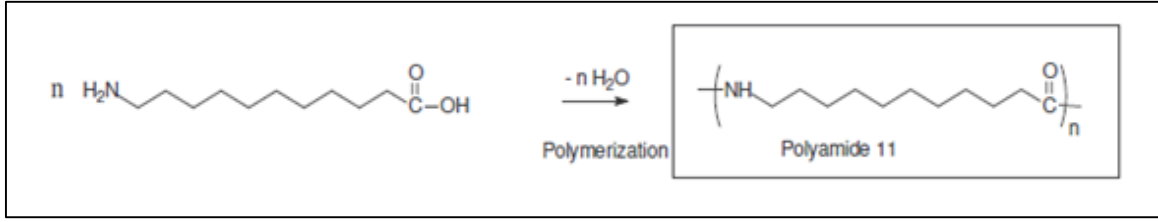
Örneğin, alkid ve akrilik reçineler genelde tarım ve endüstriyel ekipmanların korozyondan korunması amacıyla kullanılmaktadır. Solventlerle çözünbilme kolaylığı ve iyi pigment ıslatma özelliğinden dolayı alkid ve akrilik reçineler boya uygulamalarında sıklıkla kullanılmaktadırlar. Poliüretan kaplamalar, her türlü beton ve çelik yüzeylerde uygulanan, kolay temizlenebilen, sararmaz, aşınma direnci yüksek, etkili ve koruyucu bir kaplamadır. Kimyasal ve mekanik dayanımın kritik olmadığı alanlarda tercih edilirler. Epoksi kaplamalar, diğer organik kaplamalara göre metallerle daha iyi yapışma özelliklerinden dolayı genelde astar uygulaması için tercih edilmektedirler [14].

2.1. Poliamid-11 Kaplama

Poliamid-11 hafif, biyobozunur, termoplastik toz kaplamadır. Poliamid-11 ilk olarak 1938 yılında Joseph Zeltner ve Michel Genas tarafından hint yağı bitkisinin parçalanmasıyla elde edilen aminoundekanoikasitin polimerleşme reaksiyonu ile elde edilmiştir. Endüstriyel boyutta üretimine ilk kez 1955 yılında Fransada başlanmıştır. Hint yağı bitkisinin çekirdeklerinden ekstraksiyonla yöntemiyle hint yağı elde edilmektedir. Hint yağı yaklaşık % 85 oranında risinoleik asit içermektedir. Şekil 2.1'de 1'nci reaksiyondan görüldüğü gibi risinoleik asit metanolle reaksiyona girerek metil-risinolatı oluşturur. Daha sonra metil-risinolatın parçalanmasından elde edilen metilundesilanatın hidrolizinden undesilenik asit elde edilir. Oluşan bu yapıya daha sonra sırasıyla hidrojen bromür ve amonyak ilavesiyle aminoundekanoikasit elde edilir. Bu yapının polimerizasyonundan Şekil 2.2'den poliamid-11 polimeri elde edilir [15].



Şekil 2.1. Hint yağından aminoundekanoikasit eldesi [15]



Şekil 2.2. Aminoundekanoikasitin polimerizasyon reaksiyonu [15]

Poliamid-11 toz kaplama; yüksek aşınma dayanımı, yüksek darbe dayanımı, yüksek korozyon dayanımı, düşük sürtünme katsayısı, esnek ve kolay işlenebilme özelliklerine sahiptir. Poliamid-11 toz kaplamalar otomotiv endüstrisinde şaftlarda, kayar kapı ve koltuk kızaklarında ve emniyet kemeleri tokalarında kullanılmaktadır. Ayrıca matbacılıkta baskı merdanelerinin üzerinde, bulaşık makinesi ve alışveriş arabası sepetlerinde, yer temizleme arabalarında ve yer altı su boruları, vana ve ekipmanlarının kaplanması amacıyla kullanılmaktadırlar.

2.1.1. Kaplama öncesi yüzey temizleme yöntemleri

Yüzey temizleme işlemi, kaplama yapılacak yüzeyi kaplama işlemine hazırlayarak kaplamanın yüzeye yapışma kalitesini belirlemektedir. Bu işlem adımının doğru ve kaliteli yapılabilmesi ancak yüzeyde oluşan korozyon mekanizmasının doğru anlaşılabilmesinden geçmektedir. Korozyon; çevre etkileri sebebiyle metal ve metal alaşımlı yüzeylerin kimyasal ve fiziksel çözünme şeklinde aşınmasıdır [2]. Platin, gümüş ve altın gibi soymetaller dışında kalan metaller için korozyon önemli bir tehdittir. Ancak korozyon sadece metal matrisli malzemeler için değil metal olmayan malzemelerinde yapısını olumsuz yönde etkilemektedir.

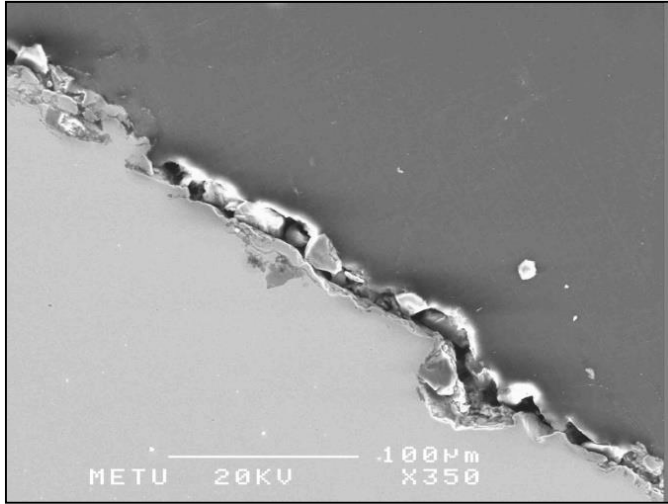
Metal malzeme yüzeyinde elektrokimyasal korozyonun gerçekleşmesi için anot ve katodu oluşturan iki elektrot, iletkenliği sağlayacak bir iletken, ayrıca elektron transferi oluşması için sıvı bir ortam gereklidir. Bu oluşan hücreye galvanik hücre denilmektedir. Korozyonun önlenmesi için devreden en az bir elemanın çıkarılması gerekmektedir. Korozyondan korunmak için korozyona dirençli uygun malzeme seçimi, malzeme tasarımı, katodik ve anodik koruma, çevresel faktörler önemlidir. Metallerin korozyona karşı dayanımlarının belirtildiği metal aktiflik serisi Çizelge 2.1'de belirtilmiştir [16].

Çizelge 2.1. Metallerin aktiflik serisi [16]

Metal/Alařım	Potansiyel (volt)	
Magnezyum	- 2,37	Çok aktif
Aluminyum	- 1,66	
Çinko	- 0,76	
Krom	- 0,74	
Demir	- 0,44	
Nikel	- 0,26	
Kalay	- 0,14	
Kurşun	- 0,13	
Hidrojen	0,00	Az aktif
Bakır	+ 0,34	
Gümüş	+ 0,80	
Altın	+ 1,68	

Kaplama uygulamaları koruyucu bakım kapsamında korozyondan korunmada en etkili yöntemlerden biridir. Kaplama, metal yüzeyi ile koroziv ortam arasında iyon hareketine direnç gösteren bir bariyer tabakası oluşturur. Bu bariyer tabakasının performansı metal yüzeyi ile yaptığı yapışma kalitesiyle doğrudan ilgilidir. Kaplama bariyerinin altındaki kirlilikler kaplamanın metal yüzeye olan tutunumunu düşürür. Bu sebeple kaplanacak metal yüzeylerin kaplama öncesi yüzeyde bulunan yağ, nem, toz, ve pastan arındırılması çok büyük önem arz etmektedir.

Yüzeyde yapılacak temizlik işlemleri yüzeyde yapılacak kaplamanın türüne ve kaplama yapılacak metalin cinsine göre değişiklik göstermektedir. İnorganik boya uygulamalarında kumlama (mekanik) yöntemi uygunken, elektrolitik kaplama uygulamalarında kumlama yerine kimyasal temizleme yöntemleri daha uygundur. Uygun yapılmayan yüzey temizleme işlemleri sonucunda Resim 2.1'de olduğu gibi metal yüzey- kaplama tabakası arasında kirlilikler giderilemeyerek kaplamanın yüzeye yapışması oldukça kötü olur.



Resim 2.1. Kaplama yapılmış metal yüzey SEM görüntüsü

Mekanik temizleme yöntemleri adından da anlaşılacağı gibi metal yüzeyindeki kirliliği mekanik işlemlerle giderilmesidir. Bunlar zımpara, silindirik tel fırça kullanılarak yapılan temizleme yöntemleri ve kumlama yöntemidir. Mekanik temizleme yöntemi kimyasal temizleme yöntemine göre avantaj ve dezavantajları vardır. Mekanik temizleme yöntemleri zamandan tasarruf sağlarken metal yüzeyinde çizik, çukur vb. mekanik hasar bırakabilir. Mekanik temizlemede yüzeye zarar vermemek için zımpara, pirinç tel fırça, döner disk tel fırçalar, polisaj makineleri gibi ekipmanlar bilinçli olarak uygulanmalıdır. Polisaj makinesi, yüzeyde oluşmuş çapak ve inatçı kirlerin o metalden daha sert bir fırçanın dönmesiyle temizler. Ayrıca kumlama makineleri zamandan tasarruf sağlamaları ve metal kaplamalara zarar vermemesi sebebiyle temizleme işlemlerinde çok sık kullanılmaktadır. Kumlama makineleriyle genelde Resim 2.2'de gösterilen plastik medya, alüminyum oksit ve cam tozu gibi malzemelerin basınçlı hava yardımıyla metal yüzeyine belirli bir hız ve açıda püskürtülerek metal yüzeyi temizlenir daha sonra bu maddeler makinede bulunan santrifuj bölümüne gelerek filtrelerden geçirilip temiz maddeler kirlenmiş maddelerden ayıklanır ve temiz medya tekrar depoya gönderilerek sisteme beslenir. Metal yüzeylerde kumlama işlemi uygulanan medya tipi ve hava basıncına göre değişiklik gösterebilir ortalama 2-9 μm aralıkta bir pürüzlülük değeri oluşturur [17-19]. Bütün bir hava aracının eski boyasının sökülmesi amacıyla maliyet ve işçilikten tasarruf sağlayan kumlama metodu tercih edildiği Resim 2.3'de görülmektedir. Maliyet ve işçilikten tasarruf sağlamanın yanında uygulayan operatörün ve uygulanan metal yüzeyin zararlı kimyasallara maruz olmasına engel olmaktadır. Bu sebeple hem malzemeyi, hem insan sağlığını koruyan avantajlı bir metottur [20].



Resim 2.2. Kumlama makinesinde kullanılan plastik medya ve cam tozu [20]



Resim 2.3. Hava aracı gövdesine uygulanan kumlama işlemi [21]

Mekanik temizleme metoduyla karbon kirlilikleri ve çeşitli oksit tabakalarının temizlenmesi mümkünken yağ, gres içeren kirliliklerin temizlenmesi mümkün değildir. Bu nedenle kimyasal temizleme mekanik temizlemeye göre bu konuda üstünlük sağlar. Kimyasal temizleme yönteminde özellikle girintili ve çıkıntılı yüzeylerde tüm yüzeyler kimyasallarla temas etmesinden dolayı homojen bir temizlik elde edilir. Çok hızlı uygulanabilir ve kullanım alanı genişir.

Genelde endüstride kimyasal temizleme yöntemleri olarak; buharla yağ alma solventleri, genel amaçlı yağ alma solventleri, asitler, alkali çözeltileri, ultrasonik temizleme çözeltileri kullanılır. Buharla yağ alma solventleriyle temizleme işleminde metal parçalarla sadece solvent buharı temas ettiğinden hızlı bir yağ alma işlemi sağlanır ve metal yüzeyde herhangi bir durulama işlemi gerektirmez. Yağ alma solventleri en çok kullanılan kimyasallardır. Bu solventler metal yüzeylere fırça, püskürtme veya sıcak/soğuk daldırma

şeklinde uygulanır. Ağır kirlilik içeren yağlar çok etkili bir şekilde metal yüzeye zarar vermeden uzaklaştırılır. Bu solventler plastik yüzeylerde de uygulanabilir. Hava aracı parçalarında en çok kullanılan temizleme metotudur. Alkali ve asit temizleme işlemleri uzun süren uygulamalarda metal yapıda çatlak ve korozyon oluşturabilirler. Bu metodu uygulayan personelin eğitilmiş ve tecrübeli olması gerekmektedir. Örneğin alüminyum alaşımlı bir metal parçayı alkali temizleme işlemi yaparsanız metal yüzeyi dağlanarak yüzeyde korozyon ve tahribat meydana gelebilir. Asidik temizleme solüsyonunda uygun oranda asit inhibitörü olmazsa bu çözelti yüzeye zarar vererek özellikle yüksek sertlikteki çeliklerde hidrojen kırılabilirliğine sebep olabilir. Asit ve alkali temizleme işleminden hemen sonra malzeme bekletilmeden durulama işlemine tabi tutulmalıdır [22].

2.1.2. Poliamid-11 kaplama yöntemleri

Poliamid-11 kaplamalar kullanım amacına yönelik olarak farklı partikül boyutlarında ve farklı renklerde üretilmektedir. Genel olarak poliamid-11 toz kaplamalarla ilgili endüstride iki farklı uygulama yöntemi bulunmaktadır.

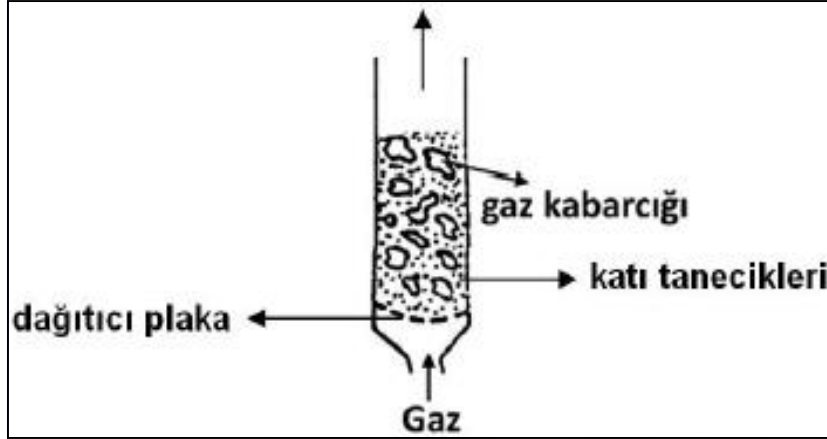
Elektrostatik kaplama

Elektrostatik kaplama yöntemi endüstride sıklıkla kullanılan ucuz ve etkili bir yöntemdir. Elektrostatik kaplama metotunda kaplama yapılacak metal parça topraklama bağlantısı yapılarak parça üzerine özel bir tabanca yardımıyla negatif yükü yüklenmiş toz polimerler gönderilmektedir. Toz polimerler ve metal yüzey arasında elektriksel yüklerdeki farklardan dolayı bir tutunum olmaktadır. Daha sonrasında metal parça fırında bekletilerek polimerik toz kaplamanın yüzeyde tutunumu artırılmaktadır. Bu metot seri üretime en uygun bir kaplama metodudur. Ancak kaplamanın kalınlığının belirlenmesi direk operatörün uygulama alışkanlığına göre değişmesinden ve metal parçanın tamamının fırına girmesi sebebiyle tez çalışmasına konu olan hava aracı şaftı için bu metot tercih edilmemiştir.

Akışkan yatak kaplama

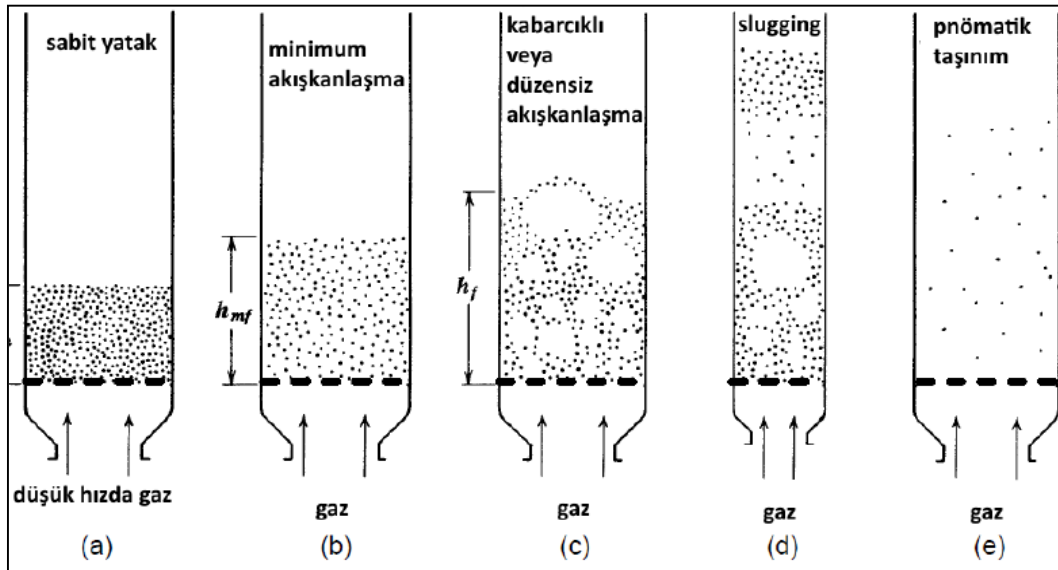
Akışkan yatak, Şekil 2.3'de görüldüğü gibi küçük katı partiküllerin bir silindir içinde tabanda bulunan dağıtıcıdan gönderilen hava vasıtasıyla hareketlenerek sıvı gibi davrandığı prosese denir. Akışkanlaşma durumunda hava hızı ile katı partiküllerin hızı aynıdır.

Akışkan yatağın özellikleri hem katı partiküllerin hemde akışkanın özelliklerine bağlıdır. Bu tez çalışmasında poliamid-11 kaplama uygulamaları akışkan yatak reaktörde daldırma metoduyla gerçekleştirilmiştir. Öncelikle kaliteli bir kaplama elde etmek için optimum kaplama parametrelerinin belirlenmesi ve akışkanlaşma mekanizmasını iyi bilmek gerekir [23].



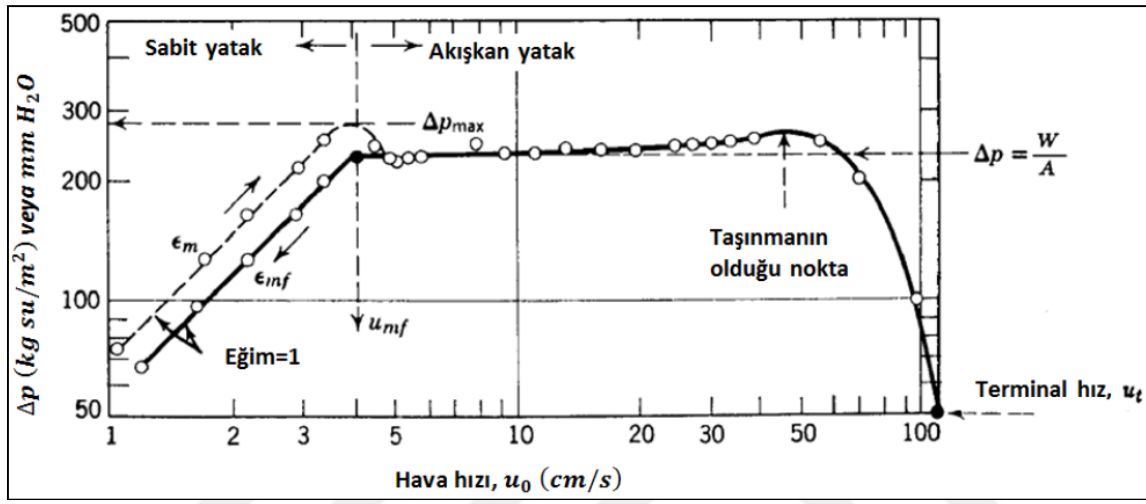
Şekil 2.3. Akışkan yatak [23]

Akışkan yataklarda Şekil 2.4'de görüldüğü gibi hava beslemesi yapıldığı andan itibaren yatakta eğer hareket yoksa buna sabit yatak, ilk hareketlenme olduğu an minimum akışkanlaşma, hava artırılması ile yatakta kabarcıklanma ve daha sonra taşma evreleri gözlemlenir.



Şekil 2.4. Akışkan yatak davranışları [23]

Şekil 2.5'de gösterildiği gibi akışkan hızının 1-4 cm/s aralığında katı partikül hareketi olmadığı görülmekte ve sabit yatak özelliği göstermektedir. Bu noktadan sonra akışkan hızı arttıkça basınç düşmesinin sabit olduğu anlaşılmaktadır. Basınç düşmesinin sabitlendiği bu akışkan hızına minimum akışkanlaşma hızı denir. Bu durumda yatak akışkan yatak özelliği göstermektedir. Hız artışı devam ettikçe katı partiküller akışkanla sürüklenmeye başlayarak taşma ve basınç düşmesi sıfıra yaklaşmaktadır.



Şekil 2.5. Akışkan yataklı reaktörde akışkan hızı-basınç düşmesi eğrisi [23]

Akışkan yatak reaktörde katı partiküllerin toplam ağırlığı Eş.2.1'de belirtildiği gibi hesaplanır.

$$Ws = \rho_c A_c h_s (1 - \varepsilon_s) = \rho_c A_c h (1 - \varepsilon) \quad (2.1)$$

ρ_c : Katı partiküllerin yoğunluğu (g/cm^3)

A_c : Yatağın kesit alanı (cm^2)

h : Yatak yüksekliği (cm)

ε : Yatak boşluk kesri

Akışkan yatakta akışkanlaşmanın ilk başladığı andan itibaren akışkanlaşma hızı artsa bile basınç düşmesi sabit kalır. Bu akışkanlaşmanın başladığı anda katı partiküllere uygulanan sürüklenme kuvveti net gravitasyonel kuvvete eşit olur. Akışkan yatak reaktörlerde basınç düşmesi değeri Eş. 2.2'den hesaplanabilir.

$$\Delta P = g (\rho_c - \rho_g)(1 - \varepsilon)h \quad (2.2)$$

g = Yer çekimi ivmesi (m/s^2)

ρ_g : Havanın yoğunluğu (g/cm^3)

Akışkan yataklarda basınç düşmesini gösteren Ergun denklemi aşağıda belirtilmiştir.

$$\frac{\Delta P}{h} = \rho_g u^2 \left[150 \frac{(1-\varepsilon)}{Re \varphi} + 1,75 \right] \frac{(1-\varepsilon)}{\varphi d_p \varepsilon^3} \quad (2.3)$$

u : Hava hızı (m/s)

φ : Parçacıkların şekil faktörüdür. Parçacık şekil faktörü değeri tipik bir katı partikül için genelde 0,6 olarak kabul edilmektedir [24].

Düşük Reynolds sayılarında vizkos kuvvetler etkin olur böylece minimum akışkanlaşma hızı hesabı için Eş. 2.3'den Eş. 2.4 denklemi elde edilir.

$$u_{mf} = \frac{(\varphi d_p)^2}{150 \mu} \left[g (\rho_c - \rho_g) \right] \frac{(\varepsilon_{mf})^3}{(1 - \varepsilon_{mf})} \quad (2.4)$$

Tek bir katı parçacık üzerine etkiyen sürüklenme kuvvetinin parçacık üzerine etkiyen gravitasyonel kuvveti aştığı noktadaki gaz hızına maksimum akışkanlaşma hızı denir. Küçük boyutlardaki parçacıklar için maksimum akışkanlaşma hızını veren denklem Eş. 2.5'de sunulmuştur [23].

$$u_t = g (\rho_c - \rho_g) \frac{(d_p)^2}{18\mu} \quad Re < 0,4 \quad (2.5)$$

Ayrıca 1000 kg/m^3 yoğunlukta dairesel bir parça için teorik terminal hız değerleri Çizelge 2.2'de verilmiştir [25].

Çizelge 2.2. Dairesel bir parçacığa ait terminal hız değerleri [25]

1000 kg/m ³ yoğunluk değerine sahip daireesel bir partikülün terminal hız değerleri	
d (μm)	u _t (m/s)
0,2	1,25 x 10 ⁻⁶
0,3	4,2 x 10 ⁻⁶
0,5	10 x 10 ⁻⁶
1	35 x 10 ⁻⁶
2	128 x 10 ⁻⁶
5	780 x 10 ⁻⁶
10	3 x 10 ⁻³
50	72 x 10 ⁻³
100	250 x 10 ⁻³
200	750 x 10 ⁻³
500	2
1000	3,85

2.2. Literatür Çalışmaları

Kaplamaların yapıldığı akışkan yatak tasarımı, imalatı ve akışkanlaşma parametreleri üzerine literatürde yapılan çalışmalara değinmek gerekirse;

Sahoo [26], endüstriyel gazlardan flor gazının ayrıştırılması amacıyla laboratuvar ölçeklerinde bir akışkan yatak tasarlayarak imal etmiştir. Alüminyum endüstrisinin atıklarından faydalanmak amacıyla kırmızı çamur partiküllerini akışkanlaşma için kullanmıştır. 63 μm partikül çapında kırmızı çamurla yeterli akışkanlaşma elde edilemediğinden farklı ağırlık oranlarında ve 250-500 μm çapında alüminyum partiküllerle karışım hazırlayarak çalışmalarını gerçekleştirerek akışkan yatakta akışkanlaşma elde etmiştir. Akışkan yatakta hava hızının artmasıyla yatak genişlemesinin arttığı ve yatakta dalgalanma düştüğünü tespit etmiştir. Yatak yüksekliğinin artması, yatakta bulunan partiküllerin ağırlığını arttırdığından basınç düşmesini arttırmıştır.

Escudero [27], akışkan yatak yüksekliğinin ve partikül çapının akışkan yatak hidrodinamiğine çeşitli etkilerinin olduğunu göstermiştir. Minimum akışkanlaşma hızının, yatak yüksekliğinden etkilenmediğini ancak partikül yoğunluğunun artması minimum akışkanlaşma hızında artmaktadır. Akışkan yatakta bulunan yatak yüksekliğinin partikül çapına oranının yatakta bulunan gaz miktarına etkisinin incelenmesi amacıyla X-ray bilgisayarlı tomografi cihazıyla görüntüler elde ederek bu görüntüleri bir program aracılığıyla analiz etmiştir. Bu amaçla cam taneleri, mısır koçanı ve hindistan cevizi kabuğu olmak üzere 3 farklı partikül kullanılarak farklı yükseklik/partikül çapı oranının gaz bekleme süresine etkilerini incelemiştir. Yatak yüksekliğinin/partikül çapına oranı

arttıkça cam partiküller için ortalama gaz bekleme süresinin düştüğü, hindistan cevizi kabuğu ve mısır koçanına ortalama gaz bekleme sürelerinin arttığını tespit etmiştir.

Ananthraman vd. [28], minimum akışkanlaşma hızının belirlemede kullanılan 4 farklı korelasyonu A, B ve D Geldart Grup partikülleri için değerlendirmişlerdir. Bu çalışmada değerlendirilen korelasyonlar partikül çapı (d_p), partikül yoğunluğu, akışkan gaz yoğunluğu, gaz viskozitesi, yatak boşluk kesri ve partikül şekil faktörü gibi parametreleri içermektedir. Bu parametre değerlerindeki değişimlerin söz konusu korelasyonlarla bulunan minimum akışkanlaşma hızını değerine olan etkileri inceleyerek ortalama standart sapmalarını bulmuşlardır.

Asif [29], katı partikül karışımları içeren akışkan yatakta laminar akış için ölçülen deneysel minimum akışkanlaşma hızlarıyla çeşitli denklemlerden hesaplanan akışkanlaşma hızlarını karşılaştırmıştır. Yoğunluğu ve parçacık çapı farklı olmak üzere iki tip karışımı incelemiştir. Minimum akışkanlaşma hızı değerinin yatakta bulunan partiküllerin karışım oranlarından çok etkilendiği sonucuna ulaşmıştır.

Perez vd. [30], akışkan yatak reaktörde farklı partikül çaplarındaki şeker kamışlarıyla minimum akışkanlaşma hızını hesaplamışlardır. 0,445 mm çapına kadar olan şeker kamışlarında partikül çapındaki artışın minimum akışkanlaşma hızını arttırdığını tespit etmişlerdir. Partikül yoğunluğunun artışı akışkanlaşma üzerine olumlu etki yaparken, partikül porozitesindeki artış akışkanlaşmayı olumsuz etkilediğini belirlemişlerdir. Farklı partikül çaplı şeker kamışlarıyla dolu akışkan yatak reaktörler için basınç düşmesi değerlerini hesaplamışlar ve partikül çapındaki artış basınç düşüşünü azalttığını tespit etmişlerdir.

Mukhtar vd. [31], A, B, C ve D grubuna ait süt tozu, kum, un ve buğday olmak üzere dört farklı partikülle akışkan yatak reaktörü doldurarak akışkan yatağa ait basınç düşmesi değeri ve minimum akışkanlaşma hızı değerlerini bulmuşlardır. Deneysel çalışmalarında en yüksek minimum akışkanlaşma hızını (29 litre/dakika) buğdayla, en düşük akışkanlaşma hızını (25 litre/dakika) ise un ile yapılan ölçümlerde tespit etmişlerdir. Partikül çap ve yoğunluğundaki artışın akışkanlaşma hızını arttırdığını belirlemişlerdir.

Sulemian vd. [32], farklı akış hızlarında katı partiküllerin akışkanlaşmasını görmek amacıyla laboratuvar ölçekli bir akışkan yatak tasarlayarak imal etmişlerdir. Akışkan yatak reaktörde 1 m yükseklikte 40 mm çapında cam tüp kullanmışlar ve akışkan yatağı 1800 µm çapında ve 2,62 g/cm³ yoğunlukta kumla 25 mm yatak yüksekliğinde doldurmuşlardır. Basınç düşmesini su dolu bir plastik manometre ile ölçmüşlerdir. Yaptıkları bu akışkan yatak için minimum ve maksimum akışkanlaşma hızlarını sırasıyla 0,64 m/s ve 245,86 m/s olarak, basınç düşmesi değerini ise minimum ve maksimum akışkanlaşma için sırasıyla 0,11 ve 43,53 mH₂O olarak tespit etmişlerdir.

Akışkan yatakta polimerik kaplama uygulamasında bazı parametreler direk kaplama kalitesini etkilemektedir. Yukarıda da bahsedildiği gibi akışkanlaşma mekanizması ile ilgili olanlar; akışkan gazın hızı, akışkan gazın yoğunluğu ve vizkozitesi, polimer partikülün çapı, polimer partikülün yoğunluğudur. Bunların dışında kaplama uygulanacak metal parçanın ısıtma sıcaklığı ve ısıtma süresi, akışkan yatağa daldırma süresi ve soğutma yöntemi kaplamanın kalitesini etkilemektedir. Akışkanlaşma mekanizmasının etkin olduğu bir akışkan yatakta daldırma süresindeki artış kaplama kalınlığında artışa, ısıtma sıcaklığının yeterli olmaması ise metal yüzeye kaplamanın iyi tutunmamasına ve yüzeyde gözeneklerin olmasına sebep olmaktadır [33].

Takeshita, Sawada, Handa, Watanuki ve Kudo poliester toz kaplama sonrası havayla soğutma süresinin artmasıyla polimerik kaplamanın kristal yapısının arttığını, yapılaşma kalitesi, darbe dayanım performansı ve parlaklığının azaldığını tespit etmişlerdir [34].

Poliamid-11 kaplama ile ilgili son yıllarda yapılan literatür çalışmalarına değinmek gerekirse;

Leong vd. [35], akışkan yatakta silindirik bakır test numunelerine iki tip termoplastik toz polimerle kaplama yapmışlar ve akışkan yatağa daldırma süresinin kaplama kalınlığına olan etkisini ve kaplamanın yüzey pürüzlülüğünü incelemişlerdir. Çalışmalarında silindirik bakır numuneler üzerine poliamid-11 ve düşük yoğunluklu polietilen kaplamışlardır. Daldırmanın ilk anında kaplamanın hızla arttığını maksimum kaplama kalınlığına kadar zamanla azalarak arttığını tespit etmişlerdir. Poliamid-11'e göre polietilenin erime noktasının daha düşük olması sebebiyle aynı sıcaklık ve daldırma süresinde polietilenin kaplama kalınlığının daha yüksek olduğunu belirlemişlerdir. Bu polimerik kaplamalarla

uygun bir kaplama eldesi için kaplanacak metal yüzeyinin daldırma anındaki sıcaklığının 240-300°C arasında olması gerektiğini ayrıca daldırma süresinin 2 saniyeden daha düşük olmaması gerektiğini belirlemişlerdir. Ayrıca kaplamanın yüzey pürüzlülüğü değerinin belirli bir daldırma süresinden sonra çok arttığını tespit etmişler ve bu noktadan metal yüzeyin ısısının polimerik kaplamanın eriyik oluşturarak sürekli bir film tabakası oluşturamamasından kaynaklandığını tespit etmişlerdir. Poliamid-11 ve polietilen kaplamanın minimum yüzey pürüzlülük değerlerini sırasıyla 1 µm ve 2 µm olarak ölçmüşlerdir.

Frübing vd. [36], ferroelektrik ve ferroelektrik olmayan poliamid-11 malzemenin camsı geçiş sıcaklığındaki moleküler hareketliliği hakkında bilgi edinmek amacıyla DSC, Dinamik Mekanik Analizi (DMA) ve Dielektrik Spektrometresi analizlerini gerçekleştirmişlerdir. Poliamid-11'in camsı geçiş sıcaklığının ve erime sıcaklığının hazırlanış metotlarından bağımsız olarak sırasıyla 50 °C ve 185 °C civarı olduğunu tespit etmişlerdir. Genel olarak poliamid-11 tüm yapılarında düşük kristalin yapı olduğu büyük çoğunluğunu sert bir amorf yapının oluşturduğunu ve bu sert yapının polimerin yapısındaki hidrojen bağlarının çapraz bağlanmasından kaynaklabileceğini öngörmüşlerdir

Liu vd. [37], poliamid-11 nanokompozitlerin ısıtma ve soğuma anında kristalizasyon davranışlarını değişken sıcaklıklı X-ışını Difraktometresi (XRD) cihazıyla incelenmiştir. Poliamid-11 ve içeriğinde ağırlıkça % 5 oranında kil bulunan poliamid-11 nanokompoziti oda sıcaklığından 220 °C sıcaklığa kadar ısıtılmış yada tam tersi 220 °C'den oda sıcaklığına kadar soğutulmuştur. PA-11/kil nano kompozitin Brill geçiş değeri saf PA-11'den 20 K daha yüksek olduğu belirtilmiştir. Bu durumun kil içeriğinde bulunan silika tabakalarının termal bariyer etkisinden kaynaklandığını öngörmüşlerdir.

Rajesh ve Bijwe [38], 10 farklı poliamid polimerin çizik dayanımlarını incelemişlerdir. Çizik testlerini sabit yük altında 10-40 N yük uygulamıştır. Aromatik grup içeren poliamid ve poliamid-66 en yüksek çizik dayanımı gösterirken, yüksek esnek yapıda poliether grup içeren poliamid ise en düşük çizik dayanımı göstermiştir. Çizik testi anında yüzey morfolojisindeki değişimi görmek amacıyla SEM cihazıyla çizilen yüzeylerden görüntüler alınmıştır.

Polimerik kaplamaların yüzey morfolojisinin incelenerek yüzeyin pürüzlülük değerlerinin tespit edilmesi amacıyla Farshad vd. [39], çelik borulara fenolik, epoksi, modifiye novolak ve poliamid-6 kaplama olmak üzere 4 farklı tip kaplama uygulaması yapmışlardır. Bu kaplamaların yüzey pürüzlülük değerlerini profilometre ve atomik kuvvet mikroskopuyla incelemişlerdir. Tüm kaplamalar için boru çapı azaldığında kaplamanın yüzey pürüzlülüğünün arttığını tespit etmişlerdir. En yüksek ortalama yüzey pürüzlülük değerinin $1,03 \mu\text{m}$ ile fenolik kaplamalı yüzeyde olduğunu, en düşük ortalama yüzey pürüzlülük değerinin $0,25 \mu\text{m}$ ile poliamid-6 kaplı yüzeyde olduğunu gözlemlemişlerdir. Ayrıca poliamid kaplı boruların yüzey pürüzlülüğünde en yüksek pik nokta ile en dip nokta arasındaki mesafeyi $0,96 \mu\text{m}$ olarak ölçmüşlerdir.

Polimer yapıların ısıyla bozunmasına yönelik olarak Beyler ve Hirschler [40] polimerlerin ısıyla bozunma karakteristiğinde kullanılan analitik test metotlarını, polimerlerin ısıyla bozunma mekanizmalarını, ısıyla bozunma anındaki fiziksel değişimlerini ve çeşitli polimerlerin ısı dayanımlarını incelemişlerdir. İnceleme yaptıkları polimer çeşitlerinden poliamid-6,6 ile ilgili olarak; bu polimerin 258°C civarı eridiğini, havada 340°C 'de azot ortamında ise 420°C 'de bozunduğunu tespit etmişlerdir. Çalışmalarında poliamid-11'in kristalin yapısının fazla olduğunu ve $185\text{-}195^\circ\text{C}$ sıcaklık aralığında eridiğini ayrıca aromatik poliamidlerin 451°C sıcaklıkta bozunduğunu belirtmişlerdir.

Elsabee vd. [41], çeşitli aromatik ve alifatik poliamidlerin hazırlanması ve karakterizasyonuna yönelik çalışma yapmışlardır. Poliamidleri tereftaoil klorid ve diaminlerin düşük sıcaklıkta arayüzey polimerleşmesi ile elde etmişlerdir. Elde ettikleri polimerlerin bağ yapılarının analizi amacıyla polimerlere $400\text{-}4000 \text{ cm}^{-1}$ dalga boyunda FTIR analizi gerçekleştirmişlerdir. Polimerlerin homojen yapıda olup olmadıklarını SEM analizi ile belirlemişlerdir. Elde ettikleri poliamidlerin termal bozunmalarının belirlenmesi amacıyla polimerlere TGA analizleri yapmışlar ve termogramlardan poliamidlerin genel olarak iki basamakta bozunduklarını görmüşlerdir. Birinci bozunma basamağının 270°C sıcaklıkta, ikinci bozunma basamağının ise ortalama $400\text{-}450^\circ\text{C}$ aralığında gerçekleştiğini görmüşlerdir.

Ayrıca kaplama karakterizasyonuna yönelik yapılan dikkat çekici çalışmalarla ilgili olarak; Jambagi vd. [42], karbon nanotüp takviyeli üç farklı tip seramik toz kaplamayı çelik numune yüzeylerine plazma spreyle kaplama yöntemiyle uygulamışlardır. Kaplanmış

yüzeylerde kaplama içerisinde karbon nano tüplerin dağılımı ve tutunmasını, kaplamanın porozitesini, sertliğini ve mikroyapısını incelemişlerdir. Kaplamada karbon nanotüplerin tutunmasını ve dağılımını Raman spektrometresiyle, kaplamanın mikro yapısını Elektron mikroskopuyla, kaplamanın sertlik ve elastikliğini ise mikro çizik cihazıyla ölçmüşlerdir.

Petkov vd. [43], katodik-ark biriktirme yöntemiyle çelik plakalar üzerine uygulanan AlSiN kaplamanın karakterizasyonu incelemişlerdir. Çalışmalarında AlSiN kaplamanın yüzey morfolojisini profilometre ve AFM cihazıyla inceleyerek ortalama yüzey pürüzlülük değerini tespit etmişler ayrıca yüzeyin 2 ve 3 boyutlu görüntülerini elde etmişlerdir. Kaplamanın yüzeye yapışma performansı ve sertliğini mikro çizik cihazıyla ölçmüşlerdir. AlSiN kaplamanın sürtünmeyle aşınma direncini tespit etmek amacıyla yaklaşık 1000 periyod boyunca abrazyon test cihazında kaplamalı plakaları 10N yüküyle test etmişlerdir. AlSiN kaplamanın kristal yapısını XRD cihazıyla incelemişler ve AlN kaplamanın kristal yapısının hekzagonal iken yapıya silisyum eklenmesiyle AlSiN kaplamanın kübik yapıya dönüştüğünü tespit etmişlerdir.

Deneysel çalışmalarda şafta astar uygulamasından sonra bu astarın kürlenmesi ve şaftın üzerine toz polimerik kaplamanın eriyik oluşturarak bir film tabakası oluşturabilmesi amacıyla şaftın belirli sıcaklığa ısıtılması gerekmektedir. Bu sebeple şafta ANSYS programı kullanılarak yapılan termal analizin doğru modellenebilmesi ve fırın içinde konveksiyonla ısı mekanizmasının iyi bir şekilde anlaşılabilmesi için literatürde konuyla ilgili yapılan çalışmalardan bahsetmek gerekirse;

Carson vd. [44], ev tipi bir fırın ve sanayi tip bir fırın içine ısı akısı sensörü yerleştirilerek fırın içindeki ısı transfer katsayısını bulmuşlardır. Ev tipi fanlı fırında hava hızının 0,1-0,7 m/s aralığında değiştiğini ölçmüşler ve laminar akış için konveksiyonla ısı transfer katsayısının (h_a) 4-10 W/m²K arasında olması gerektiğini düşünürlerken yaptıkları ölçümlerden h_a değerinin 10-30 W/m²K arasında değiştiğini tespit etmişlerdir. Bu durumun fırında bulunan fanın fırın içinde hava hızını fazla artırmaya bile, fırın hacmi ve tasarımının bu düşük hızlarda bile yatışkın olmayan türbülent akım oluşturmaktan kaynaklandığını belirlemişlerdir. Ticari fırın için hava hızının 0,2-1,9 m/s aralığında olduğunu tespit etmişlerdir. Ayrıca ısı transfer katsayısını test ettikleri ticari fırın için 15-40 W/m²K arasında değiştiğini tespit etmişlerdir.

Sakin vd. [45], 70-220 °C sıcaklık aralığı için fanlı ve fansız pişirme fırınlarının birleştirilmiş ısı transfer katsayısını belirlenmesini incelemişlerdir. Çalışmalarında konveksiyonla ısı aktarımına radyasyonun etkisini de dahil ederek birleştirilmiş ısı katsayısı terimine ulaşmışlardır. Kullandıkları ev tipi fırının fanı fırın içerisine 0,56 m/s hızında hava sağlamaktadır. Radyasyonu da hesaba katan birleştirilmiş ısı transfer katsayısının fansız fırın için 11-20 W/m²K arasında değiştiğini, fan bulunan fırın için ise 28-34 W/m²K arasında değiştiğini belirtmişlerdir. Fırın iç ortam sıcaklığındaki artışın ısı transfer katsayısını da arttırdığını belirtmişlerdir.

Ayrıca Sato vd. [46], fırın iç ortamında bulunan hava hızının 0,2 m/s değerinden 1,5 m/s değerine arttığında konveksiyonla ısı transfer katsayısının 5 W/m²K'den 20 W/m²K'ye arttığını belirtmişlerdir. Bu çalışma, ısı transfer katsayısının hava hızındaki artışla büyük oranda arttığını göstermiştir.



3. MALZEME VE YÖNTEM

Çalışmalarda torkmetre şafta ve kaplama uygulanacak diğer test numunelerine öncelikle uygun temizleme adımlarından sonra Arkema firması tarafından üretilen su bazlı Primgreen® LAT 12035 astarı uygulanmıştır. İstenilen kaplama kalınlığına göre değişen sıcaklık ve sürelerde fırında ısıtma yapılan parçalar, aynı firma tarafından üretilen Rilsan® T NAT BHV poliamid-11 polimeriyle doldurulan akışkan yatak reaktöre daldırılarak kaplanmıştır. Söz konusu sıvı haldeki astara ait MSDS EK-1'te, poliamid-11'e ait MSDS ise EK-2'de sunulmuştur.

3.1. Akışkan Yatak İmalatı ve Akışkanlaşma Parametrelerinin Bulunması

Çalışmanın ilk kısmında içerisinde polimerik kaplamaların yapılabileceği küçük ölçekli bir akışkan yatak reaktör imal edilmiştir. Akışkan yatak imalatında kaynak yapılabilmesi, oksidasyon direncinin iyi olması ve fiyat/performans oranının düşük olması sebebiyle AISI-304 tipi paslanmaz çelik malzeme seçilmiştir. Resim 3.1'de gösterilen akışkan yatak (en x derinlik x boy) 25 cm x 25 cm x 59 cm ölçülerinde imal edilmiştir.

Akışkan yatak iç yapısında dağıtıcı plakanın altına gelen hava akışını homojen dağıtması amacıyla bir adet pervane konulmuş ancak pervane havanın geçişine engel olduğu görülerek tasarımdan çıkarılmıştır. Dağıtıcı plaka olarak eşit aralıklarla yuvarlak deliklerin olduğu bir levha kullanılmış ve yatakta akışkanlaşma olduğu görülmüştür.

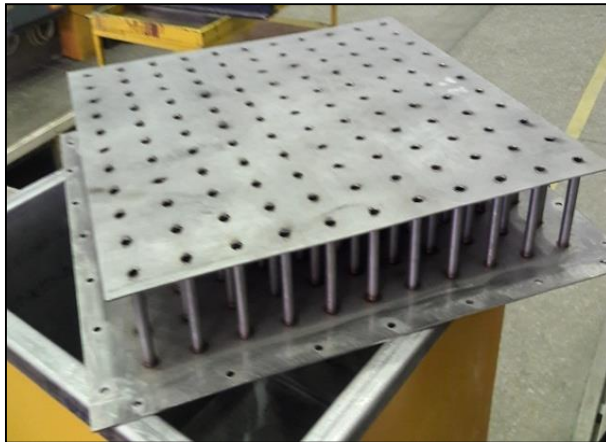


Resim 3.1. Küçük ölçekli akışkan yatak

Daha sonra büyük ölçülerde parçaların da kaplanabilmesi amacıyla Resim 3.2.'de gösterilen ikinci bir akışkan yatak tasarlanarak (en x derinlik x boy) 45 cm x 45 cm x 75 cm ölçülerinde imal edildi. Bu akışkan yatak reaktörde birinci reaktörün aksine hava akış rejiminin düzenlenerek daha iyi bir akışkanlaşma sağlanabilmesi amacıyla Resim 3.3.'de gösterilen dağıtıcı plaka imal edilmiştir. İki plaka arasına 1 cm çapında borular kaynak yapılmıştır. Ancak akışkan yatak katı partiküllerle doldurularak denemeler yapılmış ve homojen akışkanlaşma olmadığı görülmüştür. Bu sebeple ilk yapılan dağıtıcı plaka tasarımının daha uygun olması sebebiyle daha küçük boyutlarda olan Resim 3.1'te sunulan akışkan yatakla deneysel çalışmalara devam edilmiştir.



Resim 3.2. Büyük ölçekli akışkan yatak



Resim 3.3. İmal edilen dağıtıcı plaka

Resim 3.1'te sunulan akışkan yatak kenarlarından akışkan yatağa U tipi civalı bir manometre bağlanmıştır. Daha sonra akışkan yatağa bir miktar polimerik partikül konulmuştur. Akışkan yatağa hava beslemesi yapılarak akışkanlaşmanın olduğu nokta belirlenmiştir. Bu noktada U tipi manometreden basınç düşmesi değeri okunmuştur. Akışkanlaşma öncesi ve akışkanlaşma anında yatak yükseklikleri ölçülmüştür. Yatağa konulan polimerik kaplama ağırlığından yatağın boşluk kesri bulunmuştur. Boşluk kesri ve diğer verilerden teorik basınç düşmesi değeri, minimum akışkanlaşma hızı ve terminal hız değerleri hesaplanmıştır.

3.2. Maskeleme Aparatları, Isıtma ve Soğutma Ekipmanları

Bu çalışmada poliamid-11 polimeriyle dişli bölgesi kaplanmak istenen torkmetre şaft, Resim 3.4'te görülen Airbus firmasına ait As-532 Cougar helikopterlerinin güç aktarım parçasında bulunmaktadır. Resim 3.5'te görülen bu şaft, helikopterlerde motor gücünün transmisyona aktarılmasını ve motorun anlık tork değerinin ölçülerek helikopter gösterge paneline iletilmesini sağlamaktadır. Bu şaftın iki dişli yüzeyine sürtünme ve aşınma direnci yüksek olması sebebiyle poliamid-11 (Rilsan® T-NAT BHV) kaplanmıştır. Kazanılan tecrübeler doğrultusunda bu kaplamanın yaklaşık her 15 yılda bir helikopterler yenileştirmeye girip transmisyona açıldığı anda yıprandığı ve yenilenmesi gerektiği görülmüştür (Resim 3.6). Helikopterlerin yaklaşık 15 yıl önce ülke envanterine girmesi sebebiyle önümüzdeki yıllarda bu model helikopterlerin bakımında ciddi masraflara sebep olacağı anlaşılmıştır. Şu an sökülen parçanın yerine onarım kabiliyeti olmaması sebebiyle yeni şaftlar Fransadan çok yüksek fiyatlarla tedarik edilmektedir. Bu sebeple ülke ekonomisine katkı sunmak amacıyla bu doktora çalışmasında bu şaftın yerli imkanlarla kaplanarak gerekli kalifikasyon testlerinin yapılması amaçlanmıştır.



Resim 3.4. As-532 Cougar helikopteri



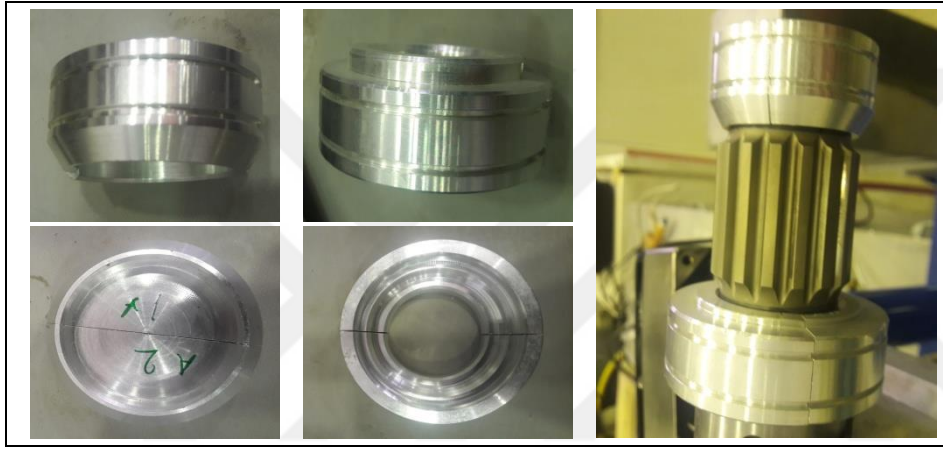
Resim 3.5. Helikopter torkmetre şaftı



Resim 3.6. Helikopterden sökülen torkmetre şaftın kaplaması yıpranmış dişli bölümü

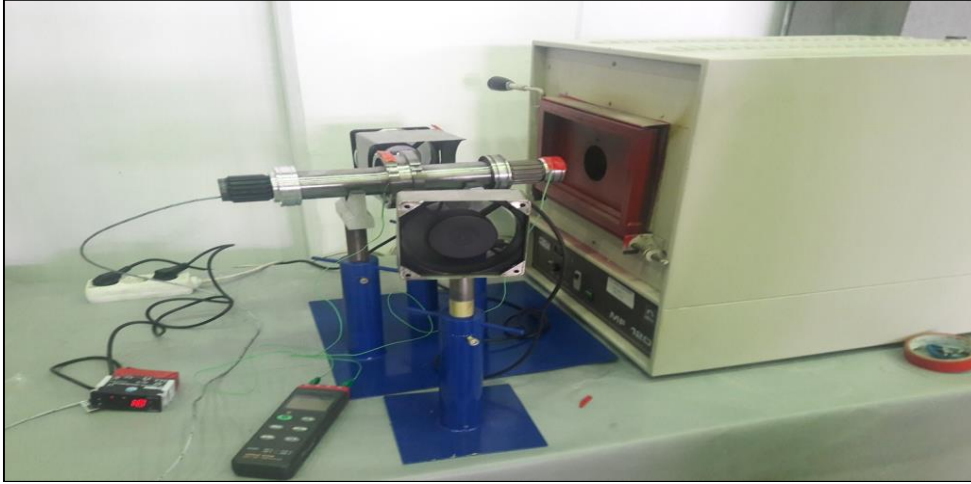
Şaftın orta kısmının şaftın malzemesinden farklı bir metalden imal edilmiş olması sebebiyle ve kaplama öncesi dişli kısmın yüksek sıcaklıklara ısıtıldığında orta kısım ve dişli arasında sıcaklık farkından dolayı burkulma olmaması sebebiyle bu bölüm 70-90°C sıcaklıkta kalması gerekmektedir. Tork değeri bu bölümün karşısına gelen sensörler aracılığıyla ölçüldüğünden bu bölümün ölçü ve geometrisinin değişmemesi parçanın fonksiyonelliği açısından çok hassastır. Kaplanacak bölge ise gerekli ön işlemlerden sonra yüzeye uygulanan astarın kürleşmesi ve polimerik kaplamanın yüzeye iyi yapışabilmesi amacıyla 280-330 °C sıcaklıkta 20-35 dakika arasında ısıtılması gerekmektedir. Bu işlemlerin yapılmasına müteakip parçanın dişli kısımlarının akışkan yatak reaktöre daldırılarak 170-190 µm kalınlıkta kaplanması hedeflenmektedir. Ancak yukarıda bahsedildiği gibi parçanın orta bölümü için olan sıcaklık kısıtlamasının yanında parçanın akışkan yatak reaktör içinde bulunan polimerik toza daldırılma metoduyla kaplandığından

parçanın kaplanmaması gereken bölgelerinin çok iyi maskelenmesi gerekmektedir. Şaftın dişli bölümünün yanında özellikle kaplanmaması gereken ve Resim 3.6'da kırmızı renkli çemberle gösterilen pin delikleri bulunmaktadır. Bu deliklerin polimer partikülleriyle temas etmemesi ve kaplanmaması gerekmektedir. Bu amaçla kaplama yapılmayacak bölgeler için torkmetre şafta özel ölçülerde ve şaftı çizmemesi için alüminyumdan Resim 3.7'de gösterilen aparatlar imal edilmiştir. Ayrıca maskeleme aparatlarının üzeri ve alt bölgelerinin maskelenmesi amacıyla 300 °C sıcaklığa dayanklı DuPont firmasına ait Kapton® isimli polimid maskeleme bandı kullanılmıştır.



Resim 3.7. İmal edilen maskeleme aparatları

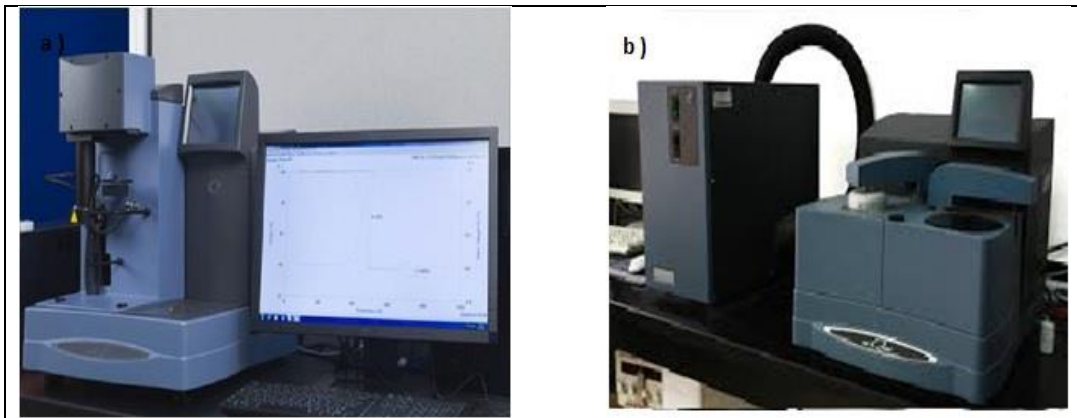
Maskeleme aparatları ile maskelenen torkmetre şaftın poliamid-11 ile kaplanacak dişli bölgesi kaplama öncesi ısıtma işlemine tabi tutulması gerekmektedir. Envanterde bulunan kül fırın çalışmalarında kullanılmıştır. Ayrıca şaftın bölgesel olarak bu fırında ısıtılabilmesi için Resim 3.8'te görüldüğü gibi metal fırın kapağı imal edilmiş ve bu kapağın ortası delinerek şaft fırına yerleştirilmiştir. Ayrıca şaftın ısıtma süresince durması için platform imal edilmiş ve bu platforma şaftın orta bölgesini 70-90°C sıcaklıkta tutması için 2 adet fan yerleştirilmiştir (Resim 3.8). Bu fanlar şaftın orta bölgesine yerleştirilen sıcaklık sensörleri ile sıcaklık ayarlanan sıcaklığı geçtiğinde devreye girmekte sıcaklık ayarlanan sıcaklığın altına düştüğünde ise durmaktadır. Ayrıca bu bölgenin soğutulmasının fan sistemiyle etkin ve pratik olarak yapılabilmesi sebebiyle alternatif bir yöntem denenmemiştir.



Resim 3.8. İmal edilen platform ve soğutma ekipmanları

3.3. Termal Analizler

Kaplama malzemeleri olarak bu çalışmada polimerik toz ve bu kaplama öncesi yüzeye uygulanan sıvı astar kullanılmıştır. Kaplama öncesi uygulanan astarın kürlenmesi amacıyla astar uygulanmış metal yüzeyin 260 °C ile 320 °C arasında değişen sıcaklık ve sürelerde ısıtılması gerekmektedir. Yüksek sıcaklıklara maruz bırakılan bu kimyasalların sıcaklıkla değişimlerinin iyi analiz edilmesi gerekmektedir. Bu amaçla KKK.lığı Mühimmat İyileştirme ve Geliştirme Merkezi/Kırıkkale tesislerinde polimerik toz partiküllerine ve astar olarak uygulanan sıvıya TGA ve DSC analizleri yapılmıştır. Sıvı astar ve toz polimer numunesine DSC ve TGA analizleri 2 şer kez yapılarak elde edilen sonuçlar doğrulanmıştır. TGA analizi TGA-Q 500 model cihazla, DSC analizi ise DSC-Q 2000 model cihazla gerçekleştirilmiştir (Resim 3.9).



Resim 3.9. a) Termogravimetrik analiz cihazı b) Diferansiyel taramalı kalorimetre

Polimerin DSC analizi yaklaşık 11 mg alınan polimer numunesinin -100 °C sıcaklıktan 350 °C sıcaklığa kadar 10 °C/dakika ısıtma hızıyla ısıtılmasıyla gerçekleştirilmiştir. Astar olarak uygulanan sıvı kimyasaldan yaklaşık 2,3 mg ve 10,7 mg numuneler alınmış ve aynı şekilde astarın DSC analizi, -100 °C sıcaklıktan 350 °C sıcaklığa kadar 10 °C/dakika ısıtma hızıyla ısıtılmasıyla gerçekleştirilmiştir. Polimerin DSC analizinden camsı geçiş sıcaklığı 46 °C ve erime sıcaklığı ise 186 °C olarak tespit edilmiştir. Astarın DSC analizinden astarın içerisinde su bulunduğu 0 °C ve 100 °C sıcaklıklarda görülen piklerden anlaşılmıştır.

TGA analizleri için polimerden alınan yaklaşık 1,5 mg ve 2 mg alınan numuneler ile sıvı astardan alınan 3,5 mg ve 1,7 mg numuneler öncelikle 40 °C sıcaklığa ısıtılmış ve bu noktadan sonra 550 °C sıcaklığa 20 °C/dakika ısıtma hızıyla ısıtılarak gerçekleştirilmiştir. TGA analizinden polimerin ve astarın bozunma sıcaklıkları sırasıyla 415 °C ve 395 °C olarak bulunmuştur.

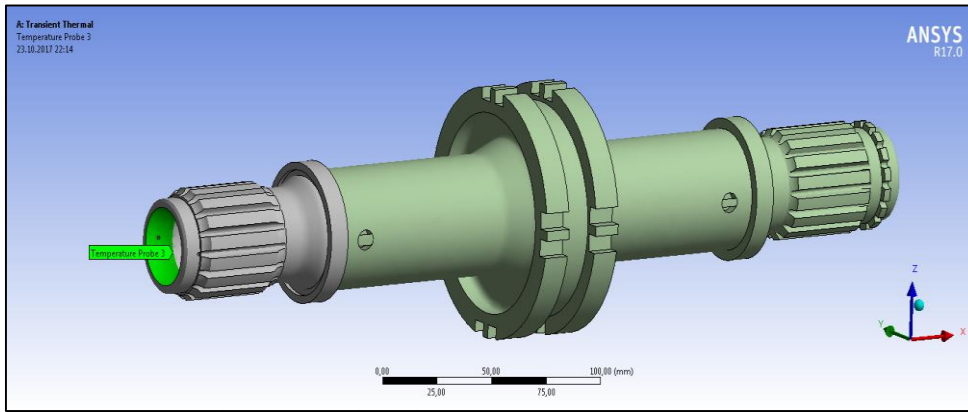
3.4. ATR-FTIR Analizleri

Polimer ve astar numunelerinin yapısında bulunan kimyasal bağların tespitine yönelik numunelere FTIR spektrometresiyle analizler gerçekleştirilmiştir. Analizler Gazi Üniversitesi Fotonik Araştırma ve Uygulama Merkezinde Bruker firmasına ait Vertex-80 cihazı ile gerçekleştirilmiştir. FTIR analizinde herhangi bir analiz öncesi hazırlık gerektirmeyen ve özellikle kalın kaplamaların analizlerini kolaylaştıran Attenuated Total Reflection (ATR) aparatı kullanılmıştır [47]. Sıvı astar çelik plaka üzerine uygulanarak kurumasına müteakip analiz edilirken polimerik toz direk analiz edilmiştir. Analizler orta infrared bölgede 550 ile 4000 cm^{-1} aralığında ve her numune için oda sıcaklığında 32 tarama yapılarak gerçekleştirildi.

3.5. ANSYS Programıyla Sistemin Isıl Modellenmesi

Torkemetre shaftın oda koşullarında mevcut fırınla shaftın bir kısmının fırının dışında kalacak şekilde ısıtıldığında shaftın sıcaklık dağılımının anlaşılabilmesi amacıyla sistemin ANSYS programıyla ısıl modellenmesi yapılmıştır. Shaftın SolidWorks programıyla 3 boyutlu teknik çizimi yapılarak bu çizim ANSYS programına yüklenmiştir. Shaftın fırın içine giren kaplama yapılması istenen ve Şekil 3.1'de verilen gri renkli bölge ısıtılırken

şaftın diğer yeşil renkle gösterilen bölgesi oda koşullarında kalacak şekilde modellenmiştir. Bu modelleme için termal analizi yapılan şaftın başlangıç sıcaklığı 22°C, fırın sıcaklığı 300°C ve ortam sıcaklığı 25 °C olarak kabul edilmiştir. Fırın içinde konveksiyonla ısı yayılımı olduğu değerlendirilerek, fansız fırın içindeki 300°C'de durgun havanın ısı transfer katsayısı (h) 12 W/m²K, 25 °C'de havanın ısı transfer katsayısı (h) 5 W/m²K olarak kabul edilmiştir [44-46]. Daha sonra parça için oluşturulan model 7200 saniye simüle edilerek parça üzerinde sıcaklık dağılımları tespit edilmiştir.

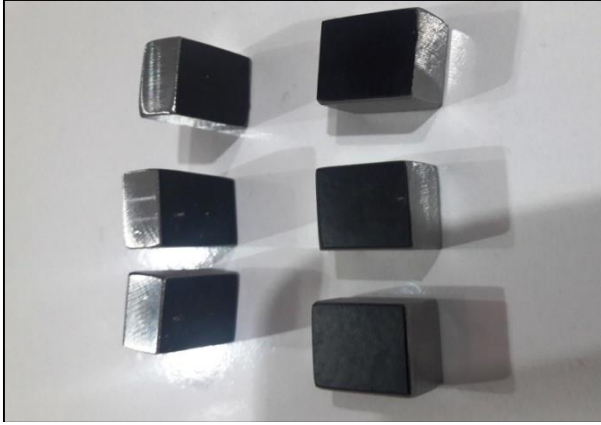


Şekil 3.1. Ansys programına yüklenen şaftın üç boyutlu çizimi

3.6. Kaplamanın Yüzey Morfolojisi ve Arayüzey Yapışma Performansının İncelenmesi

Kaplamanın yüzey pürüzlülüğün tespitine yönelik olarak 1,5cm x 1,5cm x 0,8cm ebatlarında çelik test plakaları poliamid 11 ile akışkan yatak reaktörde kaplanmıştır. Test numunelerinin yaklaşık 140 µm kalınlıkta poliamid kaplanmış yüzeyin üzerinden 10 µm x 10 µm ölçülerinde bir alan GaziÜniversitesi Fotonik Araştırma ve Uygulama Merkezinde bulunan Nanomagnetics-hP model AFM cihazıyla taranarak yüzeye ait pürüzlülük parameterleri bulunmuş ve taranan bölgenin iki ve üç boyutlu görüntüleri elde edilmiştir. Ayrıca kaplamanın ve metal yüzeyin pürüzlülük değerlerinin karşılaştırılması için kaplama öncesi metal yüzeyinden 10 µm x 10 µm ölçülerinde bir alan AFM cihazıyla taranmıştır. En yüksek nokta ve en düşük nokta arasındaki mesafe metal yüzey için 2,1 µm iken, bu değer poliamid-11 kaplama için 0,98 µm olduğu görülmüştür. Kaplama öncesi metal yüzeyin ortalama yüzey pürüzlülük değeri 0,2 µm, poliamid-11 kaplama yapılmış yüzeyin ise 0,148 µm olarak bulunmuştur.

Kaplamanın metal ile yaptığı yapışma kalitesinin belirlenmesi amacıyla metal-astar ve astar-polimer arayüzeylerinin görüntüleri Gazi Üniversitesi Fotonik Araştırma ve Uygulama Merkezinde bulunan Jeol firmasına ait JSM-6060 model SEM cihazıyla incelenmiştir. Ara yüzeyin SEM görüntüleri alınabilmesi için öncelikle çelik plakadan 1cm x 1cm x 0,8cm ebatında test numuneleri kesilmiştir (Resim 3.10). Hem çıplak metalin hemde metal-astar ara yüzeyinin incelemesi amacıyla bu test numunelerinden bir kısmı maskelenmiş ve maskeleme yapılmayan yüzeyine astar uygulanmıştır. Ayrıca bir kısım test numunesi de temizlenmiş ve astar uygulanmasına müteakiben yaklaşık olarak 200 µm kalınlıkta poliamid-11 ile akışkan yatakta kaplanmıştır. Hem yalnız astar uygulanan hemde poliamid-11 kaplı test numunelerinin SEM görüntüleri alınmıştır.



Resim 3.10. SEM analizi için hazırlanan poliamid kaplı çelik test numuneleri

3.7. Kaplamanın Korozyon, Kimyasal ve Mekanik Dayanımı Testleri

3.7.1. Tuz püskürtme testi

Tuz püskürtme testi, kaplamaların korozyon dayanımını belirlemede en çok kullanılan test metodudur. Tuz testi Metaltek Teknoloji firmasında bulunan Q-Lab marka cihazla 35°C iç kabin sıcaklığında küttele %5 derişimde ve 6,5 pH değerinde tuz çözeltisiyle TS EN ISO 9227 standardına göre yapılmıştır. Kabin içine plakalar dikey eksenle 20 ± 5 lik bir açıyla yerleştirilmiştir (Resim 3.11).



Resim 3.11. Tuz püskürtme testi kabin içi görüntüsü

Daldırma süresi, sıcaklık, fırın bekleme süresi ve astar uygulamasının kaplama kalınlığına ve korozyon dayanımına etkisini incelemek amacıyla öncelikle alüminyum plakalara kaplamalar yapılarak sonuçlar incelenmiştir. Alüminyum test plakaları, Al-2024 alaşımlı plakadan 6 cm x 6 cm ölçülerinde kesilerek elde edilmiştir. Kaplama öncesinde bu plakalara sırasıyla kumlama, alkali temizleme ve buharla yağ alma işlemi yapılarak kaplanılacak yüzeyler temizlenmiştir. Daha sonra plakalara Arkema firmasına ait sıvı formdaki astar tabancayla püskürtülmüş ve plakalar yaklaşık 4 saat kurumaya bırakılmıştır. Astarın korozyon dayanımına etkisini görmek adına 2 adet plakaya astar uygulaması yapılmamıştır. Plakalar daha sonra Çizelge 3.1.'de verildiği üzere farklı sıcaklıklarda 30 dakika boyunca fırında bekletilmiştir. Plakalar yaklaşık 3 saniye kadar akışkan yatağa daldırılmıştır. Sıcaklığın artması ile plaka üzerindeki kaplama kalınlığında arttığı görülmüştür. Alüminyum plakalar 14 gün boyunca (336 saat) tuz testine tabi tutulmuştur.

Çizelge 3.1. Farklı daldırma sıcaklıklarında kaplama numuneleri

Nu.	T (°C)	Fırın Bekleme Süresi (min)	Daldırma Süresi (s)	Astar Var mı?	Astar Kaplama Kalınlığı (μ)	Son Kaplama Kalınlığı (μ)	Tuz Testi Sonucu	Numune Adedi
1	260	30	3	Var	8-15	100-130	Korozyon yok	2 Adet
2	280	30	3	Var	10-17	150-180	Korozyon yok	2 Adet
3	280	30	3	Yok	-	180-200	Korozyon yok	2 Adet
4	300	30	3	Var	9-16	200-250	Korozyon yok	2 Adet

Ayrıca Çizelge 3.2'te verildiği gibi fırında ısıtma süresi değiştirilerek ısıtma süresinin kaplama kalınlığına etkisi araştırılmıştır. Torkmetre şaftı için istenilen 170-190 μ arasında kaplama kalınlığına, alüminyum plakalardan elde edilen verilere göre 290 °C sıcaklık ve 25-30 dakika ısıtma süresinde ulaşılabileceği öngörülmüştür.

Çizelge 3.2. Farklı ısıtma sürelerinde kaplama numuneleri

Nu.	T (°C)	Fırın Bekleme Süresi (min)	Daldırma Süresi (s)	Astar Var mı?	Astar Kaplama Kalınlığı (μ)	Son Kaplama Kalınlığı (μ)	Tuz Testi Sonucu	Numune Adedi
1	290	25	3	Var	8-15	150-180	Korozyon yok	2 Adet
2	290	30	3	Var	10-17	185-210	Korozyon yok	2 Adet
3	290	35	3	Yok	-	200-220	Korozyon yok	2 Adet
4	290	40	3	Var	9-16	215-240	Korozyon yok	2 Adet

Tuz püskürtme testi ayrıca poliamid-11 kaplanmış 1 mm kalınlıkta çelik plakalara da uygulanmıştır. Çelik plakalar ortalama 150-200 μ m arası kalınlıkta poliamid-11 ile kaplanmış ve plakalara 720 saat boyunca tuz püskürtme testi yapılmıştır.

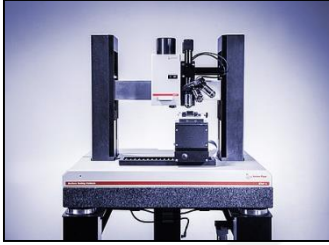
3.7.2. Sıcak yağa dayanım testi

Torkmetre şaft transmisyon parçası içinde yaklaşık 60 °C sıcaklıkta olan yağ içinde çalışmaktadır. Bu sebeple uygulaması yapılan poliamid-11 kaplamanın bu sıcaklıklara dayanıp dayanmadığının test edilmesi amacıyla 1 mm çelik plakalar poliamid kaplanarak yağ daldırma testine tabi tutulmuştur. 60 °C $\pm$ 20 °C sıcaklıkta bulunan 10W-40 dizel motor yağına plakaların yüzeyleri 2/3 oranında 168 saat süresince daldırılarak test gerçekleştirilmiştir. Test sonrası yüzeyde herhangi bir kaplama deformasyonu görülmemiştir.

3.7.3. Çizik testleri

Kaplamanın çizilmeye karşı direncinin tespit edilmesi amacıyla mikro çizik testi ve hassasiyeti daha düşük olan mekanik çizik testi uygulanmıştır. Bu test kaplamanın yüzeye yapışma kalitesi hakkında bilgi vermektedir. Test sonrası elde edilen verilerden

kaplamanın artan yüklerle yapılan çizilme karşısında ilk çatlağın oluştuğu kritik yük değeri (Lc1), kaplamanın kırıldığı kritik yük değeri (Lc2) ve kaplamanın tabakalar halinde yüzeyden ayrıldığı kritik yük değeri (Lc3) tespit edilmektedir. Mikro çizik testi ODTÜ Merkez Laboratuvarına bağlı Nano-Mekanik Test Laboratuvarında CMS model mikro çizik test cihazıyla gerçekleştirilmiştir (Resim 3.12). Test için 160 µm kalınlıkta poliamid-11 kaplanmış 1,5 x 1,5 cm ebatlarında St-37 çelik test numunesi hazırlanmıştır. Testlerde Rockwell marka 100 µm çapında çizici uç kullanılmıştır. Kaplama yüzeyinde 0,05 N başlangıç kuvvetinden 5 N seviyesine artan kuvvetle 5 mm uzunluğunda çizik oluşturulmuş ve test sonunda kaplamanın çizik dayanımının 5 N'dan büyük olduğu görülmüştür.



Resim 3.12. Mikro çizik cihazı [48]

Kaplama yüzeyine 0,05 N kuvvet değeri ile çizik testine başlanmış ve uygulanan kuvvet kademeli olarak arttırılarak çizik testi cihazın maksimum çizik kuvveti olan 25 N kuvvet değeri uygulanarak sonlanmıştır. Test boyunca yüzeyde 6 mm uzunluğunda çizik oluşturulmuş ve test sonucunda kaplamanın çizik dayanımının 25 N değerinden yüksek olduğu tespit edilmiştir. Kaplamanın çizik dayanımının 25 N'dan yüksek olduğu anlaşılması üzerine polimerik kaplama üzerine hassasiyeti düşük ancak daha yüksek kuvvetlerle çizik testine imkan veren manuel tip bir cihazla çizik testi uygulanmıştır. Bu Metaltek Teknoloji firmasında bulunan SH706N model çizik cihazı ile gerçekleştirilmiştir (Resim 3.13). 1 mm kalınlıkta 10 cm x 15 cm ölçülerinde saç plaka yüzeyine yaklaşık 156 µm kalınlıkta poliamid kaplanmış ve plakaların yüzeyinde 10N, 20N ve 40 N kuvvetlerle çizikler oluşturulmuştur. Daha sonra poliamid-11 kaplamanın deformasyonunun tespiti için çizilen plakaların çizik yüzeylerinden 1,5 cm x 1,5 cm ebatlarında parça kesilerek çizikler SEM cihazıyla incelenmiştir.

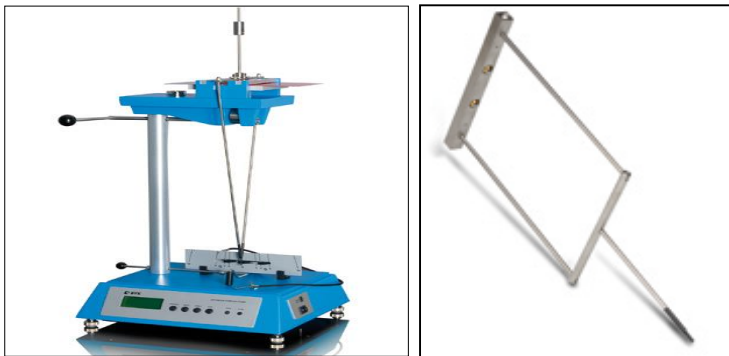


Resim 3.13. Manuel tip çizik cihazı [49]

3.7.4. Sertlik testleri

Sertlik ölçümleri öncesinde plaka yüzeyleri hafif nemli bir bezle silenerek yüzeyden kir, yağ ortadan kaldırılmıştır. Plakalar düz bir zemine konularak 3 noktadan kaplama film kalınlığı ölçümleri alınarak ortalama film kalınlığı tespit edilmiştir. Kaplamanın sertlik değeri 3 ayrı test metoduyla Metaltek Teknoloji (Ankara) firmasına ait akredite laboratuvarında ölçülmüştür. Bu testler shore sertlik testi, persoz pendulum sertlik testi ve kalem sertlik testidir.

Shore sertlik testi TQC marka LD0550 shoremetre cihazı ile birlikte EN ISO 868 standardına göre gerçekleştirilmiştir. Persoz pendulum sertlik testi BYK firmasına ait MT-PEN-111 model cihazla gerçekleştirilmiştir (Resim 3.14). Test kaplamalı yüzeyde hareket eden bir sarkacın cihazın üzerindeki göstergenin 12°'den 4°'ye düşmesi için geçen süreyi ve yaptığı salınım sayısını ölçerek kaplamanın sertliği hakkında bilgi vermektedir.



Resim 3.14. Persoz pendulum sertlik ölçüm cihazı [50]

20 farklı sertlikte kalemin kullanıldığı kalem sertlik testi sertliği bilinen kalemin yüzeyi çizerek yüzeyin sertliğinin belirlenmesi metoduna dayanır. Bu test Resim 3.15'te gösterilen Sheen marka SH720N model kalem sertlik cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.



Resim 3.15. Kalem sertlik ölçüm cihazı [51]

3.7.5. Darbe (ağırlık düşürme) testi

Bu test Sheen marka SH807 model tübüler darbe test cihazıyla TS EN ISO 6272-1 standardına uygun olarak Metaltek Teknoloji (Ankara) firmasına ait akredite laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Test esnasında 1 kg, 1,2 kg, 1,5 kg ve 2 kg ağırlıklar kullanılmıştır. Kaplamanın herhangi bir darbeye olan direncini tespit etmek amacıyla 1 mm kalınlıkta 10 cm x 15cm ölçülerinde 3 adet DKP plaka yüzeyine yaklaşık 120 µm poliamid kaplanmıştır. Plakalara ağırlıklar belirli yükseklikten bırakılarak kaplama yüzeyinde çatlak oluşup oluşmadığına göre ağırlıklar değiştirilerek testler tekrarlanmıştır.

3.7.6. Bükme testi

Bu test, Tronic firmasına ait konik mandrel kullanılarak TS EN ISO 6860 standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Konik mandrelin küçük ve büyük uçlarının çapları sırasıyla 3,1 mm ile 38 mm ölçülmüştür. Kaplamanın yüzeye olan yapışma direnci hakkında bilgi edinmek amacıyla 1mm kalınlıkta 10 cm x 15 cm ölçülerinde 2 adet DKP plaka 102 µm ve 170 µm kalınlıkta poliamid-11 polimeriyle kaplanmıştır. Plakalar konik mandrelle bükülmüş ve kaplama yüzeyinde çatlak, ayrılma ve deformasyon olup olmadığı büyüteçle incelenmiştir.

3.7.7. Aşınma dayanımı testi

Bu test Metaltek Teknoloji firmasında bulunan Qualitest marka Aşındırma test cihazı kullanılarak ASTM D4060 standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. 1 mm kalınlıkta 10 cm çapında dairesel kesitli DKP plaka 106,9 µm poliamid kaplanmış ve aşındırma test cihazı ile test edilmiştir. Aşınma testi 1000 g yük ile 72 devir/dakika dönüş hızında ve 5000 devir boyunca gerçekleştirilmiştir. Test sonrası plaka yüzeyinde kaplama kalınlığı ölçülerek kaplamanın ömür hesabı yapılmıştır.



Resim 3.16. Aşınma test cihazı [52]



4. DENEY VE ANALİZ SONUÇLARI

Bu çalışmada As-532 Cougar model helikopterlerden belirli uçuş saatleri sonunda sökülen torkmetre şaftın dişli bölümünde mevcut yıpranmış poliamid kaplamanın uygulanabilirliği araştırılmıştır. Ayrıca bu poliamid kaplamanın ve kaplama öncesinde kullanılan sıvı astarın kimyasal ve mekanik dayanımı, termal özellikleri, morfolojik ve tribiyolojik özellikleri araştırılmıştır. Polimerik toz kaplamalar genelde iki yöntemle uygulanmaktadır. Bunlar akışkan yatak reaktörde daldırma metodu ve elektrostatik sprey metodudur. Bu tez çalışmasında torkmetre şafta uygulanacak poliamid toz polimer uygulamasını akışkan yatak reaktörde daldırma metodou ile gerçekleştirilmiştir.

Çalışmamızın ilk kısmında daldırma metodunda kullanılmak üzere AISI-304 tipi paslanmaz çelik malzemeden 25 cm x 25 cm x 59 cm ölçülerinde akışkan yatak reaktör tasarlanarak imal edilmiştir. Akışkan yatak iç yapısında dağıtıcı plakanın altına gelen hava akışını homojen dağıtması amacıyla bir adet pervane konulmuş ancak polimerik tozun akışkanlaşmasına engel olduğu görülerek tasarımdan çıkarılmıştır. Dağıtıcı plaka olarak eşit aralıklarla yuvarlak deliklerin olduğu bir levha kullanılmış ve yatakta akışkanlaşma olduğu görülmüştür. Daha sonra büyük ölçülerde parçaların kaplanabilmesi amacıyla ikinci bir akışkan yatak tasarlanarak 45 cm x 45 cm x 75 cm ölçülerinde imal edildi. Bu akışkan yatak reaktörde birinci reaktörün aksine hava akış rejimini düzenlemesi amacıyla farklı bir dağıtıcı plaka imal edilmiştir. İki plaka arasına 1 cm çapında 7 cm uzunluğunda borularak kaynak yapılmıştır. Ancak akışkan yatak katı partiküllerle doldurulduğunda denemeler yapılmış ve homojen bir akışkanlaşmanın olmadığı görülmüştür. Bu sebeple ilk yapılan dağıtıcı plaka tasarımının daha uygun olması sebebiyle daha küçük boyutlarda olan akışkan yatakla çalışmalara devam edilmiştir.

Şaftın daldırma metoduyla dişli kısmının kaplanabilmesi amacıyla daldırma anında dişli dışındaki kısımların maskelenmesi gerekmektedir. Bu sebeple şaftı çizmeyecek uygun ölçülerde alüminyum maskeleme aparatlarının teknik çizimleri yapılarak imal edilmiştir.

Kaplama prosesinde kullanılan toz yapısında poliamid-11'in ve sıvı astarın termal analizleri Termogravimetrik Analiz (TGA) ve Diferansiyel Taramalı Kalorimetre (DSC) cihazlarıyla gerçekleştirilmiştir. Astar ve polimere Fourier Dönüşümlü Kızılötesi spektrometresiyle (FTIR) analizler gerçekleştirilerek yapılarında bulunan bağlar tespit

edilmiştir. Polimerik kaplamanın çelik yüzeylerde yapışmasının mikro ve nano boyutta incelenmesi amacıyla test numunelerinin SEM analizleri gerçekleştirilmiştir. Yapışmanın oldukça iyi seviyede olduğu metal-astar ve astar-polimer arayüzeylerinin SEM görüntülerinden anlaşılmıştır. Ayrıca astarın metal yüzeyi üzerine etkisini incelemek amacıyla astar uygulanmamış ve uygulanmış yüzeylerin SEM görüntüleri elde edilmiştir.

4.1. Akışkan Yatak Parametreleri

Akışkan yatakta akışkanlaşma parametreleri olarak öncelikle yatak boşluk kesri ve daha sonra basınç düşmesi, minimum ve maksimum akışkanlaşma hızları hesaplanmıştır. Bu parametrelerin hesaplanmasında öncelikle Çizelge 4.1'de sunulan ölçümler kullanılmıştır.

Çizelge 4.1. Akışkanlaşma parametrelerinin hesaplanmasında kullanılan değerler

S/Nu	Ölçülen parametre	Birim	Ölçüm Değeri
1	Kazan Ölçüleri (En x Derinlik x Yükseklik)	cm	25x25x59
2	Yatak yüksekliği (Yatışkın durumda)	cm	14,7
3	Yatak yüksekliği (Akışkan durumda)	cm	17,7
4	Partikül çapı	μm	80
5	Partikül yoğunluğu	g/cm^3	1,1
6	Akışkan yatakta bulunan partikül ağırlığı	g	5040
7	Hava vizkositesi	kg/m.s	$1,8 \times 10^{-5}$
8	Hava yoğunluğu	kg/m^3	1,25
9	Yüzey alanı	cm^2	625

Eş.2.1'den akışkan yatağa konulan partikül ağırlığından akışkan yatak boşluk kesri (ϵ) 0,58 olarak bulunmuştur.

Akışkan yatak reaktörlerde basınç düşmesi değeri Eş. 2.2'den 665 Pa olarak bulunmuştur. Deneysel basınç düşmesi değeri manometreden 677 Pa olarak ölçülmüştür. Teorik basınç düşmesi değeriyle deneysel basınç düşmesi değeri karşılaştırıldığında % 1,8 hata hesabı olduğu tespit edilmiştir.

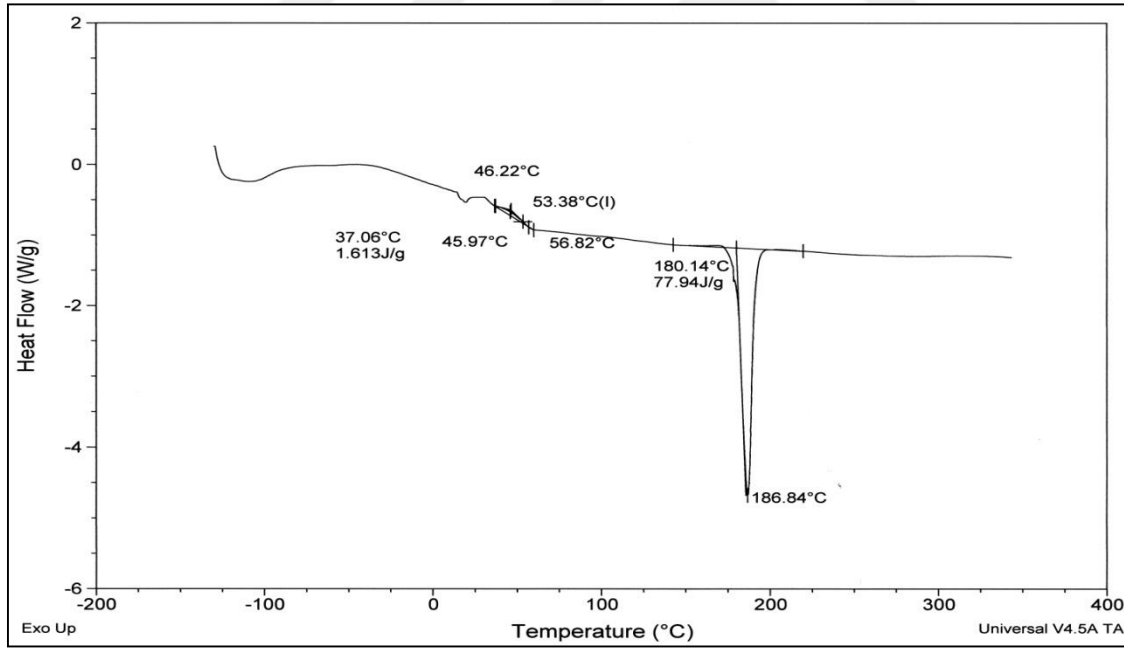
Eş.2.4'ten minimum akışkanlaşma hızı 0,42 cm/s, Eş.2.5'ten ise maksimum akışkanlaşma hızı 21 cm/s olarak hesaplanmıştır. Maksimum akışkanlaşma hızının minimum akışkanlaşma hızına oranı 50 olduğu ve bu oranın literatürde belirtilen 9 - 90 değeri

arasında olduğu görülmüştür [23]. Ayrıca Çizelge 2.2'den 80 μm çapı olan dairesel bir partikülün 20°C ve 1 atm basınçlı havada maksimum akışkanlaşma hızının (terminal hız) teorik değerinin 0,180 m/s olduğu görülmüştür. Hesaplanan 0,21 m/s değerinin literatürde bulunan bu değerle uyumlu olduğu anlaşılmıştır. Hacimsel akış hızları sırasıyla minimum akışkanlaşma için 0,26 lt/s ve maksimum akışkanlaşma için ise 13 lt/s olarak bulunmuştur.

4.2. Termal Analizler

4.2.1. DSC analizleri

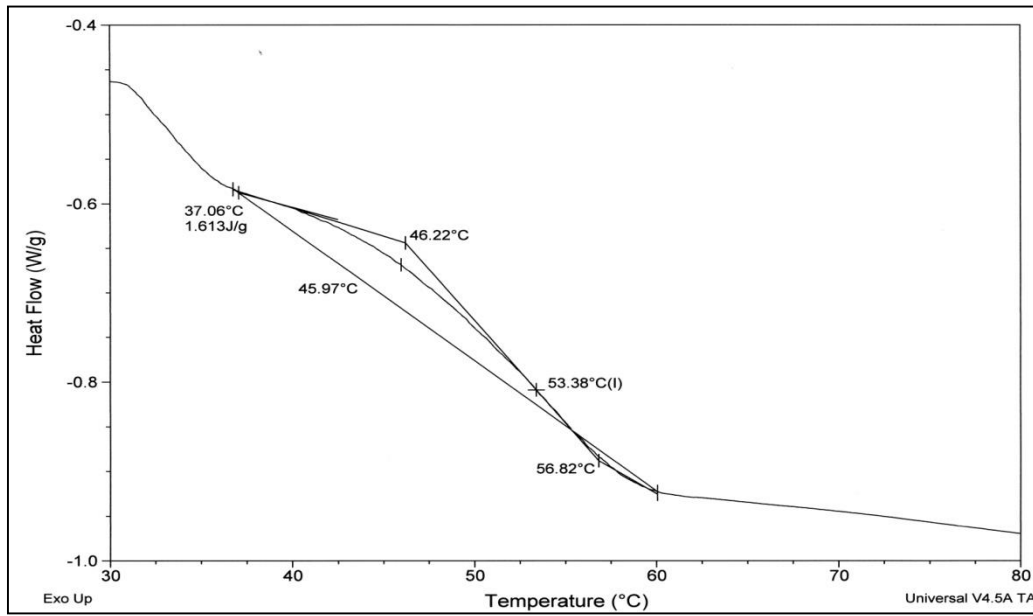
DSC analizleri öncelikle 30 ile 350 °C sıcaklık aralığında yapılmış ancak bazı termal geçişlerin görünmeme ihtimaline karşın sıcaklık aralığı genişletilerek -100 °C ile 350°C sıcaklık aralığında DSC analizleri tekrarlanmıştır. Polimerin -100 °C ile 350°C sıcaklık aralığına ait DSC analizi sonuçları Şekil 4.1'de sunulmuştur.



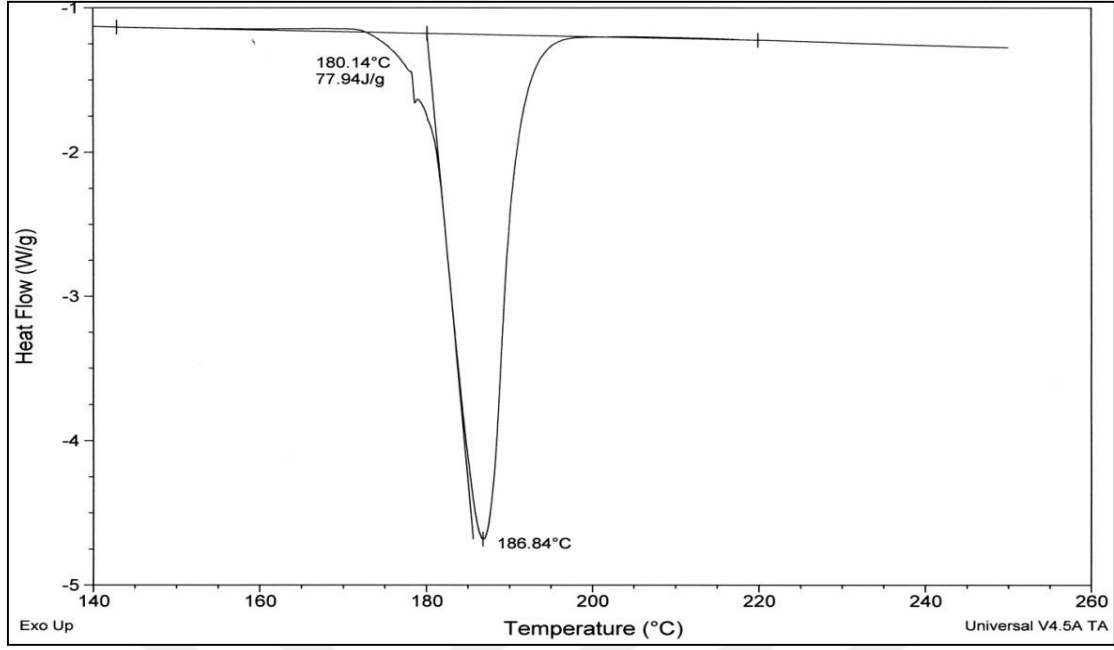
Şekil 4.1. Polimerin -100 ile 350 °C sıcaklık aralığına ait DSC spektrumu

Şekil 4.1'de sunulan grafikte polimer numunesinde 0 °C sıcaklık değerinin altında herhangi bir termal değişim gözlenmediği ancak sıcaklık artırıldığında 38 °C ile 56 °C aralığında DSC eğrisinin eğiminin arttığı ve eğimin orta noktasının 46 °C civarında olduğu Şekil 4.2.'den tespit edilmiştir. Bu nokta polimerin camsı geçiş sıcaklığıdır. Bu noktada polimerin özgül ısısının arttığı görülmektedir. Şekil 4.3.'te sunulan DSC diagramında ise

polimer numunesinin 180 °C erimeye başladığı ve faz değişiminin 190°C'de tamamen gerçekleştiği görülmektedir. Polimer numunesinin erime noktasının ısı artışıyla sıcaklığın sabitlendiği net değer olan 186°C olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca erime noktasındaki pik değerinin üzerindeki alan hesabından polimerin erime ısı 78 J/g olarak hesaplanmıştır. Yapılan literatür araştırmasında poliamid-11'in camsı geçiş sıcaklığı ve erime sıcaklığının sırasıyla 46 °C ve 186 °C olduğu ayrıca erime entalpi değerinin 80 J/g olduğu tespit edilmiştir [32,36,53]. Polimer numunesine ait DSC diagramlarından elde edilen değerler poliamid-11'in literatür değerleri ile uyumlu olduğu görülmektedir.

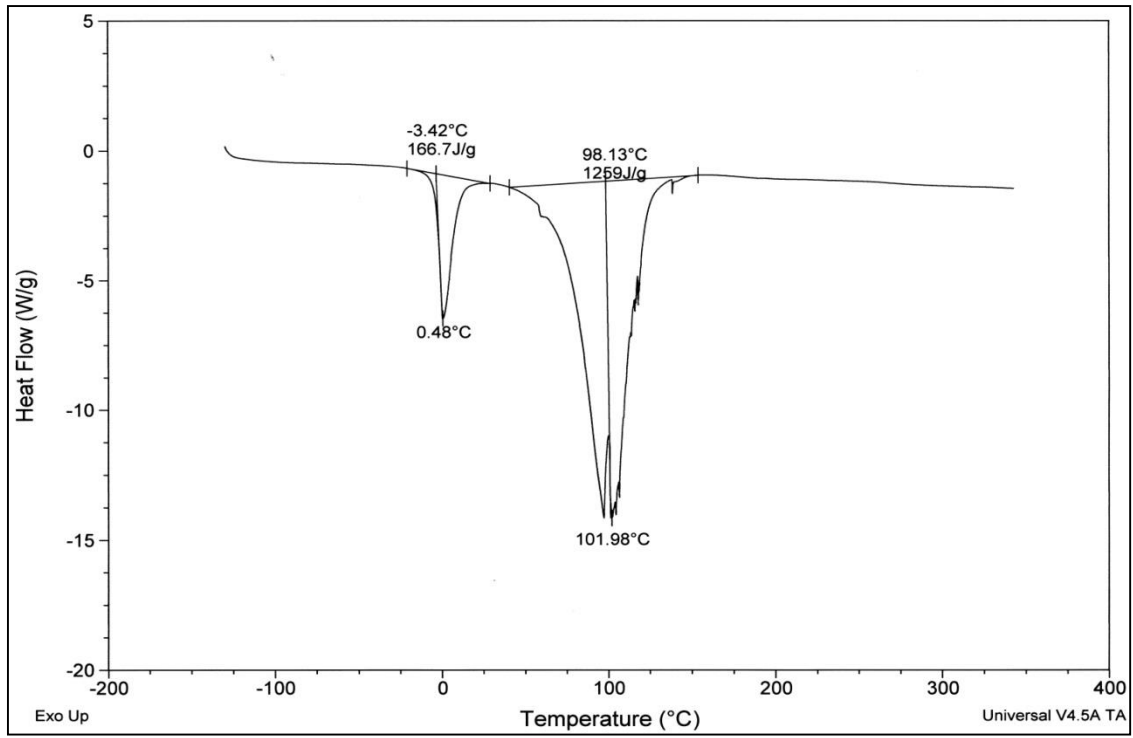


Şekil 4.2. Polimerin 30°C ile 80 °C sıcaklık aralığına ait DSC spektrumu



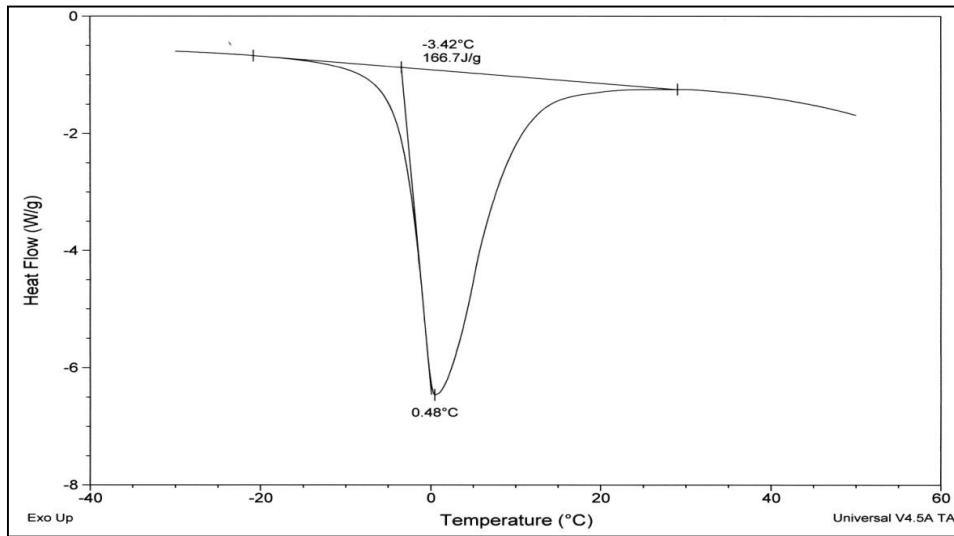
Şekil 4.3. Polimerin 140 °C ile 250 °C sıcaklık aralığına ait DSC spektrumu

Astarın -100 °C ile 350 °C sıcaklık aralığına ait DSC analizi sonuçları Şekil 4.4'de sunulmuştur.

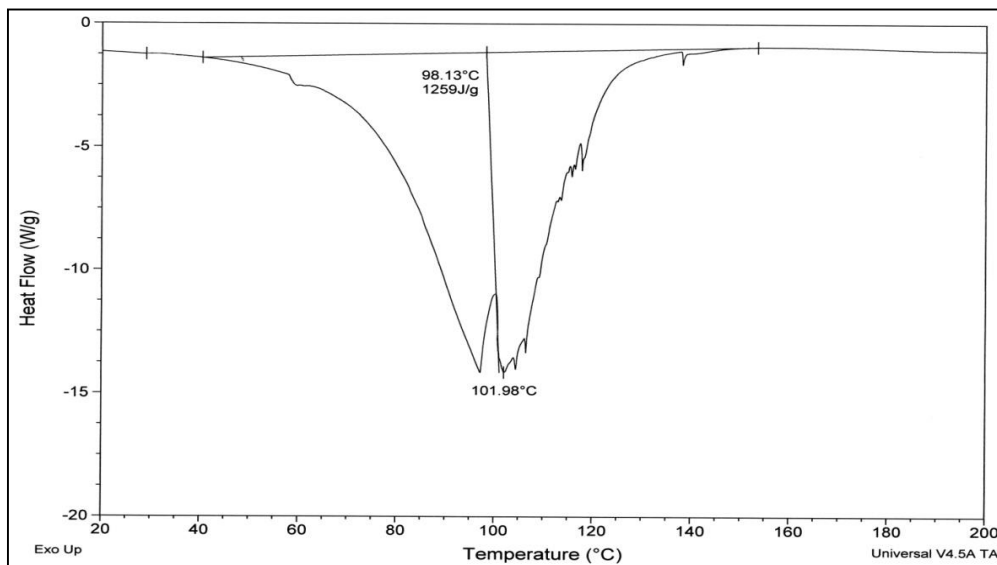


Şekil 4.4. Astarın -100 °C ile 350 °C sıcaklık aralığına ait DSC spektrumu

Şekil 4.5 ve Şekil 4.6.'da bulunan DSC spektrumları detaylı olarak incelendiğinde 0 °C civarında ve 100 °C civarında görünen pikler astar içeriğinde bulunan suyun donma ve kaynama noktası olduğu değerlendirilmektedir. Grafikte yapılan alan hesabından hal değiştirme ısıları sırasıyla 166 J/g ve 1260 J/g değeri olarak bulunmuştur. Bulunan bu değerler suyun donma ısısı 333 J/g ve buharlaşma ısısı 2260 J/g değerlerinin yaklaşık %50'si olduğu görülmüştür. EK-1'de sunulan astara ait teknik bilgiler incelendiğinde astar numunesinin içeriğinde ağırlıkça yaklaşık % 50 su olduğu ve analiz sonuçlarının doğru olduğu görülmüştür.



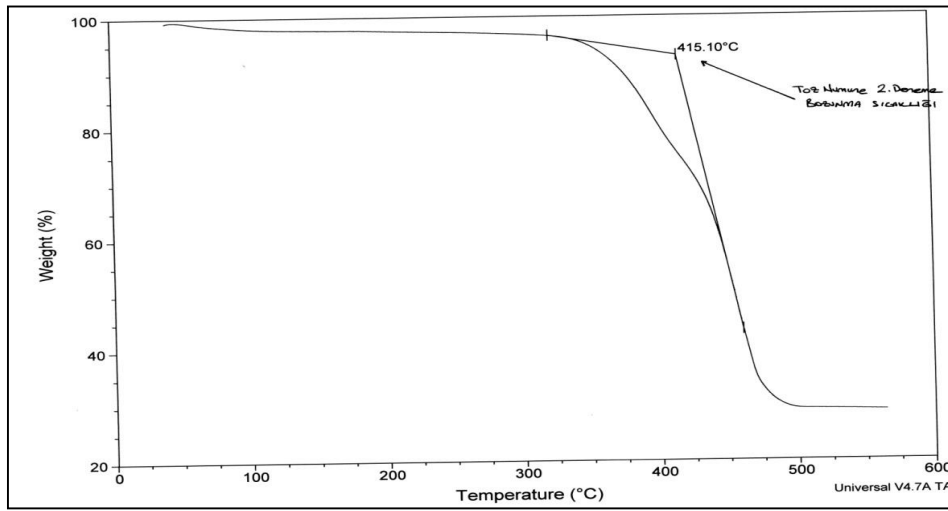
Şekil 4.5. Astarın -30 °C ile 50 °C sıcaklık aralığına ait DSC spektrumu



Şekil 4.6. Astarın 20 °C ile 200 °C sıcaklık aralığına ait DSC spektrumu

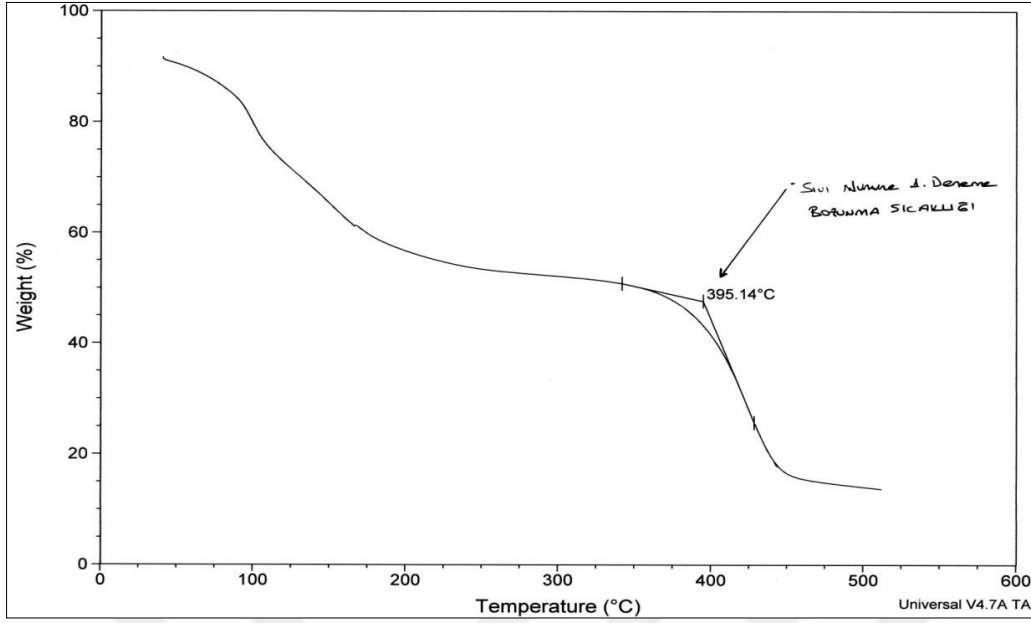
4.2.2. TGA analizleri

Polimer numunesine yapılan TGA analiz sonuçları Şekil 4.7'de sunulmuştur. TGA spektrumundan polimerin 390 °C sıcaklık değerinde bozunmaya başladığı ve bozunmanın yaklaşık 480 °C sıcaklığa kadar devam ettiği görülmüştür. Ortalama bozunma değeri grafikten 415 °C olarak belirlenmiştir. Şekil 4.7'de sunulan TGA spektrumundan yanma sürecinden sonra ağırlıkça % 30 oranında kül kaldığı ve bu miktarın polimer yapısında bulunan inorganik katkı maddelerinden geldiği düşünülmektedir.



Şekil 4.7. Polimer numunesinin TGA spektrumu

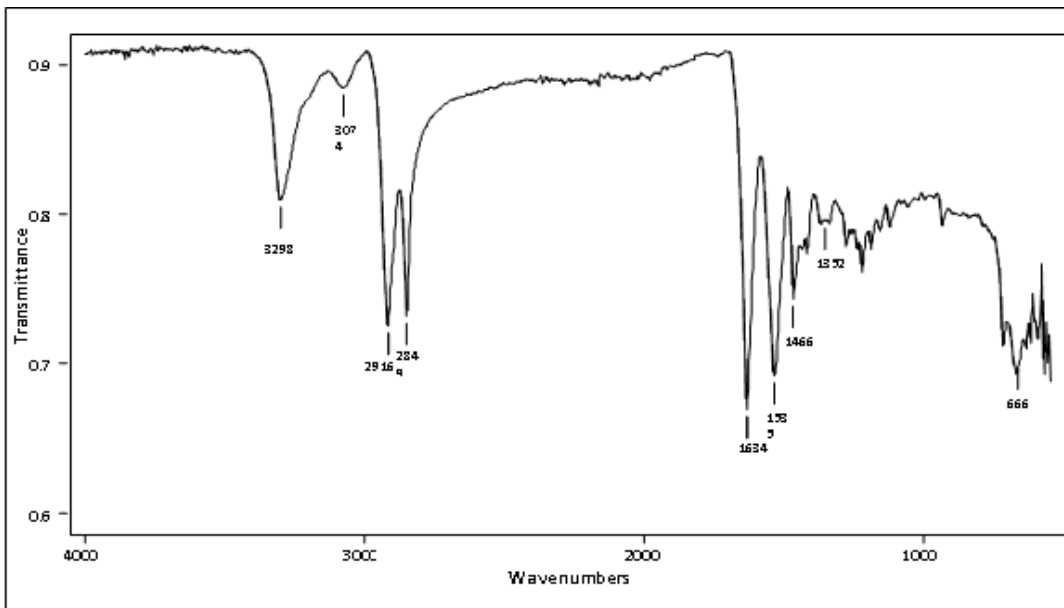
Astara yapılan TGA analizi sonucunda Şekil 4.8'de sunulan spektrum elde edilmiştir. TGA spektrumundan astarın 370 °C sıcaklık değerinde bozunmaya başladığı ve bozunmanın yaklaşık 425 °C sıcaklığa kadar devam ettiği görülmüştür. Ortalama bozunma değeri grafikten 395 °C olarak belirlenmiştir. Şekil 4.8'de sunulan TGA spektrumundan yanma sürecinden sonra ağırlıkça % 10 oranında kül kaldığı görülmüştür.



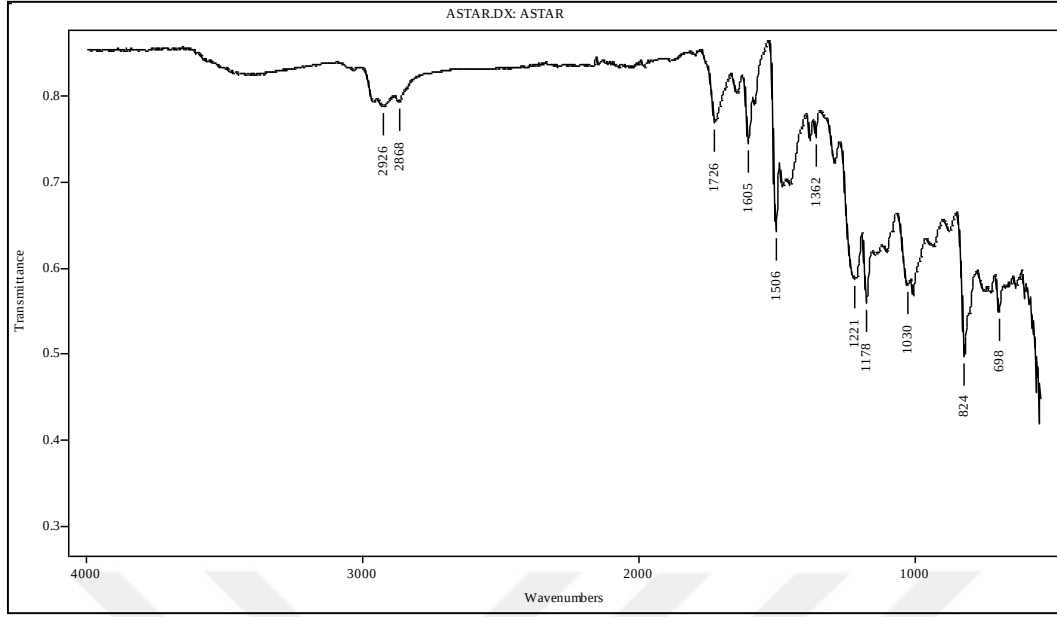
Şekil 4.8. Astar numunesinin TGA spektrumu

4.3. ATR-FTIR Analizi

Polimer ve astar numunesine ait ATR-FTIR spektrumu sırasıyla Şekil 4.9 ve Şekil 4.10'da sunulmuştur. Literatür araştırmaları ve Essential FTIR programı yardımıyla belirlenen piklere ait yorumlar Çizelge 4.2'de sunulmuştur. Elde edilen verilerin literatürle uyumlu olduğu görülmüştür [39,40,54].



Şekil 4.9. Polimerin ATR-FTIR spektrumu



Şekil 4.10. Astarın ATR-FTIR spektrumu

Çizelge 4.2. Polimer ve astara ait ATR-FTIR spektrumu

Dalga Boyu (cm^{-1})	Bağ Yapısı
Toz Polimer	
3298	N-H gerilme bandı
3074	N-H gerilme bandı
2916	C-H, CH_2 gerilme bandı
2849	C-H, CH_2 gerilme bandı
1634	C=O gerilme bandı
1535	N-H eğilme bandı
1466	CH_2 scissoring bandı
1352	C-H eğilme bandı
666	C-H düzlem dışı eğilme bandı
Sıvı Astar	
2926	C-H, CH_2 gerilme bandı
2868	C-H, CH_2 gerilme bandı
1726	C=O gerilme bandı
1605	C=C gerilme bandı
1506	C=C gerilme bandı
1362	C-N gerilme bandı
1221	C-N, C-O gerilme bandı
1178	C-O gerilme bandı
1030	C-N gerilme bandı
824	=C-H düzlem dışı eğilme bandı

Polimerin FTIR spektrumu incelendiğinde;

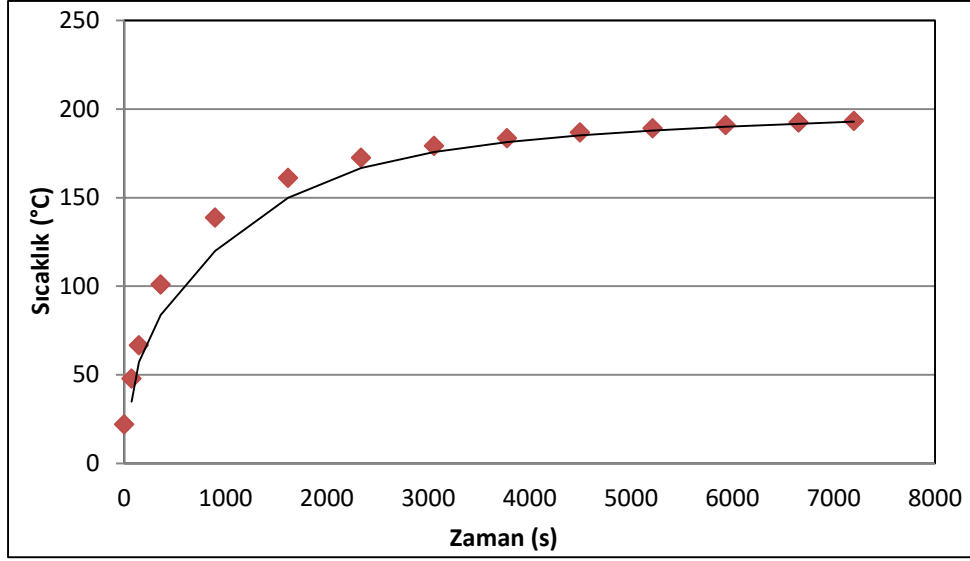
- 3298 cm^{-1} ve 3074 cm^{-1} dalga boylarında görülen N-H gerilme piklerinin polimerin yapısında bulunan amit (NH_2) kimyasal grubundan,
- 2916 cm^{-1} , 2849 cm^{-1} , 1466 cm^{-1} , 1352 cm^{-1} ve 666 cm^{-1} dalga boylarında görülen C-H gerilme piklerinin ise poliamid 11 monomerleri arasında bulunan bağlardan ve özellikle yapıda bulunan metilenden (CH_2) geldiği değerlendirilmiştir.

Astarın FTIR spekturumu incelendiğinde ;

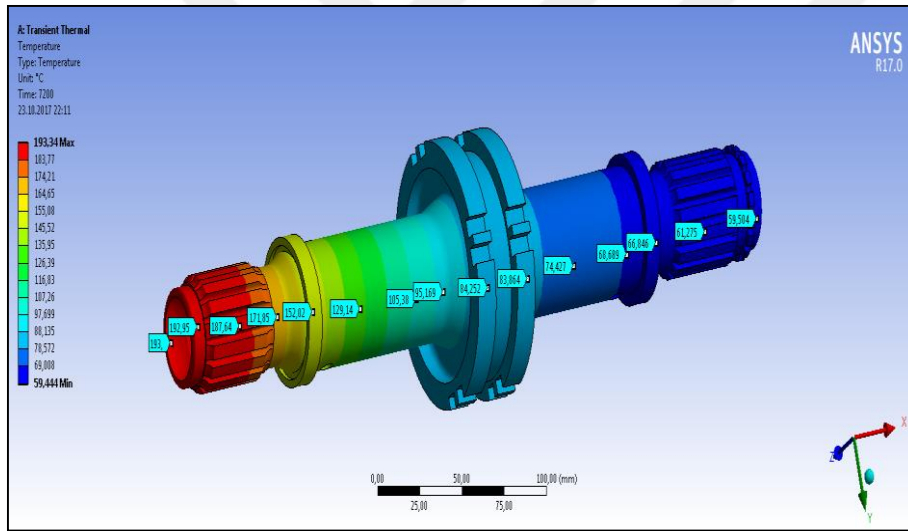
- Genelde organik birleşikler yapılarında C-H bağları bulundurmakta ve bu bağlar genelde 2850 cm^{-1} ile 3000 cm^{-1} dalga boyları arasında pikler vermektedir. Bu sebeple astarın spekturumunda 2926 cm^{-1} ve 2868 cm^{-1} dalga boylarında görülen piklerin astar içeriğinde bulunan 1-bütanol ve bütül glikolde bulunan C-H bağlarından geldiği,
- Astar içeriğinde yaklaşık kütlece % 13 oranında bulunan BisfenolA-epikloridin-etil akrilat-metakrilik asit-sitiren kopolimerin yapısında bulunan metakrilik asitte bulunan C=O bağından ve yaklaşık kütlece % 7 oranında bulunan formaldehitin yapısında bulunan C=O bağından dolayı spekturumunda 1726 cm^{-1} dalga boyunda pik görüldüğü,
- Ayrıca astarta bulunan kresol isimli kimyasalda bulunan C=C bağının 1500 cm^{-1} ve 1600 cm^{-1} dalga boylarında pik verdiği,
- 1221 cm^{-1} ve 1178 cm^{-1} dalga boylarında görülen piklerin bütül glikol yapısında bulunan C-O bağlarından,
- 1030 cm^{-1} ve 1362 cm^{-1} dalga boyunda görülen pikin ise astar içeriğinde bulunan metenamin isimli kimyasalda bulunan amin yapısında bulunan C-N bağından,
- 824 cm^{-1} dalga boyunda görülen pikin ise astar içeriğinde bulunan formaldehitin yapısında bulunan =C-H bağından geldiği değerlendirilmiştir.

4.4. ANSYS Programıyla Şaftın Isıl Modelleme Sonuçları

Şaftın fırın içinde kalan kısmının sıcaklık dağılımını gösteren modelleme sonucu Şekil 4.11 ve Şekil 4.12'de gösterilmiştir. Malzemenin bu şekilde fansız bir fırında 2 saat sonunda bile 280 °C'ye ulaşamayacağı yapılan ısıl analizle anlaşılmış ayrıca deneysel olarak yapılan ısıtma işleminden sonra da şaftın bu sıcaklığa ulaşmadığı görülmüştür. Analiz sonucunda fırının konveksiyonla ısı transfer katsayısının yüksek olduğu yüksek devirle çalışan fanlı bir fırın olması gerektiği değerlendirilmiştir.



Şekil 4.11. Torkmetre şaftın en sıcak noktasının zaman-sıcaklık grafiği



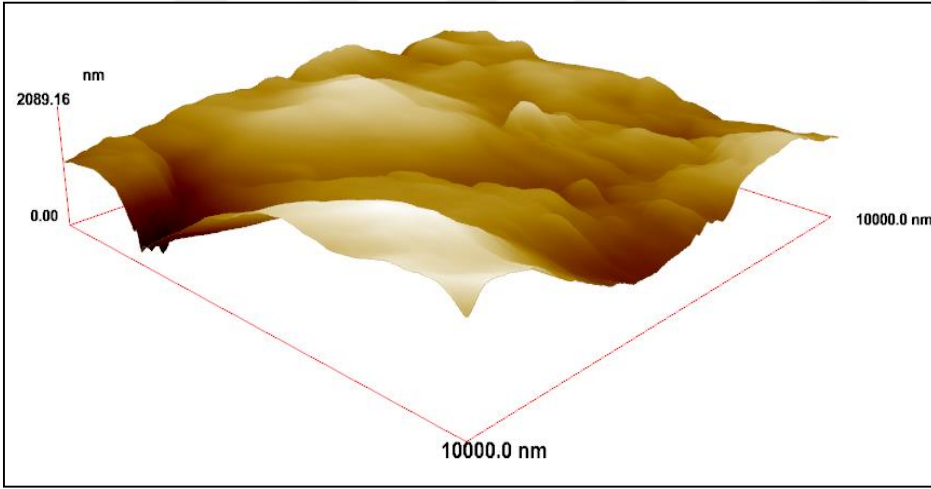
Şekil 4.12. Torkmetre şaftın tamamının zaman-sıcaklık dağılımı

Modelleme sonucu ve deneysel çalışmalardan kısmi ısıtma işleminin başarıya ulaşmadığı görülmesi üzerine bunu doğrulamak amacıyla torkmetre şaftın kaplama yapılan bölgesiyle aynı diş ve çap ölçülerinde çelik bir şaft imal edilmiş ve temizleme prosedürleri uygulanmıştır. Bu şaftın tamamı fırına konularak 290 °C sıcaklıkta 30 dakika boyunca ısıtmaya tabi tutulmuş ve akışkan yatağa 5 saniye daldırılarak kaplama yapılmıştır. Sonuç olarak çelik malzemeye ait kaplama görüntüsü Resim 4.1'de sunulmuş ve kaplamanın iyi seviyede olduğu anlaşılmıştır.



Resim 4.1. İmal edilen şaftın kaplama görüntüsü

4.5. Kaplamanın ve Kaplama Öncesi Metalin Yüzey Morfolojisi



Şekil 4.13. Poliamid kaplama yapılmamış çelik numunenin üç boyutlu yüzey görüntüsü

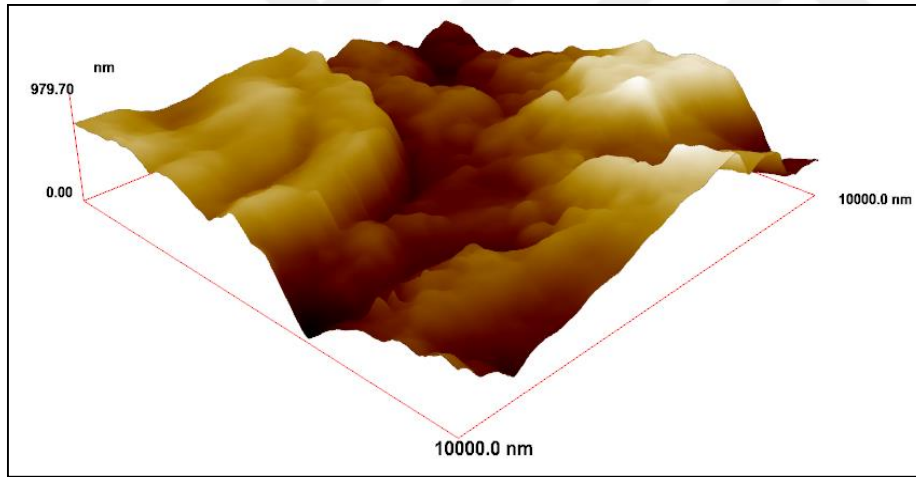
Çelik numunelere kaplama öncesi yüzey temizliği için kumlama, alkali temizleme ve buharla yağ alma işlemleri yapılmıştır. Bu işlemlerden özellikle kumlama ve alkali yüzey temizleme işlemleri yüzeyin pürüzlülüğünü artırarak kaplamanın yüzeye daha iyi yapışmasını sağlamaktadır. Temizleme işlemleri yapılmış çelik numunenin yüzey görüntüsü Şekil 4.13'te sunulmuştur. Çelik numune yüzeyinin en düşük ve yüksek

noktaları arasındaki farkın yaklaşık 2,1 μm olduğu Şekil 4.13'ten görülmektedir. Ayrıca poliamid kaplanmamış çelik numunenin yüzey parametreleri Çizelge 4.3'te sunulmuştur.

Çizelge 4.3. Poliamid kaplama yapılmamış çelik numunenin yüzey pürüzlülük parametreleri

Parametre	Tanım	Değer	Birim
Sa	Yüzey Pürüzlülüğü Aritmetik Ortalama Değeri	0,200	μm
Sq	Yüzey Pürüzlülüğü Karekök Ortalama Değeri (RMS)	0,272	μm
Ssk	Yüzey Çarpıklığı	0,44	-
Sku	Yüzey Pik Keskinliği	4,37	-

Poliamid kaplı çelik numunenin yüzey morfolojisi ise Şekil 4.14 'te sunulmuştur. Şekilden kaplanmış yüzeyin en düşük ve yüksek noktaları arasındaki farkın 0,98 μm olduğu görülmektedir.



Şekil 4.14. Poliamid kaplanmış çelik numunenin üç boyutlu yüzey görüntüsü

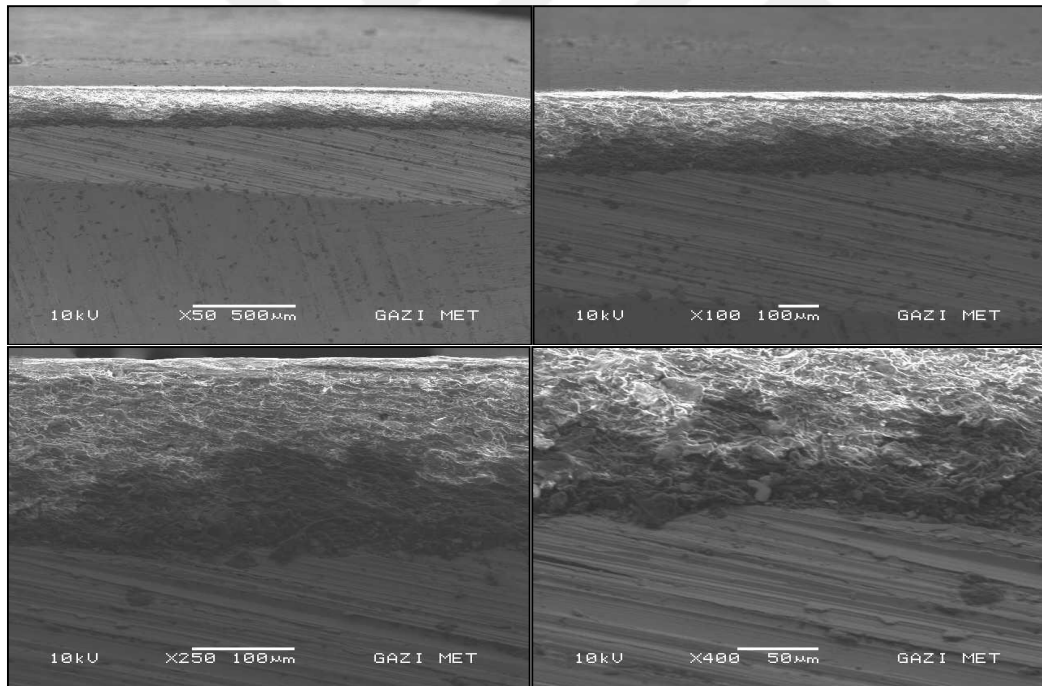
Ayrıca kaplamanın yüzey pürüzlülüğü hakkında bilgi veren parametreler Çizelge 4.4'te sunulmuştur. Şekil 4.14 ve Şekil 4.13 karşılaştırıldığında poliamid kaplamanın kaplama yapılmamış çelik numunesinin yüzey pürüzlülüğünü büyük miktarda azalttığı görülmüştür. Bunun yanında Çizelge 4.4'te görülen yüzeye ait pürüzlülük değerleri incelendiğinde poliamid kaplamanın yüzey pürüzlülüğünün aritmetik ve karekök ortalama değerleri olan Sa ve Sq değerlerinin literatür çalışmalarına göre düşük olduğu ve daha pürüzsüz bir kaplama elde edildiği görülmüştür [32,38].

Çizelge 4.4. Kaplamanın yüzey pürüzlülük parametreleri

Parametre	Tanım	Değer	Birim
Sa	Yüzey Pürüzlülüğü Aritmetik Ortalama Değeri	0,148	μm
Sq	Yüzey Pürüzlülüğü Karekök Ortalama Değeri (RMS)	0,177	μm
Ssk	Yüzey Çarpıklığı	0,09	-
Sku	Yüzey Pik Keskinliği	2,37	-

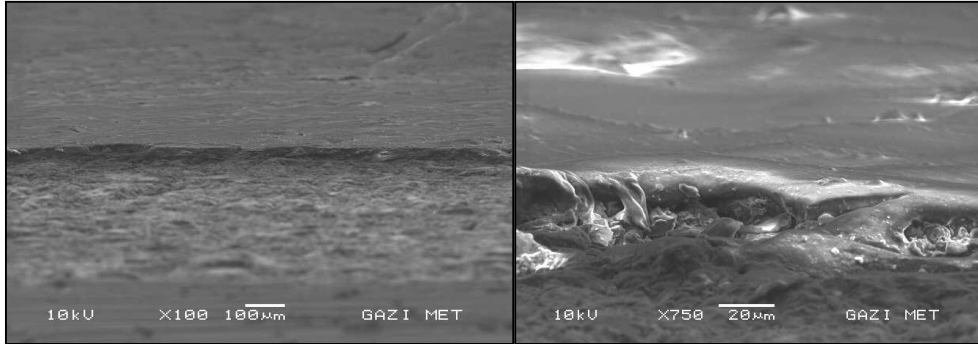
4.6. Kaplamanın Metal Yüzeye Yapışma Performansı

Şekil 4.15'te sunulan SEM görüntülerinden poliamid-11 kaplamanın ve astarın metal yüzeyine iyi şekilde yapıştığı yüzeyler arasında boşlukların olmamasından anlaşılmaktadır. Ancak polimerik kaplamanın homojen olmadığı ve yığın bir görünümde olmasının polimerin ısıyla eriyik halinde yüzeye yapışmasından kaynaklandığı değerlendirilmektedir.



Şekil 4.15. Kaplama-metal arayüzeyinin farklı büyütme oranlarındaki SEM görüntüleri

Ayrıca kaplama öncesinde metal yüzeye yapılan kumlama gibi temizleme işlemlerinin metal yüzeyini porlu ve pürüzlü bir yapıya dönüştürdüğü Şekil 4.16'da görülmektedir. Metal yüzeye püskürtülerek uygulanan astarın Şekil 4.16'da sunulan SEM görüntüsü incelendiğinde astarın metal yüzeyine iyi yapıştığı ve metal yüzeyini pürüzsüzleştirerek poliamid-11 kaplaması için düzgün bir film tabakası oluşturduğu görülmektedir.



Şekil 4.16. Metal-astar arayüzeyinin 100 ve 750 büyütme oranında SEM görüntüleri

4.7. Kaplamanın Korozyon, Kimyasal ve Mekanik Dayanımı Testleri

4.7.1. Tuz püskürtme testi

Astar uygulanmadan poliamid-11 ile kaplanan test plakaları da dahil olmak üzere Çizelge 3.2 ve Çizelge 3.3'te sunulan ve farklı kalınlıklarda poliamid-11 kaplı Al-2024 test plakalarının tamamında tuz püskürtme testi sonrası herhangi bir korozyon ve deformasyon görülmemiştir. 336 saat uygulanan tuz testi sonrasında poliamid-11 kaplı Al-2024 test plakalarından birinin görüntüsü Resim 4.2'de sunulmuştur.



Resim 4.2. 200 μm kalınlıkta poliamid-11 kaplı Al-2024 plakanın 336 saat tuz testi sonrası görüntüsü

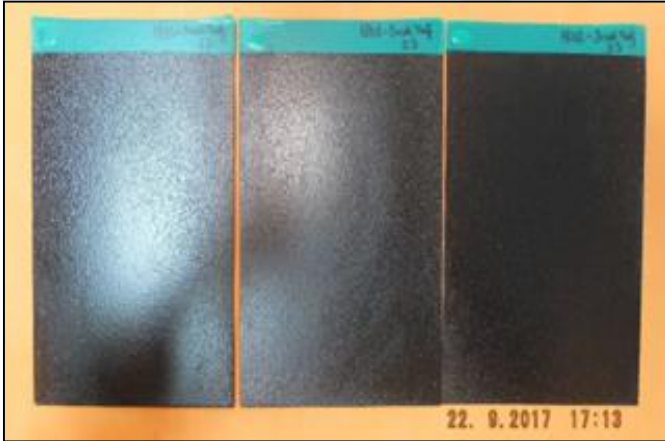
Ayrıca 150 ile 200 μm arasında değişen kaplama kalınlıklarında poliamid-11 ile kaplanmış üç adet çelik plakanın 720 saatlik tuz testi sonrası görüntüleri Resim 4.3'te sunulmuş ve çelik plakaların yüzeylerinde de yukarıda bahsedilen alüminyum plakalarda olduğu gibi herhangi bir korozyon ve deformasyon görülmemiştir.



Resim 4.3. Poliamid-11 kaplı St-37çelik plakaların 720 saat tuz testi sonrası görüntüsü

4.7.2. Sıcak yağa dayanım testi

60 ± 20 °C sıcaklıkta bulunan 10W-40 dizel motor yağına 168 saat süresince daldırılan poliamid-11 kaplı çelik plakaların yüzeylerinde test sonrası herhangi bir korozyon ve kaplama deformasyonu oluşmadığı Resim 4.4'te görülmektedir.

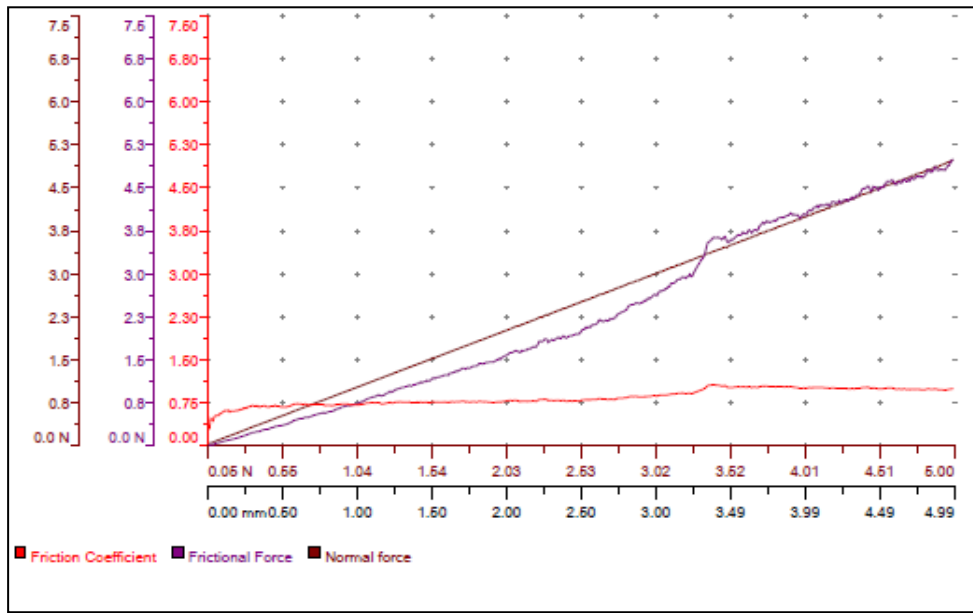


Resim 4.4. Poliamid-11 kaplı St-37çelik plakaların 60 ± 20 °C sıcaklıkta 10W-40 motor yağına daldırma testi sonuçları

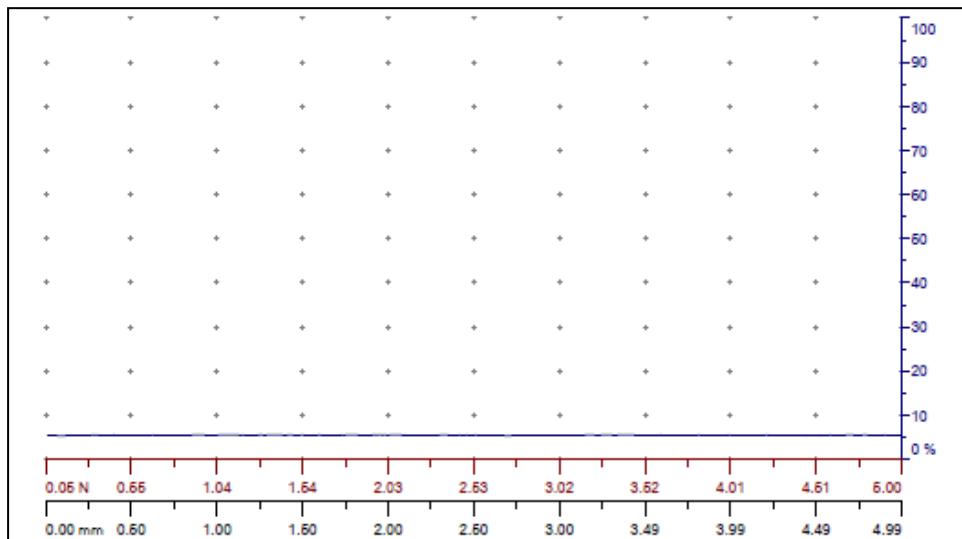
4.7.3. Çizik testleri

Test plakaları üzerinde poliamid-11 kaplı yüzeylere CMS model mikro çizik test cihazıyla iki farklı kuvvetle mikro çizik testi uygulanmıştır. Öncelikle 100 µm çapında çizici uçla 0,05 N başlangıç kuvvetinden 5 N seviyesine kadar artan kuvvetle yüzeyde 5 mm çizik oluşturulmuştur. Çizik boyunca uygulanan kuvvete karşı sürtünme katsayısı ve sürtünme

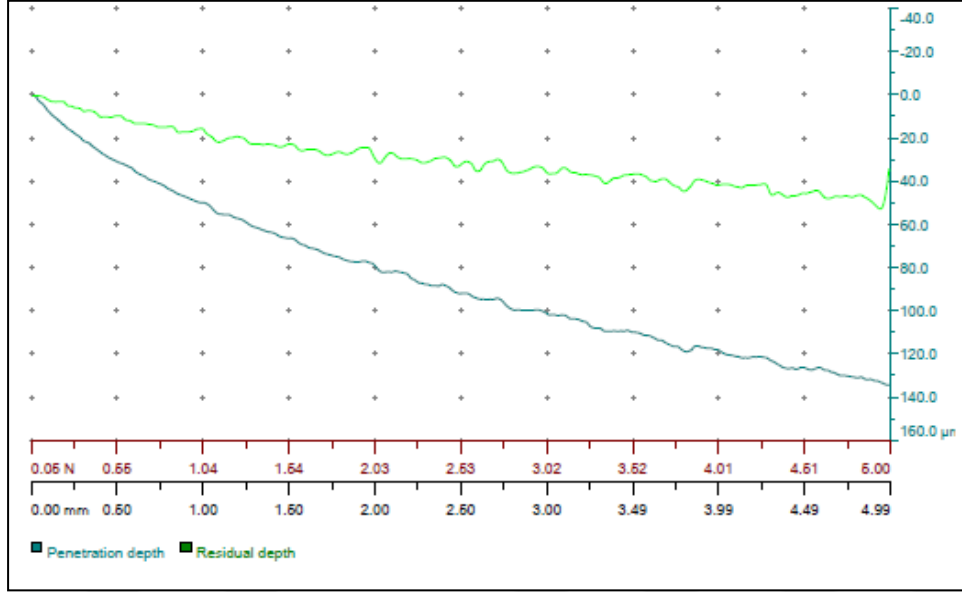
kuvvetinde olan değişim Şekil 4.16'da sunulmuştur. Grafik incelendiğinde sürtünme katsayısında ve sürtünme kuvvetinde 3,5 N değerinde küçük bir pik görülsede bu durumun kritik yük değerini veren belirgin bir değişim olmadığı öngörülmüştür. Ayrıca kritik yük noktası akustik emisyon grafiğinde ve penetrasyon derinliği grafiğinde eğimin aniden değiştiiği nokta olarak kabul edilmektedir. Özellikle 3,5 N kuvvet değerinde ve test boyunca uygulanan tüm kuvvet değerlerinde Şekil 4.17'de ve Şekil 4.18'de sunulan grafiklerde herhangi bir değişim görülmediğinden poliamid-11 kaplamanın çizik dayanımının 5 N'dan büyük olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 4.17. 5 N'a kadar yapılan çizik testine ait sürtünme kuvveti-yük grafiği

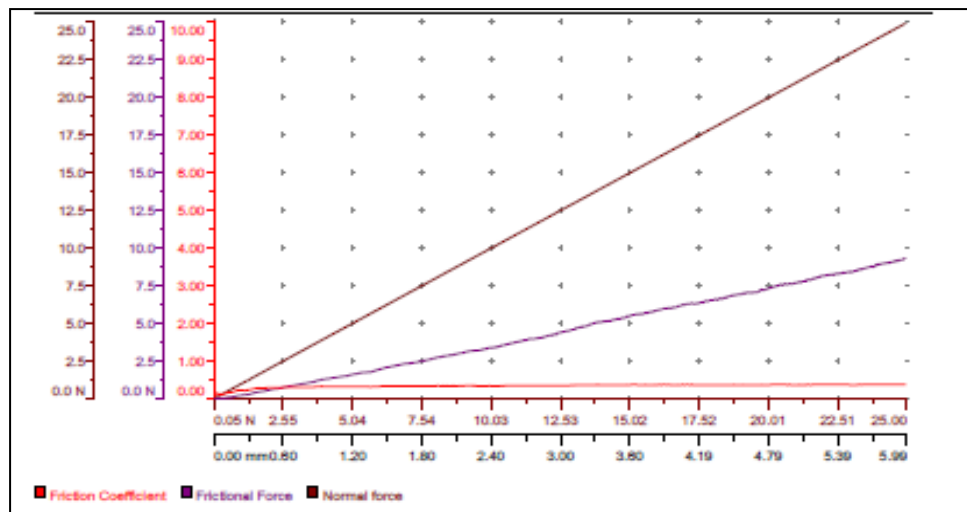


Şekil 4.18. 5 N'a kadar yapılan çizik testine ait akustik emisyon grafiği

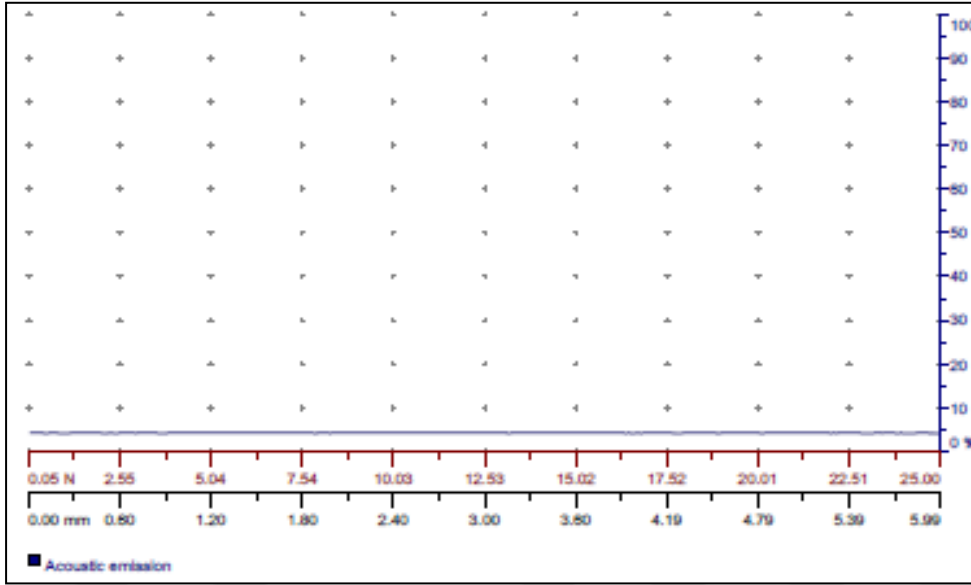


Şekil 4.19. 5 N'a kadar yapılan çizik testine ait penetrasyon derinliği grafiği

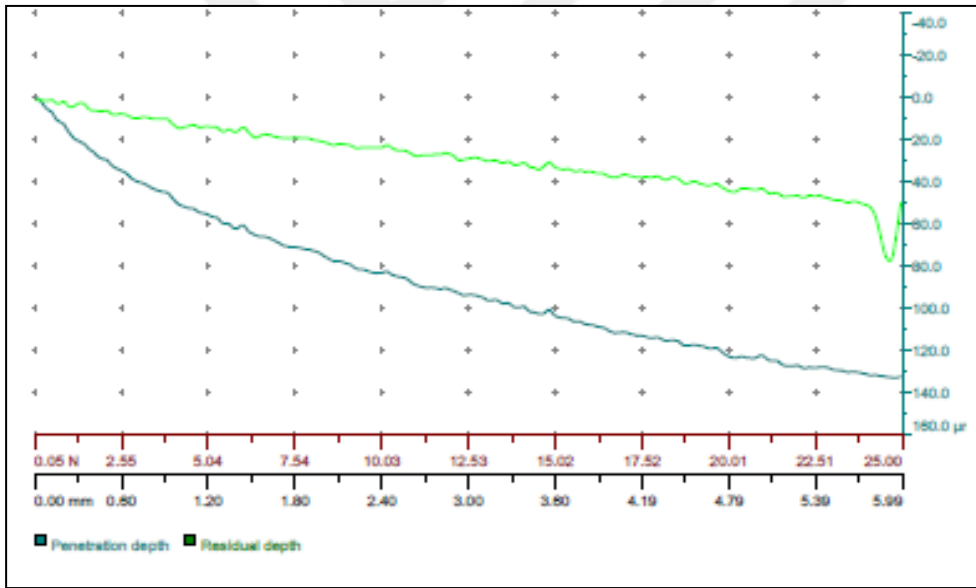
Daha sonra aynı çizici uçla 0,05 N başlangıç kuvvetinden 25 N kuvvetine kadar artan kuvvetle yüzeyde 6 mm çizik oluşturulmuştur. Çizik boyunca uygulanan kuvvete karşı sürtünme katsayısı ve sürtünme kuvvetinde olan değişim Şekil 4.19'da sunulmuştur. 25 N kuvvete kadar yapılan çizik testinin akustik emisyon ve penetrasyon değerlerini gösteren Şekil 4.20 ve Şekil 4.21 incelendiğinde grafiklerden kaplamanın çatladığı ve kırıldığı kritik yük noktalarını veren bir değişim görülmemiş ve Şekil 4.22'de sunulan çizikğin optik görüntüsü de bu sonucu doğrulamıştır. Her iki mikro çizik testinde de çizici ucun kaplamanın 130 µm derinliğine kadar indiği görülmüştür.



Şekil 4.20. 25 N'a kadar yapılan çizik testine ait sürtünme kuvveti-yük grafiği



Şekil 4.21. 25 N'a kadar yapılan çizik testine ait akustik emisyon grafiği



Şekil 4.22. 25 N'a kadar yapılan çizik testine ait penetrasyon derinliği ölçümü



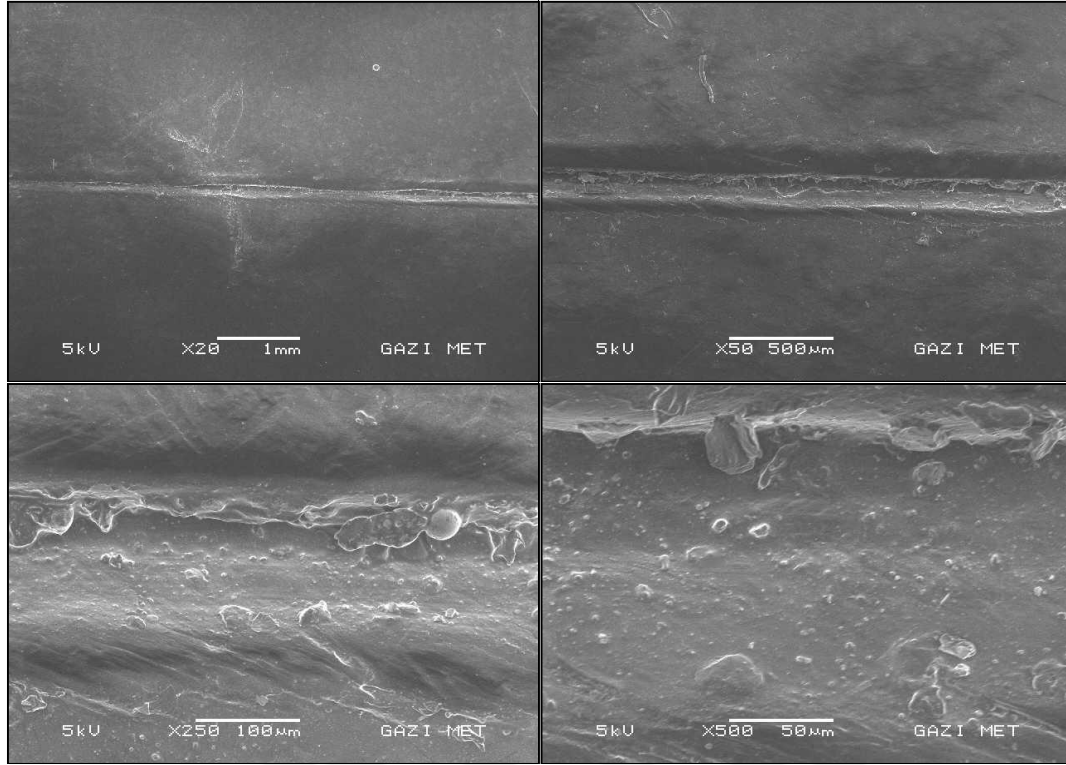
Şekil 4.23. 25 N'a kadar yapılan çizik testinin optik mikroskop görüntüsü

40 N ile yapılan çizik testinde çizici ucun poliamid kaplamanın yüzeyinde tabakalar halinde döküntü ve kopmalara yol açtığı Şekil 4.24'te sunulan özellikle 250 ve 500 büyütme oranlarındaki SEM görüntülerinden tespit edilmiştir.

Giraldo ve diğerleri poliamid-6 ve çok duvarlı karbonnanotüp ile güçlendirilmiş poliamid-6'nın çizilmeye karşı dirençlerini incelemişlerdir. 15 N ile gerçekleştirilen çizik testlerinde elde edilen SEM görüntülerini incelemişler ve hem poliamid-6'nın hemde güçlendirilmiş poliamid-6'nın yüzeyinde çizik testi sonrası kaplama kopması olmadığını tespit etmişlerdir [55].

Ayrıca Rajesh ve Bijwe yaptıkları çalışmada granül haldeki poliamid-11'i çizik testi için enjeksiyon kalıplama tekniği ile istenilen şekle sokmuşlardır. Ardından polimerin yüzeyinde 10 N'dan 40 N'a kadar sabit yüklerle çizikler oluşturmuşlardır. Elde ettikleri SEM görüntülerinde poliamid-11'in yüzeyinde 20 N ile yapılan çizik testinde kopmalar görmüşlerdir [37].

Daha önceki mikro çizik testi verilerinden de çizik dayanımının 25 N'dan büyük olduğu tespit edilmişti. Bahsedilen literatür araştırmaları, yapılan mikro ve manuel çizik testleri ve elde edilen SEM görüntülerinden poliamid-11 kaplamanın çizik dayanımının 40 N'dan düşük ve 20 N 'dan büyük olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 4.25. Manuel tip çizik test cihazıyla 40 N kuvvet ile oluşturulan çiziklin farklı büyütme oranlarındaki SEM görüntüleri

4.7.4. Sertlik testleri

Shore sertlik testi

Çizelge 4.5'te gösterilen farklı kaplama kalınlıklarına sahip polyamid-11 kaplı test plakaların sertlikleri ölçülmüş ve kaplama sertliği 90 Shore-A olarak bulunmuştur. Kaplama kalınlığındaki artışın kaplamanın sertliğine etkisi olmadığı görülmüştür.

Çizelge 4.5. Poliamid-11 kaplamanın shore sertlik testi sonuçları

Değerlendirme Kriteri	Test Sonuçları		
	Numune-1	Numune-2	Numune-3
Film Kalınlığı TS 2311 EN ISO 2178	119 ± 3 µm	136 ± 3 µm	153 ± 3 µm
Shore sertlik testi (Shore-A) EN ISO 868	90	90	90

Persoz pendulum sertlik testi

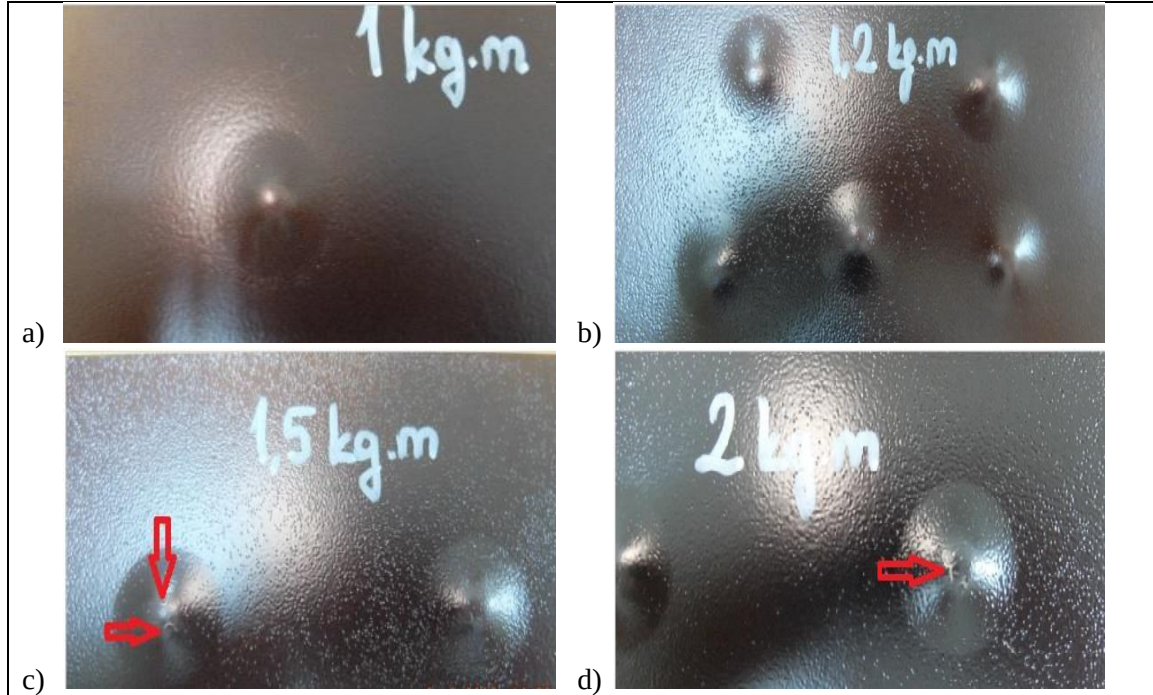
Persoz pendulum sertlik testi sonucunda 120 ± 3 µm kaplama kalınlığına sahip test plakasının sertlik değeri 337 saniye olarak bulunmuştur.

Kalem sertlik testi

Sheen marka SH720N model kalem sertlik cihazı ile 20 farklı sertlikte kalemin kullanıldığı testte poliamid-11 kaplamanın bu kalemlerin en sert 9H 'dan daha yüksek sertliğe sahip olması sebebiyle bu testin kaplamanın sertliğini ölçemediği görülmüştür.

4.7.5. Darbe (ağırlık düşürme) testi

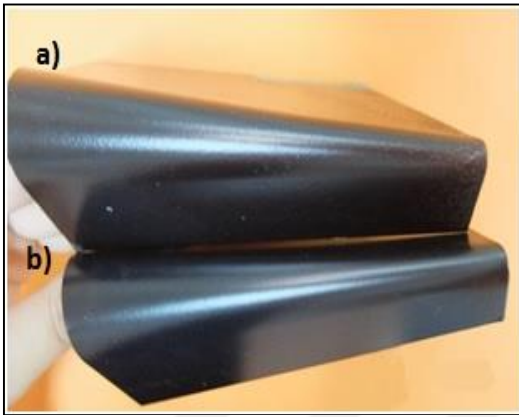
Plakalara öncelikle 1 kg ağırlık 1 metre yükseklikten bırakılmış ve yüzeyde çatlak oluşumu büyüteçle incelenmiştir. Kaplama yüzeyinde çatlak oluşmadığı için daha sonra 2 kg ağırlık 1 metre yükseklikten bırakılmış ve kaplamalı yüzeyde Resim 4.6'da kırmızı oklarla gösterilen çatlaklar oluşmuştur. Daha sonra sırasıyla 1,5 kg ve 1,2 kg ağırlıklar bırakılmış ve polimerik kaplamada 1,5 kg ile Resim 4.6'da kırmızı oklarla gösterilen çatlakların oluştuğu ancak 1,2 kg ağırlık ile çatlak oluşmadığı görülmüştür. Yaklaşık 120 μ m kalınlığa sahip poliamid-11 kaplamanın darbe dayanımının 1.2 kgm ile 1.5 kgm arasında olduğu görülmüştür. 1 m yükseklikten bırakılan 1.2 kg ağırlığın çarpma öncesi kinetik enerjisi 11,76 J ve plakada 3 mm çukur açması sebebiyle ortalama darbe kuvveti 3920 N olarak belirlenmiştir.



Resim 4.6. Farklı ağırlıklarla gerçekleştirilmiş darbe testi sonuçları

4.7.6. Bükme testi

Yaklaşık 100 μm ve 170 μm kalınlıkta poliamid-11 ile kaplı iki adet DKP plakanın konik mandrelle bükülmeleri sonrasında kaplama yüzeylerinin görüntüleri Resim 4.7'de verilmiştir. Kaplama yüzeylerinin büyüteçle incelenmesi sonucu ve Resim 4.7'den görüldüğü gibi her iki plakanında kaplamasında çatlak, yüzeyden ayrılma, deformasyon olmadığı ve kaplamaların plaka yüzeyine yapışma kalitesinin iyi seviye olduğu anlaşılmıştır.



Resim 4.7. Bükme testi sonrası plakaların görüntüleri a) 102 μm kalınlıkta poliamid 11 kaplı plaka, b) 170 μm kalınlıkta poliamid-11 kaplı plaka

4.7.7. Aşınma dayanımı testi

10 cm çapında dairesel kesitli ve 106,9 μm kalınlıkta poliamid-11 ile kaplanmış DKP plakanın 1000 g yük ile 72 devir/dakika dönüş hızında ve 5000 devir gerçekleştirilen aşındırma test sonucu görüntüsü Resim 4.8'de sunulmuştur. Test sonrası kaplamanın kalınlığı 103,5 μm olarak ölçüldüğü ve kaplamanın kalınlığında 3,4 μm azalma olduğu tespit edilmiştir. Kaplamanın aşınma hızı 1426 devir/ μm (36231devir/mil) olarak bulunmuştur. 5000 devir sonunda kaplama kalınlığında % 3,2 azalma olmuştur. Aşınma testine maruz kalan DKP plakanın 106,9 μm kalınlıktaki poliamid kaplamasının yaklaşık 35 saatlik test sonrası tamamen aşınacağı öngörülmüştür.



Resim 4.8. Aşındırma testi sonrası poliamid-11 kaplı DKP plakanın yüzey görüntüsü



5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Yapılan çalışmalardan elde edilen sonuçlar aşağıda özet olarak sunulmuştur.

- Çalışmada poliamid-11 kaplama prosesisin gerçekleştirileceği akışkan yatak 2 farklı ölçü ve tasarımı imal edilmiştir. Akışkan yataklar kaynak yapılabilmesi, oksidasyon direncinin iyi olması ve fiyat/performans oranının düşük olması sebebiyle AISI-304 tipi paslanmaz çelik malzemeden imal edilmiştir. Öncelikle küçük boyutlu akışkan yatak imal edilmiş ve bu yatakta tek plaka üzerinde delikler oluşturularak elde edilen dağıtıcı plaka kullanılmıştır. Daha büyük boyutlarda imal edilen akışkan yatakta ise aralarında hava geçişini sağlayan 1 cm çapında boruların olduğu 2 adet plaka dağıtıcı plaka olarak kullanılmıştır. İmal edilen akışkan yataklar farklı partikül çaplarında ve yatak yüksekliklerinde polimerik kaplama malzemeleri ile doldurulmuş ve test edilmiştir. Akışkanlaşmanın dağıtıcı plaka olarak tek plakanın kullanıldığı küçük boyutlu akışkan yatakta daha iyi olduğu görülmüştür.
- Küçük boyutlu akışkan yatak ile çalışmalara devam edilmiş ve bu akışkan yatak için yatak boşluk kesri, basınç düşmesi, minimum ve maksimum akışkanlaşma hızları gibi akışkanlaşma parametreleri hesaplanmıştır.
- Teorik olarak hesaplanarak bulunan basınç düşmesi değeriyle U tipi manometreden okunan deneysel basınç düşmesi değeri karşılaştırıldığında aralarında % 1,8 değerinde fark olduğu tespit edilmiştir.
- Minimum akışkanlaşma hızı 0,42 cm/s, maksimum akışkanlaşma hızı ise 21 cm/s olarak hesaplanmıştır. Maksimum akışkanlaşma hızının minimum akışkanlaşma hızına oranı 50 olduğu ve bu oranın literatürde belirtilen 9 - 90 değeri arasında olduğu görülmüştür [23]. Ayrıca maksimum akışkanlaşma hızı olarak hesaplanan 0,21 m/s değerinin, aynı partikül çapında bir parça için literatürde maksimum akışkanlaşma hızı olarak verilen 0,18 m/s değerine oldukça yakın olduğu görülmüştür.
- Polimerin -100 °C ile 350°C sıcaklık aralığında gerçekleştirilen DSC analizlerinden polimerin camsı geçiş sıcaklığının 46 °C olduğu ve polimer numunesinin 180 °C sıcaklıkta erimeye başladığı ve erimenin 190°C'de sona erdiği görülmüştür. Ayrıca DSC spektrumundan polimerin erime ısı 79 J/g olarak hesaplanmıştır. Yapılan literatür araştırmasında poliamid-11'in camsı geçiş sıcaklığı ve erime sıcaklığının sırasıyla 46 °C ve 186 °C olduğu ayrıca erime entalpi değerinin 80 J/g olduğu tespit edilmiştir.

[32,36,52]. DSC analizinden elde edilen değerlerin poliamid-11'in literatür değerleri ile uyumlu olduğu tespit edilmiştir.

- Astarın -100 °C ile 350 °C sıcaklık aralığında gerçekleştirilen DSC analizinden elde edilen grafikten 0 °C civarında ve 100 °C civarında görünen piklerin astarın içeriğinde bulunan suyun donma ve kaynama noktası olduğu değerlendirilmektedir. Grafikten yapılan entalpi hesaplamalarından astarın içeriğinde %50 su olduğu tahmin edilmiş ve daha sonra üreticiden temin edilen ve EK-1'de sunulan astara ait teknik dokümanda astarın su içeriğinin % 56 civarı olduğu tespit edilmiştir.
- Polimerin ve astarın ısıyla bozunmasını tespit edebilmek amacıyla polimere TGA analizi yapılmıştır. Polimerin TGA spektrumundan polimerin 390 °C sıcaklık değerinde bozunmaya başladığı ve bozunmanın yaklaşık 480 °C sıcaklığa kadar devam ettiği görülmüştür. Astarın TGA spektrumundan ise astarın 370 °C sıcaklık değerinde bozunmaya başladığı ve bozunmanın yaklaşık 425 °C sıcaklığa kadar devam ettiği görülmüştür. Polimerin TGA spektrumundan analiz sonunda % 30 kül kaldığı ve bu miktarın polimer yapısında bulunan inorganik katkı maddelerinden geldiği düşünülmektedir. Bu durum ileride yapılabilecek çalışmalarla araştırılabileceği öngörülmüştür.
- Polimer ve astar numunelerinin yapısında bulunan kimyasal bağların tespitine yönelik numunelere FTIR spektrometresiyle analizler gerçekleştirilmiştir. Analizler Gazi Üniversitesi Fotonik Araştırma ve Uygulama Merkezinde Bruker firmasına ait Vertex-80 cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Sıvı astar çelik plaka üzerine uygulanarak kurumasına müteakip analiz edilirken polimerik toz direk analiz edilmiştir. Polimerin ve astarın FTIR spektrumlarında C=O, C-N ve N-H piki gibi çeşitli fonksiyonel gruplara ait karakteristik pikler görülmüştür. Elde edilen verilerin literatürle uyumlu olduğu görülmüştür [39,40,53].
- Torkmetre şaftın kaplama yapılabilmesi için gereken ısıtma işlemi ve oluşacak sıcaklık dağılımının tespit edilebilmesi amacıyla şaftın Solidworks programıyla üç boyutlu çizimi yapılmış ve çizimler ANSYS programına yüklenerek şaftın fırın içinde ısıtma işlemi modellenmiştir. Yapılan modelleme için durgun havanın ısı transfer katsayısı (h) 12 W/m²K, 25 °C'de havanın ısı transfer katsayısı (h) 5 W/m²K olarak kabul edilmiştir. ANSYS programıyla yapılan ısı analiz sonucundan şaftın 2 saat sonunda en fazla 193 °C sıcaklığa ulaştığı görülmüştür. Şaft için yapılan deneysel ısıtma işlemide bu durumu doğrulamış şaftın kaplanacak dişli bölümünün istenilen sıcaklığa ulaşmadığı

görülmüştür. İstenilen ısıtma işleminin şaft için özel olarak imal edilmiş yüksek devirle çalışan fanlı bir fırınla gerçekleştirilebileceği ön görülmüştür. Torkmetre şaft gibi çelik bir malzemeden şaftla aynı ölçülerde bir şaft imal edilmiştir. İmal edilen bu şaftta gerekli kaplama öncesi temizlikler yapılmış ve şaft tamamı fırına girecek şekilde ısıtılmıştır. Akışkan yatakta daldırma yöntemiyle kaplanan şaftın iyi bir şekilde poliamid-11 ile kaplandığı görülmüştür.

- Polimerik kaplamanın yüzey pürüzlülük değerlerinin tespit etmek amacıyla kaplamalı yüzeyden 10 μm x 10 μm ölçülerinde bir alan AFM cihazıyla taranmıştır. Ayrıca yüzey pürüzlülüğün kıyaslanabilmesi amacıyla kaplama öncesi temizlenmiş metal yüzeyde taranarak pürüzlülük değerleri bulunmuştur. Çelik numune yüzeyinin en düşük ve yüksek noktaları arasındaki fark yaklaşık 2,1 μm iken poliamid-11 kaplama yüzeyinin en düşük ve yüksek noktaları arasındaki farkın 0,98 μm olduğu tespit edilmiştir. Kaplamanın pürüzlülük parametrelerinin literatür çalışmalarına göre düşük olduğu ve daha pürüzsüz bir kaplama elde edildiği görülmüştür [32,38].
- Kaplamanın metal ile yaptığı yapışma kalitesinin belirlenmesi amacıyla metal-astar ve astar-polimer arayüzeylerinin görüntüleri GaziÜniversitesi Fotonik Araştırma ve Uygulama Merkezinde bulunan Jeol firmasına ait JSM-6060 model SEM cihazıyla incelenmiştir. Farklı büyütme oranlarında elde edilen SEM görüntülerinde yüzeyler arasında boşlukların olmaması poliamid-11 kaplama, astar ve metal yüzeyleri arasında iyi bir yapışma olduğunu göstermiştir. Metal yüzeye kaplama öncesi uygulanan astarın porlu olan metal yüzeyini pürüzsüz bir yapıya dönüştürdüğü SEM görüntülerinden tespit edilmiştir.
- Al-2024 ve St-37 çelik plakalara farklı kalınlıklarda poliamid kaplanmıştır. Kaplama prosesinde astarın tuz testine karşı korozyon direncine etkisini belirlemek amacıyla Al-2024 plakalara kaplama öncesi astar uygulanmadan ve astar uygulanarak poliamid kaplama yapılmıştır. Alüminyum plakalara 336 saat, çelik plakalara 720 saat boyunca tuz püskürtme testi uygulanmıştır. Tüm plakalarda test sonrası deformasyon, kaplama kalkması veya korozyon görülmemesinden kaplamanın korozyon direncinin iyi seviyede olduğu tespit edilmiştir.
- Kaplamanın yağla çalışan mekanik parçalar için kullanılabilirliğinin belirlenmesi için çelik plakalara poliamid kaplama yapılmıştır. 60 $\pm$ 20 $^{\circ}\text{C}$ sıcaklıkta bulunan 10W-40 dizel motor yağına 168 saat süresince daldırılan poliamid-11 kaplı çelik plakaların yüzeylerinde herhangi bir değişim olmadığı görülmüştür.

- Poliamid-11 kaplamanın çizik dayanımı yapılan iki farklı çizik testi ile incelenmiştir. Öncelikle poliamid kaplı çelik test plakalarına CMS model mikro çizik test cihazıyla iki farklı kuvvetle mikro çizik testi uygulanmıştır. Bu test için 1,5 x 1,5 cm ebatlarında St-37 çelik test plakaları 160 µm kalınlıkta poliamid-11 ile kaplanmıştır. Mikro çizik test cihazıyla test plakaların yüzeyinde 0,05 N başlangıç kuvvetinden 5 N seviyesine kadar artan kuvvetle 5 mm çizik ve 0,05 N başlangıç kuvvetinden 25 N seviyesine kadar artan kuvvetle 6 mm çizik oluşturulmuştur. Testlerden çizik boyunca uygulanan kuvvete karşı sürtünme kuvveti, sürtünme katsayısı, akustik emisyon değeri ve penetrasyon değerlerini gösteren grafikler elde edilmiştir. Ayrıca çizik yüzeyinin optik mikroskop görüntüleri elde edilmiştir. Elde edilen tüm verilerden çizik testinde 25 N'a kadar kaplamada herhangi bir değişim görülmemiştir. Bu sebeple test plakalarına daha yüksek kuvvetle çizik testine imkan veren manuel tip çizik testi uygulanmıştır. Bu testte plaka yüzeylerinde 10 N, 20 N ve 40 N ile çizikler oluşturulmuştur. 20 N ve 40 N ile çizilen plakaların çizik bölgelerinden 1,5 cm x 1,5 cm ebatlarında parçalar kesilerek SEM cihazıyla incelenmiştir. SEM görüntülerinden poliamid-11 kaplamanın çizik dayanımının 40 N'dan düşük ve 20 N 'dan büyük olduğu tespit edilmiştir.
- Poliamid-11 kaplamanın sertlik değerinin belirlenmesi amacıyla kaplamaya shore sertlik testi, persoz pendulum sertlik testi ve kalem sertlik testi uygulanmıştır. Farklı kaplama kalınlıklarında test plakalarına uygulanan shore sertlik testinde kaplamanın sertliği 90 Shore-A olarak bulunmuş ve kalınlık artışının sertliğe etkisi olmadığı görülmüştür. Persoz pendulum sertlik testi sonucunda sertlik değeri 337 saniye olarak bulunmuş ve kalem sertlik testinin kaplamanın sertliğini ölçmede yetersiz bir test olduğu anlaşılmıştır.
- Darbeler altında kaplama üzerindeki değişiminin belirlenmesi amacıyla uygulanan ağırlık düşürme testinde poliamid-11 ile kaplı plakalara 1 metre yükseklikten farklı ağırlıklar bırakılmış ve darbe yüzeyi büyüteçle incelenmiştir. Poliamid-11 kaplamanın darbe dayanımının 1.2 kgm ile 1.5 kgm arasında olduğu görülmüştür.
- Poliamid kaplı plakaların konik mandrelle bükülmeleri sonrası kaplama yüzeylerinde çatlak, yüzeyden ayrılma, deformasyon olmadığı ve kaplamanın plakalara yapışma kalitesinin iyi seviye olduğu anlaşılmıştır.
- Kaplamaların kalitesinin belirlenmesinde önemli bir özellik olan aşınma dayanımı poliamid kaplama için aşındırma test cihazı kullanılarak incelenmiştir. 10 cm çapında dairesel kesitli ve 106,9 µm kalınlıkta poliamid-11 ile kaplanmış DKP plakaya 1000 g

yük ile 72 devir/dakika dönüş hızında ve 5000 devir boyunca aşındırma testi uygulanmıştır. Test sonrası kaplamanın kalınlığı 103,5 μm olarak ölçüldüğü ve kaplamanın kalınlığında 3,4 μm azalma olduğu tespit edilmiştir. Kaplamanın aşınma hızı 1426 devir/ μm (36231devir/mil) olarak bulunmuştur. 5000 devir sonunda kaplama kalınlığında % 3,2 azalma olmuştur. Aşınma testine maruz kalan DKP plakanın 106,9 μm kalınlıktaki poliamid kaplamasının yaklaşık 35 saatlik test sonrası tamamen aşınacağı öngörülmüştür.

Yapılan çalışmada biyolojik kökenli poliamid-11 polimerinin kaplama prosesisin parametreleri incelenmiştir. Polimerin partikül boyutu ve yoğunluğunun imal edilen akışkan yatağın birçok parametresini etkilediği görülmüştür. Daldırma tipi kaplama metodunda kürleme sıcaklığının, fırında bekletme süresinin ve akışkan yatağa daldırma süresinin kaplama kalınlığını ve kaplamanın parça yüzeyine yapışma kalitesini direkt etkilediği görülmüştür. Kaplama kabiliyetinin yurtiçinde olmaması sebebiyle yurtdışından yüksek maliyetlerle temin edilen torkmetre şafta poliamid-11 kaplama uygulamasının yapılabilirliği araştırılmıştır. Torkmetre şafta kaplama öncesi uygulanan astarın kürlenmesi ve parçanın belirli sıcaklığa ulaşması için kullanılan fırının yetersiz olduğu yapılan deneysel çalışmalardan ve ANSYS programıyla yapılan termal analizle görülmüştür. Torkmetre şaft ile aynı boyutlarda imal edilen çelik şaftın dişli bölümünün uygun şekilde poliamidle kaplanmıştır. Bu durumda torkmetre şaftın kendi geometrisine göre imal edilmiş ve içinde güçlü bir fan sistemi olan fırınla ısıtılması durumunda çalışmaların başarılı olabileceği tespit edilmiştir. Poliamid 11 kaplama yapılmış test numunelerine uygulanan termal, mekanik ve tribolojik testlerden imal edilen akışkan yatağın ve mevcut kaplama işlemi adımlarının kaliteli olduğu görülmüştür. Ayrıca bu polimerik kaplamanın endüstride çok fazla kullanım alanı bulabilen özellikle korozyondan koruma amaçlı gelecek vadeden çevre dostu bir kaplama olduğu tespit edilmiştir.



KAYNAKLAR

1. Benavides, S. (2009). Corrosion in the aerospace industry. *Corrosion Control in the Aerospace Industry*, 1-14.
2. Üneri, S. (1998). *Korozyon ve önlenmesi*. Ankara: Korozyon Derneği Yayını, 410-413.
3. Morgan, J.H. (1981). Cathodic protection in corrosion control. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 118(2), 251-258.
4. Jain, N.K. and Pathak, S. (2017). Electrochemical processing and surface finish. *Comprehensive Materials Finishing*, 3(11), 358-380.
5. Song, L. and Shi, Z. (2013). Anodization and corrosion of magnesium (Mg) alloys. *Corrosion Prevention of Magnesium Alloys*, 1(18), 232-281.
6. Ren, F., Yin, L., Wang, S., Volinsky, A. and Tian, B. (2013). Cyanide-free silver electroplating process in thiosulfate bath and microstructure analysis of Ag coatings. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 23(2), 3822-3828.
7. Jung, M., Lee, G. and Choi, J. (2017). Electrochemical plating of Cu-Sn alloy in non-cyanide solution to substitute for Ni under coating layer. *Electrochimia Acta*, 241(5), 229-236.
8. Stratmann, M., Feser, R. and Leng, A. (1994). Corrosion protection by organic films. *Electrochimia Acta*, 39(3), 1207-1214.
9. Zielecka, M. and Bujnowska, E. (2006). Silicone-containing polymer matrices as protective coatings: properties and applications. *Progress in Organic Coatings*, 55(2), 160-167.
10. Deflorian, F. and Fedel, M. (2014). UV curable organic polymer coatings for corrosion protection of steel. *Handbook of Smart Coatings for Materials Protection*, 12(4), 530-559.
11. Nikraves, B. and Sarabi, A. (2011). Evaluation of the corrosion resistance of an epoxy-polyamide coating containing different ratios of micaceous iron oxide/Al pigments. *Corrosion Science*, 53(14), 1592-1603.
12. Füllbrandt, M. and Wellert, S. (2015). Thermal and corrosion stability of polyamide-6 studied by broadband dielectric spectroscopy. *Polymer*, 75(1), 34-43.
13. Phalak, G., Patil, D. and Mhaske, S.T. (2017). Synthesis and characterization of thermally curable guaicol based polyurethane coating for corrosion protection on mild steel. *European Polymer Journal*, 88(11), 93-108.
14. Bishop, C. (2011). Polymeric coating basic information. *Vacuum Deposition onto Webs, Films and Foils*, 11(2), 197-214.

15. İnternet: Çevre dostu poliamid-11 eldesi. URL: http://www.webcitation.org/query?url=https%3A%2F%2Fwww.extremematerials+arkema.com%2Fexport%2Fsites%2Ftechnicalpolymers%2F.content%2Fmedias%2Fdownloads%2Farticlereprints%2Frilsan-article-reprints%2FRilsanFamily_eco-profile_article.pdf%2C+&date=2018-08-10, Son Erişim Tarihi: 16.06.2018.
16. Baycık, H., Koltuk, F. ve Müftüoğlu, F. (2003). *Galvanizli çeliklerin mikroyapısı*. Yüksek Lisans Tezi, Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Zonguldak.
17. Yalçın, H. ve Koç, T. (1991). *Demir ve çelik yapıların korozyonu ve katodik koruması*. Ankara: İller Bankası Genel Müdürlüğü Yayını, 327.
18. Robert, B. (2009). Improving surface prep through air blasting: Air blasting contributes to more productive cleaning and pretreatment by making short work of otherwise time-consuming and labor-intensive tasks. *Metal Finishing*, 107(9), 934-47.
19. Uzun, M., Gökkaya, H. ve Metlioğlu, M.R. (2014). St37 Çelik levhanın türbinli kumlama tezgahında kumlanması esnasında işleme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğüne etkisinin deneysel olarak incelenmesi. *Karaelmas Fen ve Mühendislik Dergisi*, 4(1), 58-62.
20. İnternet: Kumlama makinesinde kullanılan plastik medya ve cam tozu. URL: <http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fplastikabrasiv.com%2Fplastik%2Babrasiv%2Bcesitleri.html&date=2018-06-10>, Son Erişim Tarihi: 10.06.2018.
21. İnternet: Hava aracı gövdesine uygulanan kumlama işlemi. URL: http://www.webcitation.org/query?url=https%3A%2F%2Fwww.army.mil%2Farticle%2F96912%2Famc_commander_praises_artisan_workforce_discusses_way_ahead&date=2018-06-10, Son Erişim Tarihi: 10.06.2018.
22. Mandich, N.V. (2002). *Surface preparation of metals prior to plating*. Orlando: Paper presented American Electroplaters and Surface Finishers Society, 327.
23. Kunii, D. and Levenspiel, O. (2013). *Fluidization Engineering* (Second edition). Boston: Butterworth-Heinemann, 491.
24. Tisa, F., Raman, A.A. and Ashri, W.M. (2014). Basic design of a fluidized bed reactor for wastewater treatment using fenton oxidation. *International Journal of Innovation Management Technology*, 5(1), 113-120.
25. Klinzing, G.E., Marcus, R.D., Rizk, F. and Leung, L.S. (2010). *Pneumatic conveying of solids a theoretical and practical approach* (Second Edition). Springer Media, 69-70.
26. Sahoo, S. (2012). *Fluidized bed reactor design and application for abatement of flüoride*. Master of Science Thesis, National Institute of Technology, Rourkela, 145.
27. Escudero, D. (2010). *Bed height and material density effects on fluidized bed hydrodynamics*. Master of Science Thesis, Iowa State University, Iowa, 111.

28. Anantraham, A., Cocco, R. and Chew, J.W. (2017). Evaluation of correlations for minimum fluidization velocity (U_{mf}) in gas-solid fluidization. *Powder Technology*, 8(12), 32-59.
29. Asif, M. (2013). Predicting minimum fluidization velocities of multi-component solid mixtures. *Particuology*, 11(5), 309-316.
30. Perez, N.P., Pedroso, D.T., Machin, E.B., Antunes, S.J., Ramos, R.A. and Silveria, J.L. (2018). Prediction of the minimum fluidization velocity of particles of sugarcane bagasse. *Biomass and Bioenergy*, 109(3), 249-256.
31. Mukhtar, A., Shafiq, U., Shafique, K. and Qizilbash, M. (2016). Estimating the minimum fluidization and de-fluidization velocities of Geldarts classified powders. *European Journal of Advances in Engineering and Technology*, 3(7), 53-57.
32. Sulemian, Y., İbrahim, H., Anyakora, N.V., Mohammed, F., Abubakar, A., Aderemi, B.O. and Okonkwo, P.C. (2013). Design and fabrication of fluidized bed reactor. *International Journal of Engineering and Computer Science*, 2(5), 1595-1605.
33. Hesketh, R.P., Stewart C.S., Stephanie F. and Carney M. (2002). Fluidized bed polymer coating experiment. *Chemical Engineering Education Journal*, 36(2), 138.
34. Takeshita, Y., Sawada, T., Handa, T., Watanuki, Y. and Kudo, T. (2012). Influence of air-cooling time on physical properties of thermoplastic polyester. *Progress in Organic Coatings*, 75(11), 584-589.
35. Leong, K.C., Lu, G.Q. and Rudolph, V. (1999). A comparative study of the fluidized-bed coating of cylindrical metal surfaces with various thermoplastic polymer powders. *Journal of Materials Processing Technology*, 89(11), 354-360.
36. Fröblich, P., Frebber, A. and Gerhard, R. (2006). Relaxation processes at the glass transition in polyamide 11: From rigidity to viscoelasticity. *The Journal of Chemical Physics*, 22(18), 125-132.
37. Liu, T., Chen, D., Phang, I. and Wei, C. (2014). Studies on Crystal Transition of Polyamide 11 Nanocomposites by Variable-temperature X-ray Diffraction. *Chinese Journal of Polymer Science*, 32(5), 115-122.
38. Rajesh, J. and Bijwe, J. (2005). Investigations on scratch behaviour of various polyamides. *Wear*, 259(12), 661-668.
39. Farshad, F., Pesacreta, T.C., Garber, J.D. and Bikkı, S.R. (2001). A comparison of surface roughness of pipes as measured by two profilometers and atomic force microscopy. *Scanning*, 23(11), 241-248.
40. Beyler, C.L. and Hirschler, M.M. (2002). Thermal Decomposition of Polymers Fire Science. *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, 7(6), 110-130.
41. Elsabee, M.Z., Nassar, M. and Salah, E.M. (2012). Preparation and Characterization of Some Aromatic/Aliphatic Polyamides. *American Journal of Polymer Science*, 2(1), 7-13.

42. Jambagi, S.C., Kar, S., Brodard, P. and Bandyopadhyay, P.P. (2016). Characteristics of plasma sprayed coatings produced from carbon nanotube doped ceramic powder feedstock. *Materials and Design*, 112(2), 392-401.
43. Petkov, N., Bakalova, T., Cholakova, T., Bahchedzhiev, H., Louda, P., Rysanek, P., Kormunda, M., Capkova, P. and Kejzlar, P. (2017). Study of surface morphology, structure, mechanical and tribological properties of an AlSiN coating obtained by the cathodic arc deposition method. *Superlattices and Microstructures*, 1(2), 1-12.
44. Carson, J.K., Willix, J. and North, M. F. (2006). Measurements of heat transfer coefficients within convection ovens. *Journal of Food Engineering*, 72(3), 293-301.
45. Sakin, M., Kaymak-Ertekin, F. and Coskan, I. (2009). Convection and radiation combined surface heat transfer coefficient in baking ovens. *Journal of Food Engineering*, 94(4), 344-349.
46. Sato, H., Matsumura, T. and Shibukawa, S. (1987). Apparent heat transfer in a forced convection oven and properties of baked food. *Journal of Food Science*, 52(1), 185-188.
47. Schmitt, J. and Flemming, H. (1998). FTIR Spectroscopy in Microbial and Material Analysis. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 41(1), 1-11.
48. İnternet: Mikro çizik test cihazı. URL: <http://www.webcitation.org/query?url=https%3A%2F%2Fwww.anton-paar.com%2Fusen%2Fproducts%2Fdetails%2Fmicroscratchtester-mst3%2F&date=2018-06-28>, Son Erişim Tarihi: 28.06.2018.
49. İnternet: Manuel tip çizik cihazı Sheen-706. URL: <http://www.webcitation.org/query?url=https%3A%2F%2Fsheeninstruments.com%2Fproducts%2Fhardness%2Fscratch-testers&date=2018-06-29>, Son Erişim Tarihi: 29.06.2018.
50. İnternet: Persoz pendulum sertlik ölçüm cihazı. URL: <http://www.webcitation.org/query?url=https%3A%2F%2Fwww.byk.com%2Fen%2Finstruments%2Fproducts%2F%3Fa%3D8%26b%3D27%26f%3D0%26faction%3D%23fam1&date=2018-06-28>, Son Erişim Tarihi: 28.06.2018.
51. İnternet: Kalem sertlik cihazı. URL: <http://www.webcitation.org/query?url=https%3A%2F%2Fsheeninstruments.com%2Fproducts%2Fhardness%2Fpencil-hardness-tester-sh720n&date=2018-06-28>, Son Erişim Tarihi: 28.06.2018.
52. İnternet: Aşınma test cihazı (Qualitest). URL: <http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.worldoftest.com%2Frotary-abrasion-tester&date=2018-06-29>, Son Erişim Tarihi: 29.06.2018.
53. Achhammer, B.G., Reinhart, W.F. and Kline, G.M. (1951). Mechanism of the degradation of polyamides. *Journal of Research of the National Bureau of Standards*, 46(5), 391-421.
54. Şerifaki, K., Böke, H., Yalçın, Ş. ve İpekoğlu, B. (2009). Characterization of materials used in the execution of historic oil paintings by XRD, SEM-EDS, TGA and LIBS analysis. *Materials Characterization*, 60(4), 303-311.

55. Giraldo, L.F., Brostow, W., Devaux, E., Lopez, B. and Perez, L.D. (2008). Scratch and wear resistance of polyamide 6 reinforced with multiwall carbon nanotubes, *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 8(2), 1-8.







EK-1. SIVI Astara Ait MSDS Formu

**PRIMGREEN (tm) LAT 12035 PRIMER**

Material Safety Data Sheet

Arkema Inc.

1 PRODUCT AND COMPANY IDENTIFICATION**Technical Polymers**

Arkema Inc.
2000 Market St.,
Philadelphia, PA 19103-3222

EMERGENCY PHONE NUMBERS:

Chemtrec: (800) 424-9300 (24hrs) or (703) 527-3887
Medical: Rocky Mountain Poison Control Center
(866) 767-5089 (24Hrs)

Information Telephone Numbers	Phone Number	Available Hrs
Engineering Polymers (Pebax & Rilsan)	(800) 932 - 0420	Mon - Fri 8:00am - 6:00pm EST
Fluoropolymers (Kynars)	(800) 722 - 9668	Mon - Fri 8:00am - 6:00pm EST

Product Name PRIMGREEN (tm) LAT 12035 PRIMER
Product Synonym(s)

Chemical Family See Ingredients

Chemical Formula

Chemical Name See Ingredients

EPA Reg Num

Product Use Primer for plastic coatings

2 COMPOSITION / INFORMATION ON INGREDIENTS

Ingredient Name	CAS RegistryNumber	Typical %	OSHA
Cresol (mixed isomers)	1319-77-3	0.1-0.2	Y
Diethylene glycol butyl ether	112-34-5	2-3	Y
Linseed oil, epoxidized	8016-11-3	3-4	Y
Phenol, methyl-, polymer with formaldehyde and 1,3,5,7-tetraazatricyclo[3.3.1.1 ^{3,7}]decane	68845-06-7	6-7	N
2-Butoxy ethanol	111-76-2	6-8	Y
1-Butanol	71-36-3	8-10	Y
Bisphenol A-epichlorohydrin-ethyl acrylate-methacrylic acid-styrene copolymer	65308-20-5	13-14	N
Water	7732-18-5	56-58	N

The substance(s) marked with a "Y" in the OSHA column, are identified as hazardous chemicals according to the criteria of the OSHA Hazard Communication Standard (29 CFR 1910.1200)

The components of this product are all on the TSCA Inventory list.

3 HAZARDS IDENTIFICATION**Emergency Overview**

Amber liquid with slight odor

WARNING!

FLAMMABLE LIQUID AND VAPOR.

CAUSES EYE IRRITATION.

CAUSES SKIN IRRITATION.

CAUSES RESPIRATORY TRACT IRRITATION.

HARMFUL IF SWALLOWED.

EK-1. (devam) Sıvı Astara Ait MSDS Formu

**PRIMGREEN (tm) LAT 12035 PRIMER**

Material Safety Data Sheet

Arkema Inc.

CONTAINS 2-BUTOXYETHANOL WHICH MAY CAUSE RED BLOOD CELL DAMAGE BASED ON ANIMAL DATA.

Potential Health Effects

Inhalation and skin contact are expected to be the primary routes of occupational exposure to this material. Based on its composition, it is anticipated to be slightly to moderately toxic if swallowed, moderately toxic if absorbed through skin, slightly toxic if inhaled, severely irritating to eyes and moderately irritating to skin. Prolonged or repeated contact may remove oils from the skin and may dry skin and cause irritation, redness and rash. High vapor concentrations may be irritating to the eyes and respiratory tract, and may result in central nervous system (CNS) effects such as headache, dizziness, nausea, drowsiness and, in severe exposures, loss of consciousness. If swallowed, this material may cause digestive tract irritation and CNS effects as noted above. Studies with laboratory animals indicate that a component of this material may cause red blood cell damage (hemolysis). Mild to severe lung injury may occur if this material is drawn into the lungs (aspirated) during swallowing, or during vomiting after swallowing. Symptoms of injury may include increased breathing and heart rate, coughing and related signs of respiratory distress.

4 FIRST AID MEASURES

IF IN EYES, immediately flush with plenty of water for at least 15 minutes. Get medical attention.

IF ON SKIN, immediately flush with plenty of water. Remove contaminated clothing and shoes. Get medical attention. Wash clothing before reuse. Destroy contaminated shoes.

IF SWALLOWED, induce vomiting immediately as directed by medical personnel. Get medical attention. Call a Poison Control Center. NEVER GIVE ANYTHING BY MOUTH TO AN UNCONSCIOUS PERSON.

IF INHALED, remove to fresh air. If breathing is difficult, get medical attention.

5 FIRE FIGHTING MEASURES**Fire and Explosive Properties**

Auto-Ignition Temperature	340 deg C		
Flash Point	51 deg C	Flash Point Method	Seta CC
Flammable Limits- Upper	11.2% in volume		
Lower	1.5% in volume		

Extinguishing Media

Use water spray, carbon dioxide, foam or dry chemical.

Fire Fighting Instructions

Use water spray to cool containers exposed to fire. Fire fighters and others who may be exposed to products of combustion should wear full fire fighting turn out gear (full Bunker Gear) and self-contained breathing apparatus (pressure demand NIOSH approved or equivalent). Fire fighting equipment should be thoroughly decontaminated after use.

Fire and Explosion Hazards

When burned, the following hazardous products of combustion can occur: Carbon monoxide and Carbon dioxide

6 ACCIDENTAL RELEASE MEASURES**In Case of Spill or Leak**

Extinguish or turn off all ignition sources. Ventilate the space involved. Wear appropriate personal protection equipment as indicated in Section 8 of this MSDS. Contain spill with inert materials. Construct a dike to

EK-1. (devam) Sıvı Astara Ait MSDS Formu

**PRIMGREEN (tm) LAT 12035 PRIMER**
Material Safety Data Sheet

Arkema Inc.

6 ACCIDENTAL RELEASE MEASURES

prevent spreading. Collect with non-sparking tools to a suitable container. Prevent waterway contamination. Absorb liquid onto inert absorbent and place in DOT approved drums for disposal. Consult a regulatory specialist to determine appropriate state or local reporting requirements, for assistance in waste characterization and/or hazardous waste disposal and other requirements listed in pertinent environmental permits.

7 HANDLING AND STORAGE**Handling**

Do not taste or swallow. Do not breathe vapor. Avoid contact with eyes, skin and clothing. Wash thoroughly after handling. Keep away from heat, sparks and flame. Keep container tightly closed. Check that all equipment is properly grounded and installed to satisfy electrical classification requirements. Avoid breathing processing fumes or vapors. CONTAINER HAZARDOUS WHEN EMPTY. Emptied container retains product residue. FOLLOW LABELED WARNINGS EVEN AFTER CONTAINER IS EMPTIED. RESIDUAL DUSTS MAY EXPLODE ON IGNITION. DO NOT CUT, DRILL, GRIND, OR WELD ON OR NEAR THIS CONTAINER. Improper disposal or reuse of this container may be dangerous and/or illegal.

Storage

Store in well ventilated area away from heat and sources of ignition such as flame, sparks and static electricity. Ensure that all storage and handling equipment is properly rated, grounded and installed to satisfy electrical classification requirements. Static electricity may accumulate and create a fire hazard. All storage containers, including containers such as drums, cylinders and IBC's, must be bonded and grounded during filling and emptying operations. Store away from oxidizers and reactive materials. Keep container tightly closed. Observe all federal, state and local regulations and National Fire Protection Association (NFPA) Codes which pertain to the specific local conditions of storage and use, including OSHA 29 CFR 1910.106 and NFPA 30, 70, 77, and 497.

8 EXPOSURE CONTROLS / PERSONAL PROTECTION**Engineering Controls**

Investigate engineering techniques to reduce exposures below airborne exposure limits. Provide ventilation if necessary to control exposure levels below airborne exposure limits (see below). If practical, use local mechanical exhaust ventilation at sources of air contamination such as open process equipment. Consult ACGIH ventilation manual or NFPA Standard 91 for design of exhaust systems.

Eye / Face Protection

Where there is potential for eye contact, wear chemical goggles and have eye flushing equipment immediately available.

Skin Protection

Wear appropriate chemical resistant protective clothing and chemical resistant gloves to prevent skin contact. Consult glove manufacturer to determine appropriate type glove material for given application. Wear chemical goggles, a face shield, and chemical resistant clothing such as a rubber apron when splashing may occur. Rinse immediately if skin is contaminated. Remove contaminated clothing promptly and wash before reuse. Clean protective equipment before reuse. Provide a safety shower at any location where skin contact can occur. Wash skin thoroughly after handling.

Respiratory Protection

Avoid breathing vapor or mist. When airborne exposure limits are exceeded (see below), use NIOSH approved respiratory protection equipment appropriate to the material and/or its components. Consult respirator manufacturer to determine appropriate type equipment for given application. Observe respirator use limitations specified by NIOSH or the manufacturer. For emergency and other conditions where exposure limit may be significantly exceeded, use an approved full face positive-pressure, self-contained breathing apparatus or positive-pressure airline with auxiliary self-contained air supply. Respiratory protection programs must comply with 29 CFR § 1910.134.

EK-1. (devam) S1v1 Astara Ait MSDS Formu

**PRIMGREEN (tm) LAT 12035 PRIMER**

Material Safety Data Sheet

Arkema Inc.

8 EXPOSURE CONTROLS / PERSONAL PROTECTION**Airborne Exposure Guidelines for Ingredients**

Exposure Limit		Value
2-Butoxy ethanol		
ACGIH TWA	-	20 ppm
OSHA Skin designator	-	Y
OSHA TWA PEL	-	50 ppm (240 mg/m3)
1-Butanol		
ACGIH TWA	-	20 ppm
OSHA TWA PEL	-	100 ppm (300 mg/m3)
Cresol (mixed isomers)		
ACGIH Skin designator	-	Y
ACGIH TWA	-	5 ppm 22 mg/m3
OSHA Skin designator	-	Y
OSHA TWA PEL	-	5 ppm 22 mg/m3

-Only those components with exposure limits are printed in this section.

-Skin contact limits designated with a "Y" above have skin contact effect. Air sampling alone is insufficient to accurately quantitate exposure. Measures to prevent significant cutaneous absorption may be required.

-ACGIH Sensitizer designator with a value of "Y" above means that exposure to this material may cause allergic reactions.

-WEEL-AIHA Sensitizer designator with a value of "Y" above means that exposure to this material may cause allergic skin reactions.

9 PHYSICAL AND CHEMICAL PROPERTIES

Appearance/Odor	Amber liquid with slight odor
pH	NE
Specific Gravity	0.95-1.05
Vapor Pressure	20 hPA (mbar) @ 20 deg C
Vapor Density	950-1050 kg/m3 @ 20 deg C
Melting Point	NA
Freezing Point	NE
Boiling Point	NE
Solubility In Water	Partly soluble
Percent Volatile	>42%

10 STABILITY AND REACTIVITY**Stability**

This material is chemically stable under normal and anticipated storage and handling conditions.

Hazardous Polymerization

Does not occur.

Incompatibility

Oxidizing agents, halogens, strong acids, strong bases.

Hazardous Decomposition Products

Carbon oxides, nitrogen oxides.

EK-2. Poliamid-11'e Ait MSDS Formu

Rilsan® T NAT BHV2 | PA11



Product Text

Rilsan® Natural BHV2 Fluid Bed Powder

Rilsan® fluid bed powders are thermoplastic polyamides obtained from renewable resources.

Outstanding characteristics: abrasion resistance, corrosion resistance, impact resistance, sound reduction, flexibility, low coefficient of friction.

Main applications: coating of wire goods and piping components exposed to high weathering or corrosive environments, coating of machinery exposed to high abrasion such as spline shafts, coating of springs for sound reduction.

Rilsan® fluid bed powders are designed to coat metal substrates via fluidized powder bed dipping. HV grades exhibit a higher viscosity making them ideal for applying thick coatings.

Additional info:

- Smooth texture with a glossy appearance
- Good adhesion after over 2000 hours of salt spray testing (ISO 9227)
- Only 1% fine particles < 40 µm (ISO 13320)
- Only 7% coarse particles > 254 µm (ISO 13320)
- 5 year shelf life from date of delivery
- Available in 20 kg bags

Powder properties	Value	Unit	Test Standard
Melting temperature	183 - 188	°C	ISO 1218
Specific Gravity of Coating, 20°C	1.04	-	ISO 1183
Water Absorption, 24h	≤1	%	ISO 62-1
Median Particle Size	100 - 130	-	ISO 13320
Abrasion Resistance, Wheel CS 17, load 1 kg, 1000 cycles	7	mg	ISO 9352
Impact Resistance	≥2	J	ASTM G14
Dielectric Stress	30	kV/mm	ASTM D149
Thickness	350 - 450	µm	-
Persoz Hardness	240	-	-
Non Tapped Density	0.52	-	ISO 1068

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : KEVRAN, Selim
Uyruğu : T.C.
Doğum tarihi ve yeri : 22.11.1985, Ankara
Medeni hali : Evli
Telefon : 0 (554) 743 04 26
e-mail : dennssel@hotmail.com



Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Doktora	Gazi Üniversitesi / Kimya Mühendisliği	Devam ediyor
Yüksek lisans	Hacettepe Üniversitesi / Kimya	2012
Lisans	Hacettepe Üniversitesi / Kimya	2008
Lise	Kuleli Askeri Lisesi	2004

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2008-Devam ediyor	Milli Savunma Bakanlığı	Mühendis

Yabancı Dil

İngilizce, Rusça

Yayınlar

-

Hobiler

Yüzme, Tenis, Fotoğrafçılık



GAZİ GELECEKTİR..