



**HABERLEŞME UYDULARINDA ISIL ARAYÜZ MALZEMELERİNİN  
KARAKTERİZASYON VE KARARLI DURUM DENEYSEL YÖNTEMİ  
KULLANILARAK ISIL İLETKENLİK PERFORMANS  
KARŞILAŞTIRILMASI**

**Ezgi Nur SAYAR ÇINAR**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**KASIM 2024**

## ETİK BEYAN

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

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dökümanları 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 aleyhimde doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Ezgi Nur SAYAR ÇINAR

20/11/2024

HABERLEŞME UYDULARINDA ISIL ARAYÜZ MALZEMELERİNİN  
KARAKTERİZASYON VE KARARLI DURUM DENEYSEL YÖNTEMİ  
KULLANILARAK ISIL İLETKENLİK PERFORMANS KARŞILAŞTIRILMASI  
(Yüksek Lisans Tezi)

Ezgi Nur SAYAR ÇINAR

GAZİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Kasım 2024

ÖZET

Isıl kontrol alt sistemi (IKS) her uzay aracının önemli bir parçasıdır. Amacı, bir uzay aracının tüm bileşenlerini kendi sıcaklık sınırları içinde tutmaktır. Isıl kontrol alt sistemi hem pasif hem de aktif öğelerden oluşabilir. Aktif donanım; ısıtıcıları, ısı borularını, sıvı döngülerini, soğutucuları ve panjurları içerebilir ve bunlar harici kontrol gerektirir. Pasif donanım; kaplamalar, izolasyonlar ve arayüz malzemelerini içerebilir ve kontrol gerektirmezler. Bu çalışma, pasif ısı kontrol donanımı olan ısı arayüz malzemesine (TIM) odaklanmaktadır. Isıl arayüz malzemesi, uzay tabanlı uygulamalar için ısı kontrol şemasının bir parçası olarak ve ısı teması iyileştirmek için sıklıkla kullanılan birçok araçtan biridir. TIM'ler ağırlıklı olarak polimerlere, özellikle de silikon ve seramiklere dayanmaktadır. Bu malzemeler, örneğin bir aviyonik kutu veya yüksek güç harcayan elektronik ünite ile soğuk plaka arasına yerleştirilerek uygun sıcaklıkların korunabilmesi için iletim yoluyla ısı transferini iyileştirir. Bu çalışma iki bölüme odaklanmaktadır. İlk bölüm, üç farklı TIM'in SEM (Taramalı Elektron Mikroskobu), EDS (X-ışını spektrometresi), XRD (X-ışını kırınım analizi), FTIR (Fourier-transform kızılötesi spektroskopisi) ve DTA/DSC (Diferansiyel Termal Analiz/Diferansiyel Taramalı Kalorimetri) analizleri yoluyla tersine mühendislik yöntemi analizi ile karakterizasyonu ve ikinci bölüm ise ASTM D5470 standardına dayalı olarak üç farklı TIM'in ısı iletkenlik katsayısı performans karşılaştırmasıdır.

Bilim Kodu : 91524  
Anahtar Kelimeler : Polimerik malzeme, ısı iletkenlik, karakterizasyon  
Sayfa Adedi : 75  
Danışman : Doç. Dr. Hanifi ÇİNİCİ

CHARACTERIZATION OF THERMAL INTERFACE MATERIALS IN  
COMMUNICATION SATELLITES AND THERMAL CONDUCTIVITY  
PERFORMANCE COMPARISON USING A STEADY STATE EXPERIMENTAL  
METHOD

(M. Sc. Thesis)

Ezgi Nur SAYAR ÇINAR

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

November 2024

ABSTRACT

The thermal control subsystem (TCS) is an important part of every spacecraft. Its purpose is to maintain all the components of a spacecraft within their respective temperature limits. The thermal control subsystem can be composed of both passive and active items. Active hardware can include heaters, heat pipes, fluid loops, coolers, and louvers, requiring external control. Passive hardware can consist of coatings, insulations, and fillers, and they require no control. This study focuses on the thermal interface material (TIM) which is passive thermal control hardware. A thermal interface material is one of the many tools that are often used as part of the thermal control scheme for space-based applications and to improve thermal contact. TIMs are predominantly based on polymers, particularly silicone and ceramics. These materials are placed between, for example, an avionics box or high power dissipated electronic unit and a cold plate, to improve the conduction heat transfer so that proper temperatures can be maintained. This study focuses on two parts. The first part is the characterization of three different TIMs via SEM (Scanning Electron Microscope), EDS (X-ray spectrometer), XRD (X-ray diffraction analysis), FTIR (Fourier-transform infrared spectroscopy), and DTA/DSC (Differential Thermal Analysis/Differential Scanning Calorimetry) analyses via the reverse engineering method, and the second part is the thermal conductivity performance comparison of three different TIMs based on the ASTM D5470 standard.

Science Code : 91524

Key Words : Polymer Materials, thermal conductivity, characterization

Page Number : 75

Supervisor : Assoc. Prof. Dr. Hanifi ÇİNİCİ

## TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca beni motive eden, yardım ve desteğini esirgemeyen, kıymetli bilgi ve tecrübelerinden faydalandığım değerli tez danışman hocam Sayın Doç. Dr. Hanifi ÇİNİCİ'ye, tez çalışmalarımın en başından itibaren bilgisi ve desteğiyle yanımda olan, çalışmalarına Tübitak Uzay tesis alt yapısından faydalanma imkânı sağlayan çok değerli ve kıymetli yöneticim Tübitak Uzay Teknolojileri ve Araştırma Enstitüsü Müdürü Sayın M. Mehmet NEFES'e sonsuz teşekkürlerimi borç bilirim. Ayrıca hayatım boyunca maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen, her zaman bana güvenen ve destek olan başta annem Serpil SAYAR olmak üzere aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Ve son olarak hayatımın her anında yanımda olduğunu ve desteğini hissettiğim sevgili eşim A. Faruk ÇINAR'a teşekkür ederim.

## İÇİNDEKİLER

	<b>Sayfa</b>
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. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....	3
3. ISI TRANSFER YÖNTEMLERİ.....	5
3.1. İletim ile Isı Transferi.....	5
3.2. Işıma ile Isı Transferi .....	5
3.3. Taşınım ile Isı Transferi .....	6
4. UYDU ISIL ORTAMI.....	7
4.1. Uzay Ortamı .....	7
4.1.1. Direk güneş ışınımı .....	7
4.1.2. Albedo ışınımı.....	9
4.1.3. Dünya kızılötesi ışınımı .....	10
4.1.4. Ekipman ısı yayılımı .....	11
4.2. Yer Eşzamanlı Yörünge Uydusu ve Uydu Isı Dengesi .....	11
5. UYDU ALT SİSTEMLERİ.....	13
6. UYDU ISIL KONTROL YÖNTEMLERİ.....	15
6.1. Aktif Isıl Kontrol Elemanları .....	15
6.1.1. Isıtıcılar .....	15

	<b>Sayfa</b>
6.1.2. Sıcaklık algılayıcılar .....	17
6.1.3. Termo-Elektrik soğutma .....	18
6.2. Pasif Isıl Kontrol Elemanları.....	18
6.2.1. Çok katmanlı yalıtım battaniyesi .....	18
6.2.2. Isıl arayüz malzemesi.....	20
6.2.3. Isıl yüzey kaplama malzemeleri.....	21
6.2.4. Radyatörler .....	23
6.2.5. Isı borusu.....	24
<b>7. KARAKTERİZASYON YÖNTEMLERİ .....</b>	<b>27</b>
7.1. SEM (Taramalı Elektron Mikroskobu) .....	27
7.2. EDS (Enerji Dağılımlı X-ışını Spektroskopisi).....	28
7.3. XRD (X-ışını Kırınımı Yöntemi).....	28
7.4. FTIR (Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi).....	29
7.5. DTA/DSC (Diferansiyel Termal Analiz/Diferansiyel Taramalı Kalorimetri) ....	29
<b>8. MALZEME VE YÖNTEM .....</b>	<b>31</b>
8.1. Malzemelerin Karakterizasyon Yöntemleri .....	31
8.1.1. SEM analiz yöntemi.....	31
8.1.2. XRD analizi yöntemi .....	33
8.1.3. FTIR analizi yöntemi .....	33
8.1.4. DSC analizi Yöntemi .....	34
8.2. Isıl Arayüz Malzemesi Performans Hesabı.....	34
8.2.1. Isıtıcı seçimi .....	34
8.2.2. Test düzeneği hazırlanması .....	36
8.2.3. Isıl iletkenlik katsayı hesaplanması.....	39
<b>9. BULGULAR VE TARTIŞMA .....</b>	<b>41</b>
9.1. Isıl Arayüz Malzemelerinin SEM ve EDS Analizleri .....	41

	<b>Sayfa</b>
9.2. Isıl Arayüz Malzemelerinin XRD Analizleri.....	52
9.3. Isıl Arayüz Malzemelerinin FTIR Analizleri .....	53
9.4. Isıl Arayüz Malzemelerinin DTA/DSC Analizi .....	56
9.5. Isıl Arayüz Malzemelerinin Isıl İletkenlik Performans Karşılaştırması .....	58
10. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	67
KAYNAKLAR .....	71
ÖZGEÇMİŞ .....	75

**ÇİZELGELERİN LİSTESİ**

<b>Çizelge</b>	<b>Sayfa</b>
Çizelge 4.1. Gezegenlere Göre Güneş Sabiti Değerleri .....	9
Çizelge 4.2. Bölgelere Göre Albedo Faktörü .....	10
Çizelge 8.1. Isıl Arayüz Malzemeleri Katalog Verileri.....	31
Çizelge 8.2. Isıl Arayüz Malzemeleri Kaplama Şartları .....	33
Çizelge 8.3. Clayborn Isıtıcı Katalog Bilgileri.....	34
Çizelge 8.4. Isıl Arayüz Malzemelerinin Performans Testi Düzenek-1.....	37
Çizelge 8.5. Isıl Arayüz Malzemelerinin Performans Testi Düzenek-2.....	37
Çizelge 9.1. Laird Tflex SF10 Numunesinin 6 Farklı Bölgenin EDS Analizi Sonucu Ağırlıkça Atom Yüzdesi .....	46
Çizelge 9.2. Loctite 5952 Numunesinin 3 Farklı Bölgenin EDS Analizi Sonucu Ağırlıkça Atom Yüzdesi .....	48
Çizelge 9.3. Therm-a-gap 579 Numunesinin 3 Farklı Bölgenin EDS Analizi Sonucu Ağırlıkça Atom Yüzdesi .....	52
Çizelge 9.4. RTV 615 Malzemesinin Kızılötesi Spektroskopisi Analiz Sonucu .....	55

## ŞEKİLLERİN LİSTESİ

<b>Şekil</b>	<b>Sayfa</b>
Şekil 4.1. Uydu Isıl Ortamı .....	7
Şekil 4.2. Dünya ve uydunun GEO yörüngede güneşe göre konumu .....	8
Şekil 4.3. Gezegenlerin Güneşe Uzaklıkları .....	9
Şekil 4.4. GEO yörünge irtifa ve ışıınım etkileri .....	11
Şekil 5.1. Isıl Kontrol Alt Sistemi Sistem Arayüzü .....	14
Şekil 6.1. Peltier etkisiyle Termo-elektrik soğutma.....	18
Şekil 6.2. Tipik Bir ÇKYB Tasarımı .....	19
Şekil 6.3. Temas Arayüzlerinde Isı Akışı .....	21
Şekil 6.4. Isıl Yüzey Kaplama Malzemelerinin Termo-Optik Özellikleri.....	22
Şekil 6.5. Optik Güneş Yansıtıcı Ömre göre Yaşlanma Değerleri .....	23
Şekil 6.6. Isı Borusu Çalışma Prensibi.....	24
Şekil 6.7. Isı borusunun termodinamik döngüsü .....	25
Şekil 7.1. SEM çalışma prensibi .....	27
Şekil 8.1. Sistemin hacimlerine ayrılması ve düğümler arası iletim ile ısı transferi .....	40
Şekil 9.1. Laird Tflex SF10 Numune 1000 Büyütmede 6 Farklı Bölgenin EDS Bulguları.....	45
Şekil 9.2. Loctite 5952 Numune 1000 Büyütmede 3 Farklı Bölgenin EDS Bulguları ..	48
Şekil 9.3. Therm-a-gap 579 1000 Büyütmede 3 Farklı Bölgenin EDS Bulguları.....	51
Şekil 9.4. Loctite Stycast 5952, Laird Tflex SF10 ve Therm-a-gap 579 XRD Analizi Bulguları.....	53
Şekil 9.5. Loctite 5952 numune için FTIR analizi.....	54
Şekil 9.6. Therm-a-gap 579 numune için FTIR analizi .....	54
Şekil 9.7. Laird Tflex SF10 numune için FTIR analizi .....	55
Şekil 9.8. Laird Tflex SF10 Numunenin DSC Analizi .....	56
Şekil 9.9. Loctite 5952 Numunenin DSC Analizi.....	57
Şekil 9.10. Therm-a-gap 579 Numunenin DSC Analizi .....	57

<b>Şekil</b>	<b>Sayfa</b>
Şekil 9.11. Therm-a-gap 579 numune sıcaklık zaman grafiği .....	59
Şekil 9.12. Laird Tflex SF10 numune sıcaklık zaman grafiği .....	60
Şekil 9.13. Loctite 5952 numune için sıcaklık zaman grafiği.....	61
Şekil 9.14. Laird Tflex SF10 numune 0.5 mm kalınlık 0.8Nm uygulama kuvveti .....	62
Şekil 9.15. Laird Tflex SF10 numune 0.5 mm kalınlık 1Nm uygulama kuvveti .....	63
Şekil 9.16. Laird Tflex SF10 numune 1.5 mm kalınlık 0.8Nm uygulama kuvveti .....	64
Şekil 9.17. Laird Tflex SF10 numune 1.5 mm kalınlık 1Nm uygulama kuvveti .....	65

## RESİMLERİN LİSTESİ

<b>Resim</b>	<b>Sayfa</b>
Resim 6.1. Yama Isıtıcılar ve Şekilleri .....	16
Resim 6.2. Kapton ısıtıcı Translogic Inc.....	16
Resim 6.3. Tayco Kapton Isıtıcı.....	16
Resim 6.4. Minco Product Inc. Firması ısıtıcı modeli .....	17
Resim 6.5. Clayborn tipi ısıtıcı.....	17
Resim 6.6. NTC Tip Sıcaklık Algılayıcı .....	18
Resim 6.7. Uydu paneli üzerinde OSR uygulaması .....	24
Resim 8.1. Isıl Arayüz Malzemeleri.....	31
Resim 8.2. Deneysel Çalışmalarda Kullanılan Taramalı Elektron Mikroskobu .....	32
Resim 8.3. Deneysel Çalışmalarda Kullanılan Numunelerin Au/Pd Kaplama Cihazı...	32
Resim 8.4. Isıl Performans Test Düzeneği CAD çizimi .....	37
Resim 8.5. Isıtıcı Hazırlanması Aşamaları.....	38
Resim 8.6. Üst Plaka üzerine ısıtıcı yerleşimi.....	39
Resim 9.1. Laird Tflex SF10 Numune X500 SEM Görüntüsü .....	41
Resim 9.2. Laird Tflex SF10 Numune X1000 Bölge 1 SEM Görüntüsü.....	42
Resim 9.3. Laird Tflex SF10 Numune X1000 Bölge 2 SEM Görüntüsü.....	43
Resim 9.4. Laird Tflex SF10 Numune X1000 Bölge 3 SEM Görüntüsü.....	43
Resim 9.5. Laird Tflex SF10 numune X1000 SEM görüntüsü.....	44
Resim 9.6. Loctite 5952 Numune X500 SEM Görüntüsü.....	46
Resim 9.7. Loctite 5952 Numune X1000 SEM Görüntüsü.....	47
Resim 9.8. Loctite 5952 numune X1000 SEM görüntüsü .....	47
Resim 9.9. Therm-a-gap 579 Numune 500 Büyütmede 2 Farklı Bölgeden SEM Görüntüsü.....	49
Resim 9.10. Therm-a-gap 579 Numune 1000 Büyütmede 1 Numaralı Bölge SEM Görüntüsü .....	50

<b>Resim</b>	<b>Sayfa</b>
Resim 9.11. Therm-a-gap 579 Numune 1000 Büyütmede 2 Numaralı Bölge SEM Görüntüsü .....	50
Resim 9.12. Therm-a-gap 579 Numune X1000 SEM görüntüsü .....	51

## SİMGELER VE KISALTMALAR

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

<b>Simgeler</b>	<b>Açıklamalar</b>
<b>A</b>	Alan
<b>Au</b>	Altın
<b>A<sub>rad</sub></b>	Radyatör Alanı
<b>a</b>	Albedo Katsayısı
<b><math>\dot{Q}</math></b>	Toplam Isı Miktarı
<b><math>\dot{Q}_{albedo}</math></b>	Toplam Albedo Işınım Miktarı
<b><math>\dot{Q}_{dünya}</math></b>	Toplam Dünya Kızılötesi Işınım Miktarı
<b><math>\dot{Q}_s</math></b>	Toplam Güneş Işınım Miktarı
<b><math>\dot{Q}_{yayınım}</math></b>	Ekipman Isı Yayınımı
<b>W</b>	Watt
<b>q</b>	Isı Akısı
<b>k</b>	Isıl İletkenlik Katsayısı
<b>h</b>	Isı Transfer Katsayısı
<b>K</b>	Kelvin
<b>m<sup>2</sup></b>	Metrekare
<b><math>\sigma</math></b>	Stefan-Boltzmann Sabiti
<b><math>\alpha</math></b>	Soğurganlık Değeri
<b><math>\epsilon</math></b>	Yayıcılık Değeri
<b><math>\Delta T</math></b>	Sıcaklık Değişimi
<b>C<sub>s</sub></b>	Güneş Sabiti
<b>F</b>	Görüş Faktörü
<b><math>\Omega</math></b>	Direnç
<b>C</b>	Isıl Kapasitans
<b>G<sub>eş</sub></b>	Eşdeğer Isıl İletkenlik
<b>V</b>	Volt

**Simgeler****Açıklamalar**

<b>V<sub>max</sub></b>	Maksimum Gerilim
<b>P</b>	Güç
<b>P<sub>max</sub></b>	Maksimum Güç
<b>Pd</b>	Paladyum
<b>I</b>	Akım
<b>R</b>	Direnç
<b>L</b>	Isıtıcı Uzunluğu
<b>Si</b>	Silisyum
<b>C</b>	Karbon
<b>Al</b>	Alüminyum
<b>O</b>	Oksijen
<b>SiO<sub>2</sub></b>	Silika
<b>SiC</b>	Silisyum Karbür
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	Alümina
<b>Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub></b>	Alüminyum Karbür

**Kısaltmalar****Açıklamalar**

<b>AO</b>	Atomik Oksijen
<b>CAD</b>	Bilgisayar Destekli Tasarım
<b>ÇKYB</b>	Çok Katmanlı Yalıtım Battaniyesi
<b>DSC</b>	Diferansiyel Taramalı Kalorimetri
<b>DTA</b>	Diferansiyel Termal Analiz
<b>EDS</b>	Enerji Dağılımlı X-Işını Spektroskopisi
<b>FTIR</b>	Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi
<b>IR</b>	Kızılötesi
<b>LNA</b>	Düşük Gürültü Amplifikatörü
<b>NTC</b>	Negative Temperature Coefficient
<b>NVR</b>	Non Volatile Residue
<b>OSR</b>	Optik Güneş Yansıtıcı

**Kısaltmalar****Açıklamalar****PTC**

Positive Temperature Coefficient

**RTV**

Room Temperature Vulcanizing

**SEM**

Taramalı Elektron Mikroskopi

**SSM**

İkinci Yüzey Aynası

**TKYB**

Tek Katmanlı Yalıtım Battaniyesi

**XRD**

X-Işını Kırınımı Yöntemi

## 1. GİRİŞ

Bir uzay aracı yörüngeye transfer aşamasında ve yörüngesinde güneş ışıını, ünyadan yansıyan güneş ışığı (albedo), yeryüzünden yayılan kızılötesi ve ekipman tarafından üretilen ısı olmak üzere farklı ısı enerji kaynaklarına maruz kalmaktadır. Bu nedenle, ısı kontrol alt sistemi her uzay aracı için farklılık göstermektedir. Uydularda ısı kontrol alt sistemi her sistemle ilişkisi olması açısından önemli bir sistem olarak rol almaktadır. Isıl Kontrol Alt Sistemi, uydunun tanımlanan en kötü sıcak ve en kötü soğuk senaryolarında ekipman ve alt sistem sıcaklıklarının gereken limitler içerisinde olmalarını sağlama, uzay aracı derin uzaya veya güneş akısına maruz kaldıkça geniş bir aralıkta değişebilen dış ortama dayanma ve uzay aracının kendi iç ısı dağılımını uzaya aktarma işlevine sahiptir. Isıl kontrol görevin optimum performansının ve başarısının garanti edilebilmesi için gereklidir. Bir bileşen çok yüksek veya düşük sıcaklıklarla karşılaşması durumunda performansı etkilenebilir veya hasar görebilir. Isıl kontrol yöntemleri aktif ve pasif kontrol olmak üzere iki kısma ayrılmaktadır. Aktif ısı kontrol sistemlerine ısı boruları, ısıtıcı ve sıcaklık algılayıcılar örnek gösterilebilirken pasif ısı kontrol sistemlerine çok katmanlı yalıtım battaniyesi, optik güneş yansıtıcılar, yüzey kaplama malzemeleri, ısı arayüz malzemeleri örnek olarak verilebilir.

Uzay aracı, uydu, elektronik ve mekanik uygulamalar için ısı temas iletkenliği önemli bir mühendislik parametresi olmuştur. Isıl arayüz malzemeleri yüksek iletim katsayısına sahip olup, yüksek güç tüketen ekipmanlar ile uydu yapısal paneli arasındaki teması ısı olarak kuvvetlendirmek ve daha iyi ısı iletimini sağlamak için kullanılmaktadır. Bu malzemeler, ekipman bağlantı yüzeyi ile panel arasında kalan, yüzey pürüzlülüğünden kaynaklı mikron seviyesindeki boşlukları doldurarak ısı arayüz direncini azaltmak amacıyla tasarlanmıştır.

Çeşitli ısı arayüz malzemesi türleri vardır. En yaygın kullanılan türler arasında ısı gres yer almaktadır. Bu malzemeler ısı olarak iletken parçacıklarla doldurulmuş bir polimer tabandan oluşur. Bu parçacıklar genellikle metalik veya seramiktir. Gresler ince bir tabaka oluşturarak hava boşluklarını kolayca doldurur. Ancak greslerin uygulanması ve çıkarılması zahmetlidir ve zamanla performanslarında azalma görülmektedir [1]. Alternatif malzemeler arasında parçacık dolgulu elastomerlerden oluşan ısı pedler bulunmaktadır. Bu malzemeler gresler gibi serbest akışlı olmadıkları için boşlukları kolay bir şekilde dolduramazlar. Bu çalışmada yer eşzamanlı yörüngede bulunan haberleşme uydularında ısı kontrolün

sağlanmasında kullanılan pasif kontrol elemanları arasında yer alan ısı iletimini artırması amacıyla ekipman ile panel arasında uygulanan ısı arayüz malzemelerinin tersine mühendislik yöntemi ile karşılaştırılma yapılacak olup ileriki çalışmalarda elde edilen sonuçların kullanılarak yeni bir malzeme üretilmesi hedeflenmiştir.

## 2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Literatürde uydular üzerinde ısı kontrol sistemlerinden pasif kontrol elemanları arasında yer alan ısı arayüz malzemelerinin sıcaklık ve basınç altında performans karşılaştırılması, ısı iletkenlik katsayılarına göre kullanımlarının tercih edilmesi, kimyasal özelliklerinin incelenmesi ve karakterizasyon işlemleri üzerine çalışmalar bulunmaktadır.

Bu bölümde literatürde yer alan çalışmalar özetlenmiştir. Wang ve diğerleri [2] 200km ve 700 km irtifa arasındaki alçak dünya yörüngesinde yer alan uyduların yüzeyinin atomik oksijen (AO), elektron ve proton parçacıkları, ısı döngü ve uzay aracı yapılarındaki polimerlerde kritik hasarlara neden olabilecek güneş ışınımı spektrumu gibi çevresel ortama maruz kalacak yapıların atomik oksijene dirençli bir katman olarak kullanılabilen organik-inorganik malzemelerin özelliklerine ve uzay ortamına iyi uyum sağlayabilme özelliğine sahip silikon kauçuk kaplamaları üzerine çalışma gerçekleştirmişlerdir.

Park ve diğerleri [3] gerinim sensörleri, eyleyiciler ve kaplamalar gibi çeşitli uygulamalarda kolay üretilebilmesi ve yüksek mekanik ve dielektrik özelliklere sahip olması dolayısıyla kompozit matris olarak sıklıkla silikon kauçuk malzeme tercih edilmesi üzerine artan talep doğrultusunda titanyum dioksit ve demiroksit gibi yeni dolgu maddeleri ekleyerek kullanılan uygulamada mekanik ve manyetik özellikleri iyileştirme üzerine çalışma gerçekleştirmişlerdir.

Sponagle ve Groulx [1] uzay araçlarında kullanılan pasif ısı kontrol elemanları arasında yer alan ısı dolgu malzemelerinin temas iletkenlik katsayılarını ASTM D5470 tarafından tanımlanan kararlı durum tek boyutlu ısı akışı yöntemi ile Alüminyum 6061 T6 malzemedan hazırlanmış olan bloklar kullanılarak malzemelerin ısı iletkenlik katsayılarının karakterizasyonu üzerine çalışmalarını gerçekleştirmişlerdir.

Chen ve diğerleri [4] uzay araçlarında kullanılan elektronik ve mekanik ekipman ve bileşenlerin yüksek güç ve verimlilikte çalışmalarına katkı sağlayan ısı arayüz malzemeleri arasında yer alan silikon bazlı ısı gres ürününe alümina ve grafen arasındaki sinerjik etkiden yararlanılarak yeni bir arayüz malzemesi hazırlamışlardır. Hazırlanan ısı arayüz malzemesi

üzerinde sıcaklık ve basınç etkileri incelenerek kaplama kalınlığı ve ısı kararlılığı test edilmiştir.

Villahermosa ve Joseph [5] uzay aracı uygulamalarında kullanımı sıklıkla tercih edilen ve yüksek seviyede gaz salınımı olduğu bilinen silikon ve poliolefinlerin ASTM E595 testi ve kızılötesi soğurum spektroskopisi kullanılarak karakterizasyonu üzerine çalışma gerçekleştirmişlerdir. Gaz çıkışı test verilerinin NVR (Non-Volatile Residue) kalıntısının kimyasal karakterizasyonu ile birleştirilmesi, kirlenme süreçlerinin daha iyi anlaşılmasını sağlamaya ve daha etkili azaltma stratejilerinin geliştirilmesine katkıda bulunması açısından çalışma gerçekleştirilmiştir.

Esfahani ve diğerleri [6] uzay araçlarında kullanılan pasif ısı kontrol elemanları arasında yer alan ısı arayüz malzemelerinin çeşitlerinin vakum koşulları altında cıvatalı konfigürasyonları ile ısı temas direncini değerlendirmek için uzay uygulamalarında geniş kullanımı olan cıvatalı bağlantıların ve yapısal geometrilerin ortodoks konfigürasyonlarını temsil eden iki farklı test düzeneği ile yapılan deneylerin sonuçları değerlendirmiştir.

Glasgow ve Kittredge [7] uzay tabanlı uygulamalar için ısı kontrol şemasının bir parçası olarak sıklıkla kullanılan ısı arayüz malzemelerinin teknolojinin gelişmesi ile birlikte artan çeşitliliği doğrultusunda hali hazırda kullanılmakta olan CHO-TERM 1671 malzemesine alternatif olabilecek ısı arayüz malzemelerinin vakum koşulları altında cıvatalı konfigürasyonları ile ısı iletkenlik katsayıları ve performansları değerlendirilmiştir.

Bu tezde yer eşzamanlı yörüngede bulunan haberleşme uydularında ısı kontrolün sağlanmasında kullanılan pasif kontrol elemanları arasında yer alan ve hali hazırda ticari olarak kullanılan ısı arayüz malzemeleri ile tarihçesini Türksat 5B uydusu ile kazanmış olan arayüz malzemesi arasında tersine mühendislik yöntemi ile karşılaştırılma yapılmış olup ileriki çalışmalarda elde edilen sonuçların kullanılarak yeni bir malzeme üretilmesi hedeflenmiştir.

### 3. ISI TRANSFER YÖNTEMLERİ

Isı transferi, sıcaklık farkının bir sonucu olarak enerjinin sıcak bir cisimden soğuk bir cisme aktarılmasıdır. Isı transferi bilimi, sıcaklık, ısı, entalpi ve iş gibi temel nicelikleri tanımlamak için termodinamiği kullanır [8]. Isı, iletim, taşınım ve ışıma olmak üzere üç farklı modda transfer edilebilir. Tüm ısı transferi modları bir sıcaklık farkının varlığını gerektirir ve tüm modlar yüksek sıcaklıktaki bir ortamdan daha düşük sıcaklıktaki bir ortama doğrudur. Sıcaklık gradyanı ne kadar büyük olursa, ısı transferi oranı da o kadar yüksek olur [9].

#### 3.1. İletim ile Isı Transferi

İletim yolu ile ısı transferi temas halinde bulunan parçacıklar arasındaki etkileşimin sonucu olarak kinetik enerjinin yüksek enerji bölgesinden düşük enerji bölgesine hareketine dayanmaktadır. İletimin gerçekleşebilmesi için moleküllerin mevcut olması gerekmektedir. İletimin gerçekleşebilmesi için katılarda, sıvılarda ve gazlarda gerçekleşebilir. Fourier'in ısı iletim yasası olarak adlandırılan iletim ile ısı transferi Eş. 3.1'de ki gibi ifade edilir.

$$\dot{Q} = -kA \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (3.1)$$

Böylece ısı iletim hızının düzlem boyunca sıcaklık farkı ve ısı transfer alanı ile doğru orantılı olduğu, ancak kalınlık ile ters orantılı olduğu sonucuna varılmaktadır. Burada k sabiti, malzemenin ısıyı iletme kabiliyetinin ölçüsü olan malzemenin ısıl iletkenliğidir ve birimi W/m.K, A ısı transfer alanını,  $\Delta T$  sıcaklık farkını ve  $\Delta x$  ısının akış yönündeki mesafe farkını temsil etmektedir. Bileşen içerisindeki değişimler ve temas yüzeylerindeki değişimler olmak üzere iki tür iletim ısı aktarımı vardır. Uydu içerisinde iletim ile ısı transferi ekipman ile paneller arasında temas kalitesini artırmak için ısıl arayüz malzemeleri kullanılarak gerçekleştirir.

#### 3.2. Işıma ile Isı Transferi

Işıma, enerjinin elektromanyetik dalgalar yoluyla iletilmesidir. Işıma geniş bir dalga boyu aralığında iletilebilir, ancak ısıl ışıma yalnızca 0,3 ile 1000  $\mu\text{m}$  aralığında gözlemlenir. İletim ve taşıma ile ısı transferinin aksine, ışıma yoluyla enerji transferi ortam varlığını

gerektirmez. Mutlak 0 üzerindeki sıcaklıkta bulunan tüm cisimler ısı ışınım yaymaktadır. Siyah cisim, üzerine düşen tüm ışınımın dalga boyu ve geliş açısı fark etmeksizin tamamını (enerjiyi geçirmeden veya yansıtmadan) kendi içinde soğuran ideal bir cisimdir [10]. Bu özellik, tüm dalga boylarına ve geliş açılara karşılık gelen ışıma için geçerlidir. Bu sebeple siyah cisim gelen ışıma için ideal bir emicidir ve Eş. 3.2'de ki gibi enerji yayar.

$$E_{bb} = \sigma \cdot T^4 \quad (3.2)$$

Burada  $\sigma$ , Stefan-Boltzmann sabiti olup değeri  $5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$  'dir.

Gerçek cisim, siyah cisimden farklıdır ve gelen ışımın tamamını soğurmaz, belirli bir oranda ısı yayar. Gerçek cisimlerin ışınım yayma gücü Eş. 3.3'de ki gibi ifade edilir.

$$E = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \quad (3.3)$$

### 3.3. Taşınım ile Isı Transferi

Taşıma ile ısı transferi akışkanların hareketiyle ısının bir yerden başka bir yere aktarılmasıdır. Fizikte akışkan terimi, kayma gerilimi altında deforme olan herhangi bir madde anlamına gelir. Akışkanın kütle hareketi, katı yüzey ile akışkan arasındaki ısı transferini artırır. Taşınım genellikle sıvılarda ve gazlarda baskın olarak görülen ısı transferi şeklindedir. Taşınım ile ısı transferi Eş. 3.4'de ki gibi ifade edilir.

$$\dot{Q} = h \cdot A \cdot (T_1 - T_2) \quad (3.4)$$

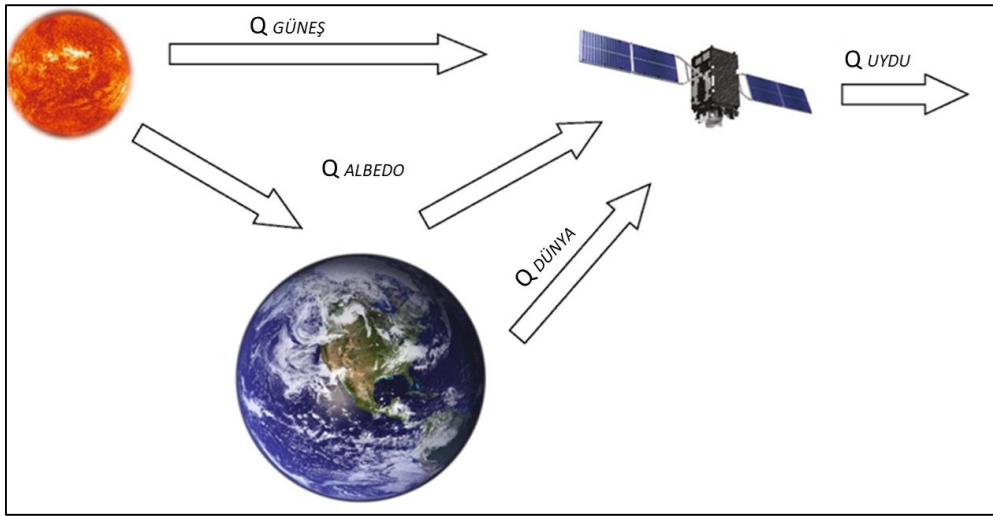
Burada  $h$ ,  $\text{W/m}^2 \text{ K}$  cinsinden taşınım ısı transfer katsayısıdır. Uzay ortamı vakum ortamından oluştuğu için taşınım akımının oluşmasına izin verilmez ve taşınım ile ısı transferi ihmal edilir [11].

## 4. UYDU ISIL ORTAMI

Uzay aracının ısıl kontrolü, çevresel yüklerin önemli rol oynadığı bir enerji yönetimi sürecidir [12]. Uzay ortamında gaz yoğunluğu düşük olduğundan, taşınım ile ısı transferi yok sayılabilecek düzeydedir. Bundan dolayı uzay ortamında bir uyduda etkin olan ısı transferleri ışınım ve iletim ile gerçekleşir. Işınım ile ısı transferi uydu probleminde çevresel yüklerin uyduya ulaşması ve uydudan ısı atımının ışınım ile ısı transferi şeklinde olması kaynaklı oldukça önemlidir. İletim ile ısı transferi yalnızca uydu ekipmanları ile uydu panelleri arasında temas halindeyken gerçekleşmektedir [13].

### 4.1. Uzay Ortamı

Uyduya uzay çevresinden ulaşan çevresel yükler güneşten gelen ışınım, dünyadan yansıyan güneş ışığı (albedo) ve dünyadan gelen kızılötesi (IR) ışınım kaynakları olarak belirtilebilir [11]. Şekil 4.1'de uyduya gelen çevresel yükler gösterilmiştir.



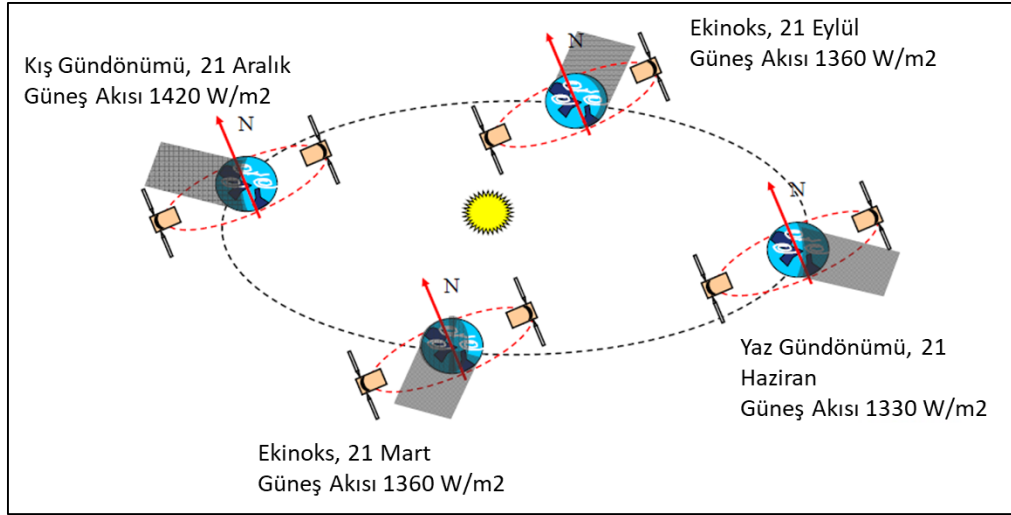
Şekil 4.1. Uydu Isıl Ortamı [11]

#### 4.1.1. Direk güneş ışınımı

Güneş ışınımı, Dünya yörüngesindeki çoğu uzay aracında uydunun ısıl tasarımını ve kontrolünü etkileyen en büyük çevresel ısıl yük kaynağıdır [12]. Dünya'nın yörüngesi eliptik olduğundan, Dünya'ya ulaşan güneş ışığının yoğunluğu, Dünya'nın güneşe olan uzaklığına bağlı olarak yaklaşık  $\pm\%3,5$  oranında değişir. Kuzey Yarım Kürede 21 Haziran yaz

gündönümünde Dünya Güneş'e en uzak konumdadır ve yoğunluk minimum değer olan 1330 W/m<sup>2</sup>'dir; 21 Aralık kış gündönümünde ise yoğunluk maksimum değer olan 1420 W/m<sup>2</sup>'dir. Dünya'nın güneşten ortalama uzaklığındaki (1 AU) güneş ışığı yoğunluğu güneş sabiti olarak bilinir ve 1360 W/m<sup>2</sup>'ye eşittir. Yukarıdaki değerler İsviçre'nin Davos kentindeki Dünya Radyasyon Merkezi tarafından tavsiye edilmekte ve %0,4 oranında doğru olduğu kabul edilmektedir [12].

Şekil 4.2' de yer eşzamanlı yörüngede uydunun ve Dünya'nın güneşe göre mevsimsel konumları görülmektedir.



Şekil 4.2. Dünya ve uydunun GEO yörüngede güneşe göre konumu [12]

Uydu yüzeylerine gelen toplam güneş ışınım miktarı Watt cinsinden Eş. 4.1' de yer alan şekilde ifade edilir.

$$\dot{Q}_s = \alpha_s \cdot q_s \cdot F \cdot A_{sat} \cdot \cos(\theta) \quad (4.1)$$

Eş. 4.1'de yer alan denklemde,  $\alpha_s$  uydu yüzey malzemesinin soğurganlık katsayısını,  $A_{sat}$  güneş ışınımına maruz kalan yüzey alanını m<sup>2</sup> cinsinden,  $q_s$  güneşten gelen ışınım miktarını W/ m<sup>2</sup> cinsinden,  $\cos(\theta)$  güneşin uyduya ulaşma açısını ve F uydu paneli ile güneş arasındaki görüş açısını ifade etmektedir.



Şekil 4.3. Gezegenlerin Güneşe Uzaklıkları [14]

Yukarıdaki Şekil 4.3’de gezegenlerin güneşe göre konumları ve aşağıdaki Çizelge 4.1’de gezegenlerin güneşe uzaklıkları astronomik birim (AU) cinsinden ve güneş sabiti ( $C_s$ ) değerleri görülmektedir.

Çizelge 4.1. Gezegenlere Göre Güneş Sabiti Değerleri [12,15]

Gezegen	Güneşe Uzaklık [AU]	Güneş Sabiti [ $W/m^2$ ]
Dünya	1.017	1400
Merkür	0.467	9000
Mars	1.666	490-700
Jüpiter	5.452	50
Pluton	48.94	0.9

#### 4.1.2. Albedo ışınımı

Dünya’ya ulaşan güneş ışınımının bir kısmı dünyanın yüzeyinden yansır ve geri uzaya döner. Bu geri yansımaya albedo adı verilir. Albedo gelen güneş ışığının uzaya geri yansıyan kısmı olarak ifade edilir ve oldukça değişkendir. Genellikle yansımaya kıtasal bölgelerde okyanus bölgelerine göre daha fazladır ve bölgesel güneş yükselme açısının azalması ve bulut örtüsünün artmasıyla artar. Daha fazla kar ve buz örtüsü, azalan güneş-yükselme açısı ve artan bulut örtüsü nedeniyle, albedo da enlemlerle birlikte artma eğilimindedir. Bir diğer önemli nokta ise, albedo sabiti aynı kalsa bile, bir uzay aracına ulaşan albedo ısı akısının, uzay aracı yörüngesi boyunca hareket ettikçe ve güneş altı noktasından (Dünya’da veya başka bir gezegende güneşin zenitte, yani doğrudan tepede olduğu nokta) uzaklaştıkça azalacaktır. Bunun nedeni albedo faktörünün bir akı değil bir yansıtma olmasıdır [12]. Albedo genellikle alçak dünya yörüngesinde yani 1500 km irtifaya kadar olan yörüngede

önem derecesine sahiptir ve değeri  $400 \text{ W/m}^2$  ulaşabilmektedir. Tutulma zamanında değeri 0 (sıfır) olmaktadır. Aşağıdaki Çizelge 4.2’de albedo faktörünün bölgelere göre değerleri görülmekte ve Eş. 4.2’de Dünya’ya gelen toplam albedo ışınımı ifade edilmektedir.

Çizelge 4.2. Bölgelere Göre Albedo Faktörü [12]

Bölge	Albedo Faktörü
Kar	0.8/0.9
Bulut	0.4/0.8
Çöl	0.25/0.3
Orman	0.05/0.1
Okyanus	0.04

$$\dot{Q}_{albedo} = a \cdot \alpha_s \cdot q_s \cdot F \cdot A_{sat} \quad (4.2)$$

Eş. 4.2’de yer alan denklemde,  $\alpha_s$  uydu yüzey malzemesinin soğurganlık katsayısını,  $A_{sat}$  güneş ışınımına maruz kalan yüzey alanını  $\text{m}^2$  cinsinden,  $q_s$  güneşten gelen ışınım miktarını  $\text{W/m}^2$  cinsinden,  $a$  albedo faktörünü ve  $F$  uydu paneli ile güneş arasındaki görüş faktörünü ifade etmektedir.

#### 4.1.3. Dünya kızılötesi ışınımı

Dünya belirli sabit bir sıcaklıkta bulunmaktadır ve albedo olarak yansıtılmayan güneş ışınımı Dünya tarafından emilir ve nihayetinde kızılötesi ışınımı olarak yeniden yayılır. Bu kızılötesi ışınım miktarı mevsimsel etkilere ve dünyanın sıcaklığına göre  $237 \pm 21 \text{ W/m}^2$  aralığında değişmektedir [16]. Dünya kızılötesi ışınım miktarı Eş. 4.3 ile hesaplanabilir.

$$\dot{Q}_{dünya} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \cdot F \cdot A_{sat} \quad (4.3)$$

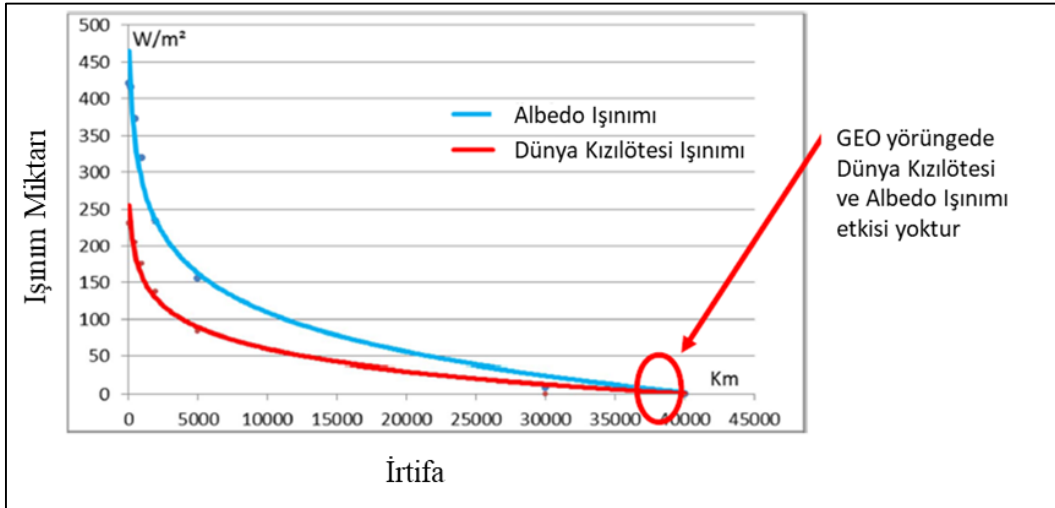
Eş. 4.3’de yer alan denklemde,  $\varepsilon$  yüzey yayıcılık katsayısını,  $A_{sat}$  yüzey alanını  $\text{m}^2$  cinsinden,  $T$  Dünya’nın sıcaklığını  $\text{K}$  cinsinden,  $\sigma$  Stefan-Boltzman sabiti ve  $F$  faktörünü ifade etmektedir.

#### 4.1.4. Ekipman ısı yayılımı

Uydu içerisinde bulunan elektronik ekipmanların çalışmaları esnasında elektronik devrelerdeki bileşenlerin direnç kaynaklı kayıplarının ısıya dönüştürülmesi ile ekipman içerisinde ısı birikir. Bu ısının ekipman performansı ve sağlığı açısından uygun yollar ile uzaklaştırılması gerekmektedir. Termodinamiğin birinci yasası olan enerjinin korunumu yasasına göre bir sistemin kararlı çalışma durumunda sisteme giren enerji miktarının sistemden çıkan enerji miktarına eşit olması gerekmektedir. Elektronik cihazdan çıkan enerji biçiminin akımın dirençli elemanlar boyunca akarken ürettiği ısı olduğu varsayılırsa bu ısı dağılımının güç tüketimine eşit olduğu sonucu ortaya çıkar. Uydu ısı dengesinde ekipman tarafından yayılan ısı da hesaba katılmaktadır [11,17].

#### 4.2. Yer Eşzamanlı Yörünge Uydusu ve Uydu Isı Dengesi

Şekil 4.4'de yer eş zamanlı yörüngede irtifaya göre albedo ve dünya kızılötesi ışınım değerleri görülmektedir.



Şekil 4.4. GEO yörünge irtifa ve ışınım etkileri [12]

Haberleşme uyduları 36000 km irtifada bulunmaktadır ve bu irtifada albedo ve dünya kızılötesi ışınım miktarı yok denilebilecek seviyededir.

Zamandan bağımsız kararlı durum koşulunda uydu ısıl dengesi aşağıdaki denklem ile belirtilmektedir.

$$\dot{Q}_{çıkan} = \dot{Q}_{giren} \quad (4.4)$$

$$\dot{Q}_{rad} + \dot{Q}_{iletim} = \dot{Q}_{yayınım} + \dot{Q}_{dış} \quad (4.5)$$

$$F \cdot A_{rad} \cdot \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_{uydu}^4 - T_{uzay}^4) + C \cdot (T - T_0) = \dot{Q}_{yayınım} + A_s \cdot \alpha_s \cdot (\varphi_{güneş} + \varphi_{albedo}) + A_e \cdot \varepsilon \cdot \varphi_e \quad (4.6)$$

Eş. 4.6'da yer alan denklemde  $A_{rad}$  ışınımsal yayılımın olacağı yüzey alanını,  $A_s$  güneş ve albedo ışınımının etki ettiği yüzey alanını,  $A_e$  dünya kızılötesi ışınımının etki ettiği yüzey alanını,  $\varphi_e$ ,  $\varphi_{güneş}$ ,  $\varphi_{albedo}$  sırasıyla dünya kızılötesi akısı, güneş akısı ve albedo akısını  $W/m^2$  cinsinden ve  $C$  sınır ile yüzey arasındaki iletkenliği  $W/K$  cinsinden ifade etmektedir.

## 5. UYDU ALT SİSTEMLERİ

Uydu, ısıl kontrol alt sistemi, yörünge yönelim kontrol alt sistemi, güç alt sistemi, uydu yapısali ve mekanizmalar, uzaktan izleme ve kontrol alt sistemi, veri işleme ve kotarma alt sistemi gibi sistemlerden oluşmaktadır.

Yörünge yönelim kontrol alt sistemi, bozucu dış torkların etkisine karşın uydunun yörüngede stabilize edilmesini ve görev ömrü boyunca istenilen yönelimi yapmasını sağlamaktadır. Bu yönelim ve kontrol hareketlerini ise sensörler ve eyleyiciler aracılığıyla gerçekleştirir.

Uzaktan izleme ve kontrol alt sistemi, uydu ve yer sistemleri arasındaki haberleşmeyi sağlamaktadır. Faydalı yük görev verilerini ve uydunun güç seviyesi, sıcaklık, pozisyon, sensör ve eyleyicileri durumu gibi genel sağlık verilerini operasyon merkezindeki operatör veya kullanıcıya iletmekle birlikte operatör tarafından girilen komutları da uyduya iletmektedir [16].

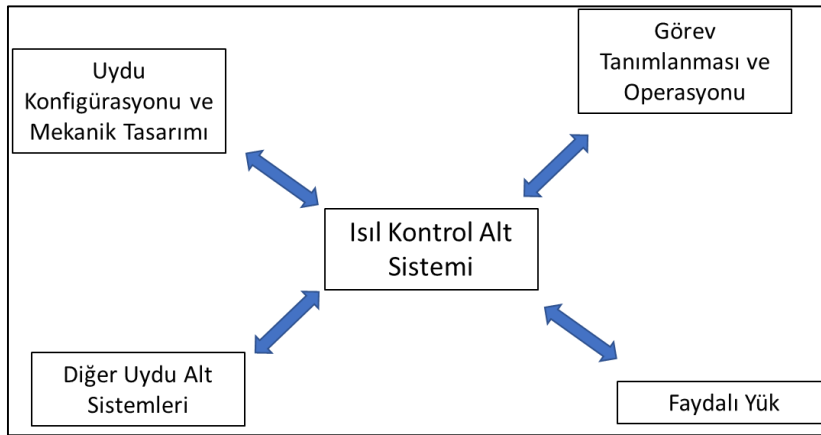
Veri işleme ve kotarma alt sistemi uydu görevlerinin başarılı bir şekilde yerine getirilmesi için gerekli olan kritik alt sistemler arasında yer almaktadır. Bu alt sistem komut yönetimi, veri toplama ve işleme, veri biçimlendirme ve saklama, uydu ana yönetim bilgisayarının sağlık verilerini izleme gibi işlevleri yerine getirerek uydunun tüm bileşenleri arasındaki veri akışını yönetir [16].

Güç alt sistemi, tüm görev modlarında uydunun ömrü boyunca ihtiyacı olan gücü sağlamak, depolamak, kontrol etmek ve dağıtmak ile sorumludur. Güneş panelleri, bataryalar, güneş paneli kontrol cihazları, güç dönüştürücüleri, elektrik bağlantı kabloları gibi bileşenler uydunun elektrik ihtiyacını karşılaması için enerji üretimi ve dağıtımını sağlayan bileşenler arasında yer alır. Gerektiği durumlarda komut doğrultusunda ekipmanları açmak ve kapamakla yükümlüdür [12,15].

Yapılar ve mekanizmalar alt sistemi, diğer uydu alt sistemlerini mekanik olarak destekler, uydunun fırlatma aracı ile arayüzünü oluşturur ve mekanizmalar ise patlayıcılar ile etkinleştirilen ayrılmayı sağlar. Yapılar birincil ve ikincil yapılar olmak üzere iki ana kateoriye ayrılır. Uydunun merkezi silindirik yapısı gibi birincil yapılar uydunun ana yüklerini

taşıırken uydunun eklentileri gibi ikincil yapılar kablo demetlerini, yakıt hatlarını, yapısal olmayan kapak ve braketleri taşır. Uydu yapısal fırlatma esnasında uydunun karşılaçağı tüm dış çevresel etkilere dayanıklı olacak şekilde tasarlanmalıdır [12,15].

Isıl kontrol alt sistemi, uydunun görev ömrü süresince tüm ekipman ve bileşenlerinin tanımlı operasyonel ve operasyonel olmayan sıcaklık sınırları içerisinde tutulmasını sağlamaktır. Isıl kontrol alt sistemi aşırı ısınmayı önlemek adına termo-optik özelliklere sahip kaplama malzemelerinin seçilmesiyle sistemin temel olarak soğutulmasını sağlarken, aşırı soğuma durumunda ise elektrikli ısıtıcılar kullanılarak bu durumu telafi eder. Isıl kontrol sistemi görev tanımı gereği diğer uydu alt sistemleri ile ilişkisi bakımından oldukça kritik bir sistemdir [15]. Şekil 5.1’de ısı kontrol alt sisteminin sistem arayüzü yer almaktadır.



Şekil 5.1. Isıl Kontrol Alt Sistemi Sistem Arayüzü

## 6. UYDU ISIL KONTROL YÖNTEMLERİ

Uydularda ısı kontrol sistemi aktif ve pasif kontrol olmak üzere iki ana kategoriye ayrılmaktadır. Yörüngesi, boyutu ve görev tanımına göre çoğu küçük ve mikro uydularda pasif ısı kontrol sistemi yeterli olurken güç tüketimi yüksek olan ve büyük uydularda pasif kontrol sisteme ek olarak aktif ısı kontrol sistemlerine de ihtiyaç duyulmaktadır. Uydu ısı kontrol sistemi hem aktif hem de pasif kontrol olmak üzere ekipmanı aşırı sıcak ve aşırı soğuk sıcaklıklardan korumaktadır.

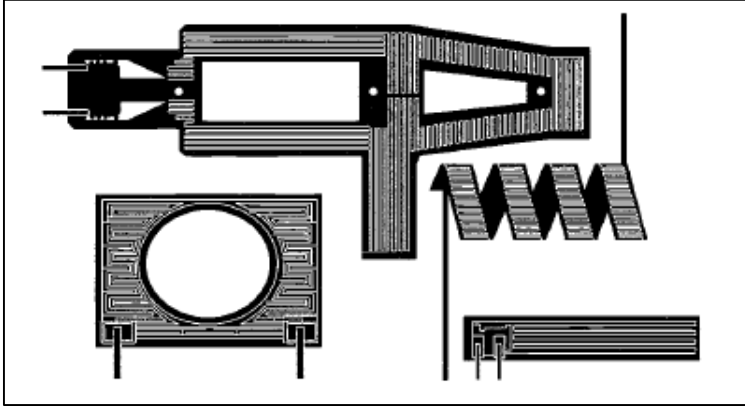
### 6.1. Aktif Isıl Kontrol Elemanları

Uydu ısı kontrol sisteminde, sıcaklık kontrolünün sağlanmasında dışarıdan kontrol gerektiren elemanlar aktif ısı kontrol sistemi olarak adlandırılmaktadır. Uydular büyüdükçe ve güç tüketimi arttıkça aktif kontrol elemanlarına ihtiyaç artmaktadır [11]. Bu sisteme örnek olarak ısıtıcılar, termoelektrik soğutucular ve sıcaklık algılayıcılar (termistörler) verilebilir. Aktif sistemler, uydu üzerinde sıcaklık dalgalanmalarını daha hassas bir şekilde kontrol etmeye olanak tanır ve genellikle daha geniş bir sıcaklık aralığında çalışma sağlar.

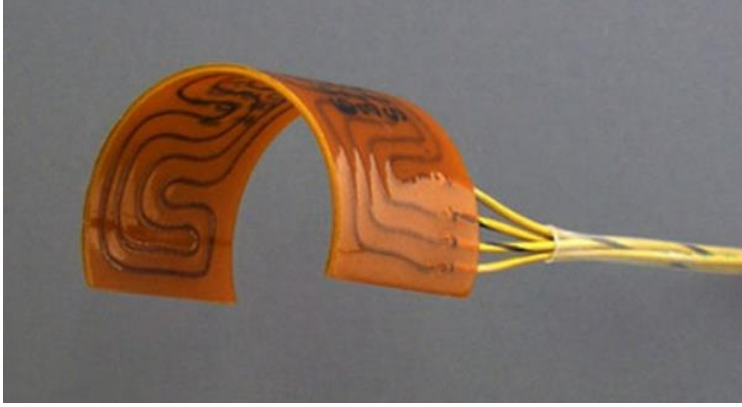
#### 6.1.1. Isıtıcılar

Aktif ısı kontrol elemanlarının en temel ekipmanları arasında yer alan ısıtıcılar uydu içerisinde yer alan ekipmanların çalışmadan önce minimum sıcaklık seviyesine kadar ısıtılmasını ve uydu en soğuk olduğu durumda ekipmanın belirli sıcaklık limitlerinin altına düşmeden görevini yerine getirebilmesini sağlarlar.

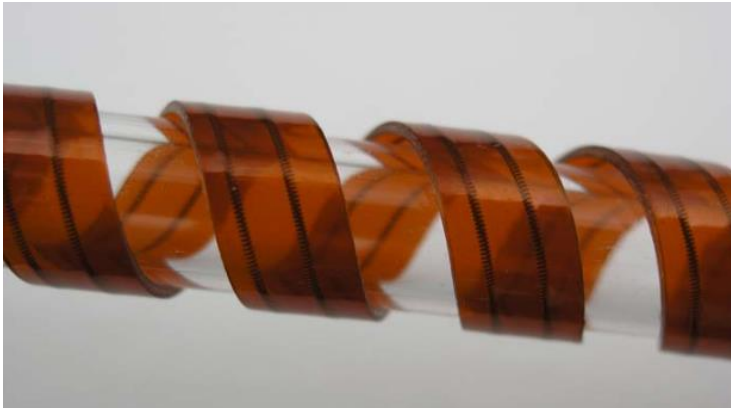
Uydularda yaygın olarak kullanılan ısıtıcılar esnek veya sert tipli olabilir. Resim 6.1'de iki esnek elektrik yalıtım malzemesi yani kapton arasında yer alan elektrik direnç elemanından oluşan esnek tipli yama ısıtıcılar ve bu ısıtıcıların üretilebilecekleri özel şekilleri yer almaktadır. Isıtıcılar içerisinde yedeklilik gerektirip gerektirmediğine göre tek devreli veya çok devreli olarak tasarlanabilmektedir. Isıtıcı devrelerinin arızalanma durumuna karşılık yedeklilik felsefesi önem arz etmektedir. Isıtıcılar kullanıldıkları ekipmanlara göre özel üretim şekillerine sahiptirler. Örneğin, Resim 6.2 uydunun ana itki motorunda kullanılırken, Resim 6.3 kimyasal itki sistemi boruları üzerinde kullanılmaktadır [12].



Resim 6.1. Yama Isıtıcılar ve Şekilleri [12]

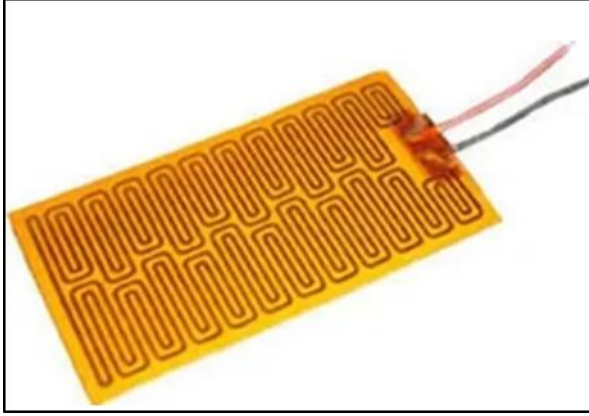


Resim 6.2. Kapton ısıtıcı Translogic Inc.

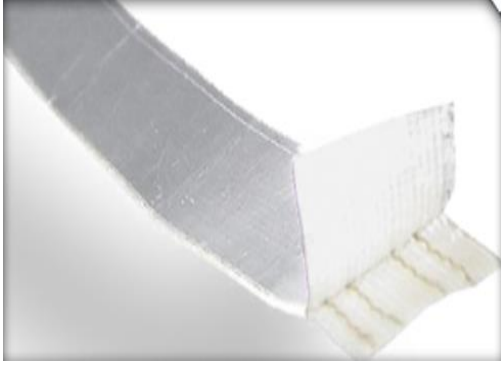


Resim 6.3. Tayco Kapton Isıtıcı

Uydu uçuş modeli üzerinde genellikle şekilde Minco Product Inc. Firmasının ürettiği ısıtıcıların kullanılırken test ekipmanlarında Clayborn ısıtıcısı kullanımı tercih edilmektedir.



Resim 6.4. Minco Product Inc. Firması ısıtıcı modeli



Resim 6.5. Clayborn tipi ısıtıcı

### 6.1.2. Sıcaklık algılayıcılar

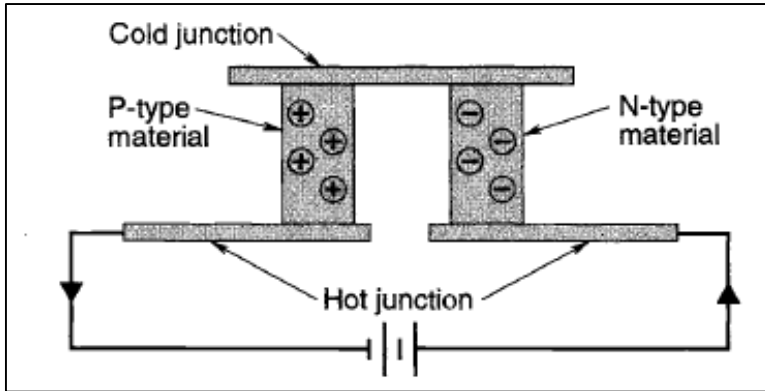
Termistörler sıcaklığa duyarlı basit dirençlerdir. Sıcaklık algılayıcılar yani termistörler uydu üzerinde konumlandırıldıkları bölgelerden sıcaklıkları okumakta ve ısıtıcı hatlarının kontrolünü sağlamaktadırlar. Sıcaklık algılayıcılar PTC (positive temperature coefficient) ve NTC (negative temperature coefficient) tip olmak üzere iki kategoriye ayrılabilir. PTC tip termistör sıcaklık arttıkça direnci artan, NTC tip ise sıcaklık arttıkça direnci azalan termistörlerdir. Şekil 6.6'da yer alan 5 mm çapında NTC tip sıcaklık algılayıcısı, düşük maliyetli olması ve hassas sıcaklık ölçümü sağladıkları için yaygın olarak tercih edilmektedir.



Resim 6.4. NTC Tip Sıcaklık Algılayıcı [18]

### 6.1.3. Termo-Elektrik soğutma

Termo-elektrik soğutucular, ekipmanı bölgesel olarak istenilen sıcaklıkta tutmak amacıyla kullanılan aktif ısı kontrol yöntemidir. Genellikle LNA (düşük gürültü amplifikatörü), yıldızlar ve kızılötesi sensörlerinin soğutulmasında kullanılırlar. Termo-elektrik soğutma peltier etkisini kullanarak birbirine aynı olmayan yarı iletken iki metal arasından elektrik akımı geçirilmesi ile soğutma sağlanır [12].



Şekil 6.1. Peltier etkisiyle Termo-elektrik soğutma [12]

## 6.2. Pasif Isıl Kontrol Elemanları

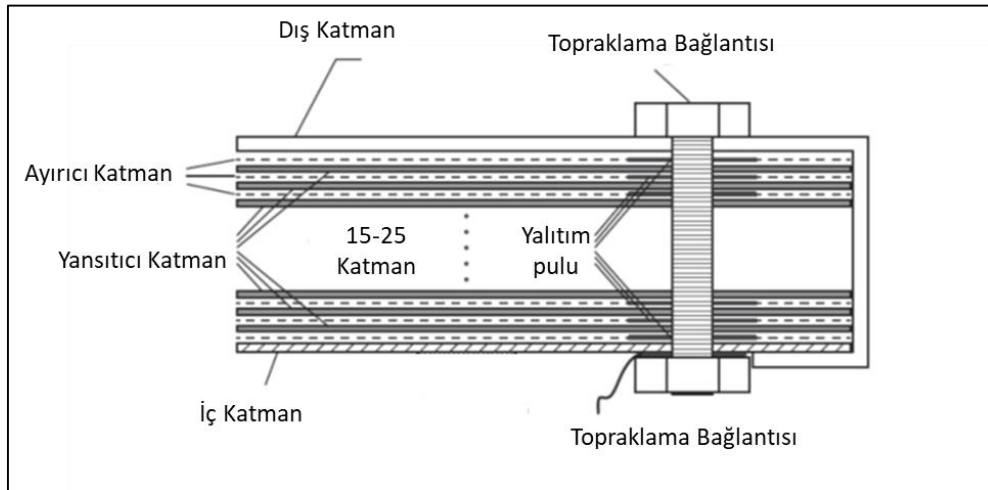
### 6.2.1. Çok katmanlı yalıtım battaniyesi

Çok katmanlı yalıtım battaniyesi (ÇKYB) ve tek katmanlı yalıtım battaniyesi (TKYB), uzay araçlarında kullanılan en yaygın pasif ısı kontrol elemanları arasında yer almaktadır. Çok

katmanlı yalıtım battaniyeleri, ısıl izolasyon sağlamasının yanısıra bileşenlerin aşırı ısı kaybını ve diğer kaynaklar tarafından aşırı ısınmayı engeller [10]. Daha az ısıl yalıtım gerektiğinde tek katmanlı yalıtım battaniyesi kullanımı daha hafif ve üretim maliyetinin daha ucuz olması kaynaklı tercih edilir. Ancak ısıl yüklerden kaynaklı izolasyonun önemli olduğu noktalarda yetersiz kalmaktadır [12].

Çok katmanlı yalıtım battaniyeleri (ÇKYB) genel olarak enerji akışını yavaşlatmak için birden fazla katmanın bir araya gelmesi ile oluşan yüksek performanslı bir izolasyon türüdür. Işımayı %100 oranında yansıtacak tek bir katman tasarlamak mümkün değildir. Tek bir yansıtıcı katmanın %90 ile %99 oranında bir performanla yansıtıcılık özelliği gösterdiği varsayılırsa birden fazla katmanın bir araya geldiğinde kümülatif etki ile yansıtıcılık oranının mükemmelle yakın olması sağlanabilmektedir [19].

Çok katmanlı yalıtım battaniyeleri uydunun iç ve dış yüzeylerinde kullanım yerlerine göre değişiklik göstermekle birlikte Şekil 6.2 temelde üç ana katmandan oluşan çok katmanlı yalıtım battaniyesinin iç yapısı görülmektedir.



Şekil 6.2. Tipik Bir ÇKYB Tasarımı [19]

Yalıtım battaniyesinin dış katmanının mümkün olduğunca düşük soğurma ve yüksek yayılım özelliğine sahip olması gerekir. Genellikle Alüminize Kapton, Siyah Kapton veya Beta Cloth malzemeler kullanılırken Mylar malzemesi UV ışınımına maruz kalmaya uygun olmadığı için kullanımı tercih edilmez [12].

Yansıtıcı katmanlar için genellikle tek veya her iki yüzü de alüminyum kaplanmış Mylar malzeme kullanımı tercih edilir. Dış katmana göre daha ince ve hava tahliyesinin sağlanabilmesi açısından delikli yapıdadır.

Yansıtıcı katmanlar arasında ısı iletkenliğini en aza indirebilmek ve minimum temasın sağlanabilmesi açısından Dacron veya Nomex olmak üzere ayırıcı katman ağ yapısı kullanılmaktadır.

Yalıtım battaniyesinin en iç katmanı altındaki katmanları streten korumak adına güçlendirilmiştir ve altındaki donanımına bitişik veya dönük pozisyonda bulunmaktadır. Bu bölgede elektriksel kısa devre riskini azaltmak için iç katman alüminyum kaplanmaz. Mylar malzeme yanıcılık etkisi gösterdiği için iç katmanda kullanımı tercih edilmez.

Teoride, düşük basınçta vakum ortamında bulunan ÇKYB sistemleri için, birbirine temas halinde olmayan en uzak iki yüzeyin yayıcılıkları  $\varepsilon_1$  ve  $\varepsilon_2$  olan  $N$  katmanlı bir battaniyenin efektif yayıcılığı  $\varepsilon$  olarak Eş. 6.1 ile hesaplanmaktadır.

$$\varepsilon = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1} \left( \frac{1}{N+1} \right) \quad (6.1)$$

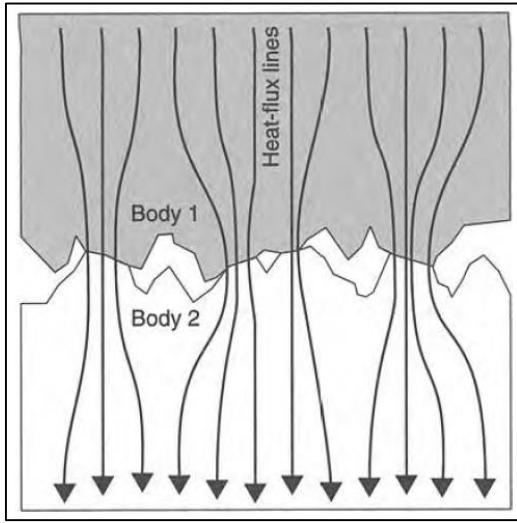
Uygulamada ise düşük basınçlı vakum ortamında ÇKYB sistemleri için efektif yayıcılık Eş. 6.2 ile deneysel olarak hesaplanabilmektedir. Burada,  $T_H$  en yüksek sıcaklık ve  $T_C$  en düşük sıcaklığı (K) olarak,  $A$  yüzey alanını ( $m^2$ ),  $\sigma$  Boltzman sabitini ve  $\dot{Q}$  net ısı transferini (W) cinsinden ifade etmektedir.

$$\varepsilon = \frac{\dot{Q}}{A\sigma(T_H^4 - T_C^4)} \quad (6.2)$$

### 6.2.2. Isıl arayüz malzemesi

Pasif ısı kontrol elemanları arasında yer alan ısıl arayüz malzemeleri ekipman ile panel arasındaki teması kuvvetlendirerek ısı iletim oranını artırmak amacıyla kullanılan yüksek ısıl iletkenliğe sahip malzemelerdir. Bu malzemeler, temas iletim değerlerinin yetersiz kaldığı durumlarda, üretimden kaynaklı pürüzlülük, gözenek, girinti ve çıkıntıları, boşlukları

doldurarak ısının ekipmandan panele ve panel üzerinden uzaya atılması sürecinde önemli rol oynamaktadırlar. Şekil 6.3 mikroskobik ölçekte incelendiğinde ortaya çıkan yüzey pürüzlülükleri ve iki cisim arasında ısıl arayüz malzemesi uygulanmadığı durumda iki gövde arasında temasın olduğu yerde ısı akışı görülmektedir. Uzay ortamının vakum koşulları altında yer alması kaynaklı ısı iletimi boşluklardan ışıma ile gerçekleşmektedir ancak bu iletim yeterli gelmemektedir ve ısı iletimini artırabilmek adına mikron seviyelerde fark edilen boşluklar için gövdeler arasına ısıl arayüz malzemeleri uygulanmaktadır.



Şekil 6.3. Temas Arayüzlerinde Isı Akışı [12]

Uydu üzerinde kullanılan uzay uyumlu ısıl arayüz malzemeleri her ne kadar düşük gaz salımlı olsa da gereğinden fazla kullanıldığında uydu içi kirliliğe sebep olmaktadır [20]. Günümüzde genellikle RTV, Sigraflex, Choterm, MAPSIL gibi ısıl arayüz malzemelerinin kullanımı yaygındır. Isıl arayüz malzemeleri uygulama kalınlıklarına ve ısı iletim oranına bağlı olarak seçilmektedirler.

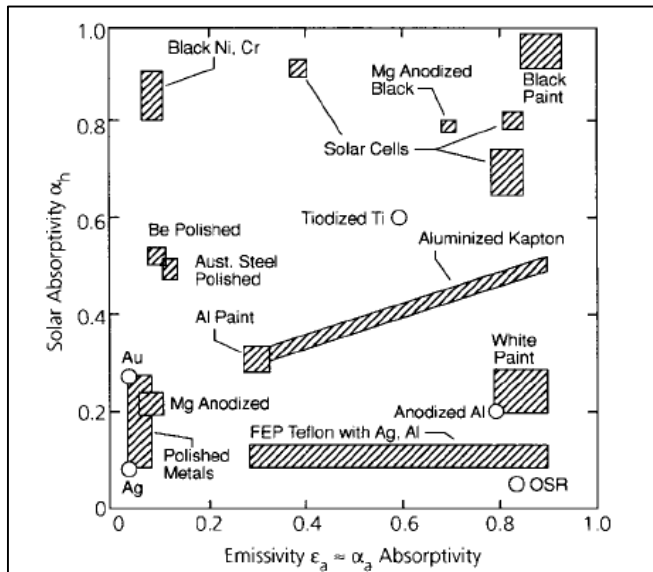
### 6.2.3. Isıl yüzey kaplama malzemeleri

Pasif ısıl kontrol elemanları arasında yer alan ısıl yüzey kaplama malzemeleri siyah ve beyaz boyalar gibi ısıl kontrol kaplamalarının yüzeyleri, özel ışıma özelliklerine sahiptir. Genel olarak, ısıyı uzaya maksimum düzeyde iletmek için yüksek bir  $\epsilon$  (yayınım katsayısı) değeri ve güneş enerjisi girişini en aza indirmek için düşük bir  $\alpha$  (soğurma katsayısı) değeri istenir. Isıl kaplamalar oldukça verimli ve hafiftir. Ancak zamanla bozulma gösterirler.

Isıl kontrol kaplamaları güneş yansıtıcı, güneş soğurucu ve düz kaplama olarak sınıflandırılmaktadır. Güneş yansıtıcı kaplamalar, düşük güneş soğurganlığı ve yüksek yayıma sahiptirler. Gelen enerjinin çoğunu yansıtırken, uydunun yaydığı ısının verimli bir şekilde uzaklaştırılabilmesi için gereken kızılötesi yayılımı korurlar. Bu kaplamalar arasında, uygulandığında  $\alpha/\epsilon$  oranı 0.2 kadar düşük olabilen beyaz boyalar ve ikinci yüzey aynası (SSM) prensibiyle çalışan optik güneş yansıtıcıları (OSR'ler) bulunur. Güneş radyasyonu, ince, şeffaf, yüksek yayılma özellikli bir malzemeden (Teflon, cam, vb.) geçer ve ardından metalik bir yüzeyden yansır, böylece düşük  $\alpha$ , yüksek  $\epsilon$  bir yüzey oluşturur [11].

Güneş soğurucu kaplamalar yüksek soğurganlık ve düşük yayıcılık özelliklerine sahip olup genellikle güneşe maruz kalan uydu yüzeylerinde nadiren kullanılırlar. En bilinen türleri arasında gümüş kaplamalar, berilyum-bakır veya paslanmaz çelik elemanlar üzerine buharla kaplanmış alüminyum yani VDA kapton yer alır.

Düz yüzey kaplamaları, soğurganlık ve yansıtıcılık değerleri neredeyse birbirine eşit olan kaplamalardır. Bu tip kaplamalar arasında,  $\alpha$  ve  $\epsilon$  değerleri yüksek olan ( $>0.8$ ) siyah boyalar ve  $\alpha$  değerleri 0.25 ile 0.50 arasında olan ve  $\epsilon$  için yaklaşık aynı değerlere sahip metalik boyalar yer alır. Siyah boyalar, uydu içerisindeki gövde panelleri ve elektronik ekipmanların dış yüzeylerinin kaplamasında yüksek yayıcılık özelliği nedeniyle tercih edilir. Metalik kaplamalar ise uydunun ışımaya ile ısı transferinin minimum seviyede olmasının istendiği yerlerde düşük yayıcılık özelliğine sahip olmasından dolayı tercih edilir [12].

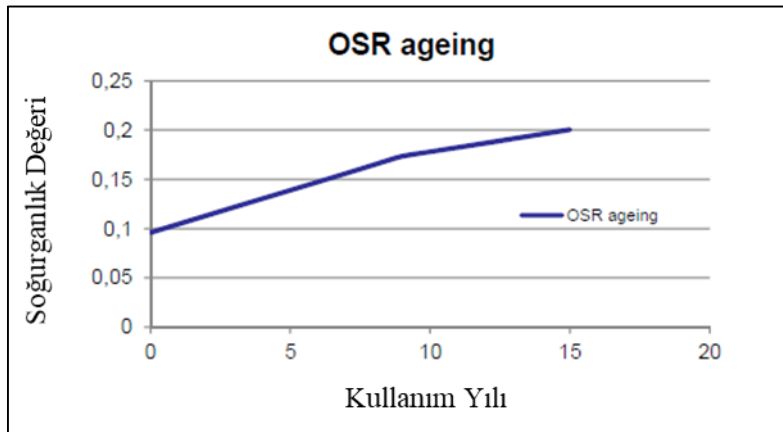


Şekil 6.4. Isıl Yüzey Kaplama Malzemelerinin Termo-Optik Özellikleri [10]

Şekil 6.4’de Pisacana ve Moore [21] ile Hallmann ve Ley [22]’in çalışmalarından uyarlanmış olan uydu ve uzay ortamında sık kullanılan ısıl yüzey kaplama malzemelerinin güneş soğuruculuğuna karşın ortam soğurganlık ve yayıcılık değerleri ömür başlangıçları için görülmektedir [10].

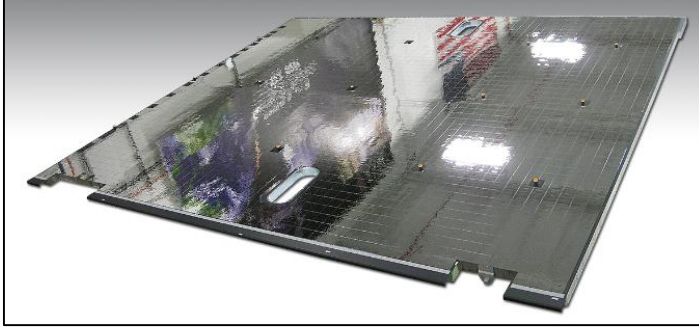
#### 6.2.4. Radyatörler

Uydu pasif ısı kontrol elemanları arasında yer alan radyatörler uydu panellerinde çeşitli konumlarda fazlı ısıyı uzaklaştırmak için kullanılır. Gümüş kaplı kuvars aynalar, uzay araçlarının ısı kontrolünde uzun bir geçmişe sahip olan çok yaygın bir optik güneş yansıtıcı (OSR) türüdür. Bu OSR’ler, genellikle kuvarsın alt tarafına yüksek yansıtıcılığa sahip bir metalin (genellikle gümüş) buharla kaplanmasıyla üretilir. Bu radyatörler ısıyı maksimum seviyede uzaklaştırmak adına yüksek yayıcılık özelliğine ( $\epsilon > 0.8$ ) ve aynı zamanda güneşten gelen ısıyı minimuma indirmek adına düşük soğurganlık ( $\alpha < 0.2$ ) özelliğine sahiptirler. Kuvars aynalar, iç ısı yayılımını reddetmek için alüminyum sandviç panelin yüzey levhasına elektriksel olarak topraklanmıştır. Kuvarsın sertliği ve kırılma kırılganlığı, bu aynaların neredeyse düz yüzeyler dışında başka bir yere uygulanmasını zorlaştırır. Haberleşme uyduları yörüngede minimum 15 yıl görev ömrü olacak şekilde tasarlanmaktadır ve optik güneş yansıtıcıların görev başlangıcındaki soğurganlık değeri 0.051 iken ömür sonuna doğru 0.2 değerine ulaşarak artış göstermektedir. Şekil 6.5’de bir haberleşme uydusunda kullanılan OSR malzemesinin ömür başı ve ömür sonu soğurganlık değeri görülmektedir [12].



Şekil 6.5. Optik Güneş Yansıtıcı Ömre göre Yaşlanma Değerleri [12]

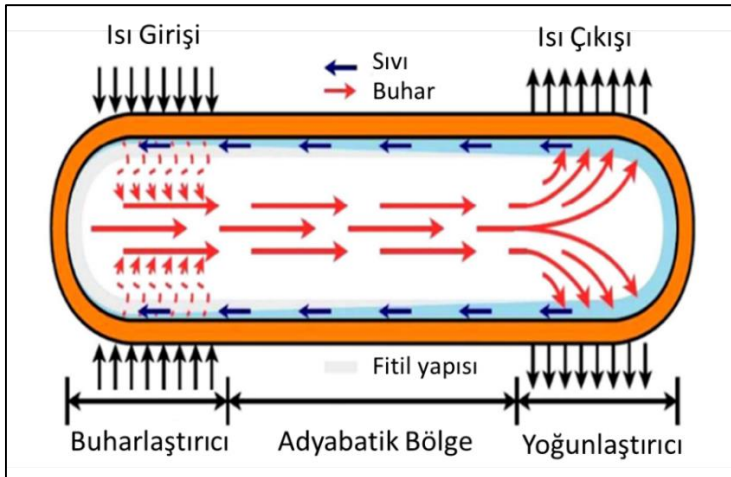
Haberleşme uydularında uydunun +/-Y duvarlarında (Kuzey ve Güney) bulunan radyatörler, gümüş kaplamalı yansıtıcı kaplamaya ve nikel krom kenar metalizasyonuna sahip, standart (40 x 40 mm<sup>2</sup>), 100 mikron kalınlığında seryum katkılı cam aynalar içermektedir. Resim 6.5’da uydularda uygulanan panel üzerine yerleşimi yapılmış radyatör örneği yer almaktadır.



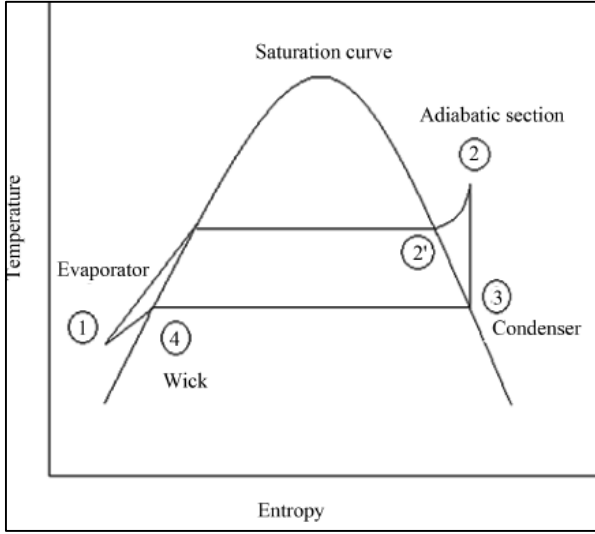
Resim 6.5. Uydular paneli üzerinde OSR uygulaması [23]

### 6.2.5. Isı borusu

Isı boruları, yüksek ısıl kapasiteye sahip olup elektrik gücü olmadan elektronik ekipmanlar tarafından üretilen ısıyı bir noktadan başka bir noktaya taşınmasını sağlar. Isı boruları, ısıyı taşımak için buharlaştırıcı ve yoğunlaştırıcı ile kapalı iki fazlı akış döngüsünü kullanır. Temel çalışma prensibinde dış kaynaklardan buharlaştırıcı bölümüne iletilen ısı kaynağı ile sıvı buhara dönüşerek adyabatik bölgeden geçer ve yoğunlaştırıcı kısmına ilerler. Buhar, yoğunlaştırıcı bölümünde ısını atıp yoğunlaşır ve yoğunlaşan sıvı kılcal basınçla fitiller aracılığıyla buharlaştırıcıya geri dönerek süreç tekrarlanır.



Şekil 6.6. Isı Borusu Çalışma Prensibi [12]



Şekil 6.7. Isı borusunun termodinamik döngüsü [24]

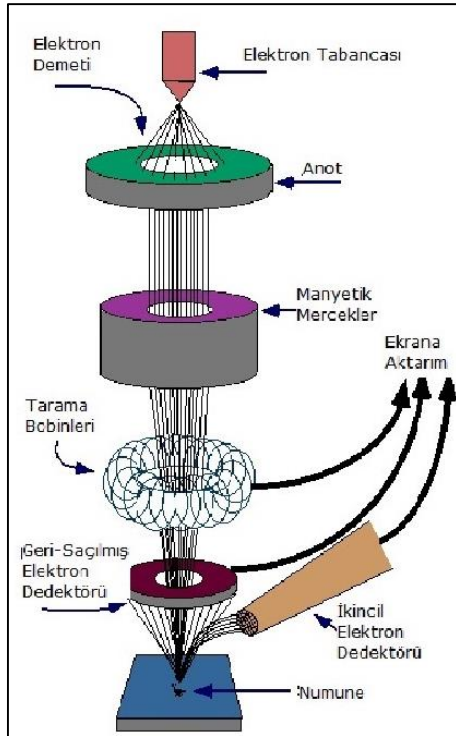
Bir ısı borusunun seçiminde çalışma sıvısı ve fitil malzemesinin kimyasal uyumluluğu önem arz etmektedir. Örneğin çalışma sıvısı olarak su tercih edilirse bakır ısı borusu ve amonyak tercih edilmesi durumunda alüminyum ısı borusu kullanımı seçilmelidir [24].



## 7. KARAKTERİZASYON YÖNTEMLERİ

### 7.1. SEM (Taramalı Elektron Mikroskobu)

SEM, malzemelerin yüzeylerini gözlemlemek için geniş ölçüde kullanılan çok yönlü ve gelişmiş bir cihazdır. SEM'de bir numune yüksek enerjili elektronla taranarak numunenin yüzeyi hakkında ayrıntılı bilgi sağlanır. Bu çıktılar, bir malzemenin topografyası, morfolojisi, bileşimi, taneciklerin yönelimi, kristalografik bilgileri vb. hakkında bilgi verir. Morfoloji, şekil ve boyutu belirtirken, topografya bir nesnenin yüzey özelliklerini, dokusunu, pürüzlülük veya pürüzsüzlüğünü ifade eder. Benzer şekilde, bileşim, malzemeyi oluşturan elementler ve bileşikler anlamına gelirken, kristalografi, malzemelerdeki atomların düzenini belirtir. SEM, 1 nm'lik yüksek kaliteli ve üç boyutlu çözünürlükle bir parçacığın ayrıntılı görüntüsünü elde edebilmeyi sağlayan bir cihazdır. Bu tür cihazların büyütme oranı 300.000 katına kadar çıkabilir [25].



Şekil 7.1. SEM çalışma prensibi [26]

Şekil 7.1'de belirtilen SEM cihazının çalışma prensibine göre incelenecek olan numune hazırlandıktan sonra mikroskopa yerleştirilir ve elektronların saçılma olmadan doğrudan

numuneye ulaşıp yüksek çözünürlükte görüntü elde edilebilmesi için ortam vakuma alınır. Bir elektron mikroskopunda elektronun numuneye ulaşması süresince elektron tabancasından üretilen ve yayılan birincil elektronlar, 1–40 keV aralığında ısıtılarak veya yüksek enerji uygulanarak hızlandırılır sonrasında manyetik mercekler elektronların odaklanmasını sağlar ve numune ile etkileşimin ardından farklı açılarda saçılan elektronlar dedektör tarafından toplanarak görüntü haline getirilir [25–27].

## **7.2. EDS (Enerji Dağılımlı X-ışını Spektroskopisi)**

Enerji Dağılımlı X-ışını Spektroskopisi (EDS), SEM ile birlikte çalışarak kullanıcıya istenen numunenin elementel bileşimini analiz ederek nitel ve nicel sonuçlar sağlayan tekniktir [28]. Moseley kanunu olarak da bilinen ışığın yayılan frekansı ile atom numarası arasında doğrudan korelasyon olduğunu belirleyen EDS temel çalışma prensibi yüksek enerjili elektromanyetik radyasyonun bir atomdan çekirdek elektronlarını çıkartabilme kapasitesine dayanmaktadır. Bu elektronların gevşeyerek enerjisini serbest bırakarak çıkarılması ile daha yüksek enerjili elektronlar ile doldurulabilecek boşluklar bırakılır. Bu gevşeme esnasında açığa çıkan enerji her bir element için özeldir. Bu sebeple, numunenin X-ışını ile bombardıman edilmesiyle hangi elementlerin ve hangi oranda mevcut olduğu belirlenebilir [29]. EDS, bir yayıcı, bir toplayıcı ve bir analizör olmak üzere üç ana parçadan oluşan bir seri ile çalışır. Bu üç parçanın kombinasyonu, hem yayılan X-ışınlarının sayısının hem de enerjilerinin analiz edilmesini sağlar. EDS dedektörü, numune içindeki çeşitli elementlerin X-ışını özelliklerini enerji spektrumuna ayırma görevini üstlenir. Daha sonra spektrum, EDS sistem yazılımı tarafından analiz edilir ve foton enerjisi elektrik sinyallerine dönüştürülerek elementin genliği belirlenir. Sonuç olarak, elementlerin kimyasal bileşim haritaları hem nitel hem de nicel olarak belirlenebilir [27].

## **7.3. XRD (X-ışını Kırınımı Yöntemi)**

Bragg denklemi prensibine dayanan X-ışını Kırınım yöntemi (XRD), her bir kristal fazın kendine özgü atomik dizilimlerine bağlı olarak X-ışınlarını karakteristik bir düzen içerisinde kırması esasına dayanır. Her bir kristal faz için bu kırınım profilleri bir nevi parmak izi gibi o kristali tanımlar. XRD cihazı x-ışını kaynağı, numune tutucu ve XRD dedektörü olmak üzere üç ana bileşenden oluşmaktadır. Temel çalışma prensibi kaynak tarafından üretilen X-ışınlarının numuneyi aydınlatması ile numune fazı tarafından kırınımına uğrayarak dedektöre

ulaşmasına dayanır. Numune ve dedektörün hareket ettirilerek kırınım açısının değiştirilmesiyle yoğunluk ölçülür ve kırınım verileri kaydedilir. Kırılma geometrisine ve numune türüne bağlı olarak, gelen ışın ile numune arasındaki açı sabit veya değişken olabilir ve genellikle kırınımına uğrayan ışın açısıyla eşleştirilir. X-Işını Kırınım analiz metodu, analiz sırasında numuneyi tahrip etmez ve çok az miktardaki numunelerin dahi analizlerinin yapılmasını sağlar.

#### **7.4. FTIR (Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi)**

Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi (FTIR), malzemelerdeki (gaz, sıvı ve katı) fonksiyonel grupları tanımlamak için kızılötesi radyasyon ışınlarını kullanan yaygın bir tekniktir. Kızılötesi spektroskopi, moleküldeki her bağın yaptığı kızılötesi radyasyon emilimini ölçer ve sonuç olarak genellikle % geçirgenlik ile dalga sayısı ( $\text{cm}^{-1}$ ) olarak gösterilen bir spektrum verir. Kovalent bağ içeren geniş malzeme yelpazesi kızılötesi bölgesindeki elektromanyetik radyasyonu emer. Kızılötesi radyasyon, elektrik dipolüne sahip malzemelerin kovalent bağları ile etkileşime girdiğinde, molekül enerji absorbe eder ve bağ ileri-geri salınım yapmaya başlar. Bu nedenle bir moleküldeki fonksiyonel grupların belirlenmesi için molekülün kızılötesi aktif olması gerekmektedir. Kimyasal bağ içermediği için tek atomun kızılötesini absorbe edemediği gibi hidrojen molekülü gibi aynı atoma sahip moleküllerde dipol momentleri sıfır olduğu için kızılötesi aktif molekül olarak adlandırılmazlar. Her bağ yapısının kendine özgü doğal titreşim frekansları vardır [30].

Kızılötesi ışınlar numuneye çarptığında, ışığı absorbe eder ve çeşitli titreşim modları oluşturur. Frekans aralıkları, enerji ve frekansla doğrudan bağlantılı olup spektrumun yorumlanmasını kolaylaştırması açısından genellikle  $600\text{-}4000\text{ cm}^{-1}$  aralığında dalga sayısı olarak ölçülür.

#### **7.5. DTA/DSC (Diferansiyel Termal Analiz/Diferansiyel Taramalı Kalorimetri)**

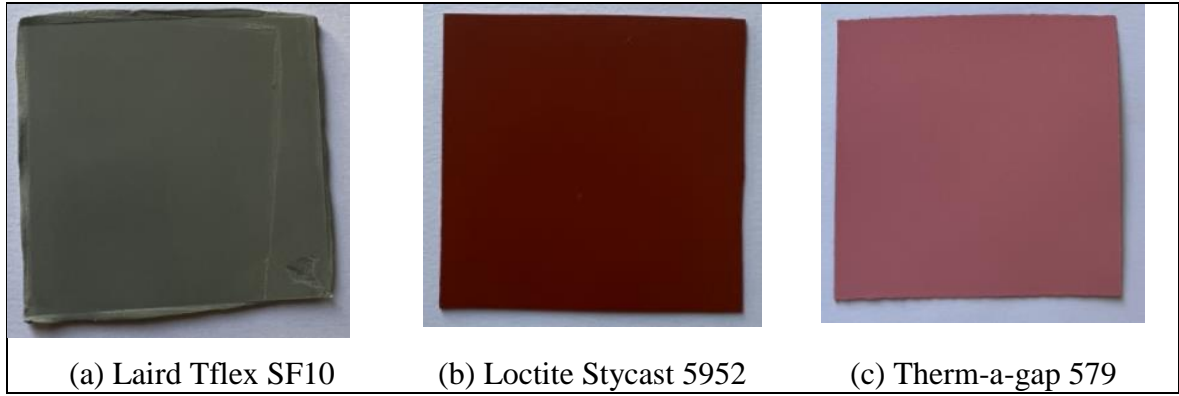
Diferansiyel termal analiz (DTA), iki numunenin kontrollü bir hızda ısıtılan veya soğutulan bir ortamda aynı sıcaklık rejimlerine tabi tutulduğunda, bir madde ile referans malzeme arasındaki sıcaklık farkını zamana veya sıcaklığa karşı kaydetme tekniği olarak tanımlanabilir [31]. Diferansiyel termal analiz (DTA), prensip olarak ısıtma veya soğutma eğrilerinin ölçüm kolaylığını kalorimetrenin nicel özellikleri ile birleştiren bir tekniktir. Isı,

ısıtma veya soğutma eğrisi belirlemelerinde olduğu gibi sürekli ölçülür ve diferansiyel sıcaklık ölçümü, aynı ortamlarda tutulan referans ve numune arasındaki ısı akışı farkının hesaplanmasına olanak tanır. Programlayıcı, doğrusal bir ısıtma oranı sağlar. Ölçüm sırasında numune içindeki sıcaklık farkı düşük tutulabilirse, numune ısı iletkenliğinin numune sıcaklığı üzerindeki etkisini ortadan kaldırmak mümkün olur ve ısı akışları sıcaklık ölçümlerinden hesaplanabilir. Numunenin erimesi veya su kaybetmesi gibi endotermik değişimde numunenin sıcaklığı referans malzemenin sıcaklığından daha düşük olacaktır ve sıcaklık farkı negatif olurken, ekzotermik değişimde numunenin sıcaklığı referans malzemenin sıcaklığından yüksek olduğu için sıcaklık farkı pozitif olmaktadır. DTA eğrisi üzerindeki tepe noktasının şekli ve boyutu numunenin doğası hakkında bilgi vermektedir. Keskin endotermal tepe noktaları bir formdan başka bir kristal forma geçiş gibi faz değişimlerini gösterirken, dehidrasyon reaksiyonlarından geniş endotermal tepe noktaları elde edilmektedir. Oksidasyon gibi kimyasal tepkimeler ise ekzotermik tepkimelere örnek gösterilebilir. Numune miktarı ve parçacık boyutu, ısıtma hızı, numune tutucusunun üretildiği malzeme ve korozyon etkisi gibi etkenler DTA eğrisini etkileyen faktörler arasında yer almaktadır.

Diferansiyel Taramalı Kalorimetri (DSC) analizi numune ile referans arasındaki ısı akış hızı farkını zaman ve sıcaklık fonksiyonu olarak ölçer. DSC analizi ile camsı geçiş, erime ve kristalleşme gibi geçişlerin ölçümlerini mümkün kılmasının yanında ısıl sertleştirme, ısı geçmişi, özgül ısı kapasitesi ve saflık analizi gibi kimyasal reaksiyonlar da ölçülebilir. DTA ve DSC, numune ile referans arasındaki sıcaklık farklarını tespit eder ve DSC, ısı miktarının kantitatif ölçümünü gerçekleştirebilir [32].

## 8. MALZEME VE YÖNTEM

Bu çalışmada tersine mühendislik yöntemi ile malzemelerin karakterizasyon ve performans karşılaştırmasının yapılabilmesi için ticari olarak kullanılmakta olan üç farklı malzeme kullanılmıştır. Resim 8.1’de sırasıyla 5x5 cm<sup>2</sup> boyutlarında ve 0.5mm kalınlığında Laird Tflex firmasının SF10 serisi, Loctite Stycast 5952 ve Therm-a-gap 579 ısı arayüz malzemeleri yer almaktadır.



Resim 8.1. Isıl Arayüz Malzemeleri

Isıl arayüz malzemelerinin ısı iletkenlik katsayıları, operasyonel minimum ve maksimum sıcaklıkları ve elektrik direnç değerlerinin yer aldığı katalog verileri Çizelge 8.1’de yer almaktadır [33–35].

Çizelge 8.1. Isıl Arayüz Malzemeleri Katalog Verileri

Isıl Arayüz Malzemesi	Isıl İletkenlik Katsayısı [W/mK]	Operasyon Sıcaklığı [°C]	Elektrik Hacimsel Dirençlilik [ $\Omega$ cm]
Laird Tflex SF10	10	-40, 125	$10^{14}$
Loctite Stycast 5952	0.8	-65, 260	$10^{14}$
Therm-a-gap 579	1.5	-55, 200	$10^{14}$

### 8.1. Malzemelerin Karakterizasyon Yöntemleri

#### 8.1.1. SEM analiz yöntemi

Deneysel çalışmalar boyunca numunelerin (Laird Tflex SF10, Loctite 5952, Therm-a-gap 579) mikroyapısal analizleri SEM aracılığıyla karakterize edilmiştir. Mikroyapı

incelemelerinde Resim 8.2’de yer alan Gazi Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği laboratuvarlarında bulunan Jeol JSM-6060 LV model SEM cihazı kullanılmıştır.



Resim 8.2. Deneysel Çalışmalarda Kullanılan Taramalı Elektron Mikroskobu

Isıl arayüz malzemeleri SEM ile incelemeye alınmadan önce daha iyi görüntü alınabilmesi adına iletkenliğini artırabilmek için Resim 8.3’ de yer alan kaplama cihazı ile altın/paladyum kaplama işlemi gerçekleştirilmiştir.



Resim 8.3. Deneysel Çalışmalarda Kullanılan Numunelerin Au/Pd Kaplama Cihazı

SEM analizi ile görüntü alma ve EDS analizi ile malzemelerin element yoğunluğunun tespit edilmesi için gerçekleştirilecek analiz için numune hazırlığı kapsamında kaplama şartları Çizelge 8.2’de belirtildiği gibi uygulanmıştır.

Çizelge 8.2. Isıl Arayüz Malzemeleri Kaplama Şartları

Basınç	Kaplama Süresi	Akım
$10^{-7}$ mbar	30 sn	6 mA

### 8.1.2. XRD Analizi yöntemi

XRD analizi ile kristal yapıya sahip malzemelerin atomik düzeydeki yapısının incelenmesi hedeflenmektedir. Tersine mühendislik yöntemi kullanılarak analizi gerçekleştirilecek Laird Tflex SF10, Loctite 5952 ve Therm-a-gap 579 ısıl arayüz malzemelerinden alınan numuneler test için hazırlanmıştır. XRD analizleri Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği bölüm laboratuvarında bulunan Bruker D8 Advance cihazı ile Cu-K $\alpha$  kaynağı ve 1.5418 dalga boyu kullanılmıştır. 2 $\theta$  tarama açısı 10°-90° tarama aralığında ayarlanmıştır. Dedektörün açisal aralığı 2.83449° ve eşik değeri 0.2 ile 0.224 olarak ayarlanmıştır. Böylece analizde istenmeyen düşük seviyeli sinyallerin filtrelenmesi hedeflenmiştir.

### 8.1.3. FTIR Analizi yöntemi

FTIR moleküllerin kimyasal yapısını incelemek için kullanılan bir analiz yöntemidir. Numunede bulunan moleküller, belirli dalga boylarında kızılötesi ışığı soğurur ve bu absorpsiyonlar, moleküler titreşimlere karşılık gelir. Bu titreşimler, molekülün kimyasal yapısına ve bağlarına özgüdür. Tersine mühendislik yöntemi kullanılarak Gazi Üniversitesi Kimya Mühendisliği bölümü laboratuvarında bulunan Bruker Vertex marka FTIR spektrometre cihazında analizi gerçekleştirilecek numuneler (Laird Tflex SF10, Loctite 5952, Therm-a-gap 579) test öncesinde nemini atması ve kurutma amaçlı 100 derecede ETÜV (laboratuvar finında)’de 1 (bir) gece bekletilmiş olup 400-4000cm<sup>-1</sup> dalga sayıları aralığında analiz gerçekleştirilmiştir.

### 8.1.4. DSC Analizi Yöntemi

Numune ve referans arasındaki ısı akış hız farkını zaman ve sıcaklık fonksiyonu olarak ölçmek için DSC analizi gerçekleştirilmiştir. Tersine mühendislik yöntemi kullanılarak analizi gerçekleştirilecek Laird Tflex SF10, Loctite 5952 ve Therm-a-gap 579 ısı arayüz malzemelerinden alınan 4 mg ağırlığındaki numune teste sokulmuştur. DSC analizi Gazi Üniversitesi Metalurji Malzeme Mühendisliği laboratuvarında Hitachi 7020 model cihazda gerçekleştirilmiş olup test düzeneğinde kullanılacak numunelerin yerleştirildiği kap yüksek sıcaklıklara dayanımı ve kimyasal olarak inert olmasından dolayı alüminyum pan olarak tercih edilmiştir. Test 30°C-500°C arasında gerçekleştirilmiştir.

## 8.2. Isıl Arayüz Malzemesi Performans Hesabı

### 8.2.1. Isıtıcı seçimi

Maliyet açısından ve tedarik süreçlerinin daha kolay olmasından kaynaklı deney düzeneğinde hali hazırda uydu ekipmanlarının uçuş modeli olmayan modellerinin testinde kullanılan Clayborn tipi ısıtıcı tercih edilmiştir. Isıtıcı seçimi yapılırken ekipmanın yayacağı ısı miktarı ve ekipmanın çekeceği voltaj değerleri göz önünde bulundurularak ısıtıcının katalog değerleri üzerinden ısıtıcının uygulanacağı yüzeyin ölçüleri sınırlayıcı koşul olarak tutulmuştur. Çizelge 8.3'de ısıtıcının üreticisi tarafından sağlanan katalog bilgileri yer almaktadır. Katalogda yer alan bilgiler inç ve fit cinsinden verilmektedir ve seçim yapılırken metric hesabına göre yapılmaktadır. Çizelge 8.3'de kullanılacak ısıtıcının bant genişliği, ısıtıcı üzerinde kaç adet iletken tel bulunacağı ve bağlantı şeklinin paralel, seri veya hem paralel hem seri olması özelliklerine göre kategorisi bulunmaktadır [36].

Çizelge 8.3. Clayborn Isıtıcı Katalog Bilgileri

Tape Width (inches)	1/6		1/4			1/2			
# of conductors	1		2			4			
Part Number	Ohm per foot	Max watts per ft.	Ohm per foot (1)	Ohm per foot (2)	Max watts per ft.	Ohm per foot (1)	Ohm per foot (3)	Ohm per foot (2)	Max watts per ft.
A-16 or A-28	1.9	25	0.9	3.8	40	0.5	1.9	7.6	70
B-16 or B-28	3.2	25	1.6	6.4	40	0.8	3.2	12.8	70

Çizelge 8.3. (devam) Clayborn Isıtıcı Katalog Bilgileri

C-16 or C-28	4	23	2	8	35	1	4	16	62
D-16 or D-28	4.9	20	2.4	9.8	30	1.2	4.9	19.6	52
E-16 or E-28	7	25	3.5	14	40	1.7	7	28	70
F-16 or F-28	8.8	23	4.4	17.6	35	2.2	8.8	35.2	62
G-16 or G-28	10.8	20	5.4	21.6	30	2.7	10.8	43.2	52
H-16 or H-28	13.2	20	6.6	26.4	30	3.3	13.2	52.8	52
J-16 or J-28	21.3	13	10.6	42.6	20	5.3	21.3	85.2	32
K-16 or K-28	26.8	10	13.4	53.6	16	6.7	26.8	107.2	25

Test esnasında deney düzeneğinde ısı yayılımı gerçekleştirilmesi planlanan plakanın ısı yayılım miktarı ve çektiği voltaj bilgileri doğrultusunda katalog üzerinden sırası ile aşağıdaki eşitlikler kullanılarak uygun olan ısıtıcı seçimi gerçekleştirilmiştir.

$$P = \frac{V_{ısıtıcı}^2}{R_{ısıtıcı}} \quad (8.1)$$

Eş. 8.1 denkleminde R ihtiyaç duyulan ısıtıcının direncini ( $\Omega$ ), P talep edilen ısıtıcı gücünü (W) cinsinden ve V ısıtıcı gücü için gerekli gerilim değerini (Volt) cinsinden ifade etmektedir. Test düzeneği ile ısıtıcının arasındaki bağlantıda 20 AWG kablo kullanılacak olup, kablonun iç direnci çok düşük olduğu için hesaba katılmamıştır. Bu sebeple ısıtıcı üzerindeki gerilim ile hat gerilimi aynı olmaktadır.

Eş. 8.1'den faydalanılarak ihtiyaç duyulan ısıtıcı için gereken direnç değeri hesaplandıktan sonra Tablo'dan R/L değerlerine göre her bir kategori için ısıtıcı boyu hesaplanmaktadır.

$$L = \frac{R}{R/L} \quad (8.2)$$

Isıtıcının boyu Eş. 8.2'de ifade edildiği üzere hesaplanmakta ve hesaplanan ısıtıcı uzunluğunun, kullanılması düşünülen yüzey boyutlarına göre tercih edilmesi gerekmektedir.

Isıtıcı boyunun Eş. 8.2 kullanılarak hesaplanması sonucunda ısıtıcıların kullanımını sınırlayan maksimum güç değeri tablodan bulunmalıdır. Maksimum güç değerini bulabilmek için aşağıdaki Eş. 8.3 kullanılmaktadır.

$$P_{max} = \text{Max Güç Yoğunluğu} \times L_{ısıtıcı} \quad (8.3)$$

Eş. 8.3 denklemi kullanılarak ve katalogda belirtilmiş olan ısıtıcı türlerinin maksimum güç yoğunluklarının Eş. 8.2 ile hesaplanmış olan ısıtıcı uzunluğu ile oranından her bir ısıtıcının maksimum gücü bulunmaktadır. Hesaplanmış olan maksimum güç değeri talep edilen güç değerinden fazla olduğu durumlardaki ısıtıcıların kullanımı uygun görülmektedir. Eğer ısıtıcının maksimum güç değeri talep edilen güç değerinin altında kalırsa ısıtıcı yanacağı için kullanıma uygun değildir.

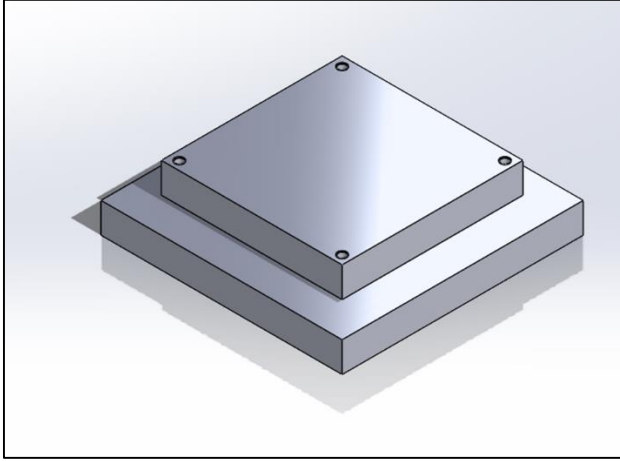
Hesaplanmış olan maksimum güç değerini seçimi yapılmış olan ısıtıcının sabit boyu ile sağlayabilmek için maksimum gerilim değeri Eş. 8.4 denklemi ile hesaplanır.

$$V_{max} = \sqrt{(P_{max} \times R)} \quad (8.4)$$

Eş. 8.4 ile ifade edilen denklem ile hesaplanmış olan maksimum gerilim değeri test sisteminin elverdiği maksimum gerilim değerinden yüksek ise sistem gerilimi sınırlayıcı gerilim olarak kabul edilir ve bu değer ile ısıtıcının verebileceği maksimum güç değeri hesaplanır.

### 8.2.2. Test düzeneği hazırlanması

Bu çalışmada tersine mühendislik yöntemi ile hali hazırda ticari kullanımı olan ve Resim 8.1’ de belirtilmiş olan ısıl arayüz malzemelerinin ısıl iletkenlik katsayılarının performans karşılaştırmasının deneysel olarak yapılabilmesi için numunelerin boyutları 5 x 5 cm<sup>2</sup> olacak şekilde ölçümlendirme yapılarak kullanılmıştır. Isıl arayüz malzemelerinin kullanım amacı ekipman veya bileşen ile uydu paneli veya montajının gerçekleştirileceği yüzey ile neredeyse boşluk kalmayacak şekilde ısıl teması sağlamaktır. Bu kapsamda deney düzeneğinde ekipman ve paneli temsil etmek üzere alt ve üst plaka tedarigi gerçekleştirilmiştir. Isıl arayüz malzemelerinin uygulama sonrasında plakaların birbirine civatalanması ile belirli bir miktar yayınımlı düşünülerek üst plaka 6 x 6 cm<sup>2</sup> olacak şekilde ve alt plakanın da uygulama kolaylığı sağlaması açısından 8 x 8 cm<sup>2</sup> olacak şekilde tedarigi gerçekleştirilmiştir ve Resim 8.4’de CAD çizimi yer almaktadır.



Resim 8.4. Isıl Performans Test Düzeneği CAD çizimi

Deney düzeneği temelde iki aşamadan oluşmaktadır. İlk aşamasında seçilmiş olan üç farklı ısıl arayüz malzemesinin 0.5mm kalınlıkta plakalar arasına uygulanarak her test düzeneğinde dört bölgede olmak üzere M3 cıvata kullanılarak 0.6Nm ile torklama yapılarak plakalar üzerinde eşit basınç seviyesi oluşturulup ısıl iletkenlik katsayıları performans karşılaştırılması yapılmıştır. İkinci aşamasında ise ilk aşamada en iyi performansı gösteren ısıl arayüz malzemesi 0.5 mm ve 1.5 mm kalınlıkta uygulanarak plakalar 0.8Nm ve 1Nm ile torklanarak ısıl arayüz malzemesinin kalınlık ve uygulanan yüzey basıncına göre performansı karşılaştırılmıştır.

Çizelge 8.4. Isıl Arayüz Malzemelerinin Performans Testi Düzenek-1

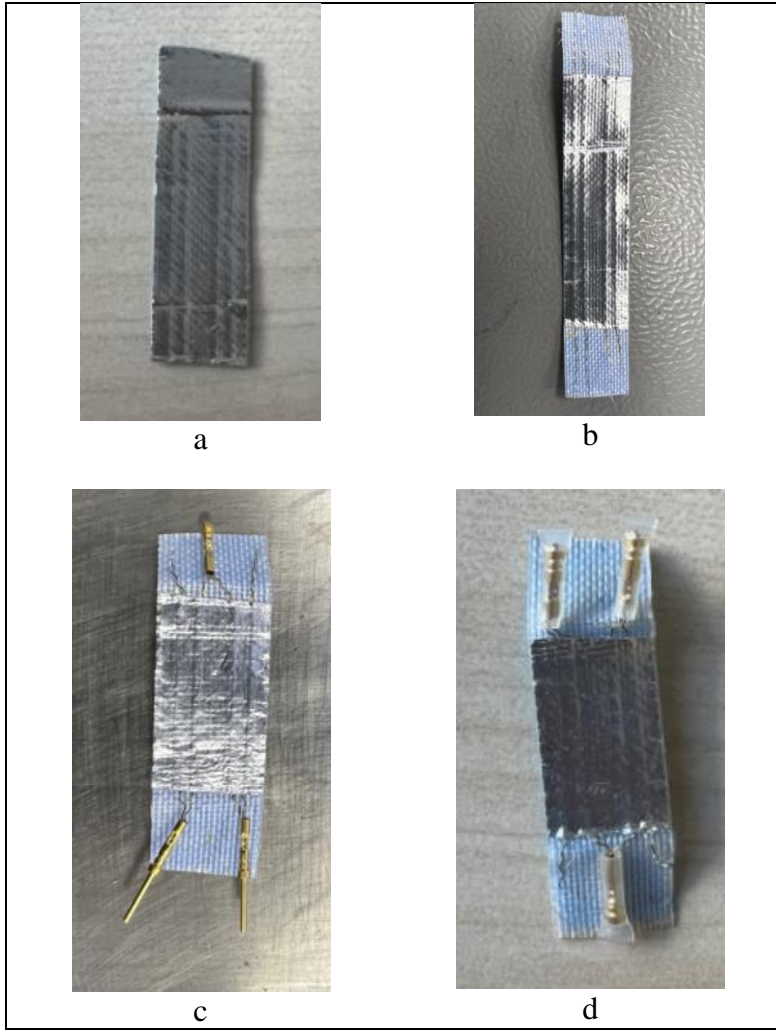
Numune	Uygulama Kalınlığı	Uygulanan Tork
Laird Tflex SF10	0.5 mm	0.6 Nm
Loctite 5952	0.5 mm	0.6 Nm
Therm-a-gap 579	0.5 mm	0.6 Nm

Çizelge 8.5. Isıl Arayüz Malzemelerinin Performans Testi Düzenek-2

Numune	Uygulama Kalınlığı	Uygulanan Tork
Laird Tflex SF10	0.5 mm	0.8 Nm
	0.5 mm	1 Nm
	1.5 mm	0.8 Nm
	1.5 mm	1 Nm

Test düzeneğinde üst plakanın ekipmanı simüle edebilmesi adına plaka üzerine ısıtıcı yerleşimi yapılmıştır. Daha önceki bölümde Clayborn tipi ısıtıcı tercih edilmiş olup, boyutlandırma hesabı yapılmıştır.

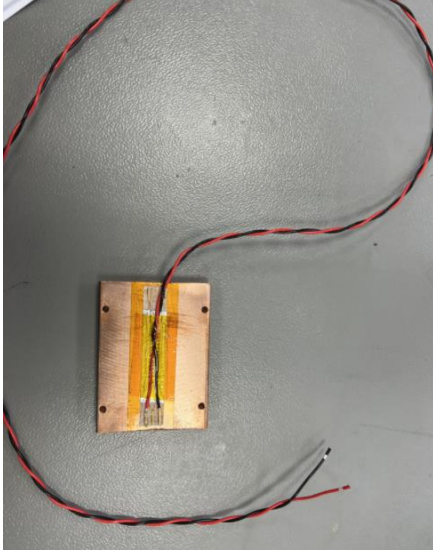
Ancak clayborn tipi ısıtıcının içerisindeki tungsten direnç tellerinin bakır ile kaplanarak iletkenliği üretici firma tarafından sağlanmış olsa da önceki kullanımlardan kazanılan deneyim doğrultusunda emaye kaplamalarının soyularak iletkenliğinin artırılması gerekmekte ve direnç telleri ortadan ikiye katlanarak seri bağlı konuma getirilerek güç kaynağına bağlanacağı kısımların makaron yapılarak yalıtkan hale getirilmesi gerekmektedir. Resim 8.5’de ısıtıcının kullanıma hazırlık öncesi ve sonrası görselleri yer almaktadır.



Resim 8.5. Isıtıcı Hazırlanması Aşamaları

Direnç tellerinin yalıtımı tamamlandıktan sonra ısıtıcı üzerinde açıkta kalan direnç tellerinin güç kaynağı ile bağlantısının yapılarak aynı şekilde makaronlama işlemi gerçekleştirilmiştir. Resim 8.6’da güç kaynağı ile bağlantının sağlanacağı kablo ile ısıtıcı bağlantısı ve plaka üzerine yerleşimi görülmektedir. Direnç kablolarının bağlantısında +/- uç fark etmeksizin bağlantı yapılabilir. Hazırlanan ısıtıcı plaka üzerine yerleştirilmeden önce plaka yüzeyi IPA

(isopropil alkol) ile temizlenmiş ve yalıtımın sağlanması açısından kapton bant yapıştırılarak ısıtıcı bu kısım üzerine yerleştirilmiştir.



Resim 8.6. Üst Plaka üzerine ısıtıcı yerleşimi

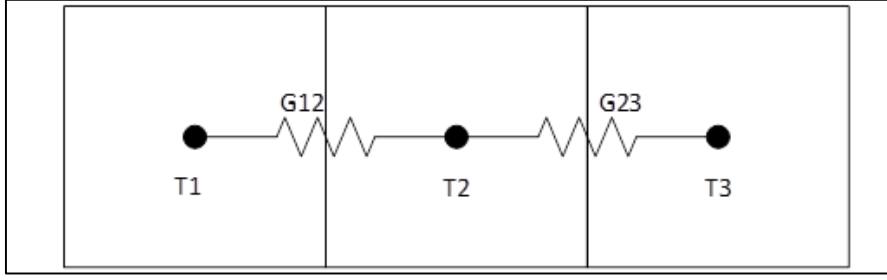
### 8.2.3. Isıl iletkenlik katsayı hesaplanması

Deney düzeneğinde yer alan ısıl arayüz malzemesinin ısıl iletkenlik katsayısının belirlenmesinde sadece iletim ile ısı transferi olması durumu, zamandan bağımsız kararlı durum ve tek yönlü akış olduğu varsayılarak hesaplama yapılmaktadır. Uzay ortamında hava olmadığı için taşınım ile ısı transferi gözlemlenmemektedir ve test sisteminde ışınım ile ısı transferi ihmal edilmiştir. Bu varsayımlar doğrultusunda iletim ile ısı transferi Eş. 8.5 ve Eş. 8.6 ile ifade edilebilmektedir.

$$Q = Gx\Delta T \quad (8.5)$$

$$Q = -\frac{kA\Delta T}{\Delta l} \quad (8.6)$$

Test düzeneğinin modellenmiş hali ve düğümler arasında iletim ile ısı transferi gösterimi Şekil 8.1'da yer almaktadır.



Şekil 8.1. Sistemin hacimlerine ayrılması ve düğümler arası iletim ile ısı transferi

İki düğüm arasındaki ısı transferi iletim yolu ile gerçekleştiğinde bu ısı aktarımına iletim ile ısı transferi denir ve doğrusal olarak adlandırılır. Isıl sistem hesaplamalarında elektriksel sistem ile benzetiminden oldukça faydalanılabilir. Şekil 8.1’de görüldüğü üzere her bir alt hacmin tam merkezinde yer alan düğüm yığın bir kütle olarak kabul edilir ve ısı karakteristiği temsil eden sıcaklık ve ısıl kütlesi ile ifade edilir. Birden fazla düğümün seri olarak iletim yolunda eşdeğer ısıl iletkenlik Eş. 8.7 ile hesaplanmaktadır.

$$G_{eş} = \frac{1}{\frac{1}{G_1} + \frac{1}{G_2} + \dots + \frac{1}{G_n}} \quad (8.7)$$

Analitik hesaplamalar için deney düzeneğinde kullanılan plakaların kendi ısıl iletkenliklerinin mükemmel olup tüm plaka boyunca ısının her noktada uniform dağılım sağladığı varsayılarak sadece ısıl arayüz malzemesi üzerinde sıcaklık değerleri okunarak ısıl iletkenlik ölçümü yapılmıştır.

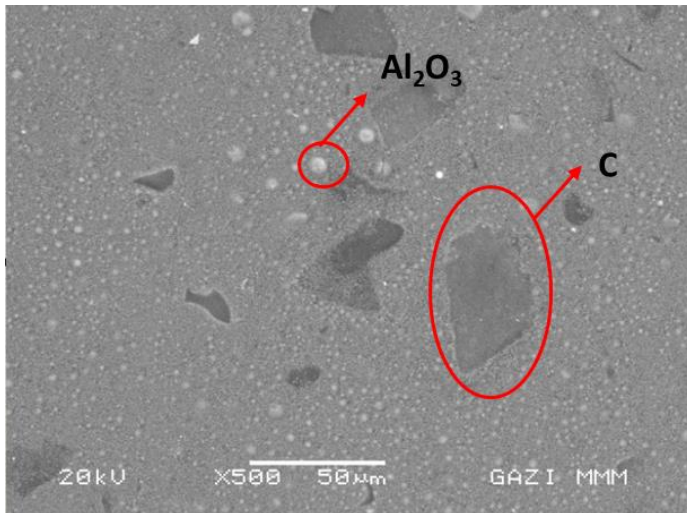
## 9. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde Laird Tflex firmasının SF10, Loctite 5952 ve Therm-a-gap 579 ısııl arayüz malzemelerinden alınan numuneler doğrultusunda tersine mühendislik çalışmaları kapsamında gerçekleştirilen malzemelerin karakterizasyon analizi sonucu elde edilen bulgular ile ısııl iletkenlik performansının karşılaştırılması kapsamında gerçekleştirilen test sonuçları yer almaktadır.

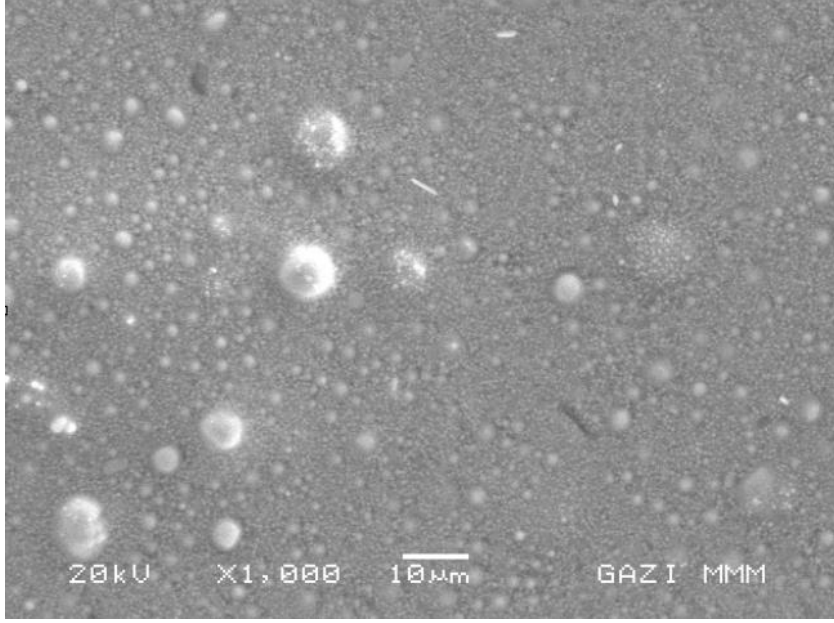
### 9.1. Isıl Arayüz Malzemelerinin SEM ve EDS Analizleri

Isıl arayüz malzemelerinin SEM analizi için her malzemedan 1 x 1 cm<sup>2</sup> boyutunda numune alınarak test kabına yerleşimi yapılmış ve teste başlamadan önce test esnasında gönderilen ışınları daha iyi iletibilmeleri açısından altın-paladyum kaplama yapılmıştır. Kaplama şartları, plazma için vakum ortamı sağlanarak basınç 10<sup>-7</sup> mbar ve 6mA olarak uygulanmış olup kaplama süresi 30 saniyedir. Numuneler 500, 1000 ve 2000 büyütmede incelenmiş olup makro ölçekte genel bakış için 500 büyütme ve daha net görüntü incelemesi 1000 büyütmede elde edilmiştir.

İlk olarak Laird Tflex firmasının SF10 ürünü incelenmiş olup, 500 büyütmede makro ölçekte genel yapı incelenmiştir. Resim 9.1 üzerinde kırmızı alan içerisinde yer alan bölgelerde yoğun Karbon (C) ve Alüminyum (Al) varlığı olduğu düşünölmekte olup 1000 büyütmede daha detaylı olarak bakılmıştır.



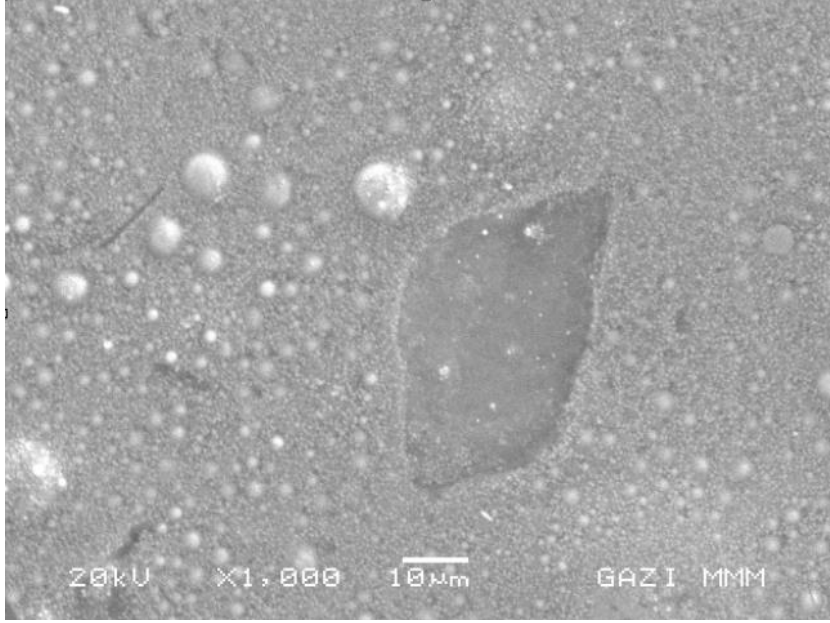
Resim 9.1. Laird Tflex SF10 Numune X500 SEM Görüntüsü



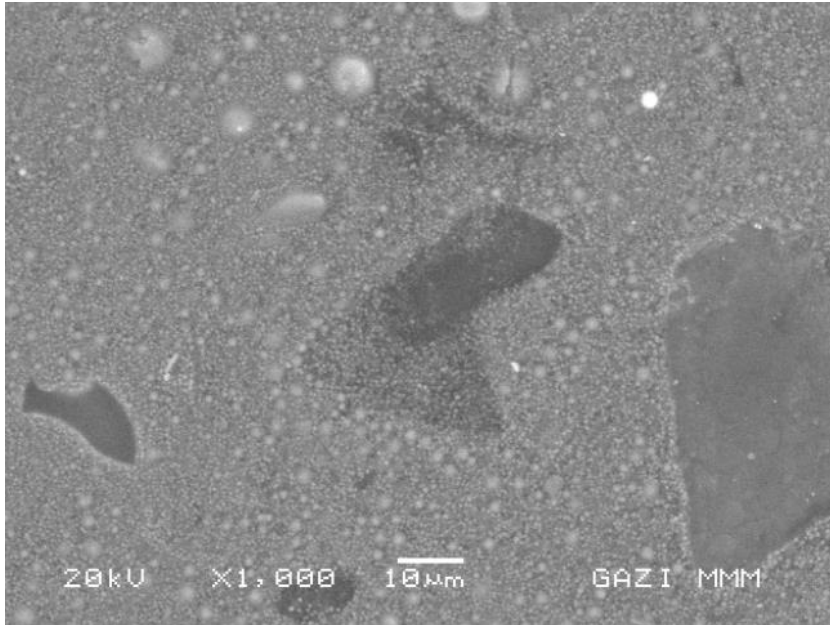
Resim 9.2. Laird Tflex SF10 Numune X1000 Bölge 1 SEM Görüntüsü

Numune üzerinde C ve Al varlığının yoğun olduğu düşünülen bölgelerde daha detaylı inceleme için 1000 büyütmede 3 farklı bölgeden görüntü alınmıştır. Resim 9.2’de küresel şekilde ve farklı boyutlarda görülen yapılara odaklanılmış olup bu bölgenin Oksijen (O) ve Al varlığı altında olduğu düşünülmektedir. Küresel Alümina ( $Al_2O_3$ ) yapılarının boyutlarının en fazla 5  $\mu m$  boyutuna ulaştığı ve farklı çaplardan alınan küresel yapıların ortalamasının 2  $\mu m$  boyutunda olduğu hesaplanmıştır.

Resim 9.3’de 1000 büyütmede numunenin farklı bir bölgesine odaklanılmıştır. Koyu gri tonlama olarak gözüken ayak izi bölgesinde C yoğunluğu olduğu düşünülmektedir. Genellikle SEM mikroyapı görüntülemesinde kontrast ve gri tonlamasının olduğu renklendirmeler yoğun C varlığını temsil etmektedir.



Resim 9.3. Laird Tflex SF10 Numune X1000 Bölge 2 SEM Görüntüsü

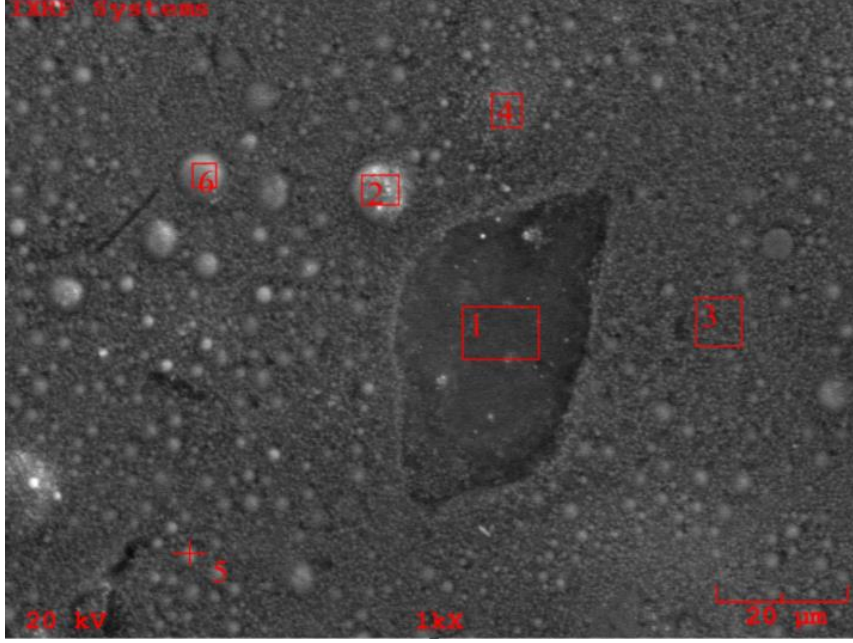


Resim 9.4. Laird Tflex SF10 Numune X1000 Bölge 3 SEM Görüntüsü

Resim 9.4'de 1000 büyütmede numunenin C yayılımının ve yoğunluğunun farklılık gösterdiği bölgeye odaklanılmıştır. Ayak izi şeklinde görüntülenen farklı gri tonlamalar C yoğunluğunun farklılık gösterdiğini ifade etmektedir.

Laird Tflex firmasının ürünü olan SF10 malzemesine ait numune için 1000 büyütmede altı farklı geçiş bölgesinden EDS analiz değerleri incelenmiş ve Resim 9.5'de paylaşılmıştır.

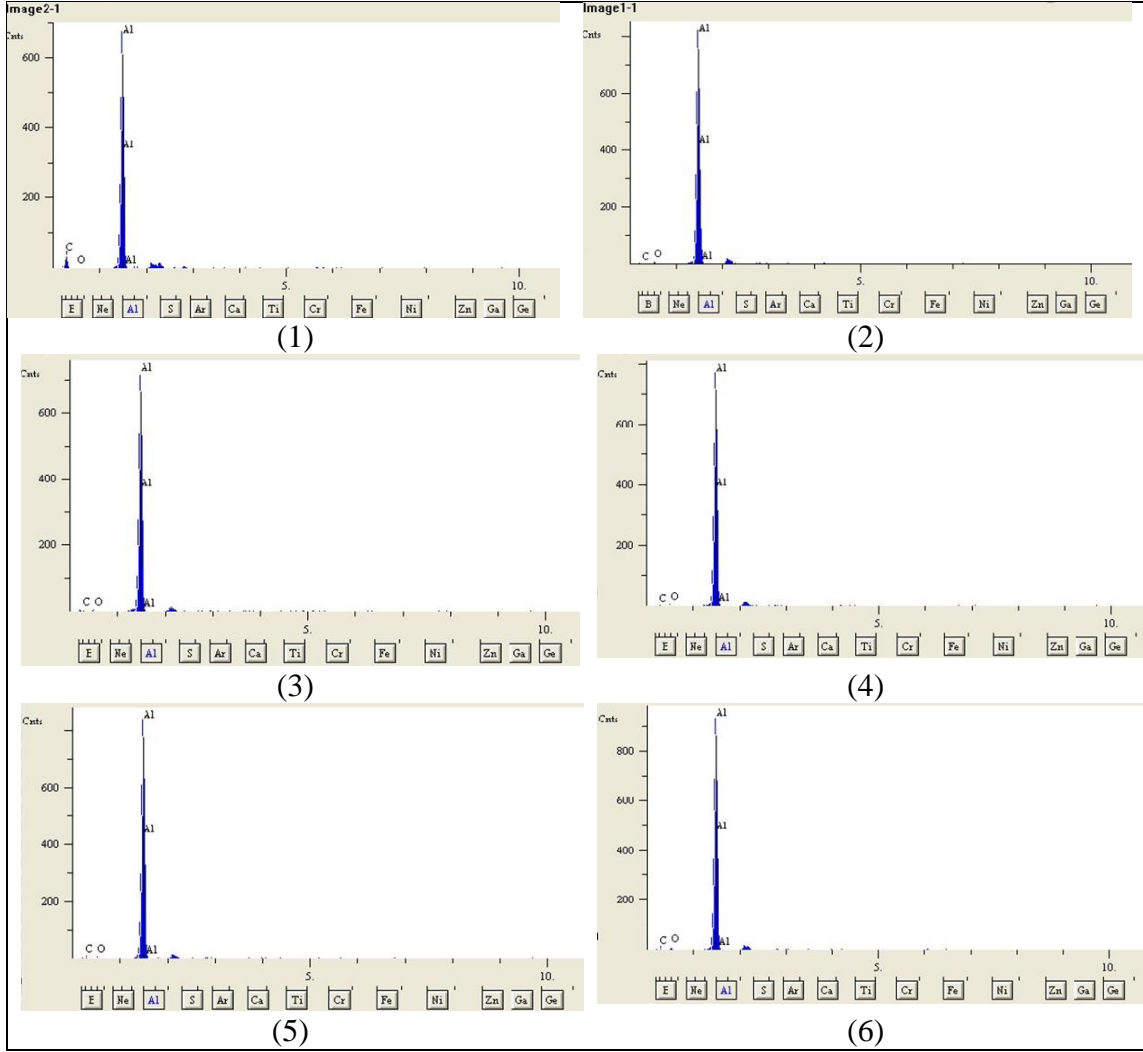
Elde edilen EDS değerleri incelendiğinde yüksek oranda Al ve O elementlerine rastlanmış olup, numunenin  $Al_2O_3$  barındırdığını göstermekle birlikte analizi gerçekleştirilen numunenin açık kaynak olarak paylaşılan teknik veri listesinde de belirtildiği gibi Silisyum (Si) elementine rastlanmamıştır [33].



Resim 9.5. Laird Tflex SF10 numune X1000 SEM görüntüsü

Numunenin 1000 büyütmede 20kV elektron enerjisi altında SEM analizinde gösterilen farklı geçiş bölgelerini temsil eden numaralı bölgeler için gerçekleştirilen EDS analiz bulguları X ışını enerji seviyesine karşın sinyalin yoğunluğu olarak

şekil 9.1şekil 9.1'de yer almaktadır. Genel olarak incelenen bölgelerde yoğunlukları değişmekle birlikte Al, O ve C atomlarına rastlanmış olup Si varlığına rastlanmamıştır.



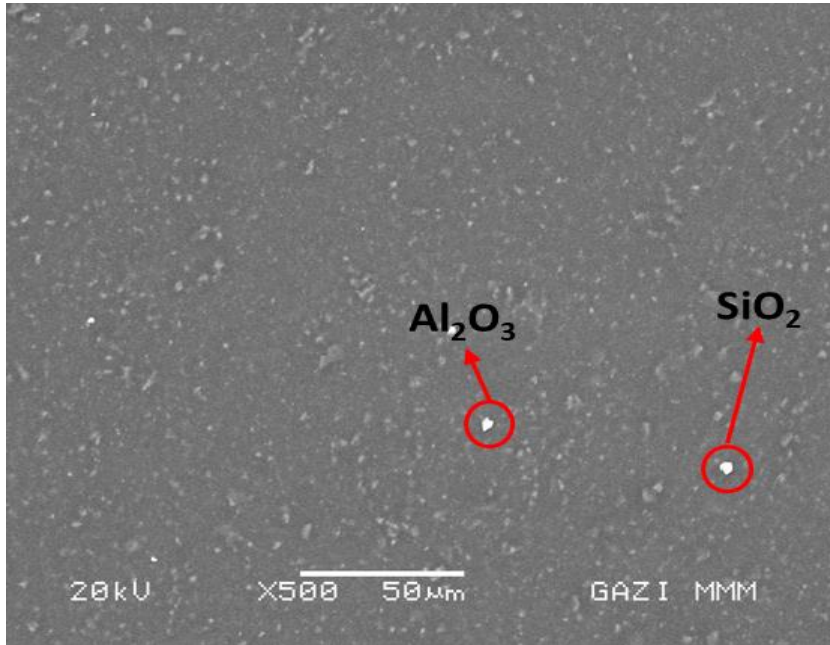
Şekil 9.1. Laird Tflex SF10 Numune 1000 Büyütmelerde 6 Farklı Bölgenin EDS Bulguları

Çizelge 9.1’de 6 farklı bölgenin EDS analizi sonucunda yüzde atom ağırlığı yer almaktadır. 1 numaralı koyu gri olarak görülen karbon yoğunluğunun yüksek olduğu düşünülen ayak izi bölgesinde diğer bölgelere kıyasla ağırlıkça en fazla C yüzdesine sahip olup değeri %58 olarak tespit edilmiştir. Al varlığının yoğunluk gösterdiği düşünülen 2 numaralı bölgede ise diğer bölgelere oranla yüksek seviyede ağırlıkça %80 civarında Al elementi tespit edilmesine karşın 4 numaralı bölgede de Al oranı oldukça yüksek tespit edilmiş ve bu bölgede C elementine rastlanmamıştır.

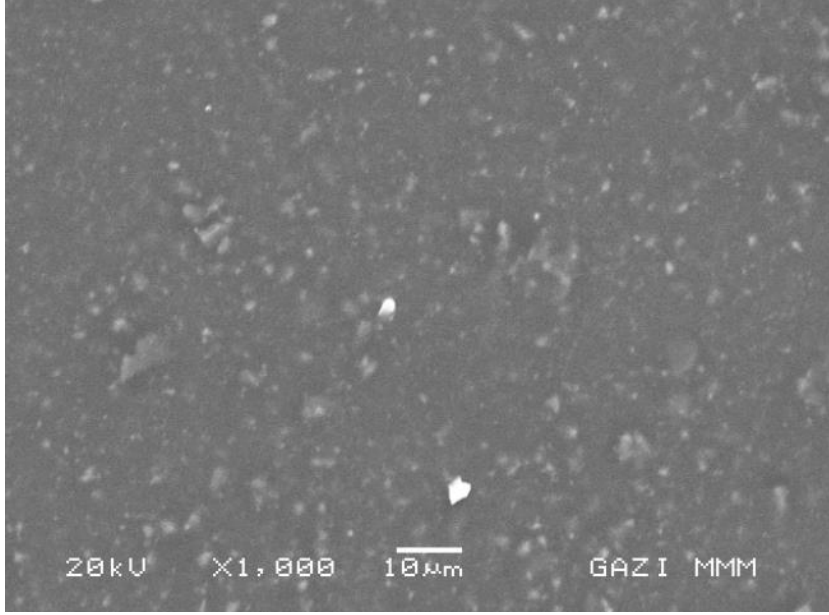
Çizelge 9.1. Laird Tflex SF10 Numunesinin 6 Farklı Bölgenin EDS Analizi Sonucu Ağırlıkça Atom Yüzdesi

Bölge	Ağırlıkça %Al Atomu	Ağırlıkça %O Atomu	Ağırlıkça %C Atomu
1	39	3	58
2	80	8	12
3	63	5	32
4	94	6	-
5	66	5	29
6	62	11	27

İkinci olarak Loctite firmasının 5952 numaralı ısıl arayüz malzemesinden alınan numune incelenmiş olup, 500 büyütmede makro ölçekte genel yapı incelenmiştir. Resim 9.6 üzerinde kırmızı alan içerisinde yer alan bölgelerde Si ve Al varlığı olduğu düşünülmekte olup Resim 9.7'de 1000 büyütmede daha detaylı olarak bakılmıştır. Genellikle yüksek atomlu elementlerin daha fazla elektron geri saçmalarından kaynaklı C elementine göre Si elementinin daha yüksek atoma sahip olması kaynaklı açık renkte gözükten bölgelerin Si, koyu renkli gözükten bölgelerin C yoğunluklu olduğu düşünülmektedir.

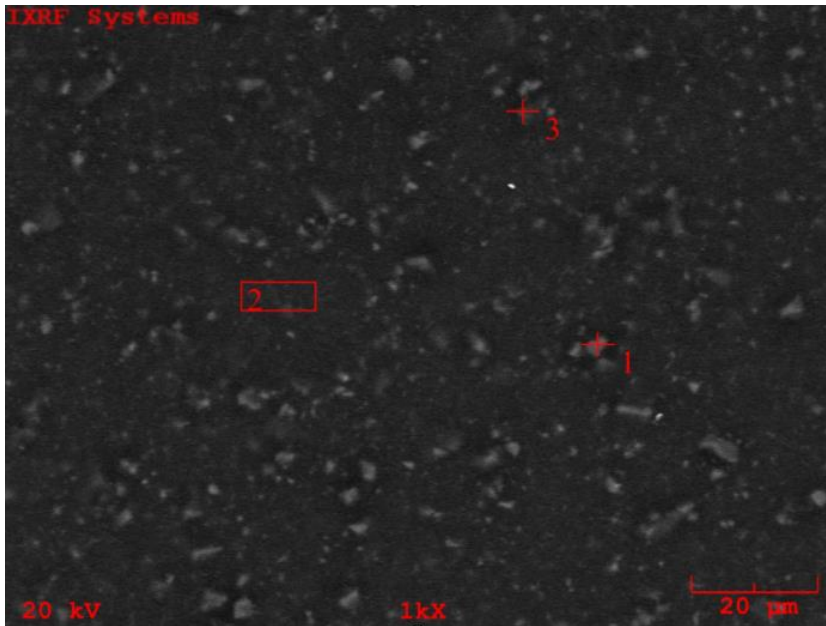


Resim 9.6. Loctite 5952 Numune X500 SEM Görüntüsü



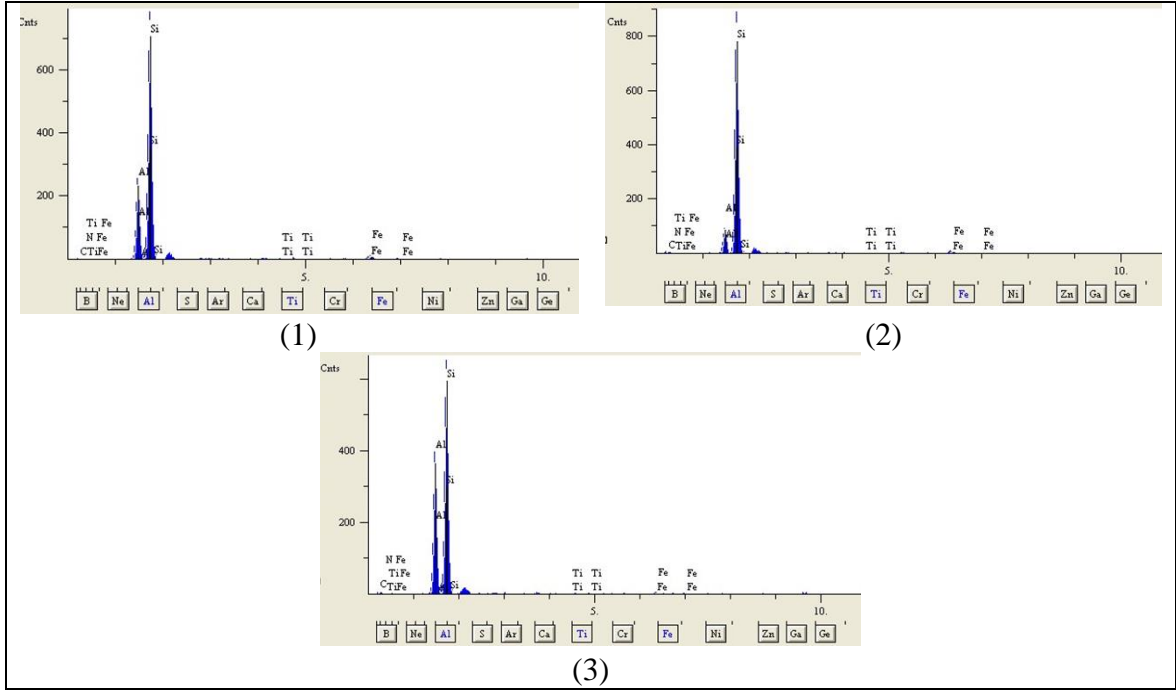
Resim 9.7. Loctite 5952 Numune X1000 SEM Görüntüsü

Loctite 5952 ısıl arayüz malzemesine ait numune için 1000 büyütmede üç farklı geçiş bölgesinden EDS analiz değerleri incelenmiş ve Resim 9.8’de paylaşılmıştır. Elde edilen EDS değerleri incelendiğinde yüksek oranda Si, C, Al ve O elementlerine rastlanmış olup, analizi gerçekleştirilen numunenin açık kaynak olarak paylaşılan teknik veri listesinde de belirtildiği gibi silikon bazlı ( $\text{SiO}$ ,  $\text{SiO}_2$  gibi) polimerik malzeme olduğu doğrulanmıştır [34].



Resim 9.8. Loctite 5952 numune X1000 SEM görüntüsü

Numunenin 1000 büyütmede 20kV elektron enerjisi altında SEM analizinde gösterilen farklı geçiş bölgelerini temsil eden numaralı bölgeler için gerçekleştirilen EDS analiz bulguları X ışını enerji seviyesine karşın sinyalin yoğunluğu olarak Şekil 9.2’de paylaşılmıştır.



Şekil 9.2. Loctite 5952 Numune 1000 Büyütmede 3 Farklı Bölgenin EDS Bulguları

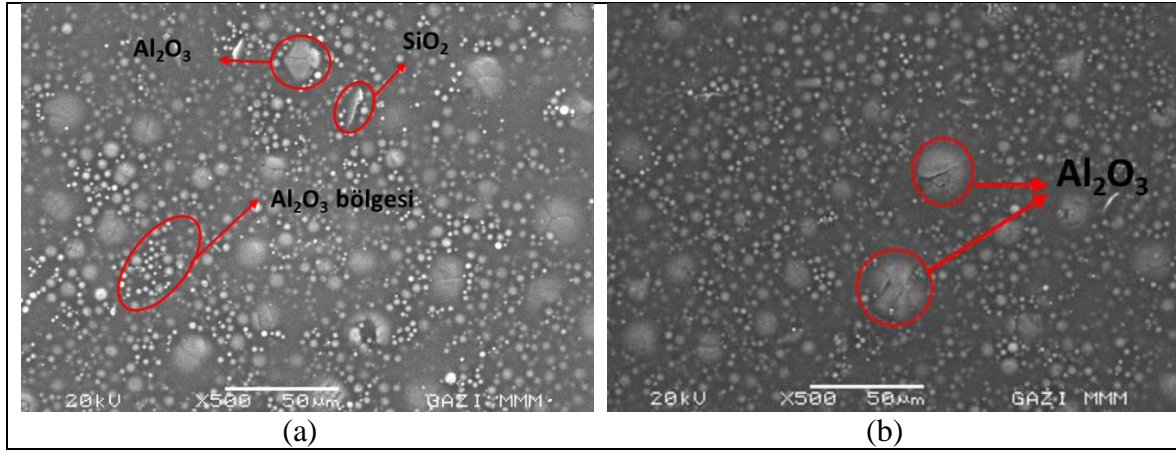
Çizelge 9.2’de 3 farklı bölgenin EDS analizi sonucunda yüzde atom ağırlığı yer almaktadır. Resim 9.8’de açık renkli olarak görünen 1 numaralı bölge incelendiğinde diğer bölgelere kıyasla daha yüksek yoğunlukta ağırlıkça %75 Si elementi ve %20 oranında Al varlığı tespit edilmiştir. 2 Numaralı bölgede ise ağırlıkça %70 Si ve %17 oranında C elementi varlığı tespit edilirken 3 numaralı bölgede Si varlığı ağırlıkça %45 civarına düşerken C oranı %30 seviyelerine ve Al varlığının %21 seviyelerine çıktığı tespit edilmiştir.

Çizelge 9.2. Loctite 5952 Numunesinin 3 Farklı Bölgenin EDS Analizi Sonucu Ağırlıkça Atom Yüzdesi

Bölge	Ağırlıkça %Si Atomu	Ağırlıkça %Al Atomu	Ağırlıkça %O Atomu	Ağırlıkça %C Atomu
1	75	20	5	-
2	70	9	4	17
3	45	21	4	30

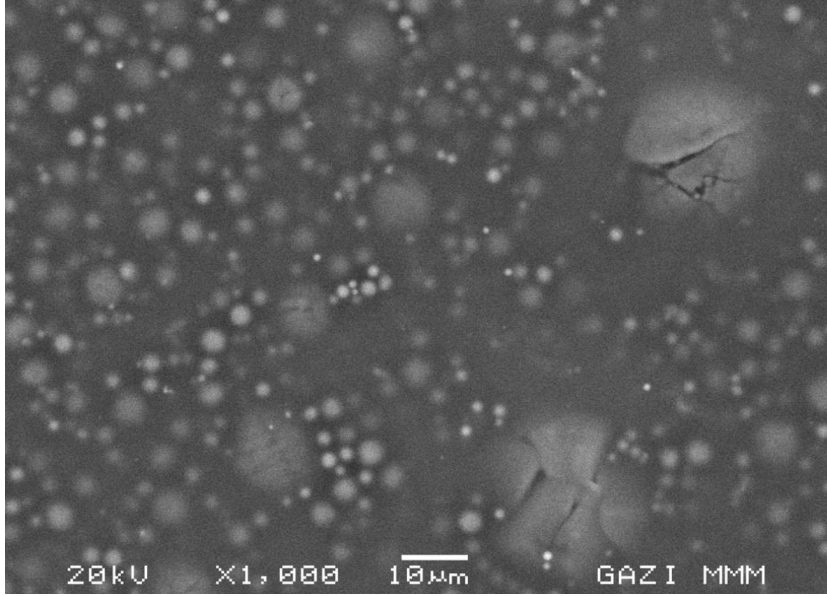
Son olarak Therm-a-gap 579 ısııl arayüz malzemesinden alınan numune incelenmiş olup, 500 büyütmede makro ölçekte genel yapı incelenmiştir.

Resim 9.9'da iki farklı bölgeye odaklanılan görüntü üzerinde kırmızı alan içerisinde yer alan bölgelerde Si ve Al varlığı olduğu düşünölmekte olup 1000 büyütmede daha detaylı olarak bakılmıştır. Genellikle yüksek atomlu elementlerin daha fazla elektron geri saçmalarından kaynaklı C elementine göre Si elementinin daha yüksek atoma sahip olması kaynaklı açık renkte gözükken bölgelerin Si, koyu renkli gözükken bölgelerin C yoğunluklu olduğu düşünölmektedir.

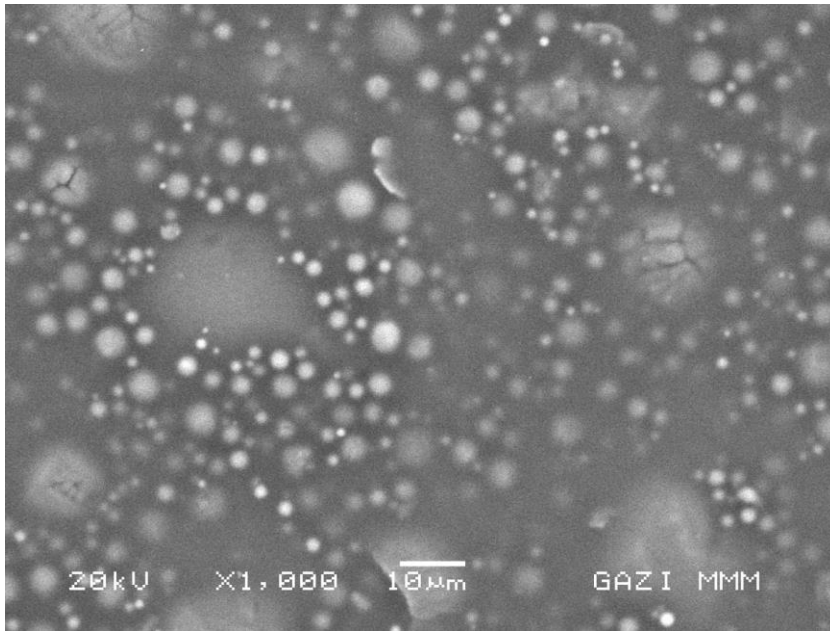


Resim 9.9. Therm-a-gap 579 Numune 500 Büyütmede 2 Farklı Bölgeden SEM Görüntüsü

Numune üzerinde Si ve Al varlığının yoğun olduğu düşünölen bölgelerde ve kırmızı ile çerçevelemiş bölgeleri daha detaylı inceleme için 1000 büyütmede 2 farklı bölgeden görüntü alınmıştır. Resim 9.10 ve Resim 9.11 numunenin farklı bölgelerinden alınan görüntüleri temsil etmekte olup küresel şekilde ve farklı boyutlarda görölen yapı yoğunluk göstermektedir. Bu küresel yapılar yüksek atom numaralı elementlerin veya yoğun yapılı bileşiklerin varlığını gösterebildiği gibi oksitlenme veya korozyon ürünlerini temsil edebilir. Bu noktada Al ve O varlığından bahsedilebilir. Ancak tam olarak hangi elementlerin varlığını gösterdiğini tespit edebilmek için EDS analizi bulgularına bakılmaktadır. Küresel  $Al_2O_3$  yapılarının boyutları incelendiğinde  $10 \mu m$ 'ye ulaşan boyutlarda olduğu görölmüştür. Boyutu artan  $Al_2O_3$  yapılarının boşlukları doldurma kapasitesi azalacağı için yapılar arasındaki temas azalır ve böylelikle ısı transferi verimliliğinin azalacağı düşünölmektedir.

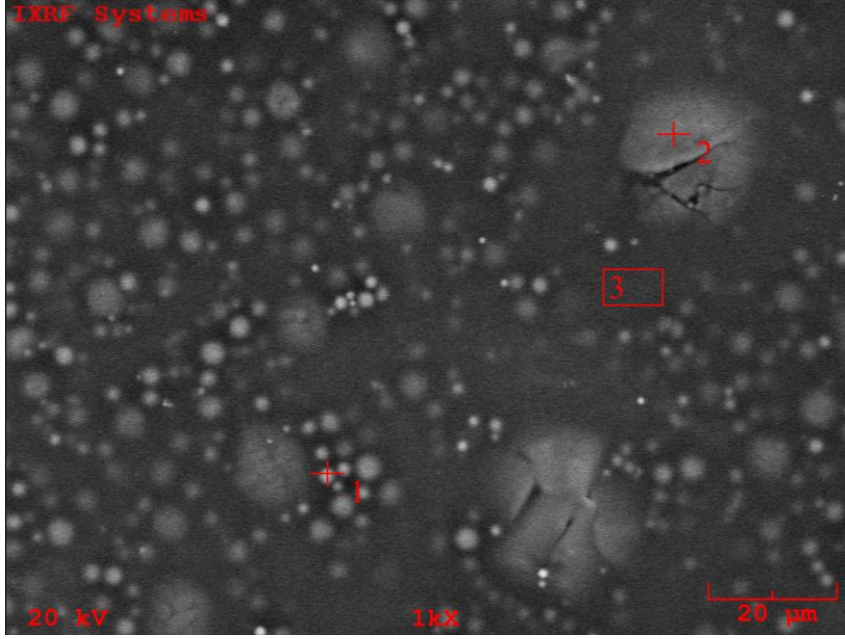


Resim 9.10. Therm-a-gap 579 Numune 1000 Büyütmede 1 Numaralı Bölge SEM Görüntüsü



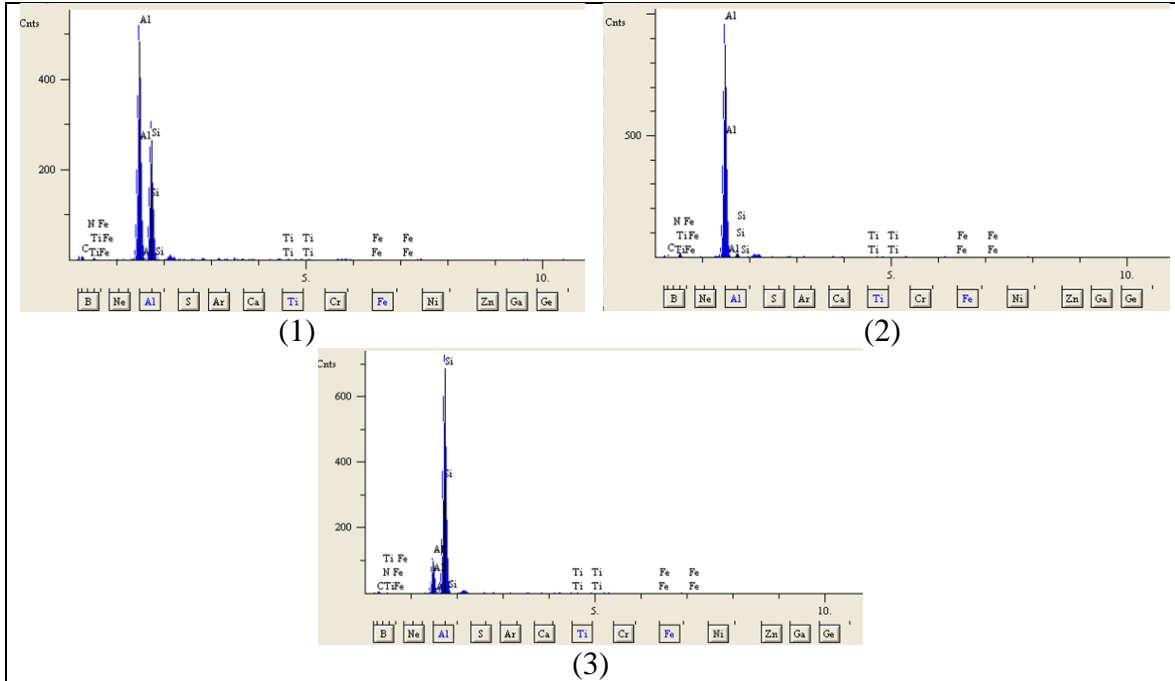
Resim 9.11. Therm-a-gap 579 Numune 1000 Büyütmede 2 Numaralı Bölge SEM Görüntüsü

Therm-a-gap 579 ısııl arayüz malzemesine ait numune için 1000 büyütmede üç farklı geçiş bölgesinden EDS analiz değerleri incelenmiş ve Resim 9.12’de paylaşılmıştır. Elde edilen EDS değerleri incelendiğinde yüksek oranda Si, C, Al ve O elementlerine rastlanmış olup, analizi gerçekleştirilen numunenin açık kaynak olarak paylaşılan teknik veri listesinde de belirtildiği gibi silikon bazlı ( $\text{SiO}$ ,  $\text{SiO}_2$  gibi) polimerik malzeme olduğu doğrulanmıştır [35].



Resim 9.12. Therm-a-gap 579 Numune X1000 SEM görüntüsü

Numunenin 1000 büyütmede 20kV elektron enerjisi altında SEM analizinde gösterilen farklı geçiş bölgelerini temsil eden numaralı bölgeler için gerçekleştirilen EDS analiz bulguları X ışını enerji seviyesine karşın sinyalin yoğunluğu olarak Şekil 9.3’de paylaşılmıştır.



Şekil 9.3. Therm-a-gap 579 1000 Büyütmede 3 Farklı Bölgenin EDS Bulguları

Çizelge 9.3'de 3 farklı bölgenin EDS analizi sonucunda yüzde atom ağırlığı yer almaktadır. Resim 9.12'de küçük çapa sahip küresel şekilde görünen yapının 1 numaralı bölgesi incelendiğinde %31 oranında Al ve %27 oranında Si beklendiği gibi bulunurken diğer bölgelere kıyasla daha yüksek yoğunlukta ağırlıkça %35 oranında C elementi varlığı tespit edilmiştir. Açık renkte görünen küresel şekildeki mikro çatlaklardan oluşan yapıda 2 Numaralı bölgede ise ağırlıkça %60 oranında Al ve %16 oranında O varlığı tespit edilirken Si varlığı minimum seviyede tespit edilmiştir. 3 numaralı bölgede ise diğer bölgelere oranla çok daha yüksek seviyede yoğun olarak Si varlığı tespit edilmiştir.

Çizelge 9.3. Therm-a-gap 579 Numunesinin 3 Farklı Bölgenin EDS Analizi Sonucu Ağırlıkça Atom Yüzdesi

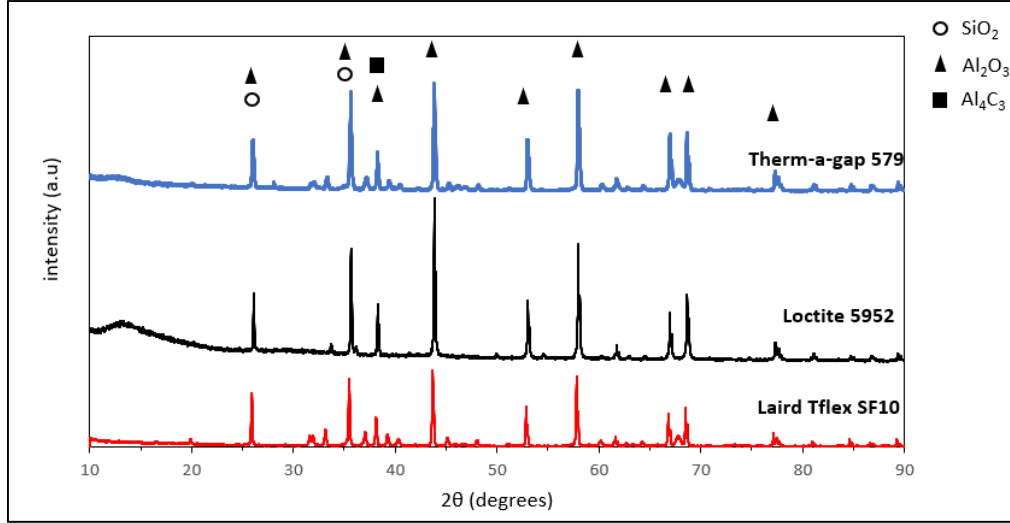
Bölge	Ağırlıkça %Si Atomu	Ağırlıkça %Al Atomu	Ağırlıkça %O Atomu	Ağırlıkça %C Atomu
1	27	31	7	35
2	4	60	16	20
3	74	10	5	11

## 9.2. Isıl Arayüz Malzemelerinin XRD Analizleri

Tersine mühendislik yöntemi ile analizleri gerçekleştirilen Laird Tflex SF10, Loctite Stycast 5952 ve Them-a-gap 579 ısıl arayüz malzemelerinin ticari katalogda belirtilen kristal yapı ile uyumlu olduğu XRD analizi ile doğrulanmıştır. Şekil 9.4'de malzemelerin XRD analizi sonucu bulguları kırınım açısına karşın yoğunluğu temsil etmektedir. Her üç malzemede genel yapıda birbiriyle uyumlu gözükmeyle beraber Laird Tflex SF10 ve Therm-a-gap 579 numunelerinin kristal yapıları oldukça benzer olup Loctite Stycast 5952 numunesinden farklı olarak gözlemlenen ekstra piklerin alümina varlığından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Şekil 9.4 detaylı olarak incelendiğinde Laird Tflex SF10 için en belirgin ilk pik seviyeleri kırınım açısı değeri  $25,6^\circ$  ve  $35,1^\circ$  civarında görülmekte olup  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (alümina) varlığından söz edilebilir. Loctite Stycast 5952 ve Therm-a-gap 579 için en belirgin ilk pik seviyeleri kırınım açısı değeri Azmi ve diğerlerinin [37] ısıl kararlılığı artırmaya yönelik çalışmalarında silikanın XRD analizi sonucu elde edilen pikleri ile uyumlu olarak  $2\theta$  açısı değerlerinde  $26^\circ$  ve  $36^\circ$  civarında görülmekte olup  $\alpha$ -SiO<sub>2</sub> (kuvars) varlığından söz edilebilir. Laird Tflex SF10 ve Therm-a-gap 579 için kırınım açısı değeri  $37^\circ$  civarında daha zayıf pik olarak gözükken  $\gamma$ - Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (alümina) varlığından kaynaklandığı düşünülebilir. Loctite Stycast 5952

için kırınım açısı değeri  $44,7^\circ$  civarında yüksek seviyede pik değerine sahip olup bu durumun kristal yapıda alüminyum varlığından kaynaklandığı düşünülebilir. Her üç numune için de kırınım açısı değeri  $37,5^\circ$  civarında zayıf piklerin arasından daha keskin olarak ortaya çıkan pik seviyesinin  $Al_4C_3$  (alüminyum karbür) varlığından kaynaklandığı düşünülebilir.



Şekil 9.4. Loctite Stycast 5952, Laird Tflex SF10 ve Therm-a-gap 579 XRD Analizi Bulguları

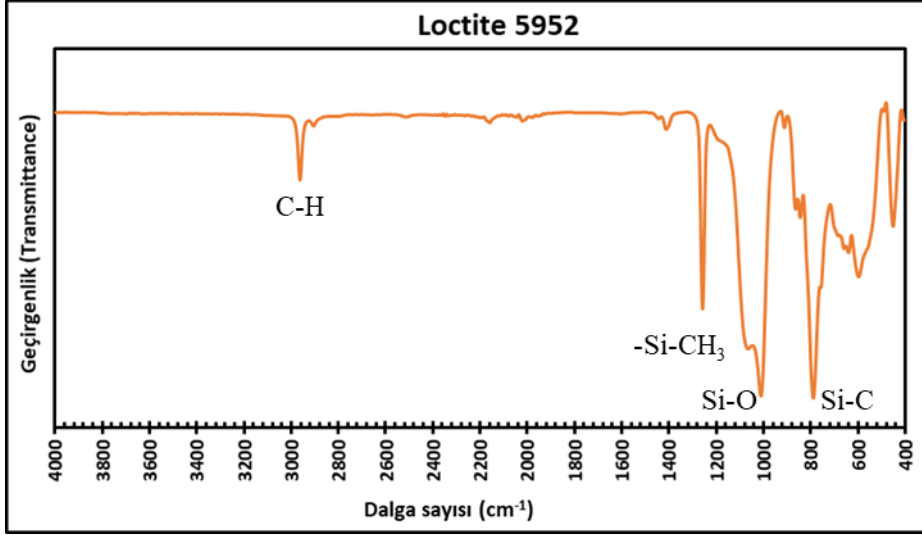
Her üç malzemenin XRD analizi sonuçlarına bakıldığında Ning ve diğerlerinin [38] kalsine edilmiş Alümina için XRD analizi çalışması ile uyumlu olduğu ve  $\alpha-Al_2O_3$  için  $2\theta$  açılarında 25.57, 35.1, 37.7, 43.3, 57.47, 66 ve 68 aralığında sergilediği pikler ile uyumlu görülmektedir.

### 9.3. Isıl Arayüz Malzemelerinin FTIR Analizleri

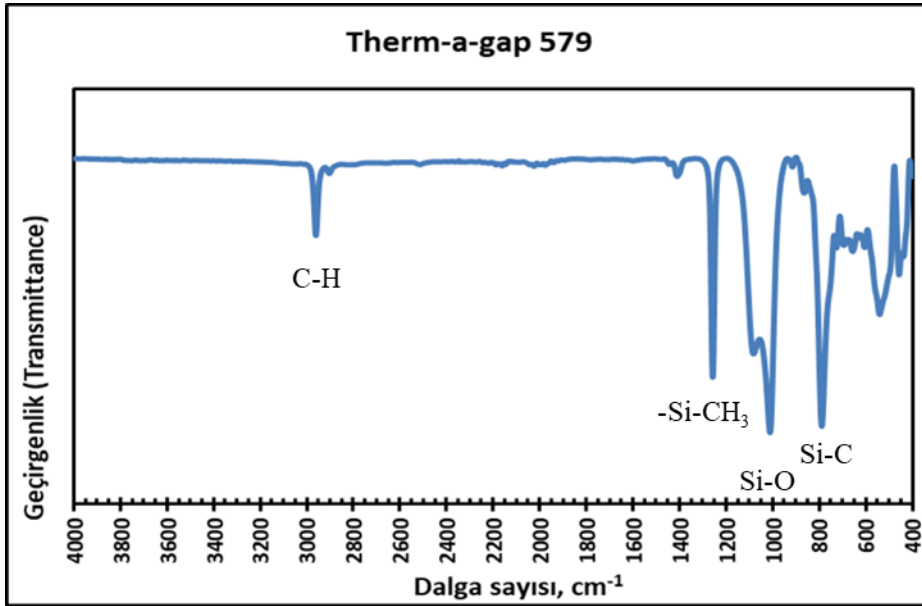
Tersine mühendislik yöntemi ile analizleri gerçekleştirilen Laird Tflex SF10, Loctite 5952 ve Them-a-gap 579 ısı arayüz malzemelerin FTIR analizi sonucu bulguları Şekil 9.5, Şekil 9.6 ve Şekil 9.7’de yer almaktadır.

Organik moleküller için, kızılötesi spektrum genellikle; 4000-2500 dalga boyu aralığında, O-H, N-H ve C-H gibi hidrojenin diğer elementlerle olan tek bağlarının absorpsiyonu, 2000-2500 aralığında  $C=C$  ve  $C=N$  gibi üçlü bağların absorpsiyonu, 1500-2000 aralığında,  $C=C$  ve  $C=O$  gibi çift bağların absorpsiyonu ve 400-1500, 1000-500 dalga boyu arası genellikle C-O ve C-C gibi bükülme titreşimleri için kullanılır. 700-400 arası ise çeşitli bileşikler için

benzersiz olan ve fonksiyonel grupların tanımlanmasında nadiren kullanılan parmak izi bölgesi olarak adlandırılmaktadır [30].



Şekil 9.5. Loctite 5952 numune için FTIR analizi



Şekil 9.6. Therm-a-gap 579 numune için FTIR analizi

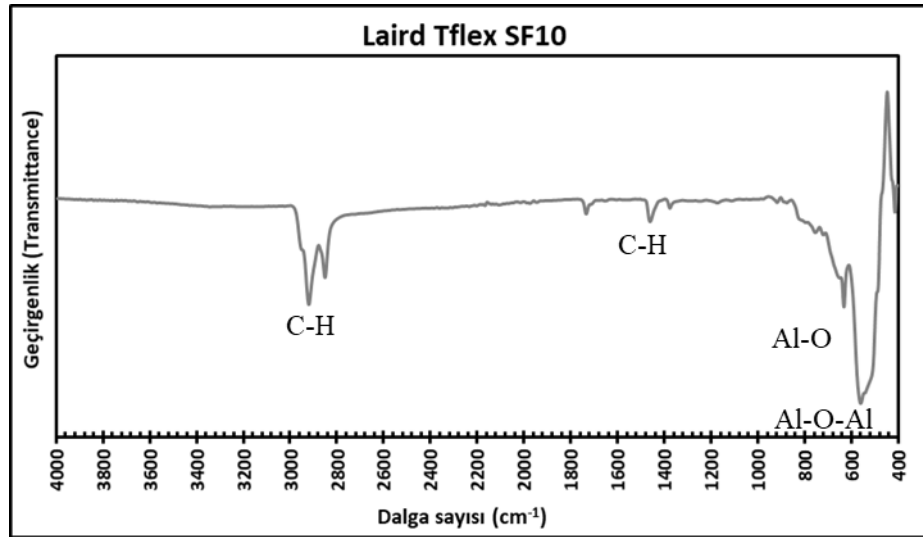
Görselde görüldüğü gibi Loctite 5952 ve Therm-a-gap 579 ısıl arayüz malzemelerine ait numunelerde daha önce yapılmış olan EDS analizinde de Si tespit edilmesi üzerine dalga sayısının yaklaşık 1000 civarında Si-O bağları, yaklaşık 2800-3000 aralığında C-H gerilmeleri ve 400-600 arasında yer alan metal bağlanma bölgelerinde değişimler gözlemlenmektedir. Her iki malzemenin EDS analizlerinde Si ve C varlığının tespit edilmesi

üzerine 700-800 dalga sayısı arası incelendiğinde yaklaşık 780 dalga sayısı civarında yer alan Si-C bağ yapısı ile SiC (silisyum karbür) varlığı gözlemlenmektedir.

Loctite 5952 ve Therm-a-gap 579 ısıl arayüz malzemesi numunelerinin FTIR analiz sonuçları Villahermosa ve Joseph [5]'in uzay aracı uygulamalarında kullanımı tercih edilen ısıl arayüz malzemelerinin gaz salınımları üzerine olan çalışmalarındaki kullanılan silikon bazlı numunenin ASTM E595 testi öncesindeki kızılötesi spektroskopisi analizi sonuçları ile neredeyse birebir uyumlu olduğu görülmektedir. Villahermosa ve Joseph [5]'in çalışma sonucunda yer alan metil polisiloksan yapısı ile uyumlu bağ yapıları Çizelge 9.4'de gözlemlenmektedir.

Çizelge 9.4. RTV 615 Malzemesinin Kızılötesi Spektroskopisi Analiz Sonucu

Tepe Pozisyonu (cm <sup>-1</sup> ) ve Şekli (s=keskin, m=orta)	Bağ Yapısı
1,011 (s)	-Si-O-
1,074 (m)	-Si-O-
1,259 (s)	-Si-CH <sub>3</sub>
1,420 (m)	-CH <sub>3</sub> / -CH <sub>2</sub> -
2,905 (s)	-CH <sub>2</sub> -
2,963 (s)	-CH <sub>3</sub>



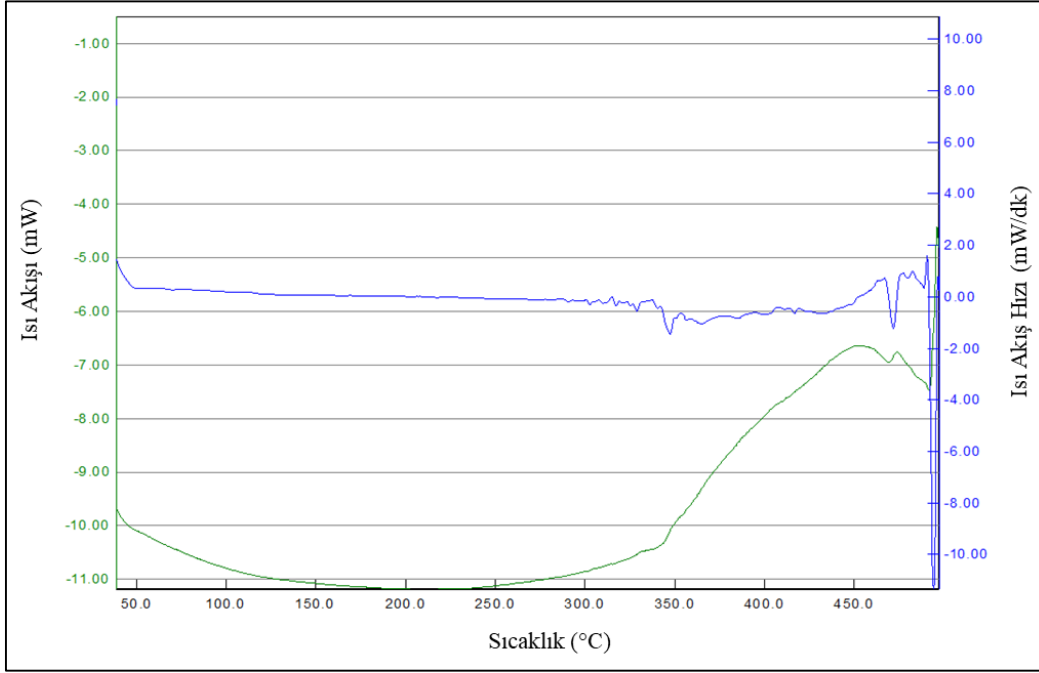
Şekil 9.7. Laird Tflex SF10 numune için FTIR analizi

Laird Tflex SF10 numunesine ait FTIR analizi grafiğine bakıldığında ise gene 2800-3000 arasında karbon-hidrojen gerilmeleri ve 1460 civarında karbon hidrojen bağlarını temsil

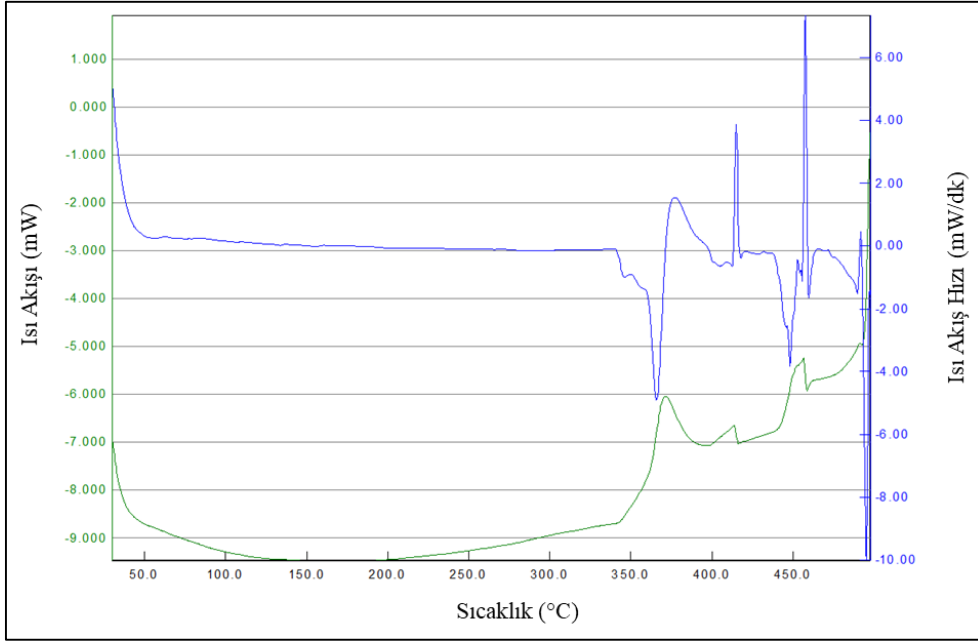
eden pik gözlemlenmektedir. EDS analizinde tespit edilen  $Al_2O_3$  kızılötesi spektroskopisinde Al-O gerilme ve Al-O-Al bükülme titreşimlerine karşılık gelen bölgelerde karakteristik yapısını göstermesi beklenir. Şekil 9.7’de  $400-500\text{ cm}^{-1}$  arasında Al-O-Al bükülme ve  $600-900\text{ cm}^{-1}$  arasında Al-O gerilme titreşimleri olduğu gözlemlenmektedir.

#### 9.4. Isıl Arayüz Malzemelerinin DTA/DSC Analizi

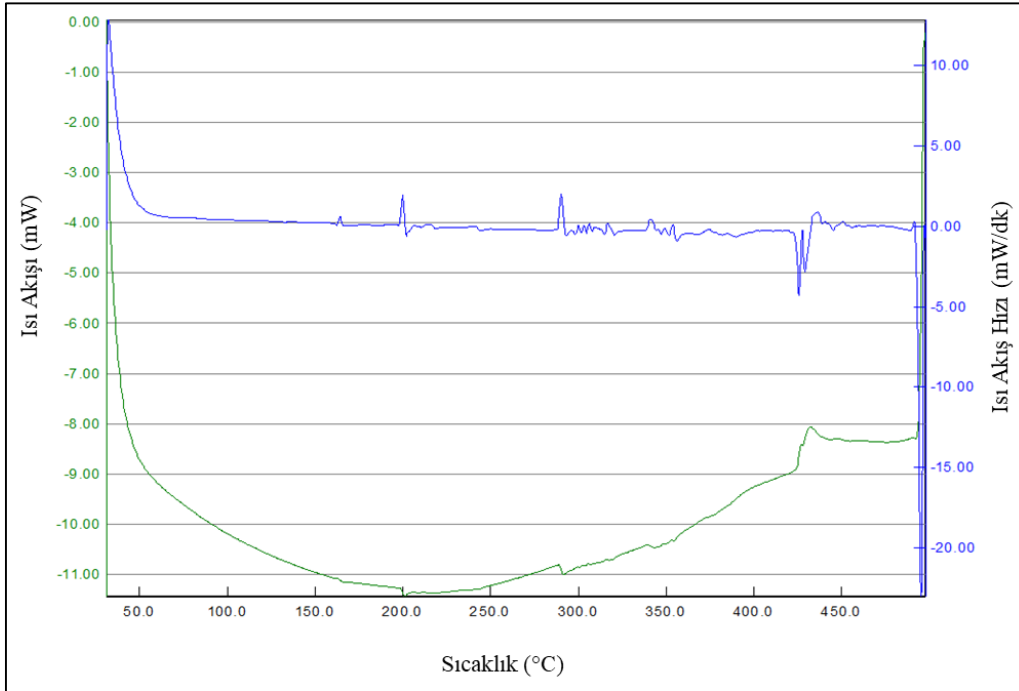
Isıl arayüz malzemelerinin DSC analiz çıktıları sırasıyla Laird Tflex SF10, Loctite 5952 ve Therm-a-gap 579 ısıl arayüz malzemelerine ait numuneler olmak üzere Şekil 9.8, Şekil 9.9 ve Şekil 9.10’da yer almaktadır. DSC analizi çıktısı endotermik aşağı yönlü ve ısı akışına karşın sıcaklık grafiği olarak görülmektedir.



Şekil 9.8. Laird Tflex SF10 Numunenin DSC Analizi



Şekil 9.9. Loctite 5952 Numunenin DSC Analizi



Şekil 9.10. Therm-a-gap 579 Numunenin DSC Analizi

Sonuçlar incelendiğinde ekzotermik reaksiyonların Laird Tflex SF10 numunesi için 180°C, Loctite 5952 malzemesinin numunesi için 140°C ve Therm-a-gap 579 malzemesinin numunesi için 200°C'de tamamlandığı gözlemlenmiştir. Endotermik reaksiyonlar ise sırası ile 240°C, 200°C ve 200°C'de başladığı gözlemlenmiştir.

Therm-a-gap 579 ısıl arayüz malzemesi numunesinin analizi detaylı incelendiğinde endotermik reaksiyon başlangıcından sonra bir ısı kaybı olduğu görülmektedir. Bu duruma faz değişimi, kirlilik veya ekzotermik bir bileşenin ortaya çıkması sebep olmuş olabilir. Numunelerin camsı geçiş sıcaklıklarına bakıldığında eğim değişiminin olduğu bölgede sıcaklık değerleri okunursa Loctite 5952 malzemesinin 250°C-300°C, Laird Tflex SF10 ve Therm-a-gap 579 malzemelerinin 300°C-350°C arasında olduğu görülmektedir. Numunelerin ısıl kapasitanslarına bakılacak olursa Therm-a-gap 579 malzemesi yaklaşık 450°C, Loctite 5952 yaklaşık 500°C ve Laird Tflex SF10 malzemesinin ise dengeye geldiği sıcaklık 500°C'nin üstünde görülmektedir.

### **9.5. Isıl Arayüz Malzemelerinin Isıl İletkenlik Performans Karşılaştırması**

Tübitak Uzay Teknolojileri ve Araştırma Enstitüsü bünyesinde bulunan iklimlendirme kabininde gerçekleştirilen testin ilk aşamasında üç farklı ısıl arayüz malzemesinin aynı kalınlık ve aynı bağlama kuvveti altında ısıl iletkenlik performanslarının ölçümü gerçekleştirilmiştir. Kabin sıcaklığı oda sıcaklığı olarak kabul edilen  $20\pm 2^\circ\text{C}$  sıcaklığa ayarlanmış olup numunelerin uygulandığı plaka sıcaklıklarının kabin ile dengeye gelebilmesi için beklenmiştir. Stabilizasyon sağlandıktan sonra güç ünitesinden komut verilerek ısıtıcılar aktif hale getirilerek plaka sıcaklıkları stabilizasyona ulaşana kadar beklenmiştir. Isıl arayüz malzemelerinin iletkenlik katsayı hesabında alt ve üst plaka üzerinde yer alan sıcaklık algılayıcılardan okunan sıcaklık değerleri plakaların her tarafında uniform ısı dağılımı olduğu varsayılarak analitik hesaplama dahil edilmiş olup ilgili çalışma zamandan bağımsız kararlı durum ve tek boyutlu akış olarak ele alınmıştır. Bölüm 8.2.3'den faydalanılarak ısıl arayüz malzemelerinin ısı iletkenlik katsayısı hesaplanmıştır.

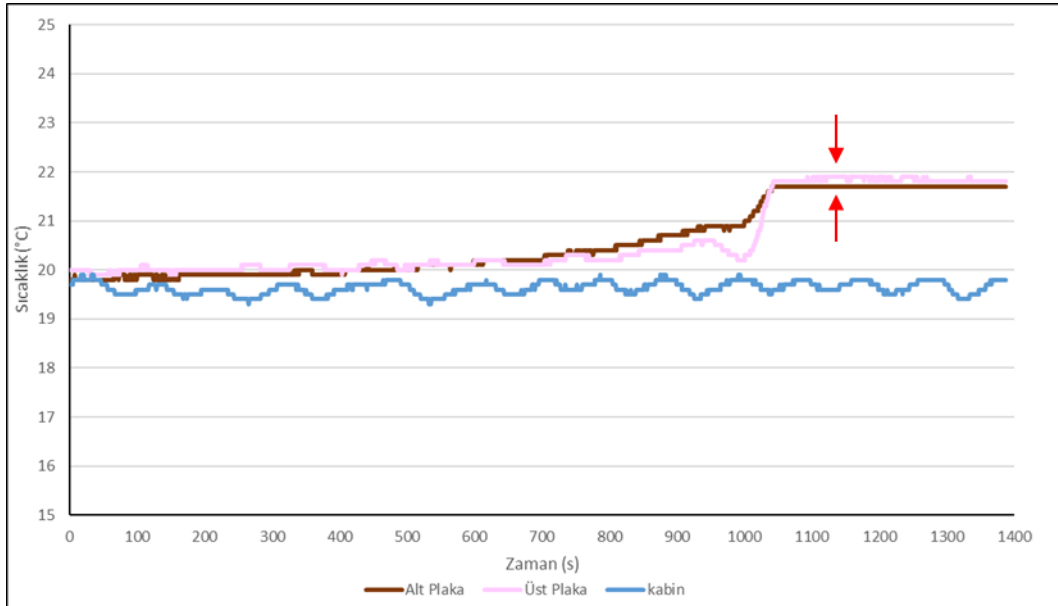
Test kabininin vakum ortamından oluşmaması ve içerisinde hava olması kaynaklı taşınım yolu ile ısı iletimi söz konusu olduğu gibi test kabinin fan ile çalışma prensibi kaynaklı doğal olmayan taşınım etkisinin de bulunmasından ötürü her bir test plaka düzeneğinin aynı sıcaklıkta olması beklenmemelidir.

Test sisteminde ekipmanı simüle etmesi planlanan plaka için ısıtıcı seçimi yapılırken güç ve sistem gerilimi değerleri sırasıyla 15 W ve 20V olacak şekilde hesaplama yapılmıştır. Kullanılan plakanın boyutları sınır koşul oluşturduğundan bölüm 8.2.1'de yer alan eşitlikler kullanılarak ısıtıcı boyu hesaplanmıştır. Isıtıcı boyu hesaplanırken tedarik ve maliyet

açısından tesis bünyesinde hali hazırda var olan K-28 tipi ısıtıcı kullanılmıştır. Bu hesaplamalar doğrultusunda Düzenek-1 için kullanılan  $60 \times 80 \text{ mm}^2$  boyutunda olan plaka için  $74 \text{ mm}$  ve  $60 \times 60 \text{ mm}^2$  boyutundaki plaka için  $43 \text{ mm}$  uzunluğunda ısıtıcı boyuna ihtiyaç duyulduğu hesaplanmıştır. Ancak hesaplanan bu boy ile ısıtıcıdan istenilen güç sağlanamadığı için güç değeri daha düşük gerilim seviyesi kullanılarak düşürülmüştür.

Test düzeneklerinde yer alan ısıl arayüz malzemelerinin ısı iletkenlik katsayı hesabında sistemin denge koşuluna ulaştığı durum ve plaka ile ısıl arayüz malzemesi arasında boşluk kalmadığı mükemmel temas olduğu varsayılarak hesaplama yapılmıştır. İletkenlik katsayısı hesabı yapılırken plakaların yalıtılmış ortamda olduğu varsayılarak ışıma ve taşınımın etkisi ihmal edilerek sadece iletim yolu ile ısı transferi olduğu değerlendirilmiştir. Hesaplanan iletkenlik katsayılarının karşılaştırması ihmaller doğrultusunda sayısal veriler üzerinden değil boyutsal olarak yapılmalıdır.

Çizelge 8.4’de belirtilmiş olan Düzenek-1’de yer alan bakır plakalar arasında  $0.5 \text{ mm}$  kalınlıkta ve  $5 \times 5 \text{ cm}^2$  ölçülerinde uygulanmış pembe numunenin Şekil 9.11’de test sonuçları yer almaktadır.

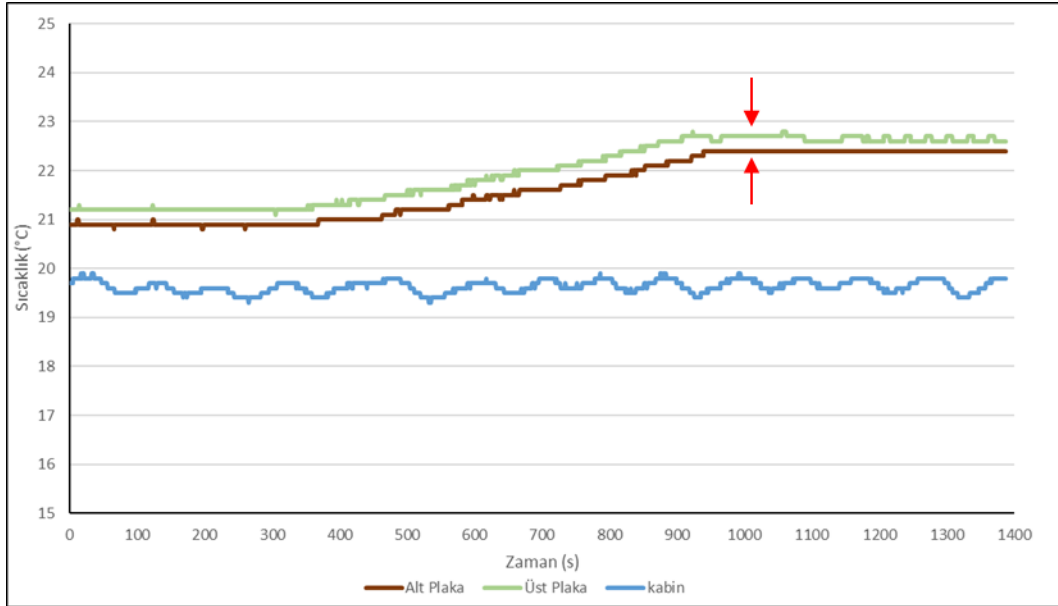


Şekil 9.11. Therm-a-gap 579 numune sıcaklık zaman grafiği

Numunenin ısı iletkenlik katsayısı Eş. 8.6 yardımıyla üst plakanın dengeye ulaştığı durumdaki sıcaklık değerleri seçilerek gerçekleştirilmiştir. Sisteme giren ısı ısıtıcının

yaydığı güç ile aynı kabul edilip, 74 mm olarak hazırlanmış olan ısıtıcı uzunluğunun gücü 3.84 W olarak ayarlanmış olup hat gerilimi 10 V olarak uygulanmıştır. Denge konumunda üst plaka sıcaklığı 21.9°C iken alt plaka sıcaklığı 21.7°C olarak sıcaklık algılayıcı tarafından okunmaktadır. Bu bilgiler doğrultusunda numunenin ısı iletkenlik katsayısı Eş. 8.6'da yer alan ifade ile 3.84 W/mK olarak hesaplanmıştır.

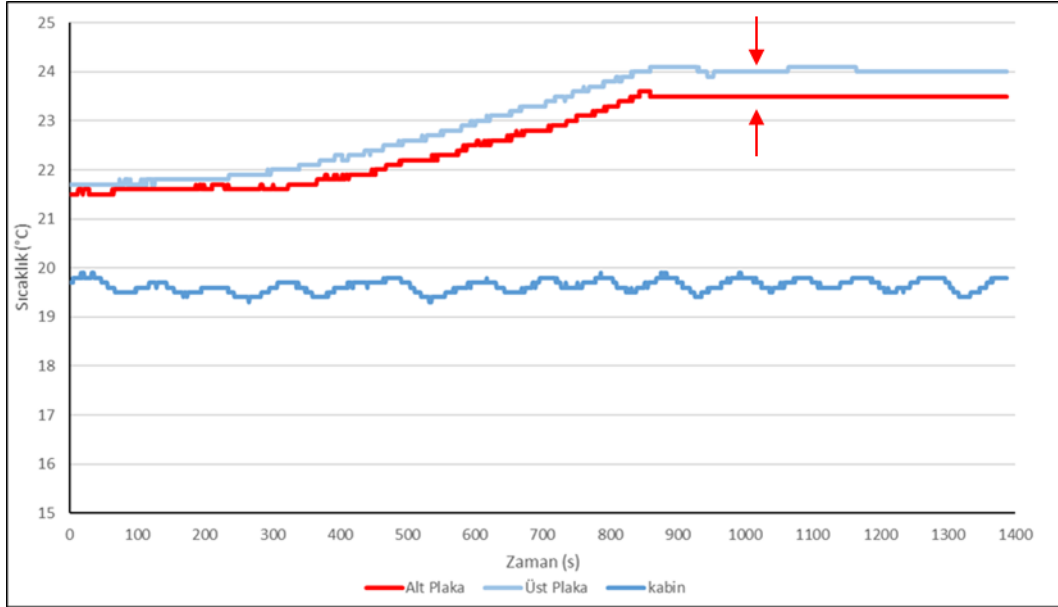
Çizelge 8.4'de belirtilmiş olan Düzenek-1'de yer alan bakır plakalar arasına 0.5 mm kalınlıkta ve 5x5 cm<sup>2</sup> ölçülerinde uygulanmış gri numunenin Şekil 9.12'de test sonuçları yer almaktadır.



Şekil 9.12. Laird Tflex SF10 numune sıcaklık zaman grafiği

Numunenin ısı iletkenlik katsayısı Eş. 8.6 yardımıyla üst plakanın dengeye ulaştığı durumdaki sıcaklık değerleri seçilerek gerçekleştirilmiştir. Sisteme giren ısı ısıtıcının yaydığı güç ile aynı kabul edilip, 74 mm olarak hazırlanmış olan ısıtıcı uzunluğunun gücü 3.84 W olarak ayarlanmış olup hat gerilimi 10 V olarak uygulanmıştır. Denge konumunda üst plaka sıcaklığı 22.7°C iken alt plaka sıcaklığı 22.4°C olarak sıcaklık algılayıcı tarafından okunmaktadır. Bu bilgiler doğrultusunda numunenin ısı iletkenlik katsayısı Eş. 8.6'da yer alan ifade ile 2.56 W/mK olarak hesaplanmıştır.

Çizelge 8.4’de belirtilmiş olan Düzenek-1’de yer alan bakır plakalar arasında 0.5 mm kalınlıkta ve  $5 \times 5 \text{ cm}^2$  ölçülerinde uygulanmış Loctite 5952 numunesinin Şekil 9.13’de test sonuçları yer almaktadır.

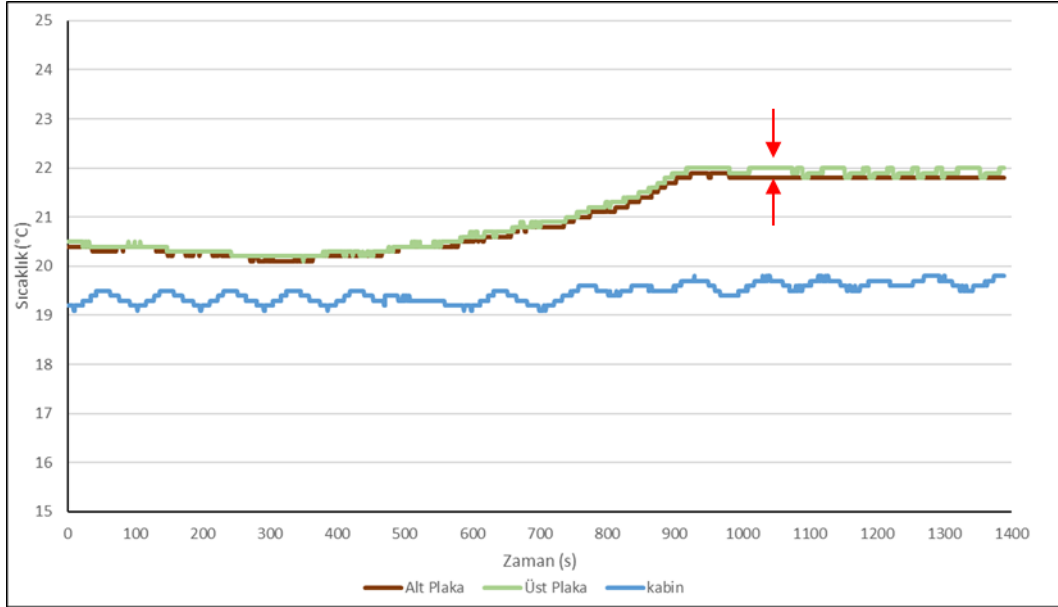


Şekil 9.13. Loctite 5952 numune için sıcaklık zaman grafiği

Numunenin ısı iletkenlik katsayısı Eş. 8.6 yardımıyla üst plakanın dengeye ulaştığı durumdaki sıcaklık değerleri seçilerek gerçekleştirilmiştir. Sisteme giren ısı ısıtıcının yaydığı güç ile aynı kabul edilip, 74 mm olarak hazırlanmış olan ısıtıcı uzunluğunun gücü 3.84 W olarak ayarlanmış olup hat gerilimi 10 V olarak uygulanmıştır. Denge konumunda üst plaka sıcaklığı  $24^{\circ}\text{C}$  iken alt plaka sıcaklığı  $23.5^{\circ}\text{C}$  olarak sıcaklık algılayıcı tarafından okunmaktadır. Bu bilgiler doğrultusunda numunenin ısı iletkenlik katsayısı Eş. 8.6’da yer alan ifade ile  $1.54 \text{ W/mK}$  olarak hesaplanmıştır.

Daha önceki uzay kullanım ve edinilmiş bilgiler doğrultusunda ısılı arayüz malzemelerinin belirli bir kalınlıktan sonra performanslarında düşüş yaşanmaktadır. Laird Tflex SF10 numunesinin açık olarak paylaşılan teknik veri formunda 4 mm kalınlığa kadar performansında ciddi düşüş yaşanmadan kullanılabilceği belirtilmektedir. Bu doğrultuda testin ikinci aşamasında Çizelge 8.5’de belirtilmiş olan alüminyum plakalar arasında uygulanan Laird Tflex SF10 ısılı arayüz malzemesinin farklı kalınlıklarda ve farklı yüzey kuvveti uygulandığı durumda ısı iletkenlik performansının değişimi gözlemlenmiştir.

Çizelge 8.5’de belirtilmiş olan Düzenek-2’de yer alan 0.8 Nm tork ile plaka bağlantıları yapılmış alüminyum plakalar arasında 0.5 mm kalınlıkta ve 5x5 cm<sup>2</sup> ölçülerinde uygulanmış Laird Tflex SF10 numunesinin test sonuçları Şekil 9.14’de yer almaktadır.



Şekil 9.14. Laird Tflex SF10 numune 0.5 mm kalınlık 0.8Nm uygulama kuvveti

Numunenin ısı iletkenlik katsayısı Eş. 8.6 yardımıyla üst plakanın dengeye ulaştığı durumdaki sıcaklık değerleri seçilerek gerçekleştirilmiştir. Sisteme giren ısı ısıtıcının yaydığı güç ile aynı kabul edilip, 43 mm olarak hazırlanmış olan ısıtıcı uzunluğunun gücü 3.53 W olarak ayarlanmış olup hat gerilimi 7.3 V olarak uygulanmıştır. Denge konumunda üst plaka sıcaklığı 22°C iken alt plaka sıcaklığı 21.8°C olarak sıcaklık algılayıcı tarafından okunmaktadır. Bu bilgiler doğrultusunda numunenin ısı iletkenlik katsayısı Eş. 8.6’da yer alan ifade ile 3.53 W/mK olarak hesaplanmıştır.

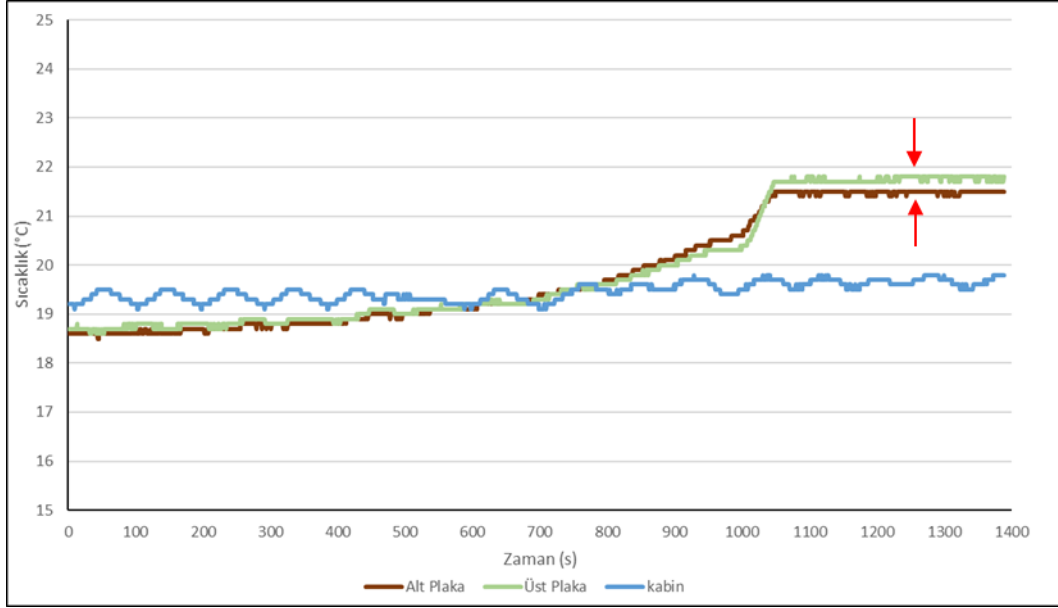
Çizelge 8.5’de belirtilmiş olan Düzenek-2’de yer alan 1 Nm tork ile plaka bağlantıları yapılmış alüminyum plakalar arasında 0.5 mm kalınlıkta ve 5x5 cm<sup>2</sup> ölçülerinde uygulanmış olan Laird Tflex SF10 numunesinin Şekil 9.15’de test sonuçları yer almaktadır.



Şekil 9.15. Laird Tflex SF10 numune 0.5 mm kalınlık 1Nm uygulama kuvveti

Numunenin ısı iletkenlik katsayısı Eş. 8.6 yardımıyla üst plakanın dengeye ulaştığı durumdaki sıcaklık değerleri seçilerek gerçekleştirilmiştir. Sisteme giren ısı ısıtıcının yaydığı güç ile aynı kabul edilip, 43 mm olarak hazırlanmış olan ısıtıcı uzunluğunun gücü 3.53 W olarak ayarlanmış olup hat gerilimi 7.3 V olarak uygulanmıştır. Denge konumunda üst plaka sıcaklığı 21.8°C iken alt plaka sıcaklığı 21.7°C olarak sıcaklık algılayıcı tarafından okunmaktadır. Bu bilgiler doğrultusunda numunenin ısı iletkenlik katsayısı Eş. 8.6'da yer alan ifade ile 7.06 W/mK olarak hesaplanmıştır.

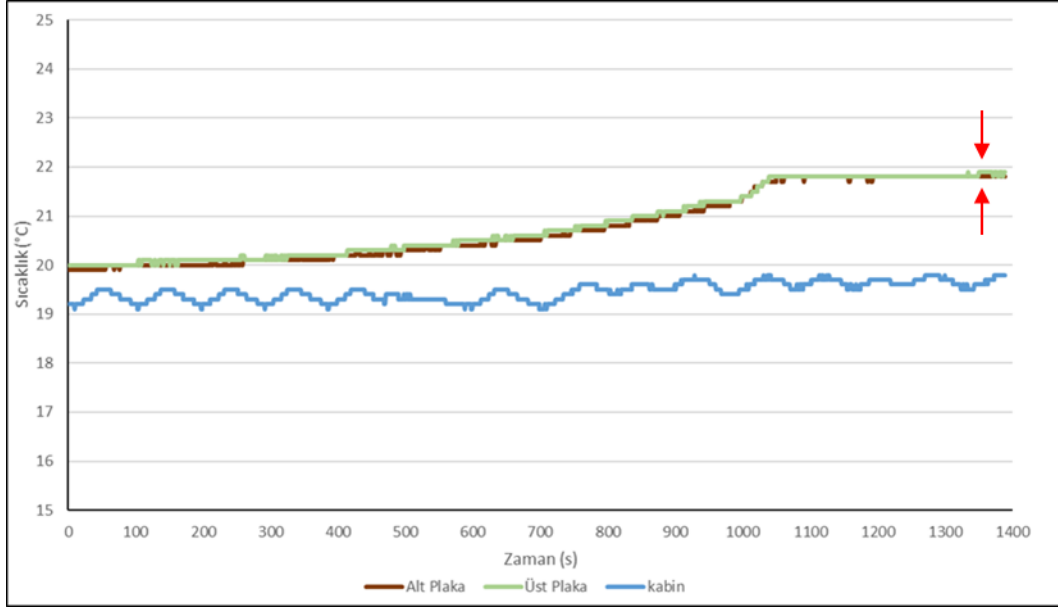
Çizelge 8.5'de belirtilmiş olan Düzenek-2'de yer alan 0.8 Nm tork ile plaka bağlantıları yapılmış alüminyum plakalar arasına 1.5 mm kalınlıkta ve 5x5 cm<sup>2</sup> ölçülerinde uygulanmış olan Laird Tflex SF10 numunesinin Şekil 9.16'de test sonuçları yer almaktadır.



Şekil 9.16. Laird Tflex SF10 numune 1.5 mm kalınlık 0.8Nm uygulama kuvveti

Numunenin ısı iletkenlik katsayısı Eş. 8.6 yardımıyla üst plakanın dengeye ulaştığı durumdaki sıcaklık değerleri seçilerek gerçekleştirilmiştir. Sisteme giren ısı ısıtıcının yaydığı güç ile aynı kabul edilip, 43 mm olarak hazırlanmış olan ısıtıcı uzunluğunun gücü 3.53 W olarak ayarlanmış olup hat gerilimi 7.3 V olarak uygulanmıştır. Denge konumunda üst plaka sıcaklığı 21.8°C iken alt plaka sıcaklığı 21.5°C olarak sıcaklık algılayıcı tarafından okunmaktadır. Bu bilgiler doğrultusunda numunenin ısı iletkenlik katsayısı Eş. 8.6'da yer alan ifade ile 2.35 W/mK olarak hesaplanmıştır.

Çizelge 8.5'de belirtilmiş olan Düzenek-2'de yer alan 1 Nm tork ile plaka bağlantıları yapılmış alüminyum plakalar arasına 1.5 mm kalınlıkta ve 5x5 cm<sup>2</sup> ölçülerinde uygulanmış olan Laird Tflex SF10 numunesinin Şekil 9.17'de test sonuçları yer almaktadır.



Şekil 9.17. Laird Tflex SF10 numune 1.5 mm kalınlık 1Nm uygulama kuvveti

Numunenin ısı iletkenlik katsayısı Eş. 8.6 yardımıyla üst plakanın dengeye ulaştığı durumdaki sıcaklık değerleri seçilerek gerçekleştirilmiştir. Sisteme giren ısı ısıtıcının yaydığı güç ile aynı kabul edilip, 43 mm olarak hazırlanmış olan ısıtıcı uzunluğunun gücü 3.53 W olarak ayarlanmış olup hat gerilimi 7.3 V olarak uygulanmıştır. Denge konumunda üst plaka sıcaklığı 21.9°C iken alt plaka sıcaklığı 21.8°C olarak sıcaklık algılayıcı tarafından okunmaktadır. Bu bilgiler doğrultusunda numunenin ısı iletkenlik katsayısı Eş. 8.6'da yer alan ifade ile 7.06 W/mK olarak hesaplanmıştır. Şekil 9.17'da da görüldüğü gibi üst plaka ile alt plaka sıcaklıkları aynı olduğu gözlemlenmektedir. Ancak ısıl arayüz malzemesinin ısı iletkenlik katsayısını ısı akışını gözlemleyerek hesaplamak için sıcaklık farkına ihtiyaç duyulmaktadır. Bu sebeple ilgili hesaplamayı yapabilmek adına sıcaklık farkının gözlemlendiği noktadaki plaka sıcaklık değerleri hesaplamaya dahil edilmiştir.



## 10. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

### Sonuçlar

Bu çalışmada Laird Tflex SF10, Loctite Stycast 5952 ve Therm-a-gap 579 ısı arayüz malzemelerinin tersine mühendislik yöntemi ile iç yapı ve elemental karakterizasyon analizi çalışmaları yapılmış olup ısı performansları karşılaştırılmıştır.

- İklimlendirme kabini içerisinde Laird Tflex SF10, Loctite 5952 ve Therm-a-gap 579 ısı arayüz malzemelerinden 5x5 cm<sup>2</sup> ölçülerinde ve 0.5 mm kalınlığındaki numuneler aynı ölçülerdeki plakalar arasına uygulanarak eşit yüzey basıncı altında oda sıcaklığında 20±2°C kabin ortamında ısı performans testleri gerçekleştirilmiştir. Test sırasında ısıtıcılar aktif hale getirilmeden önce plakaların ve kabin sıcaklığının dengeye gelmesi beklenmiştir. Denge durumuna ulaşıldıktan sonra ısıtıcılar aktif hale getirilmiştir ve plaka sıcaklıkları denge durumuna ulaştığında üç ısı arayüz malzemesinden alınan numunelerin ısı iletim katsayısı Bölüm 8.2.3 altındaki Eş. 8.6 denklemi ile hesaplanmıştır.
- Her üç ısı arayüz malzemesinden alınan numunelerin ısı iletkenlik katsayıları zamandan bağımsız kararlı durum ve tek yönlü akış varsayımı ile hesaplanmıştır. En iyi ısı performansın Therm-a-gap 579 ve Laird Tflex SF10 ısı arayüz malzemelerine ait olduğu ve en kötü ısı performansın ise Loctite 5952 malzemesine ait olduğu sonucu görülmektedir. Isı arayüz malzemelerinin ısı performansları uygulama kalınlığı ile ters orantılıdır. ECSS (European Cooperation for Space Standardization) kaynaklarında ve daha önceki uygulamalardan edinilmiş bilgiler doğrultusunda Therm-a-gap 579 numunesinin en fazla 1.5 mm kalınlığına kadar uygulanabildiği ve uygulama kalınlığı arttıkça performansında düşüş yaşandığı tespit edilmiştir. Loctite 5952 numunesinin ise genelde 0.1 mm kalınlıkta uygulandığı ve maksimum 0.3 mm kalınlığa kadar kullanılabildiği bilgisi yer almaktadır. Bu bilgiler doğrultusunda Laird Tflex SF10 malzemesinin katalog bilgilerinde yer alan 4 mm uygulama kalınlığında bile yüksek ısı performansına sahip olması dikkat çekici olup ısı performans testinin ikinci aşamasının gerçekleşmesinde kullanılmıştır.
- Isı performans testinin ikinci aşamasında iklimlendirme kabini içerisinde aynı ortam şartları altında 20±2°C oda sıcaklığına sahip kabin ortamında ve kararlı durum zamandan bağımsız tek boyutta akış varsayımı ile Laird Tflex SF10 malzemesinin 5 x 5 cm<sup>2</sup> boyutlarında, 0.5mm ve 1.5mm uygulama kalınlığı altında farklı yüzey basınçları

uygulanarak ısı performansları incelenmiştir. Testin sonunda Eş. 8.6 ile uygulama kalınlığı ve yüzey basıncı değişkeninin olduğu durumda Laird Tflex SF10 ısı arayüz malzemesinin ısı iletkenlik katsayısı hesaplanmıştır. Test sonuçlarına göre uygulama kalınlığı arttığında ısı arayüz malzemesinin ısı performansında bir miktar düşüş yaşanmıştır ancak ısı performans testinin ilk aşamasında gerçekleştirilen konfigürasyonunda değerlendirilen ısı arayüz malzemelerine göre performansının daha iyi olduğu ve yüzey basıncı arttıkça ısı performans değerinde artış gözlemlenmiştir. Laird Tflex SF10 ısı arayüz malzemesinin 1.5 mm uygulama kalınlığı ve 1Nm yüzey basıncı altında malzemenin ısı iletkenlik katsayısı tam olarak hesaplanamamış ancak değerlendirme yapılabilmesi adına sıcaklık farkının meydana geldiği nokta hesaplamalara dahil edilmiştir. Bunun sebepleri arasında kabin içerisindeki konumu, ısıtıcı gücü ve gerilim değerine bağlı olarak ısıtıcı kaybı veya sıcaklık algılayıcıların değer okumasında yaşanan problemlerden kaynaklı olabileceği değerlendirilmektedir.

- Uydularda kullanılacak olan ısı arayüz malzemelerinin uzay uyumlu ve düşük gaz salınımlı olarak tercih edilmeleri gerekmektedir. Literatür araştırmalarına göre hali hazırda kullanılan ısı arayüz malzemelerinin silikon bazlı olduğu bilinmektedir. Uzay uygulamalarında kullanılan malzemeler vakum ve sıcaklık dalgalanmaları gibi çevresel koşullar altında bazı bileşenlerinin buharlaşarak gaz haline geçmesine ve yüzeylerde yeniden yoğunlaşarak kirlenmeye yol açmasına neden olabilir. Bu durum, özellikle hassas optik bileşenler, güneş panelleri ve elektronik cihazlar için ciddi sorunlar yaratabilir. Silikon malzemeler gaz salınımı açısından kritik olabilmektedir. Bu sebeple düşük gaz salınımlı silikon bazlı malzeme kullanımı tercih edilmektedir.
- Tersine mühendislik yönteminden faydalanılarak kızılötesi spektroskopisi analizi kullanılarak karakterizasyonu gerçekleştirilen üç farklı ısı arayüz malzemelerinden Therm-a-gap 579 ve Loctite 5952 ısı arayüz malzemelerinin bünyelerinde Si ve O atomlarından oluşan metil polisioksan yapı tespit edilmiştir. Bu yapı, yapıştırıcı, ısı arayüz ve kaplama malzemeleri ile ısı iletkenliği gereken bileşenlerde kullanılmaktadır. Laird Tflex SF10 malzemesinin ise ağırlıkça C yüzdesi yüksek çıkmış ve bünyesinde yoğun olarak Al, O atomlarına rastlanmıştır.
- XRD analizi ile her üç ısı arayüz malzemesinin kristal yapıları incelenmiş olup hepsinde  $Al_2O_3$  varlığı tespit edilirken SEM ve EDS analizlerinde tespit edilen atomlar doğrultusunda Therm-a-gap 579 ve Loctite 5952 ısı arayüz malzemelerinde  $SiO_2$  varlığı görülmektedir.

- Bu çalışmada kullanılan Laird Tflex SF10 ısııl arayüz malzemesinin uygulama kalınlığı açısından elverişliliğinin yanısıra EDS analizi ve kızılötesi spektroskopisi analizi sonucunda bünyesinde diğđer malzemelere kıyasla Si barındırmadığı gözlemlenmesi üzerine gaz salınımı ve kirlilik açısından kullanımı tercih edilebilir.

### Öneriler

- Bu çalışmada test düzeneği olarak maliyet etkisinden kaynaklı vakum çemberi kullanılmayıp iklimlendirme kabiniinde test gerçekleştirilmiştir. Test verilerinde katalog bilgilerine daha yakın sonuçlar elde edilebilmesi adına testin vakum ortamında gerçekleştirilmesi veya iklimlendirme kabini ile gerçekleşmesi durumunda fan etkisinin minimum olabileceği yerleşim planında, test düzeneğinin ortamdandan yalıtılmış şekilde yerleşiminin yapılması gerekmektedir.
- Isıl performans testinin gerçekleştirilmesinde ekipmanı simüle etmesi açısından ısıtıcı seçimi önem arz etmektedir. Ekonomik ve tedarik süreçlerinin uzun olması açısından Enstitü bünyesinde hali hazırda bulunan clayborn tipi ısıtıcı test düzeneğinde kullanılmıştır. İleriki çalışmalarda ısıtıcı seçiminde plakaların sıcaklık dengesine gelebilmesi açısından ve sıcaklık farklarını daha net okuyabilmek adına uygun güç ve aralıkta ısıtıcı seçimi yapılacak olup iletkenlik katsayı hesabında plakalar ile ısııl arayüz malzemesi arasında oluşan temas direnci de hesaplamalara dahil edilecektir.
- Çalışmanın bir diğđer yüzü olan malzeme karakterizasyonu fazında ise yeni atomlar eklenerek ısııl performansın yanısıra elektriksel özellikleri de iyileştirebilmek adına yeni malzeme üretimi üzerine çalışılacak olup, yeni üretilen malzemenin uzay uyumlu olması için gerekli testlerin yapılması, gaz salınım ve kirlilik özellikleri üzerine çalışmalar gerçekleştirilmesi planlanmaktadır.



## KAYNAKLAR

1. Sponagle, B., Groulx, D. (2012). *Characterization of thermal interface materials using a steady state experimental method*. ASME 2012 Heat Transfer Summer Conference, Puerto Rico, 641–648.
2. Wang, K., Chen, M., Lei, G., Wang, X. (2021). Analysis of Physical-Chemical Properties and Space Environment Adaptability of Two-Component RTV Silicone Rubber. *ACS Omega*, 6(43), 28477–28484.
3. Kumar, V., Kumar, A., Song, M., Lee, D. J., Han, S. S., Park, S. S. (2021). Properties of silicone rubber-based composites reinforced with few-layer graphene and iron oxide or titanium dioxide. *Polymers*, 13(10), 400-418.
4. Chen, C., He, Y., Liu, C., Xie, H., Yu, W. (2020). Comprehensive excellent performance for silicone-based thermal interface materials through the synergistic effect between graphene and spherical alumina. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 31(6), 4642–4649.
5. Villahermosa, R. M., Joseph, P. L. (2004). *Characterization of outgassed contaminants from polymeric spacecraft materials*. Optical Systems Degradation, Contamination, and Stray Light: Effects, Measurements, and Control, Washington State, 147-155.
6. Esfahani, A., Sedghi, V., Karimian, S., Moeini, E., Esfahani, A. G., Sedghi, V., Karimian, S. M. (2013). *Empirical evaluation of thermal contact resistance of bolted joint configurations fitted with various interface materials under vacuum conditions*. 64th International Astronautical Congress, Beijing, 47-57.
7. Glasgow, S. D., Kittredge, K. B. Marshall Space Center. (2003). Performance Testing of Thermal Interface Filler Materials in a Bolted Aluminum Interface Under Thermal/Vacuum Conditions. NASA. Alabama. 1-11.
8. Smith, R., Peters, C., Inomata, H. (2013). *In Supercritical Fluids Science and Technology*. (1st ed.). Amsterdam: Elsevier Science, 557-615.
9. Cengel, Y. A. (2015). *Heat Transfer A Practical Approach*. (5th ed.). New York: McGraw-Hill, 67-77, 379-385, 767-782.
10. Meyer, R. X. (1999). *Elements of Space Technology for Aerospace Engineers* (1st ed.). California: Academic Press, 269-289.
11. Karam, R. D. (1998). *Satellite Thermal Control for Engineers* (1st edition). Virginia: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 13-87.

12. Gilmore, D. G., Donabedian, Martin. (2003). *Spacecraft thermal control handbook*. (2nd ed.). California: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 21-67, 139-159.
13. Sundu, H. (2020). *Bir Yer Gözlem Uydusunun Detaylı Isıl Tasarımı ve Analizi*. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
14. İnternet: Gezegenlerin Güneşe Göre Konumu. URL: <https://bilimgenc.tubitak.gov.tr/makale/gunes-sistemini-taniyalim-neptun/> Son Erişim Tarihi: 12.11.2024.
15. Brown, C. D. (2002). *Elements of Spacecraft Design for Aerospace Engineers*. (education series.). Washington: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 373-406.
16. Wertz, J. Richard., Larson, W. J. (1999). *Space mission analysis and design. Microcosm*. (3rd ed.). California: Microcosm Press, 428-459.
17. Cengel, Y. A. (2003). *Heat Transfer A Practical Approach*. (2nd ed.). New York: McGraw-Hill, 785-800.
18. İnternet: Termistör. URL: <https://www.direnc.net/ttc05103jsy-ntc-termistor-10k-5/> Son Erişim Tarihi: 12.11.2024.
19. Finckenor, M. M. (Marshall Space Flight Center). (1999). Multilayer Insulation Material Guidelines. NASA. Alabama. 9-18.
20. Jiao, Z., Jiang, L., Sun, J., Huang, J., Zhu, Y. (2019). *Outgassing Environment of Spacecraft: An Overview*. Materials Science and Engineering, 611(1), 200-212.
21. Pisacane, V. L., Moore, R. C. (2005). *Fundamentals of Space Systems*. (2nd ed.). New York: Oxford University Press, 423-440.
22. Hallmann, W., Ley, W. (2019). *Handbuch der Raumfahrttechnik*. (5th ed.). Munich: Carl Hanser Verlag, 305-313.
23. İnternet: Spacecraft Thermal Radiator. URL: <https://www.aascworld.com/portfolio/thermal-radiator/> Son Erişim Tarihi: 12.11.2024.
24. Shukla, K. N. (2015). Heat Pipe for Aerospace Applications an Overview. *Journal of Electronics Cooling and Thermal Control*, 05(01), 1–14.
25. Akhtar, K., Khan, S. A., Khan, S. B., Asiri, A. M. (2018). *Handbook of Materials Characterization*. Cham. Springer International Publishing. 113-147.

26. İnternet: Taramalı Elektron Mikroskopu Çalışma Prensi. URL:<https://www.acikbilim.com/2014/02/dosyalar/daha-yakin-olmak-icin-elektron-mikroskoplari-2.html>/ Son Erişim Tarihi: 13.11.2024.
27. Goldstein, J. I., Newbury, D. E., Echlin, P., Joy, D. C., Lyman, C. E., Lifshin, E., Linda Sawyer, L. and Michael, J. (2003). *Scanning electron microscopy and x-ray microanalysis* (3rd ed.). New York: Plenum Press. 21-60.
28. Mohammed, A. and Abdullah, A. (2018). *Scanning Electron Microscopy (SEM): A Review*. International Conference on Hydraulics and Pneumatics - HERVEX, Baile Govora, 77-85.
29. Jenkins, R. and Vries, J. L. (1982). *Practical X-Ray Spectrometry*. (2nd ed.). New York: Springer New York, 1-46.
30. Khan, S. A., Khan, S. B., Khan, L. U., Farooq, A., Akhtar, K. and Asiri, A. M. (2018). *Handbook of Materials Characterization*. Cham. Springer International Publishing, 317-344.
31. İnternet: Bhadeshia, H.K.D.H. (2002). Thermal analysis techniques and differential thermal analysis. Material Science and Metallurgy. URL: <https://www.phase-trans.msm.cam.ac.uk/2002/Thermal1.pdf>/ Son Erişim Tarihi:13.11.2024.
32. İnternet: Diferansiyel Taramalı Kalorimetri (DSC). URL: <https://www.hitachi-hightech.com/global/en/knowledge/analytical-systems/thermal-analysis/basics/dsc.html>/ Son Erişim Tarihi: 13.11.2024.
33. İnternet: Isıl Arayüz Malzemesi Laird Tflex SF10 Katalog Verileri. URL: <https://www.laird.com/sites/default/files/2023-11/A18314-00%20Tflex%20SF10%20Data%20Sheet%208-21-23.pdf>/ Son Erişim Tarihi: 13.11.2024.
34. İnternet: Polimerik Isıl Arayüz Malzemesi Loctite 5952 Katalog Verileri. URL: [https://www.henkel-adhesives.com/tr/tr/urunler/encapsulants/loctite\\_stycast\\_5952-10.html](https://www.henkel-adhesives.com/tr/tr/urunler/encapsulants/loctite_stycast_5952-10.html)/ Son Erişim Tarihi: 13.11.2024.
35. İnternet: Polimerik Isıl Arayüz Malzemesi Therm-a-gap 579 Katalog Verileri. URL: <https://ph.parker.com/us/en/product-list/therm-a-gap-579-thermally-conductive-gap-filler-pads/> Son Erişim Tarihi: 13.11.2024.
36. İnternet: Clayborn Heater Katalog Verileri. URL: <https://dpstar.com.sg/product/adhesive-heat-electrical-resistance-heat-tape/> Son Erişim Tarihi: 13.11.2024.

37. Azmi, M. A., Yahya, S. M., Ahmad, S., Mahzan, S., Taib, M., Rahman, H. A., Taib, H. (2018). Effect of Silica (SiO<sub>2</sub>) Filler on Thermal stability of polysiloxane Composites. *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences Journal Homepage*, 48, 117–124.
38. Liu, H., Ning, G., Gan, Z., Lin, Y. (2008). Emulsion-based synthesis of unaggregated, spherical alpha alumina. *Materials Letters*, 62(10–11), 1685–1688.



*Gazili olmak ayrıcalıktır*