



**(%96,5-x)Sn-%2Ag-%0,5Cu-%1Bi-%xAI LEHİM  
ALAŞIMLARININ ARAYÜZEY ISLATMA VE  
FİZİKSEL ÖZELLİKLERİNİN GELİŞTİRİLMESİ**

**2024  
DOKTORA TEZİ  
FİZİK**

**Serkan OGUZ**

**Tez Danışmanı  
Doç. Dr. Ahmet Mustafa ERER**

**(%96,5-x)Sn-%2Ag-%0,5Cu-%1Bi-%xAI LEHİM ALAŞIMLARININ  
ARAYÜZEY ISLATMA VE FİZİKSEL ÖZELLİKLERİNİN  
GELİŞTİRİLMESİ**

**Serkan OGUZ**

**Tez Danışmanı**

**Doç. Dr. Ahmet Mustafa ERER**

**T.C.**

**Karabük Üniversitesi**

**Lisansüstü Eğitim Enstitüsü**

**Anabilim Dalınız Anabilim Dalında**

**Doktora Tezi**

**Olarak Hazırlanmıştır**

**KARABÜK**

**Haziran 2024**

Serkan OGUZ tarafından hazırlanan “(%96,5-x)Sn-%2Ag-%0,5Cu-%1Bi-%xAl LEHİM ALAŞIMLARININ ARAYÜZEY ISLATMA VE FİZİKSEL ÖZELLİKLERİNİN GELİŞTİRİLMESİ ” başlıklı bu tezin Doktora Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım

Doç. Dr. Ahmet Mustafa ERER .....

Tez Danışmanı, Fizik Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından Oy Birliği ile Fizik Anabilim Dalında Doktora tezi olarak kabul edilmiştir. 11/06/2024

Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)

İmzası

Başkan: Prof. Dr. Kadir DEMİR (ZBEÜ)

.....

Üye : Prof. Dr. Yunus TÜREN (NEÜ)

.....

Üye : Prof. Dr. Necla ÇAKMAK (KBÜ)

.....

Üye : Doç. Dr.Hakan ALICI (ZBEÜ)

.....

Üye : Doç. Dr.Ahmet Mustafa ERER (KBÜ)

.....

Doç. Dr. Zeynep ÖZCAN

.....

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

*Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu; ayrıca bu kuralların ve ilkelerin gerektirdiği şekilde, bu çalışmadan kaynaklanmayan bütün atıfları yaptığımı beyan ederim.”*

Serkan OGUZ

## ÖZET

Doktora Tezi

**(%96,5-x)Sn-%2Ag-%0,5Cu-%1Bi-%xAI LEHİM ALAŞIMLARININ  
ARAYÜZEY ISLATMA VE FİZİKSEL ÖZELLİKLERİNİN  
GELİŞTİRİLMESİ**

Serkan OGUZ

Karabük Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Fizik Anabilim Dalı

Tez Danışmanı:

Doç. Dr. Ahmet Mustafa ERER

Haziran 2024, 136 sayfa

Teknolojik ürünler, hayatımızın vazgeçilmez bir parçası olan elektrikli ve elektronik cihazlar yaygın olarak kullanılmakta olup, bu cihazlar ömürlerini tamamladıklarında çevre ve insan sağlığı üzerinde olumsuz etkiler oluşturmaktadır. Elektrik ve elektronik endüstrisinde kullanılan kurşun içeren Sn-Pb lehim alaşımlarının Pb elementinin toksik olması nedeniyle, AB'nin RoHS ve WEEE direktifleri ile kullanımı sınırlandırılmıştır. Bu durum, alternatif kurşunsuz lehim alaşımlarının geliştirilmesini zorunlu kılmıştır. Bu çalışmada, SAC-1Bi (Sn-2Ag-0,5Cu-1Bi) alaşımına Al ilavesinin mikroyapı, ıslatma ve elektriksel iletkenlik özellikleri üzerine etkisi incelenmiştir. Sn-Al optimizasyonu sağlanarak (%0,05, %0,10, %0,20, %0,40 ve %0,60 Al ilaveleri) üretilen alaşımlar değerlendirilmiştir. Al katkısının, özellikle %0,1 oranında, mikroyapısal özellikler ve ıslatma kabiliyeti üzerinde en iyi etkiyi oluşturduğu gözlemlenmiştir.

Alaşım numuneleri, Argon (Ar) gazı atmosferinde Cu altlık üzerinde hibrit (pendant+sessile) damla yöntemi ile yayılma testine tabi tutulmuştur. Temas açısı ölçümleri ve ıslatma özellikleri incelenmiş, sonuçlar SEM-EDX, XRD ve DSC analizleri ile desteklenmiştir. Elektriksel iletkenlik, korozyon ve mekanik testler, alaşımların performansını değerlendirmek için kullanılmıştır. %0,1 Al ilaveli numune, en düşük temas açısı (38,44°) ile en iyi ıslatma performansını göstermiştir. SEM-EDX analizleri, Al ilavesinin mikroyapısal homojenliği artırdığını ve intermetalik fazların (Ag<sub>3</sub>Sn, Cu<sub>6</sub>Sn<sub>5</sub>) dağılımını iyileştirdiğini göstermiştir. Bu fazların varlığı, alaşımların mekanik ve elektriksel özelliklerini olumlu yönde etkilemiştir. 1M HCl çözeltisindeki korozyon testleri, Al ilavesinin korozyon direncini artırdığını göstermiştir. %0,1 Al içeriği ile üretilen alaşım, korozyon hızını ve korozyon sonrası yüzeydeki bozuklukları azaltmıştır. SACBi-0,1Al alaşımı, en düşük korozyon akım yoğunluğunu (11,75 µA/cm<sup>2</sup>) ve korozyon hızını (0,326 mm/yıl) göstermiştir. Elektriksel iletkenlik testleri, Al ilavesinin elektriksel iletkenlik üzerinde hafif bir olumsuz etki oluşturduğunu göstermiştir. %0,1 Al içeriği ile üretilen SACBi-0,1Al alaşımının elektriksel direnç değeri  $7,64748 \times 10^{-7} \Omega\text{m}$  olarak belirlenmiştir. Bu değer, saf SAC-1Bi alaşımının ( $6,89535 \times 10^{-7} \Omega\text{m}$ ) üzerinde olmasına rağmen, kabul edilebilir seviyelerde kalmaktadır. DSC analizleri, Al ilavesinin alaşımların ergime sıcaklığını düşürdüğünü göstermiştir. %0,1 Al içeriği ile üretilen alaşımın ergime sıcaklığı 212,5°C olarak belirlenmiştir. Bu değer, saf SAC-1Bi alaşımının (219,0°C) altındadır.

**Anahtar Sözcükler :** Kurşunsuz lehim alaşımları, ıslatma ve ıslatabilirlik, IMC's, Yüzey ve arayüzey analizleri, HCl asidik çözelti, Korozyon direnci, elektriksel iletkenlik.

**Bilim Kodu :** 20206.

## **ABSTRACT**

**Ph. D. Thesis**

### **IMPROVEMENT OF WETTING AND PHYSICAL PROPERTIES AT THE INTERFACE OF (%96.5-X)Sn-%2Ag-%0.5Cu-%1Bi-%XAl SOLDER ALLOYS.**

**Serkan OGUZ**

**Karabük University  
Institute of Graduate Programs  
Physics of Science Department**

**Thesis Advisor:**

**Doç. Dr. Ahmet Mustafa ERER**

**June 2024, 136 pages**

Technological products, which are indispensable parts of our lives, are widely used electrical and electronic devices. When these devices reach the end of their life, they have adverse effects on the environment and human health. The use of lead-containing Sn-Pb solder alloys in the electrical and electronic industry has been restricted by the EU's RoHS and WEEE directives due to the toxicity of the Pb element. This situation has necessitated the development of alternative lead-free solder alloys. In this study, the effects of Al addition on the microstructure, wettability, and electrical conductivity properties of the SAC-1Bi (Sn-2Ag-0.5Cu-1Bi) alloy were investigated. Alloys produced by Sn-Al optimization (0.05%, 0.10%, 0.20%, 0.40%, and 0.60% Al additions) were evaluated. It was observed that the Al addition, particularly at 0.1%, had the best effect on microstructural properties and wettability.

Alloy samples were subjected to spreading tests on a Cu substrate under Argon (Ar) gas atmosphere using the hybrid (pendant+sessile) drop method. Contact angle measurements and wettability properties were examined, and the results were supported by SEM-EDX, XRD, and DSC analyses. Electrical conductivity, corrosion, and mechanical tests were used to evaluate the performance of the alloys. The sample with 0.1% Al addition exhibited the best wetting performance with the lowest contact angle (38.44°). SEM-EDX analyses showed that the addition of Al increased microstructural homogeneity and improved the distribution of intermetallic phases ( $\text{Ag}_3\text{Sn}$ ,  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$ ). The presence of these phases positively affected the mechanical and electrical properties of the alloys. Corrosion tests in 1M HCl solution showed that the addition of Al increased corrosion resistance. The alloy produced with 0.1% Al content reduced the corrosion rate and surface defects after corrosion. The SACBi-0.1Al alloy demonstrated the lowest corrosion current density ( $11.75 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ) and corrosion rate (0.326 mm/year). Electrical conductivity tests showed that the addition of Al had a slight adverse effect on electrical conductivity. The electrical resistivity value of the SACBi-0.1Al alloy produced with 0.1% Al content was determined to be  $7.64748 \times 10^{-7} \Omega\text{m}$ . Although this value is higher than that of pure SAC-1Bi alloy ( $6.89535 \times 10^{-7} \Omega\text{m}$ ), it remains at acceptable levels. DSC analyses showed that the addition of Al reduced the melting temperature of the alloys. The melting temperature of the alloy produced with 0.1% Al content was determined to be 212.5°C. This value is lower than that of the pure SAC-1Bi alloy (219.0°C).

**Key Word** : Lead-free solder alloys, Wettability, Intermetallic compounds (IMCs), Surface and interface analyses, HCl acidic solution, Corrosion resistance, Electrical conductivity.

**Science Code** : 20206.



## TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının planlanmasında, araştırılmasında, yürütülmesinde ve oluşumunda ilgi ve desteğini esirgemeyen, beni yönlendiren, değerli görüşleri ve bilgileri ile çalışmama ışık tutan danışmanım Doç. Dr. Ahmet Mustafa ERER'e içtenlikle teşekkür ederim. Kendisinin sağlamış olduğu akademik rehberlik, benim için büyük bir öğrenme deneyimi olmuştur.

Ayrıca, tez konumuyla ilgili derinlemesine bilgileri ve deneyimleriyle beni destekleyen Prof. Dr. Fatma Meydaneri TEZEL ile Arş. Gör. Öznur DİNÇEL'e teşekkürlerimi sunarım. Verdikleri değerli görüşler ve katkılar, çalışmamın kalitesini artırmama yardımcı olmuştur.

Tezimde yer alan deneysel çalışmaların başarıyla tamamlanabilmesi için maddi ve manevi aileme ve sevdiklerime sağladıkları motivasyon ve destekler için minnettarlığımı dile getirmek isterim. Bu süreçte yanımda olan herkese teşekkür eder, saygılarımı sunarım.

Bu tez çalışması, Karabük Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi (KBÜBAP) tarafından desteklenen KBÜBAP-21-KP-091 proje numarası ile desteklenmiştir. Karabük Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi'ne (KBÜBAP) finansal destekleri için teşekkür ederim. Bu proje, üniversitemizin bilimsel araştırmalara verdiği değer bir göstergesidir ve umuyorum ki elde edilen sonuçlar bilim dünyasına faydalı olacaktır.

## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL.....	iv
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER .....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xii
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	xvi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ .....	xvii
SİMGELER.....	xvii
KISALTMALAR .....	xviii
BÖLÜM 1 .....	1
GİRİŞ .....	1
BÖLÜM 2 .....	3
KURAMSAL BİLGİ.....	3
2.1. LEHİMLEME .....	3
2.1.1. Lehim Alaşımları .....	3
2.1.1.1. Sn-Pb Lehim Alaşımları .....	3
2.1.1.2. Kurşunsuz Lehim Alaşımları .....	4
2.2. ISLATMA VE TEMAS AÇISI.....	6
2.2.1. Yüzey Gerilimi .....	8
2.2.2. Temas Açısı .....	8
2.2.3. Adsorpsiyon.....	9
2.2.3.1. Fiziksel Adsorpsiyon .....	9
2.2.3.2. Kimyasal Adsorpsiyon (Kemisorpsiyon).....	10
2.2.3.3. İyonik Adsorpsiyon.....	10
2.2.4. Van der Waals Kuvvetleri .....	11

2.3. KOROZYON.....	11
2.3.1. KOROZYON TÜRLERİ.....	12
2.3.1.1. Fiziksel Korozyon.....	12
2.3.1.2. Kimyasal Korozyon.....	13
2.3.1.3. Elektrokimyasal Korozyon.....	13
2.4. SHEAR STRENGTH (ÇEKME GERİLİMİ) DENEYİ.....	16
2.5. ELEKTRİKSEL İLETKENLİK.....	17
2.5.1. Ohm Yasası.....	17
2.5.2. Elektriksel İletkenlik.....	20
BÖLÜM 3.....	23
LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....	23
3.1. Literatür Özeti.....	23
BÖLÜM 4.....	39
DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	39
4.1. ÜRETİM İŞLEMİ.....	39
4.2. HOMOJENİZASYON İŞLEMİ.....	39
4.3. ISLATMA DENEYLERİ.....	41
4.4. KOROZYON TESTLERİ.....	45
4.4.1. Potansiyodinamik Polarizasyon Analizi.....	45
4.5. SHEAR STRENGTH (ÇEKME GERİLİMİ) TESTİ.....	46
4.6. ELEKTRİKSEL İLETKENLİK ÖLÇÜMÜ.....	47
BÖLÜM 5.....	50
BULGULAR.....	50
5.1. XRF ANALİZİ.....	50
5.2. XRD ANALİZİ.....	51
5.3. DSC ANALİZİ.....	58
5.4. ISLATMA DENEYLERİ.....	61

5.5. SEM-EDX ANALİZLERİ .....	67
5.6. KOROZYON TESTİ SONUÇLARI.....	76
5.6.1. Potansiyodinamik Polarizasyon Analiz Sonuçları.....	76
5.6.3. Korozyon Sonrası Mikroyapı Analizi.....	91
5.7. ÇEKME GERİLİMİ TESTİ SONUÇLARI .....	104
5.8. ELEKTRİKSEL İLETKENLİK ÖLÇÜM SONUÇLARI .....	105
BÖLÜM 6 .....	107
TARTIŞMA VE SONUÇLAR .....	107
KAYNAKLAR .....	111
EK AÇIKLAMALAR A.....	121
EK AÇIKLAMALAR B.....	127
ÖZGEÇMİŞ .....	134

## ŞEKİLLER DİZİNİ

### Sayfa

Şekil 2.1. Temas açısı diyagramı. ....	6
Şekil 2.2. Elektrokimyasal korozyon. ....	14
Şekil 2.3. HCl ortamında metalin korozyonu sırasında gerçekleşen elektrokimyasal olaylar [2]. ....	15
Şekil 2.4. Elektriksel iletkenlik. ....	21
Şekil 4.1. Lehim alaşımının üretim aşaması. ....	40
Şekil 4.2. Homojenizasyon işlemi. ....	41
Şekil 4.3. SACBi-0,05Al lehim alaşımının ıslatma açısı değerleri a) 275 b) 300 ve c) 325°C. ....	44
Şekil 4.4. SACBi-0,1Al lehim alaşımının ıslatma açısı değerleri a) 275 b) 300 ve c) 325°C. ....	44
Şekil 4.5. SACBi-0,3Al lehim alaşımının ıslatma açısı değerleri a) 275 b) 300 ve c) 325°C. ....	44
Şekil 4.6. SACBi-0,5Al lehim alaşımının ıslatma açısı değerleri a) 275 b) 300 ve c) 325°C. ....	45
Şekil 4.7. SACBi-0,6Al lehim alaşımının ıslatma açısı değerleri a) 275 b) 300 ve c) 325°C. ....	45
Şekil 4.8. Shear test cihazı. ....	46
Şekil 4.9. SACBi-xAl kurşunsuz lehim alaşımı shear test numunesi. ....	47
Şekil 4. 10. Elektriksel iletkenlik ölçüm cihazı. ....	48
Şekil 5.1. SACBi-0,05Al lehim alaşımının XRD analiz raporu. ....	51
Şekil 5.2. SACBi-0,1Al lehim alaşımının XRD analiz raporu. ....	52
Şekil 5.3. SACBi-0,3Al lehim alaşımının XRD analiz raporu. ....	52
Şekil 5.4. SACBi-0,5 Al lehim alaşımının XRD analiz raporu. ....	53
Şekil 5.5. SACBi-0,6Al lehim alaşımının XRD analiz raporu. ....	53
Şekil 5.6. Cu-Sn ikili faz diyagramı. ....	54
Şekil 5.7. Cu-Bi ikili faz diyagramı. ....	55
Şekil 5.8. Sn-Ag ikili faz diyagramı. ....	56
Şekil 5.9. Sn-Al ikili faz diyagramı. ....	57
Şekil 5.10. Cu-Al ikili faz diyagramı. ....	58
Şekil 5.11. SACBi-0,05Al lehim alaşımının DSC analiz raporu. ....	59

## Sayfa

Şekil 5.12. SACBi-0,1Al lehim alaşımının DSC analiz raporu. ....	59
Şekil 5.13. SACBi-0,3Al lehim alaşımının DSC analiz raporu. ....	60
Şekil 5. 14. SACBi-0,5Al lehim alaşımının DSC analiz raporu .....	60
Şekil 5. 15. SACBi-0,6Al lehim alaşımının DSC analiz raporu. ....	61
Şekil 5.16. SACBi-0,05Al lehim alaşımının temas açısı değerlerinin zaman karşı grafiği. .....	62
Şekil 5.17. SACBi-0,1Al lehim alaşımının temas açısı değerlerinin zaman karşı grafiği. .....	62
Şekil 5.18. SACBi-0,3Al lehim alaşımının temas açısı değerlerinin zaman karşı grafiği. .....	63
Şekil 5.19. SACBi-0,5Al lehim alaşımının temas açısı değerlerinin zaman karşı grafiği. .....	63
Şekil 5.20. SACBi-0,6Al lehim alaşımının temas açısı değerlerinin zaman karşı grafiği. .....	64
Şekil 5.21. SACBi-xAl lehim alaşım sisteminin 325°C sıcaklıktaki temas açısı değerleri. .....	65
Şekil 5.22.SACBi-0,05Al kurşunsuz lehim alaşımının 275°C sıcaklık değerindeki SEM analizi. ....	68
Şekil 5.23.SACBi-0,05Al kurşunsuz lehim alaşımının 300°C sıcaklık değerindeki SEM analizi. ....	69
Şekil 5.24.SACBi-0,05Al kurşunsuz lehim alaşımının 325°C sıcaklık değerindeki SEM analizi. ....	69
Şekil 5.25.SACBi-0,1Al kurşunsuz lehim alaşımının 275°C sıcaklık değerindeki SEM analizi. ....	70
Şekil 5.26.SACBi-0,1Al kurşunsuz lehim alaşımının 300°C sıcaklık değerindeki SEM analizi. ....	70
Şekil 5.27.SACBi-0,1Al kurşunsuz lehim alaşımının 325°C sıcaklık değerindeki SEM analizi. ....	71
Şekil 5.28.SACBi-0,3Al kurşunsuz lehim alaşımının 275°C sıcaklık değerindeki SEM analizi. ....	71
Şekil 5.29.SACBi-0,3Al kurşunsuz lehim alaşımının 300°C sıcaklık değerindeki SEM analizi. ....	72
Şekil 5.30.SACBi-0,3Al kurşunsuz lehim alaşımının 325°C sıcaklık değerindeki SEM analizi. ....	72
Şekil 5.31.SACBi-0,5Al kurşunsuz lehim alaşımının 275°C sıcaklık değerindeki SEM analizi. ....	73
Şekil 5.32.SACBi-0,5Al kurşunsuz lehim alaşımının 300°C sıcaklık değerindeki SEM analizi. ....	73

Şekil 5.33.SACBi-0,5Al kurşunsuz lehim alaşımının 325°C sıcaklık değerindeki SEM analizi. ....	74
Şekil 5.34.SACBi-0,6Al kurşunsuz lehim alaşımının 275°C sıcaklık değerindeki SEM analizi. ....	74
Şekil 5.35.SACBi-0,6Al kurşunsuz lehim alaşımının 300°C sıcaklık değerindeki SEM analizi. ....	75
Şekil 5.36.SACBi-0,6Al kurşunsuz lehim alaşımının 325°C sıcaklık değerindeki SEM analizi. ....	75
Şekil 5.37. SACBi-xAl lehim alaşımının potansiyodinamik polarizasyon eğrileri. .	76
Şekil 5.38.SACBi-0,05Al lehim alaşımının mikroyapı incelemesi. ....	78
Şekil 5.39.SACBi-0,1Al lehim alaşımının mikroyapı incelemesi. ....	78
Şekil 5.40.SACBi-0,3Al lehim alaşımının mikroyapı incelemesi. ....	79
Şekil 5.41.SACBi-0,5Al lehim alaşımının mikroyapı incelemesi. ....	79
Şekil 5.42.SACBi-0,6Al lehim alaşımının mikroyapı incelemesi. ....	80
Şekil 5.43.SACBi-0,05Al alaşımının SEM-EDX görüntüleri. ....	81
Şekil 5.44.SACBi-0,05Al alaşımının EDX analizi. ....	82
Şekil 5.45.SACBi-0,1Al alaşımının SEM-EDX görüntüleri. ....	83
Şekil 5.46.SACBi-0,1Al alaşımının EDX analizi. ....	84
Şekil 5.47.SACBi-0,3Al alaşımının SEM-EDX görüntüleri. ....	85
Şekil 5.48.SACBi-0,3Al alaşımının EDX analizi. ....	86
Şekil 5.49.SACBi-0,5Al alaşımının SEM-EDX görüntüleri. ....	87
Şekil 5.50.SACBi-0,5Al alaşımının EDX analizi. ....	88
Şekil 5.51.SACBi-0,6Al alaşımının SEM-EDX görüntüleri. ....	89
Şekil 5.52.SACBi-0,6Al alaşımının EDX analizi. ....	90

## Sayfa

Şekil 5.53. SACBi-0,05Al lehim alaşımının korozyon sonrası mikroyapı incelemesi. .....	91
Şekil 5.54. SACBi-0,1Al lehim alaşımının korozyon sonrası mikroyapı incelemesi.	91
Şekil 5.55. SACBi-0,3Al lehim alaşımının korozyon sonrası mikroyapı incelemesi.	92
Şekil 5.56. SACBi-0,5Al lehim alaşımının korozyon sonrası mikroyapı incelemesi.	92
Şekil 5.57. SACBi-0,6Al lehim alaşımının korozyon sonrası mikroyapı incelemesi.	93
Şekil 5.58. SACBi-0,05Al alaşımı için SEM-EDX analiz sonuçları. ....	94
Şekil 5.59. SACBi-0,05Al alaşımı için EDX analiz analizi.....	95
Şekil 5.60. SACBi-0,1Al alaşımı için SEM-EDX analiz sonuçları. ....	96
Şekil 5.61. SACBi-0,1Al alaşımı için EDX analiz analizi.....	97
Şekil 5.62. SACBi-0,3Al alaşımı için SEM-EDX analiz sonuçları. ....	98
Şekil 5.63. SACBi-0,3Al alaşımı için EDX analiz analizi.....	99
Şekil 5.64. SACBi-0,5Al alaşımı için SEM-EDX analiz sonuçları. ....	100
Şekil 5.65. SACBi-0,5Al alaşımı için EDX analiz analizi.....	101
Şekil 5.66. SACBi-0,6Al alaşımı için SEM-EDX analiz sonuçları. ....	102
Şekil 5.67. SACBi-0,6Al alaşımı için EDX analiz analizi.....	103
Şekil 5.68. SACBi-xAl lehim alaşımı için çekme gerilimi değerleri.....	105
Şekil 5.69. SACBi-xAl lehim alaşımlarının özdirenç değerleri.....	106



## ÇİZELGELER DİZİNİ

### Sayfa

Çizelge 4.1 Deney düzeneğini oluşturan parçalar.....	43
Çizelge 5.1. Üretilen Kurşunsuz lehim alaşımlarının XRF analiz sonuçları. ....	50
Çizelge 5.2. DSC analiz sonuçlarına göre alaşımların ergime sıcaklıkları. ....	58
Çizelge 5.3. SACBi-xAl (x = %0,05, 0,1 0,3, 0,5 ve 0,6) kurşunsuz lehim alaşımlarının sıcaklıklara göre zamanla temas açılarındaki değişim değerleri. ....	66
Çizelge 5.4. SACBi-xAl lehim alaşımının korozyon parametreleri. ....	77
Çizelge 5.5. SACBi-xAl lehim alaşımlarının shear test sonuçları. ....	104
Çizelge Ek B.1. SAC-1Bi lehim alaşımı için özdirenç hesaplaması. ....	128
Çizelge Ek B.2. SACBi-0.05Al lehim alaşımı için özdirenç hesaplaması. ....	129
Çizelge Ek B.3. SACBi-0.1Al lehim alaşımı için özdirenç hesaplaması. ....	130
Çizelge Ek B.4. SACBi-0.3Al lehim alaşımı için özdirenç hesaplaması. ....	131
Çizelge Ek B.5. SACBi-0.5Al lehim alaşımı için özdirenç hesaplaması. ....	132
Çizelge Ek B.6. SACBi-0.6Al lehim alaşımı için özdirenç hesaplaması. ....	133

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

### SİMGELER

Sn	: Kalay
Ag	: Gümüş
Cu	: Bakır
Bi	: Bizmut
Al	: Alüminyum
E	: Elektrik alan (N/C)
J	: Akım yoğunluğu (A/m <sup>2</sup> )
$\rho$	: Özdirenç ( $\Omega\text{m}$ )
$\gamma$	: Yüzey gerilimi (ara yüzey enerjisi)
e <sup>-</sup>	: Elektron
B	: Manyetik alan (T)

## KISALTMALAR

XRD	: X-ray differaction (X-ışını kırınımı)
XRF	:X-ray flouresence (X-ray floresansı)
DSC	:Differantial Scanning Colorimetry (Diferansiyel Taramalı Kalorimetre)
SEM	: Scanning Electron Microscopy (Taramalı elektron Mikroskobu)
RoHS	: Restriction of Hazardous Substances Directive (Zararlı maddelerin kısıtlanması direktifi)
WEEE	: Waste Electrical and Electronic Equipment Directive (Atık Elektrikli ve Elektronik Ekipman Direktifi)
IMCs	: Intermetallic Compounds (İntermetalik Bileşikler)
SMT	: Surface Mount Technology (Yüzey Montaj Teknolojisi)
PCB	: Printed Circuit Board (Elektronik Devre Kartı)
HCl	: Hidroklorik asit
SAC	: Sn-Ag-Cu
SAC-1Bi	: Sn-2Ag-0,5Cu-1Bi
SACBi-0,05Al	: Sn-2Ag-0,5Cu-1Bi-0,05Al
SACBi-0,1Al	: Sn-2Ag-0,5Cu-1Bi-0,1Al
SACBi-0,3Al	: Sn-2Ag-0,5Cu-1Bi-0,3Al
SACBi-0,5Al	: Sn-2Ag-0,5Cu-1Bi-0,5Al
SACBi-0,6Al	: Sn-2Ag-0,5Cu-1Bi-0,6Al

## BÖLÜM 1

### GİRİŞ

İdeal elektriksel bağlantı özellikleri ve mekanik desteği özelliğiyle lehimleme işlemi, elektronik üretim ve paketleme endüstrilerinde çeşitli elektrikli bileşenlerin montajı ve birleştirilmesi için kullanılan bir metalurjik işlemdir [1]. Elektrik içeren bileşenler, mekanik entegrasyonlar arasında elektriksel bir bağlantı sağlamak için lehim ile birleştirilir [2]. Kalay-gümüş (Sn-Pb) alaşımları, korozyon direnci, düşük maliyeti, erime sıcaklığı ve iyi mekanik ıslanabilirliği ile elektronik endüstrisinde yaygın olarak kullanılmaktadır [3]. Kurşun elementi sağlığa ve çevreye zarar veren ağır metal toksinleri arasında yer aldığından, kurşun bazlı lehimler toksiteleri ve çevresel etkileri nedeniyle endişe verici sorunlara sahiptir [4]. Sn-Pb lehim alaşımına alternatif olarak çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Kalay-çinko (Sn-Zn) [5,6], kalay-bakır (Sn-Cu) [7], kalay-gümüş (Sn-Ag) [8] ve kalay-bizmut (Sn-Bi) [9]. Sn bazlı kurşunsuz lehim alaşımları potansiyel adaylar olarak rapor edilmiştir. Alternatif kurşunsuz lehim alaşımlarını üretmek ve geliştirmek zordur. Elektriksel, fizikokimyasal, korozyon direnci, mekanik performans özellikleri, alaşımın maliyeti ve sıvılaştırma sıcaklığı arasında doğru denge sağlanmalıdır [10,11]. Bu özelliklere ek olarak, erime sıcaklığı da kritik bir öneme sahiptir. Üretilen kurşunsuz lehim alaşımlarının optimum erime noktası ısınma sorunlarına neden olacağından yüksek veya düşük olmamalıdır [12]. Potansiyel adaylar arasında, düşük erime noktalı lehim alaşımları alternatif olarak araştırmacıların dikkatini çekmektedir [13]. Elektronik paketleme teknolojisinde ısıya duyarlı bazı bileşenler ve çok katmanlı kaynak teknolojisi, düşük sıcaklıklarda paketlemeye ihtiyaç duymaktadır. Elektronik paketleme teknolojisinde ısıya duyarlı bazı bileşenler ve çok katmanlı kaynak teknolojisi düşük sıcaklıklarda paketlemeye ihtiyaç duyar. Yüksek sıcaklıkta paketleme işlemleri, bileşenlerin ve Baskılı devre kartı (Printed Circuit Board-PCB)'nin daha yüksek ısı direncine sahip olmasını gerektirir. Bu da üretim maliyetini artırmakta ve bir dezavantaj oluşturmaktadır. Bu nedenle, düşük sıcaklıkta paketleme, kaliteli üretim oranını artırır [14]. Kurşunsuz

lehimler arasında, Sn-Ag-Cu (SAC) lehim alaşımları, ötektik bileşime yakın olmaları, mekanik mukavemetleri ve ıslanabilirlik özelliklerinden ötürü elektronik lehimleme için yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu nedenle, elektrik ve elektronik endüstrisinde ara bağlantıların paketlenmesi için en iyi seçim olarak rapor edilmiştir [15,16]. SAC lehim alaşımının ıslanabilirlik ve çalışma sıcaklığı açısından mükemmel performansına rağmen,  $Ag_3Sn$  metallar arası bileşiklerin (IMC'ler) varlığı, bu koşullar altında dūřuk mukavemet ve sūrınme direncine sahip dezavantajlardan biri olarak bildirilmiştir [17]. Dięer bir dezavantaj ise Ag içeriğinin maliyetli olduğunun bildirilmesidir. SAC lehim alaşımlarına Bi eklenmesi alaşımın özelliklerini, ıslatmayı, yorulma ve sūrınme direncini artırdığı görülmüştür [18].

Sn- 2Ag-0,5Cu-1Bi (SAC-1Bi) dōrtlü lehim alaşımına Al katkısı ile üretilen beşli lehim alaşım sisteminin ıslatma özelliklerinin iyileştirilmesi araştırma konusunun temelini oluşturmaktadır. Bu alışmada, Al ilaveli yeni (96.5-x)Sn-2Ag-0.5Cu-1Bi-xAl (x = %0,05, 0,1, 0,3, 0,5 ve 0,6) beşli kurşunsuz lehim alaşım sistemlerinin Ar gazı atmosferinde Cu altlık üzerinde ıslatma ve arayüzey özelliklerinin etkileri incelenmiştir. Al ilavesi ile mukavemet ve kırılma direncinin azaltılması, ıslatma özelliklerinin yanı sıra mekanik özelliklerin de iyileştirilmesi amaçlanmıştır. Belirlenen oranlarda Al katkısının Sn-Ag-Cu (SAC) lehim alaşım sistemlerinin mikroyapısında  $Cu_6Sn_5$ ,  $Cu_3Sn$  ve  $Ag_3Sn$  IMC üzerine etkisi araştırılmış, XRD analizi ve SEM+EDX analizi ile desteklenmiştir. Islatma özellikleri Cu altlık üzerinde hibrit damla yöntemi (pendant+sessile damla yöntemi) kullanılarak araştırılmıştır.

SACBi-xAl lehim alaşım sistemlerinin 1M hidroklorik asit (HCl) özeltisi altında korozyon direnci araştırılmıştır. Farklı alüminyum ilavelerine sahip alaşımların potansiyodinamik davranışları değerlendirilmiş ve lehimleme çalışmaları için önemli bilgiler sağladığı öngörölmüştür. Buna ilave olarak Al katkısının çekme mukavemetine ve elektriksel iletkenlik özelliklerine etkisi incelenmiştir. Al katkısının optimize edilmesi, lehim alaşımlarının performansını iyileştirmek için kritik öneme sahiptir. Bu çalışmada elde edilen bulgular, lehim alaşımlarının geliştirilmesinde dikkate alınması gereken önemli faktörleri vurgulamaktadır.

## BÖLÜM 2

### KURAMSAL BİLGİ

#### 2.1. LEHİMLEME

Birden fazla malzemenin birleştirilmesi için gerekli olan lehimleme işlemi elektrik elektronik endüstrisinde vazgeçilmez bir prosedürdür.[19]. 450 °C üzerindeki işlemler sert lehimleme, 450°C den daha düşük sıcaklıklarda yapılan işlemler yumuşak lehimleme olarak adlandırılır. Yumuşak lehimleme prosedürü elektronik cihazların montaj işlemleri için düşük sıcaklıklarda gerçekleştirilmesi istenen bir uygulamadır [20]. Lehimleme işlemlerinde kullanılan lehim alaşımlarının elektronik devreler için elektriksel, termal ve mekanik özellikleri bakımından iyi bir performans sergilemesi gerekmektedir [21]. Kullanılan lehim alaşımlarının sahip olması gereken başlıca temel gereksinimleri vardır. Bu gereksinimler montaj işlemlerinin güvenilir ve uygulanabilir olabilmesi için lehim ıslatma özellikleri ve metaller arası bir yapı oluşturup oluşturmaması önemli bir özellik oluşturur [22].

##### 2.1.1. Lehim Alaşımları

Geleneksel Sn-Pb lehim alaşımları ve kurşun içermeyen lehim alaşımları olmak üzere iki grup altında toplanabilir.

##### 2.1.1.1. Sn-Pb Lehim Alaşımları

Sn-Pb lehim alaşımları uzun yıllardır kullanılmış ve yaygın olarak kabul gören lehim alaşımıdır. Hem maliyeti hem de mikroyapı özellikleri bakımından ergonomik ve düşük ergime sıcaklıklarına sahip olması yaygın olarak tercih edilmesinin en önemli

sebeplerinden biridir [23]. Ötektik Sn-Pb lehim alaşımlarının ergime sıcaklık değeri (183°C) saf kurşun (Pb) (232°C) ve saf kalay (Sn) (327°C) ergime sıcaklık değerlerine göre oldukça düşüktür. Sn elementine Pb elementinin eklenmesi ile yüzey gerilimi azalır ve bu durumda yayılma daha çok gerçekleşir. Islatma zellikleri daha çok iyi bir hl alır. Bu durumda bakır (Cu) altlık üzerinde yayılmasını ifade eden temas açı değeri de düşük olur [24].

### 2.1.1.2. Kurşunsuz Lehim Alaşımları

Pb elementi insan vücudundaki proteinlerle güçlü bir bağ oluşturarak insan sağlığını tehlikeye atar ve kurşun zehirlenmesine sebep olur. Aynı zamanda atık elektrik ve elektronik cihazların toprağa karışmasından dolayı yeraltı sularından tekrar insan sağlığına etkide bulunması en önemli zararlarından biridir [25].

İnsan ve evre sağlığı açısından bu endişelerin giderilmesi amacıyla Tehlikeli Maddelerin Kısıtlanması Direktifi (RoHS) direktifi ve Atık Elektrikli ve Elektronik Ekipmanlar (WEEE) direktiflerine başta Avrupa Birliği olmak üzere (2003 şubat) kabul edilmiş ve 01.07.2006 tarihinde yürürlüğe girmiştir [26]. Türkiye’de ise 30.05.2008 tarihinde Resm Gazete’de yayımlanmış ve Haziran 2009 yılında yürürlüğe girmiştir

Pb elementinin insan ve evre sağlığı açısından toksik maddelerin arasında olmasından dolayı Pb içermeyen lehim alaşımlarının üretilmesi ve geliştirilmesi amaçlanmıştır. Alternatif olarak üretilen ve geliştirilen lehim alaşım sisteminin çoğu Sn tabanlı alaşımlardır.

**Sn-Ag:** Kalay (Sn) tabanlı kurşunsuz lehim alaşımlarında gümüş (Ag) elementinin ilavesi ile üretilen Sn-Ag ikili lehim alaşımı, metalurjik özellikleri bakımından düşük yüzey gerilimine sahip olması nedeniyle hızlı lehimleme kabiliyetinin artmasına, Ag içermeyen lehim alaşımlarına oranla termal yorgunluk dayanım direncinin daha iyi olmasına ve alaşımlarının esnekliğinin geliştirilmesine yardımcı olur. Ancak oluşabilecek intermetalik fazlar (IMCs) sebebi ile mikroyapı incelemesinde büyük intermetalik Ag<sub>3</sub>Sn fazlarının oluşumu ana problem olarak görülür [8].

**Sn-Cu:** Elektriksel iletkenlikleri yüksek olduğundan dolayı elektronik devrelerde yaygın olarak kullanılır. Lehimlenmiş bileşenler arasında güçlü bağlar oluşturabildiği için yüksek mukavemet ve dayanıklılık sunar. Bu alaşımlar yüksek sıcaklık uygulamalarında kullanılmak üzere üretilmiştir. Ancak mikroyapısı incelendiğinde kırılğan yapıda olması, oksitlenmeye daha yatkın olması kullanımını sınırlı hale getirmiştir [7].

**Sn-Bi:** Düşük ergime sıcaklığına sahip olması (138°C) en önemli olumsuz etkilerinden biridir. Lehimleme işlemlerinde sıcaklık değerinin 150°C'ye ulaştığı elektronik uygulamaların çoğunda kullanılamaz [9].

Bu alaşımların ötektik bileşimleri alternatif bir lehim alaşımı olarak değerlendirilmiştir. Bununla birlikte, bu alaşımlarla ilgili intermetalik faz oluşumu, düşük ergime sıcaklığı, ıslanma ve maliyet açısından birçok sorun vardır [24]. İkili lehim alaşımlarında karşılaşılan bu sorunların üstesinden gelmek için üçlü alaşım sistemlerine ihtiyaç duyulmuştur ve geliştirilmiştir. Bunların arasında ötektik ve ötektiğe yakın yaygın olarak kullanılan Sn-Ag-Cu (SAC) alaşım sistemi en umut verici bir alternatif ve dikkat çekici bir alaşım sistemi olarak görülüyor [27].

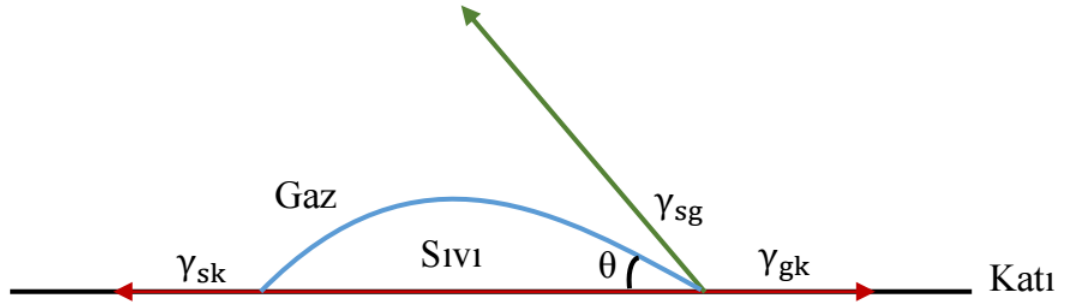
**SAC:** Çok yüksek termal şok direncine ve mekanik titreşime sahip, 150°C kadar lehimleme sıcaklıklarında çalışabilirler [28]. Sn-Pb lehim alaşımlarına göre ergime sıcaklıkları biraz fazladır (217°C). Bu durum SAC alaşım sisteminin daha iyi bir termodinamik özellikleri olduğunu açıklar. Aynı zamanda SAC alaşımları, iyi mekanik dayanıklılık ve yüksek mukavemet özellikleri sunar, bu da lehimlenmiş bileşenlerin daha sağlam olmasını sağlar. SAC lehim alaşımları, yüzeylerle iyi bir şekilde etkileşime girerek yüksek ıslatma özelliği bakımından homojen ve güvenilir bir lehim bağlantısı oluşturur. Ancak mikroyapı incelendiğinde  $Ag_3Sn$  ve  $Cu_6Sn_5$  fazlarının oluşumu, SAC lehim alaşımları açısından dezavantaj oluşturur ve belirli uygulamalarda problem olabilir. Bu fazlar, SAC lehimleme işlemi sırasında meydana gelebilir ve istenmeyen sonuçlara yol açabilir. Özellikle yüksek sıcaklıklarda veya uzun süreli ısıtma işlemlerinde bu fazlar oluşabilir.  $Ag_3Sn$  ve  $Cu_6Sn_5$  fazları, saf kalay kadar iyi bir iletkenlik sağlamazlar. Bu, elektronik bileşenlerde istenmeyen elektriksel dirençlerin oluşmasına neden olabilir ve iletkenliğin azalmasına neden olabilir. Bu



fazlar, aynı zamanda SAC lehim bağlantısının mekanik dayanıklılığını azaltabilir, bu da lehim bağlantılarının kırılma veya ayrılma riskini artırabilir [29].

## 2.2. ISLATMA VE TEMAS AÇISI

İki metal arasında uygun bir metalurjik bağ oluşturabilmek için, lehimlenecek parçaların katı yüzeyi ile erimiş lehim arasında özel bir etkileşim gerçekleşmelidir. Bu etkileşim, lehimin akma veya yayılma özelliği tarafından sağlanır ve istenilen metalik bağın oluşumu için kritik bir öneme sahiptir. Islatma ifadesi, bu tür lehimleme işlemlerinde ve yayılma olgusunu ifade etmek için sıklıkla kullanılır [30].



Şekil 2.1. Temas açısı diyagramı.

Islatma, bir sıvının katı bir malzeme üzerinde yayılma yeteneğini ifade eden bir terimdir [31]. Bu özellik, katı ve sıvının bir araya geldiği noktada oluşan temas açısıyla ölçülür.

Adhezif kuvvetler iki cisim arasında birbirlerine uyguladıkları çekim kuvvetlerdir. Kohezif kuvvetler ise bir cismin molekülleri üzerindeki çekim nedeniyle ortaya çıkan iç kuvvetlerdir. Kohezif kuvvetler sıvı damlacığın küresel bir şekle sahip olmasına, moleküllerin birbirlerini tutması ve sıvının yüzeyle temas etmekten kaçınmasına neden olur. Dolayısıyla, bir alt tabaka üzerindeki bir damlacığın temas açısının adhezif ve kohezif kuvvetlerin bir sonucudur. Sıvı damlacıkları için yüzey ıslanabilir ise "hidrofilik", yüzey ıslanamaz ise "hidrofobik", temas açısının  $150^\circ$ 'den yüksek olması "süperhidrofobik" yüzey olarak adlandırılır. Katı maddeler yüksek enerjili ve düşük enerjili katılar olmak üzere iki farklı gruba ayrılır. Metaller gibi yüksek enerjili katıların bağları çok güçlüdür ve çoğu sıvı bu katılarla yüksek ıslanabilirlik özelliği

gösterir. Düşük enerjili katıların içindeki bağlar ise zayıf olduğundan dolayı düşük enerjili katılar üzerindeki sıvılar tam ya da kısmî ıslanmaya sahip olabilir. 1805 yılında Young ve Laplace, bir malzemenin yüzey enerjisi teriminin varlığını öne sürmüşlerdir. Yerçekimi etkisi ihmal edilirse, ideal bir alt tabaka (düz, sert, mükemmel pürüzsüz ve kimyasal olarak homojen bir yüzey) üzerindeki bir sıvı damla küresel bir başlık oluşturacaktır. [32].

Genel olarak, temas açısı  $0^\circ$  ile  $90^\circ$  arasındaysa, sistem ıslanmış olarak tanımlanır. Ancak, temas açısı  $90^\circ$  ile  $180^\circ$  arasında ise sistem ıslanmamış olarak kabul edilir. Temas açısı ( $\theta$ ), birleşme noktasındaki yüzey gerilimlerinin denge durumundan, Young-Dupre denklemiyle hesaplanır [30].

$$\gamma_{gk} = \gamma_{sk} + \gamma_{gs} \cos \theta \quad (2.1)$$

Eşitlik 2.1’de belirtilen,  $\gamma_{gk}$  terimi belirli bir ortamdaki yüzey gerilimini,  $\gamma_{sk}$  katı ile sıvı arasındaki arayüzey enerjisini (yüzey gerilimi) temsil ederken,  $\gamma_{gs}$  aynı ortamdaki sıvının yüzey gerilimini,  $\theta$  temas açısını ifade etmektedir. Young-Dupré denklemi, yüzey enerjilerinin dengesi açısından katı, sıvı ve gaz fazlarının etkileşimlerini açıklar. Denklemin fiziksel anlamı, sıvının katı yüzey üzerindeki yayılma davranışını ve bu davranışın yüzey gerilimleri tarafından nasıl etkilendiğini ortaya koyar. Düşük temas açısı ( $0^\circ$ - $90^\circ$ ), sıvının katı yüzey üzerinde iyi yayıldığını ve dolayısıyla yüksek ıslanabilirlik gösterdiğini ifade eder. Bu durumda,  $\cos\theta$  pozitif ve 1'e yakındır, bu da  $\gamma_{GK}$  ve  $\gamma_{SK}$  arasındaki farkın minimal olduğunu gösterir. Yüksek temas açısı ( $90^\circ$ - $180^\circ$ ) ise sıvının katı yüzey üzerinde düşük yayıldığını ve kötü ıslanabilirlik gösterdiğini belirtir. Bu durumda,  $\cos\theta$  negatif veya sıfıra yakındır, bu da  $\gamma_{GK}$  ve  $\gamma_{SK}$  arasındaki farkın büyük olduğunu gösterir.

Islatmanın temel karakterizasyonu, termodinamik prensipler çerçevesinde ıslatma kuvvetlerini dikkate alarak yapılmıştır. Termodinamik açıdan bakıldığında, eğer toplam serbest enerjide bir azalma meydana gelirse, yani lehimin yüzey enerjisi, daha düşük bir yüzey-arayüzey enerjisine sahip bir arayüz oluşturarak azaltılırsa, bu durum iyi bir ıslatmanın gerçekleştiğini gösterir [30].

### 2.2.1. Yüzey Gerilimi

Yüzey gerilimi, ıslatma derecesini yani lehimin altılık üzerinde ıslanabilirliğini belirleyen dikkat çekici bir özelliktir. Yani erimiş bir lehim alaşımının yüzey gerilimi, yüzeye monte cihazlar olarak bilinen yüzey montaj teknolojisi (Surface Mount Technology -SMT) için kritik bir önem taşır [30]. Yüzey gerilimi olgusu termodinamik bir nicelik olarak adlandırılır. Sıvının yüzey alanını izotermal olarak büyütme için gereken iş miktarını ifade eder [33].

Yapılan çalışmalar sonucunda lehimin yüzey geriliminin sıcaklık [34], akı bileşimi [35] ve lehim katmanının etkileşim boyutuna [36] bağlı olarak değişim gösterdiği sonucuna varılmıştır. Kurşunsuz lehim alaşımlarının yüzey gerilimi ile ilgili çok az çalışma vardır. Oksidasyonun sıvı yüzeyinin sahip olduğu serbest enerjisini azaltmasından dolayı genel olarak durgun atmosfer durumundaki yüzey gerilimi değerlerinden daha düşük bir değer alma eğilimindedir. Veriler ötektik Sn-Zn ve Sn-Cu ikili kurşunsuz lehim alaşımı için bu eğilime uymadığını göstermektedir. Bu nedenle yüzey gerilimi ile ilgili daha detaylı çalışmalara ihtiyaç duyulmaktadır [30].

$$R = \left( \sqrt{\frac{\gamma}{\rho g}} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.2)$$

Eşitlik 2.2’de  $\gamma$  yüzey gerilimi,  $\rho$  yoğunluk ve  $g$  yerçekimi ivmesidir.

### 2.2.2. Temas Açısı

Yüzey gerilimi ve temas açısı arasındaki ilişki spesifik malzeme kombinasyonları için daha belirgin olmasına rağmen, temas açısı belirli materyallerde daha özgün bir konu olarak kabul edilir. Temas açısı özellikle kurşunsuz lehim alaşımlarının, iyi bir iletken olarak bilinen Cu altlıklar üzerinde çeşitli akışkanlar kullanılarak belirlenir. Temas açısı, yüzeyin pürüzlülüğü, geçen süre, kullanılan akı ve akı etkinliği ve ölçüm sıcaklığı gibi çeşitli faktörlerden etkilenebilir [30]

Temas açısı ölçümlerinin birden fazla tekniği vardır: [37].

Damla ağırlığı metodu  
Maksimum kabarcık metodu  
Wilhelmy Levha (Koparma) Metodu  
Donnan Pipeti Metodu  
Oscillating Jet Metodu  
Kapiller (Kılcal) Yükselme Metodu  
Pendant (Asılı) Damla Metodu  
DuNouy Halka Metodu  
Sessile Drop Metodu.

Kurşunsuz lehim alaşımlarının Cu altlık üzerinde yayılmasını incelemek için bu yöntemler arasından hibrit (pendant+sessile) yöntemi kullanılarak araştırmalar yapıldı.

### **2.2.3. Adsorpsiyon**

Adsorpsiyon, bir gaz veya sıvı fazdaki moleküllerin, bir katı yüzey veya sıvı yüzeyine fiziksel veya kimyasal bağlarla tutunması olayıdır. Bu süreçte, adsorbat adı verilen moleküller, adsorbent adı verilen yüzey tarafından çekim kuvvetleri aracılığıyla yüzeye bağlanır. Adsorpsiyon, yüzey olaylarına dayandığı için genellikle yüzey kimyası ve yüzey bilimi alanlarında incelenir.

#### **2.2.3.1. Fiziksel Adsorpsiyon**

Fiziksel adsorpsiyon, adsorbat moleküllerinin adsorbent yüzeyine Van der Waals kuvvetleri gibi zayıf intermoleküler kuvvetlerle bağlandığı bir süreçtir. İki molekül arasında herhangi bir elektron alışverişi durumundan bahsedilmez. Bu tür adsorpsiyon genellikle düşük sıcaklıklarda ve geri dönüşümlü olarak gerçekleşir. Fiziksel adsorpsiyonda adsorbent yüzeyinde belirli noktalar sabit olmayıp, adsorplanan moleküller yüzeyin tamamı üzerinde hareket edebilir. Bu yolla katı haldeki adsorbentlerin yüzey alanlarının ölçülmesi mümkün olmaktadır. Fiziksel adsorpsiyonun meydana gelmesi için ekstra bir aktivasyon enerjisi gerekmez.

Fiziksel adsorpsiyonun karakteristik özellikleri şunlardır:

- Düşük ısıl enerji gereksinimi (genellikle 20-40 kJ/mol).
- Çok katmanlı adsorpsiyonun mümkün olması.
- Reversible (tersinir) doğa [38].

### **2.2.3.2. Kimyasal Adsorpsiyon (Kemisorpsiyon)**

Kimyasal adsorpsiyon, adsorbat moleküllerinin adsorbent yüzeyine kimyasal bağlarla bağlandığı ve karşılıklı elektron alışverişinin olduğu bir süreçtir. Bu tür adsorpsiyon, kimyasal reaksiyonlar sonucunda gerçekleşir ve genellikle yüksek sıcaklıklarda olur. Kimyasal adsorpsiyonun oluşabilmesi için aktivasyon enerjisine ihtiyaç vardır.

Kimyasal adsorpsiyonun karakteristik özellikleri şunlardır:

- Yüksek ısıl enerji gereksinimi (genellikle 40-400 kJ/mol).
- Monolayer (tek katmanlı) adsorpsiyon.
- İrreversible (geri dönüşümsüz) doğa [39].

### **2.2.3.3. İyonik Adsorpsiyon**

İyonlar, elektrostatik çekim kuvvetlerinin etkisiyle yüzeydeki yüklü bölgelere tutunur. Bu süreçte, adsorban ve adsorbatın iyonik güçleri önemli bir rol oynar. İyonlar aynı yüke sahipse, daha küçük olan iyon yüzeye tercihli olarak tutunur. Bunun nedeni, küçük iyonların daha yüksek yüzey yük yoğunluğuna sahip olması ve bu nedenle daha güçlü elektrostatik çekim kuvvetlerine maruz kalmasıdır. Çoğu adsorpsiyon olayında, fiziksel, kimyasal ve iyonik adsorpsiyon mekanizmaları birlikte veya ardışık olarak gerçekleşir [38].

Adsorpsiyon olaylarının özet olarak tanımlaması yapıldığında ise fiziksel adsorpsiyon, Van der Waals kuvvetleri gibi zayıf intermoleküler kuvvetlerle oluşurken, kimyasal adsorpsiyon, daha güçlü kimyasal bağlarla gerçekleşir. İyonik adsorpsiyon ise zıt yüklü iyonlar arasındaki elektrostatik çekim kuvvetleriyle meydana gelir. Bu mekanizmaların birlikte veya ardışık olarak çalışması, adsorpsiyon sürecinin etkinliğini ve kapasitesini artırır.

#### 2.2.4. Van der Waals Kuvvetleri

Van der Waals kuvvetleri, moleküller veya atomlar arasındaki zayıf elektriksel etkileşimlerden kaynaklanır ve üç ana bileşenden oluşur:

- **London Dağılım Kuvvetleri:** Tüm atomlar ve moleküller arasında mevcut olan bu kuvvetler, geçici dipol etkileşimlerinden doğar ve genellikle en zayıf van der Waals kuvvetleridir [38].
- **Debye Kuvvetleri:** Polar moleküller ile indüklenmiş dipoller arasındaki etkileşimlerden kaynaklanır [40].
- **Keesom Kuvvetleri:** İki polar molekül arasındaki etkileşimlerden doğar ve genellikle daha güçlüdür [39].

Bu kuvvetler, lehimleme ve ıslatma süreçlerinde önemli rol oynar. Lehim alaşımı ve altlık yüzeyi arasındaki van der Waals kuvvetleri, yüzey gerilimini ve dolayısıyla ıslanabilirlik ve temas açısını etkiler.

Lehimleme işlemlerinde adsorpsiyon ve van der Waals kuvvetlerinin etkilerini anlamak, yüzey etkileşimlerinin daha iyi anlaşılmasını sağlar. Özellikle, farklı yüzey aktif maddelerin ve akı bileşiklerinin kullanımı, adsorpsiyon davranışlarını ve yüzey gerilimlerini etkileyerek lehim kalitesini optimize edebilir. Yapılan çalışmalar, bu kuvvetlerin lehimleme süreçlerinin verimliliği üzerindeki etkisini göstermiştir [41].

#### 2.3. KOROZYON

Korozyon, bir maddenin özellikle metalin, çevresel faktörlere maruz kalması sonucunda zamanla değişerek bozulması veya aşınması olarak tanımlanan bir doğal süreçtir. Bu süreç, metalin en düşük enerji durumuna doğru hareket etmesiyle karakterizedir ve genellikle alüminyum ve çelik gibi metallerin oksijen ve su ile reaksiyona girerek hidratlı alüminyum ve demir oksitler gibi korozyon ürünleri oluşturmasıyla gerçekleşir. Bu korozyon ürünleri, zamanla metalin işlenmiş halinden

doğal haline dönüşmesine neden olan elementlerdir. Dolayısıyla, endüstriyel ürünlerden doğal kaynaklara kadar olan yaşam döngüsünün bir parçasıdır [42].

Metalik korozyon, dünya çapında yıllık olarak milyarlarca dolarlık ekonomik kayıplara neden olmaktadır. Ancak ekonomik maliyetlerin ötesinde, korozyon zaman zaman insan hayatı ve güvenliği için daha büyük riskler oluşturabilir. Örneğin, birçok uçak kazası, gövdenin korozyon sonucu zayıflayarak parçalanmasıyla yolcuların ölümüne yol açmıştır. Aynı şekilde, bazı köprülerin çökmesi de korozyon kaynaklı mekanik arızalardan kaynaklanmış ve bu durum yaralanmalara ve can kayıplarına sebep olmuştur. Bu tür mekanik arızaların genellikle atmosferik korozyondan kaynaklanan stres korozyonu çatlaması sonucu meydana geldiği bilinmektedir. Bu nedenle, korozyonu önlemeye yönelik teknikler ve ürünlerin geliştirilmesi için önemli miktarda kaynak ayrılmış ve bu çalışmalara devam edilecektir [43].

Günümüzde, korozyonun elektrokimyasal bir süreç olduğu kabul edilmektedir. Bu nedenle, korozyon süreçlerini anlamak ve karakterize etmek için elektrokimyasal teknikler büyük önem taşımaktadır. Elektrokimyasal teknikler, metalik korozyonun mekanizmalarını ve etkilerini incelemek, korozyon hızını belirlemek, koruyucu kaplamaların etkinliğini değerlendirmek ve korozyon önleme stratejilerini geliştirmek için yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu teknikler, korozyonla ilgili bilimsel araştırmaların yanı sıra endüstriyel uygulamalarda da önemli rol oynamaktadır. Bu nedenle, korozyonla mücadelede etkili çözümler geliştirmek için elektrokimyasal tekniklerin anlaşılması ve kullanılması gerekmektedir [44].

### **2.3.1. KOROZYON TÜRLERİ**

#### **2.3.1.1. Fiziksel Korozyon**

Korozyon, genellikle iki ana yöntemle gerçekleşir: doğrudan fiziksel çözünme ve katı hal değişimi. Bu süreçler, ergimiş metallerin veya organik sıvıların malzeme yüzeyine etkimesiyle tetiklenebilir. Örneğin, cıva veya sıvı alüminyumun metal yüzeyine teması, fiziksel korozyonun bir örneği olarak düşünülebilir. Bu tür etkileşimler, malzeme yüzeyinde değişikliklere yol açabilir ve korozyon sürecini hızlandırabilir. Bu

nedenle, korozyonun bu fiziksel mekanizmalarının anlaşılması, etkili koruma stratejileri geliştirmek için önemlidir [45].

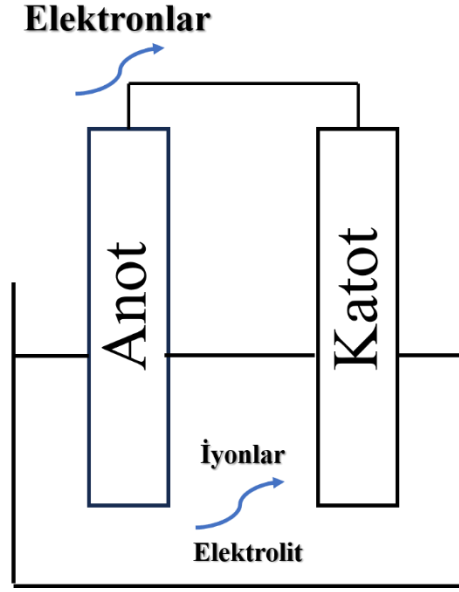
### **2.3.1.2. Kimyasal Korozyon**

Metal ve alaşımlarının atmosferik koşullardaki oksidasyonu, kuru korozyon adı verilen bir kimyasal korozyon örneğini temsil eder. Bu süreç, genellikle metalik malzemelerin yüzeyinde oksit ve sülfür gibi korozyon ürünlerinin oluşumuna yol açan belirli korozif maddelerin etkisiyle gerçekleşir. Özellikle O<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S ve halojenler gibi maddeler bu süreçte önemli rol oynarlar. Kimyasal korozyon ayrıca yüksek sıcaklık korozyonu olarak da adlandırılabilir. Bu nedenle, kazanların alev veya sıcak gazla temas ettiği bölgelerde bu tür kimyasal korozyon olayları sıkça gözlemlenir [45].

### **2.3.1.3. Elektrokimyasal Korozyon**

Metallerin ve alaşımların sulu ortamlardaki bozunumu, elektrokimyasal veya ıslak korozyon adı altında incelenir. Bu tür korozyonun gerçekleşebilmesi için, malzemeler arasında potansiyel farkı bulunan ve elektron akışının mümkün olduğu bir sulu çözeltiyle temas etmeleri gerekir. Elektrokimyasal korozyonda, elektron alışverişi malzeme yüzeyinde gerçekleşir. Korozyon süreci, anot ve katot reaksiyonlarının etkileşimiyle meydana gelir. Katot, indirgenme reaksiyonlarının gerçekleştiği yerdir, anot ise yükseltgenme reaksiyonlarının gerçekleştiği yerdir. Sulu bir elektrolit ortamında, korozyon reaksiyonu elektron verici bir madde olmaksızın gerçekleşemez. Korozyon sürecinde, çözünme olayının meydana geldiği bölge anot olarak adlandırılırken, indirgenme olayının gerçekleştiği bölge ise katot olarak tanımlanır. Korozyon esnasında, anodik ve katodik reaksiyonlar eş zamanlı olarak meydana gelir. Anot, korozyona uğrarken, katot ise korunur. Farklı potansiyel değerlere sahip iki metalik bölge veya nokta arasında etkileşim olduğunda, yüksek potansiyeldeki bölgede çözünme meydana gelirken, düşük potansiyeldeki bölgede korozyon oluşumu gerçekleşir. Bu durum, Talbot'un (2007) çalışmasında gösterildiği gibi, korozyon hücrelerinin (galvanik hücrenin) Şekil 2.4'de açıklandığı gibidir [45].

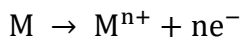




Şekil 2.2. Elektrokimyasal korozyon.

Elektrokimyasal reaksiyonlar, sulu çözeltilerde meydana gelen elektron alışverişiyle oksidasyon (elektron verme) ve redüksiyon (elektron alma) tepkimelerini ifade eder. Bu tür reaksiyonlar atmosferde, su içinde ve toprak altında oluşan korozyon reaksiyonlarında gözlemlenebilir. Atmosferde ve toprak altında bulunan metallerin yüzeylerinde çeşitli kalınlıklarda su filmleri bulunur. Su içinde çözünen oksijen (O<sub>2</sub>) gazı, metal yüzeyinde redüklenerek iyonik formuna dönüşürken, metal ise O<sub>2</sub>'ye elektronlarını vererek oksitlenir. Bu süreç sonucunda metalin kimyasal yapısında değişiklikler meydana gelir ve bu olay korozyon olarak adlandırılır [46].

Elektrolitler, suyun içinde çözüldüğünde asit, baz ve tuz gibi maddeleri içeren çözeltilerdir. Örneğin, bir metal elektrot kendi tuzunun sulu çözeltisine yerleştirildiğinde, metal atomlarındaki dış elektronlar serbest hale geçer. Bu süreç sonucunda:

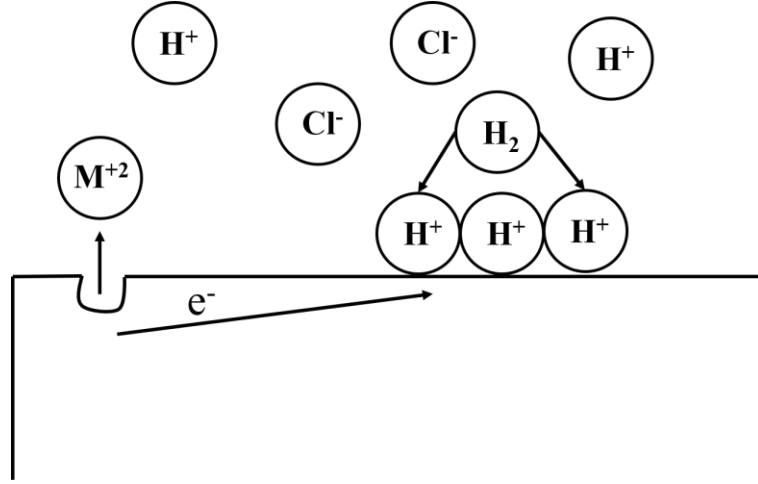


yüklü metal iyonu meydana gelir [46].





Bu reaksiyonlar metal yüzeyinde eş zamanlı ve eşit hızda meydana gelir. Başka bir ifadeyle, korozyon esnasında anottaki yükseltgenme oranı, katottaki indirgenme oranıyla dengelenir.



Şekil 2.3. HCl ortamında metalin korozyonu sırasında gerçekleşen elektrokimyasal olaylar [2].

Metal yüzeyinden ayrılan bir metal atomu, iyonlaşarak metal iyonunu oluştururken, bu süreçte yüzeyde iki elektron bırakır. Bu serbest elektronlar daha sonra hidrojen iyonlarının indirgenmesi sırasında kullanılır. Metal atomunun elektron vererek metal iyonuna dönüşümü, anodik tepkime olarak tanımlanır. Diğer yandan, katodik tepkime, hidrojenin oluşumunu içerir. Bu tip katodik tepkimelere çeşitli örnekler bulunmaktadır:



Asidik koşullarda, hidrojen çıkışı en yaygın katodik tepkime olarak görülürken, diğer katodik tepkimeler oldukça seyrek olarak meydana gelir. Metal bir alaşım korozyona

uğradığında, her metal kendi iyonlarına dönüşerek çözeltiliye geçer ve bu durum birden fazla oksidasyon tepkimesinin gerçekleşmesine yol açabilir. Öte yandan, HCl çözeltisi içinde çözülmüş oksijen varsa, hidrojen çıkışı ile birlikte oksijen indirgenmesi de meydana gelir. Korozyon sürecinde, oksidasyon hızı ile indirgenme hızı eşit olduğundan, bir tepkimenin artışı diğerinin artmasına neden olur. Dolayısıyla, oksijen içeren HCl çözeltisi, oksijen içermeyen bir çözeltiden daha fazla korozif olabilir [47].

#### **2.4. SHEAR STRENGTH (ÇEKME GERİLİMİ) DENEYİ**

Malzemelerin mekanik özelliklerini belirlemek ve mekanik davranışlarını sınıflandırmak amacıyla sıkça başvurulan bir yöntem olan çekme gerilimi deneyi, belirli standartlara uygun olarak hazırlanan numunelerin tek ekseninde sabit bir hızda kopana kadar çekilmesi esasına dayanır. Bu deney sırasında, numunelere uygulanan kuvvet, numunenin boyunu uzatacak şekilde eksen doğrultusunda olmalıdır [48]. Çekme gerilimi deneyi yapılırken numunenin standartlara uygun hazırlanması, numuneye tek bir ekseninde belirli bir hızda ve statik bir yük uygulanması, işlem yapılan sıcaklığın bilinmesi gibi dikkate alınması gereken çeşitli kriterler bulunmaktadır [49].

Başlangıç değerinden P noktasına kadar doğrusal bir eğri oluşturur ve numuneye uygulanan düşük şiddetteki kuvvet düzeylerinde numunenin uzama miktarı uygulanan kuvvet değeri ile doğru orantılı olacaktır. Bu bölgede doğrusal bir grafik oluşur ve numune elâstik (esnek) bir davranış sergiler. Malzemedeki kalıcı bir şekil meydana gelmez çünkü kuvvet ortadan kaldırıldığında eski haline geri dönerek şekil bozukluğuna sebep olmaz. Bu bölge orantı sınırı olarak da adlandırılır. Uygulanan kuvvet numunenin elastik davranışını yani orantı sınırını geçerse lineer bir doğrudan parabolik bir eğriye geçerek doğrusallık azalır. Bu durum elastik sınır olarak kabul edilen E noktasına kadar devam eder ve kuvvet kaldırıldığında numune tekrar eski haline geri döner. Bu noktadan sonra plastik deformasyon olarak adlandırılan numune üzerinde kalıcı hasarlar meydana gelir. Bazı malzemelerde elastik sınır, orantı sınırı değeriyle aynı değere denk gelebilir. Elastik sınırının ölçümünün kolay olmadığı durumlarda, %0.01 veya %0.005 plastik uzamaya karşılık gelen kuvvet değerleri alınarak, elastik sınır değeri tespit edilir.

## 2.5. ELEKTRİKSEL İLETKENLİK

Elektronik devrelerin vazgeçilmez ara bağlantısını sağlayan lehimler aynı zamanda elektriksel olarak da bir ara bağlantı görevi üstlenir. Metallerin en önemli özelliklerinin birilerinin arasında yer alan elektrik akımını iletme yeteneği (iletilmesi veya iletilmemesi) iletkenlik unsurlarının başında yer alır. Elektrik iletimi serbest elektronların hareket edip edememesi durumları ile ilgilidir [50]. Bir lehim alaşımının yani devrelerdeki elektriksel ara bağlantının yeterince işlev görebilmesi, elektriksel özdirence ( $\rho$ ) bağlıdır. Seçilen lehim alaşımının elektrik iletkenliği, seçilen geometri için elektronların hareketine yan elektrik akımına izin verecek düzeyde yüksek olmalıdır [30].

Çoğu elektronik uygulama için, kullanılan lehim alaşımının özdirenci nispeten düşüktür ve devrenin genel işlevselliği üzerindeki etkisi önemsizdir. İletkenin özdirencinin mikro yapıya, tane boyutuna, dislokasyon yoğunluğuna vs. bağlı bir niceliktir [51].

### 2.5.1. Ohm Yasası

Ohm yasası, bir elektrik devresindeki gerilim, akım ve direnç arasındaki ilişkiyi tanımlar. Bir devreye uygulanan gerilim, devreden geçen akım ile devrenin direnci arasında doğrusal bir ilişki gösterir. Yani, bir devreden geçen akım, uygulanan gerilimin büyüklüğüne doğru orantılıdır ve devrenin direncine ters orantılıdır. R direnci malzemenin geometrisi ile alakalı bir özellik olup birçok malzeme için akımdan bağımsız bir niceliktir. Elektriksel özdirenç ( $\rho$ ) ile R direnci birbirleri ile ilişkilidir.  $\rho$ ; bir malzemenin kendine özgü direncidir. Birim uzunluk ve birim kesit alanı başına düşen direnç miktarını ifade eder.  $\rho$ , bir malzemenin elektrik akımını ne kadar zorladığını belirler [52].

Başka bir deyişle bir iletken malzemenin elektriksel iletkenliği malzemeye uygulanan elektrik alan ( $\vec{E}$ ) sayesinde elektriksel yük taşıyıcılarının (serbest elektronların) hareket etmesi ile ilgilidir. Kovalent bağlı malzemelerde elektriksel alan etkisi ile kopan elektron artı kutba doğru hareket ederek eksi yük taşıyıcısı olur. Elektron eksilmesi

durumunda oluşan bu elektron boşluğu eksi yönden kopan başka bir elektron ile doldurulur. Bu olay sonucunda eksi yönde hareket eden yeni bir boşluk (hole) oluşur. Bu şekilde devam eden elektron deliğinin konumu artı yük taşıyıcısı olarak adlandırılır. İyonik yapılı malzemeler için artı yüklü iyon, eksi kutba doğru hareket ederek artı yük taşıyıcısı, eksi yüklü iyon ise artı kutba giderek eksi yüklü taşıyıcısı olur [53].

Serbest elektronun momentumu  $m\vec{v} = \hbar\vec{k}$  bağıntısı ile dalga vektörüne bağlıdır. Dış bir elektrik alan ( $\vec{E}$ ) ve manyetik alan ( $\vec{B}$ ) etkisinde – yüklü elektrona ( $e^-$ ) etkiyen kuvvet (Eşitlik 2.3):

$$\vec{F} = -e \left[ \vec{E} + \frac{1}{c} \vec{v} \times \vec{B} \right] \quad (2.3)$$

olarak elde edilir. Newton'un ikinci yasası gereği bu kuvvet;

$$\vec{F} = m \frac{d\vec{v}}{dt} = \hbar \frac{d\vec{k}}{dt} = -e \left( \vec{E} + \frac{1}{c} \vec{v} \times \vec{B} \right) \quad (2.4)$$

tanımlanır. Sadece sabit bir  $\vec{E}$  var ise  $\vec{B} = 0$  alınarak,

$$-e\vec{E} = m \frac{d\vec{v}}{dt} \quad (2.5)$$

bulunur. Gerekli diferansiyel işlemlerin ardından,

$$\int_0^v d\vec{v} = \int_0^\tau \frac{-e\vec{E}}{m} dt \quad (2.6)$$

$$v = \frac{-eE}{m} \tau \quad (2.7)$$

elde edilir. Burada elektron ve boşluklar için sürüklenme hızları;

$$v = \frac{-e\tau_e}{m_e} E = -\mu_e E \quad (2.8)$$

$$v = \frac{-e\tau_h}{m_h} E = -\mu_h E \quad (2.9)$$

elde edilir. Elektron ve boşlukların hareket etme (mobilité) yetenekleri  $\mu_e$  ve  $\mu_h$  olarak adlandırılır. Toplam elektrik akım yoğunluğu, n tane elektron ve p tane boşluğun katkıları sonucunda;

$$J = -nev_e + pev_h = \left( \frac{ne^2\tau_e}{m_e} + \frac{pe^2\tau_h}{m_h} \right) E \quad (2.10)$$

$$J = (ne\mu_e + pe\mu_h)E = \sigma E \quad (2.11)$$

elde edilir. Eşitlik 2.10 ve 2.11'de belirtilen J; akım yoğunluğunu ( $A/m^2$ ) yani malzemenin birim alanından geçen akım değeridir. E; elektrik alan şiddeti iletkenin bir metrelik bir mesafeye karşılık gelen bir volt potansiyel farkı anlamına gelir. Bu ifade ohm yasası olarak bilinir. Burada belirtilen  $\sigma$ ; elektriksel iletkenliktir. Elektron ve boşluk mobiliteleri elektronların boşlukların iletkenliğe katkılarını belirler [54].

A kesit alanlı I akımı taşıyan bir iletkeni ele alalım. İletkenin içerisindeki J akım yoğunluğu, birim alan başına düşen akım yoğunluğu olarak tanımlanır (Eşitlik 2.12).

$$J = \frac{I}{A} \quad (2.12)$$

E elektrik alanı birim uzunluk başına düşen potansiyel fark olarak tanımlanır (Eşitlik 2.13).

$$E = \frac{\Delta V}{l} \quad (2.13)$$

Eşitlik 2.11, Eşitlik 2.12 ve Eşitlik 2.13 birleştirilirse

$$\frac{I}{A} = \sigma \frac{\Delta V}{l} \quad (2.14)$$

$$\frac{\Delta V}{I} = \frac{l}{\sigma A} \quad (2.15)$$

Eşitlik 2.15'te verilen  $\frac{l}{\sigma A}$  ifadesi iletkenin direnci olarak adlandırılır. Bu eşitlikler sayesinde ohm yasası elde edilir (Eşitlik 2.16) [54].

$$R = \frac{\Delta V}{I} \quad (2.16)$$

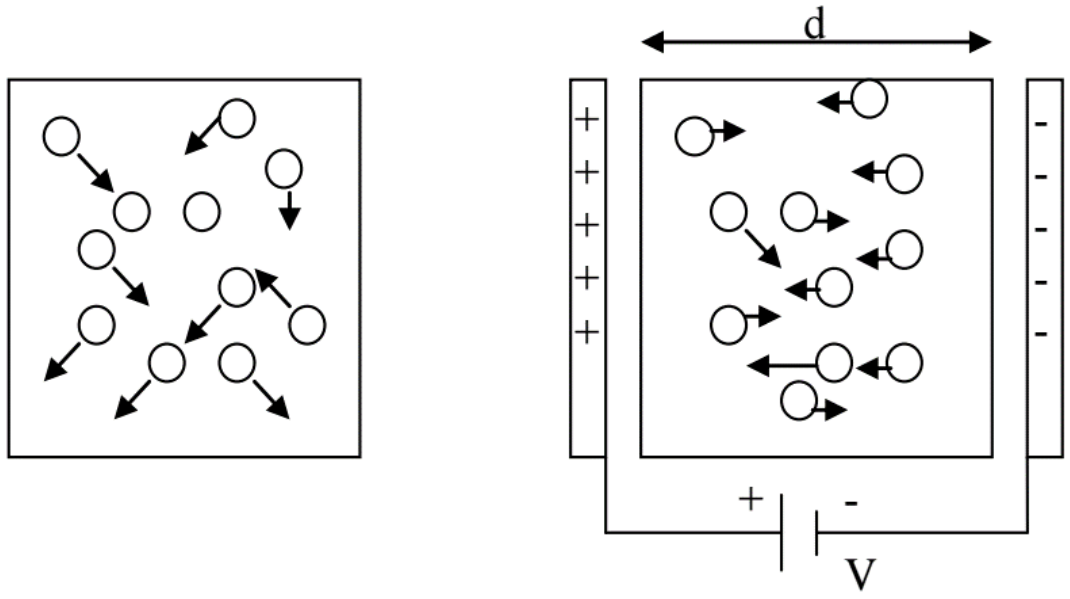
### 2.5.2. Elektriksel İletkenlik

Malzemeler iletken, yarı iletken ve yalıtkan olarak sınıflandırılır ve bu sınıflandırma elektrik akımını iletme kabiliyetleri göz önüne alınarak yapılır. Elektriksel iletkenliği en iyi olan metaller  $10^7 (\Omega.m)^{-1}$  mertebesinde, yarı iletkenler  $10^{-6}$  ile  $10^4 (\Omega.m)^{-1}$  arasında orta seviyede elektriksel iletkenliğe sahip malzemelerdir. Yalıtkan malzemeler ise  $10^{-10}$  ile  $10^{-20} (\Omega.m)^{-1}$  arasında değişkenlik gösteren çok düşük elektriksel iletkenliğe sahiptirler [52].

Bir malzemenin elektrik akımını iletme yeteneğini ifade eder. Yani, bir malzemenin elektrik akımını iletim yeteneği ne kadar yüksekse, elektriksel iletkenliği de o kadar yüksek olur. Elektriksel iletkenlik ( $\sigma$ ), elektronların serbestçe malzeme içinde hareket ettiği ve akımın kolayca iletildiği anlamına gelir. Bir malzemenin iletkenliği ile özdirenç arasında ters orantılı bir ilişki vardır. Bir malzemenin elektriksel iletkenliği ne kadar yüksekse, özdirenç de o kadar düşüktür. Bu ilişki, bir malzemenin elektrik akımını nasıl iletme yeteneğini belirleyen önemli bir faktördür [55].

Metallerde serbest elektronlar madde içerisinde rastgele hareket halindedirler. Bu hareket türleri kararlı dalga türüdür. Normal halde dış etki yoksa herhangi bir yöne giden ortalama yük ile ters yöne doğru giden ortalama yük eşit olmalıdır.

$\vec{E}$  elektriksel alanı uygulandığında – kutba doğru hareket halinde olan elektronlar yavaşlayacaktır, + kutba doğru ilerlemekte olanlar ise hızlanacaktır. Bu olay net bir akımın oluşmasını sağlar.



Şekil 2.4. Elektriksel iletkenlik.

Yük taşıyıcılarının sahip olduğu ortalama sürüklenme hızı  $v$ , ortamdaki  $\vec{E}$  elektriksel alan ile doğru orantılı bir bağıntıya sahiptir.

$$v = \mu E$$

Malzeme içerisinde aktif halde bulunan yük taşıyıcı sayısı  $n$  ve yük taşıyıcının sahip olduğu birim yük  $q$  ile elektriksel iletkenlik  $\sigma$  arasında doğru orantılı bir bağıntı vardır.

$$\sigma = \mu n q$$

$\vec{E}$  elektriksel alanı sayesinde yayılan elektronların hızının sürekli artması gerekir. Sürekli artan hız sayesinde momentum kazanırlar. Elektronlar bir atoma çarptığında veya bir engelle karşılaştığı durumda yön değiştirirler, elektronun hızı düşer ve buna bağlı olarak kinetik enerjilerinde azalma meydana gelir. Çarpışma sonucunda atomun titreşimi artması ve aldığı ısı enerjisinin maddenin içerisinde yayılması ile metal ısınır. Yön değiştirmiş olan elektronlar ortamdaki elektrik alanının devam etmesi sebebi ile tekrar hızlanır, tekrar engele çarpar ve sürekli yön değiştirerek yoluna devam eder. Elektronların engele çarpmadan sapılmadan alabileceği yol ortalama serbest yol olarak adlandırılır. Ortalama serbest yolun azalması (fononlar, yabancı atomlar, iç yapı



kusurları (dislokasyonları)) malzemenin direncini artırarak iletkenliğin azalmasına yol açar [54].

## BÖLÜM 3

### LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

#### 3.1. Literatür Özeti

Yang ve arkadaşlarının “Sn-0.7Cu-xAl ( $x = 0-0.075$ ) kurşunsuz lehim alaşımının mikroyapı, arayüzey IMC ve mekanik özellikleri” çalışmasında alüminyum konsantrasyonunun Sn-0.7Cu kurşunsuz lehim alaşımının mikro yapısı, ıslanabilirliği, arayüzey IMC ve mekanik özellikleri üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Sn-Cu-Al lehim alaşımının mikro yapısının  $\beta$ -Sn, ötektik ve IMC'den oluştuğunu ve mikro yapının alüminyum ile rafine edildiğini rapor etmişlerdir. Sn-0.7Cu-(0.01-0.025)Al'de  $\beta$ -Sn sınırındaki IMC  $Cu_6Sn_5$  ve Sn-0.7Cu-(0.05-0.075)Al'de  $Al_2Cu$  olarak değiştirildiği bildirilmiştir. Sn-Cu alaşımındaki ötektikinin konsantrasyonu hacimce yaklaşık %74.3 ve Sn-Cu-Al lehim alaşımında hacimce %14,6-21,7'ye düşürüldüğü tespit edilmiştir. Sn-Cu-Al lehim alaşımının ıslanabilirliği Sn-0.7Cu-0.075Al yayılma katsayısı yaklaşık %70'e ulaştığı bildirilmiştir. 1-3 $\mu$ m kalınlığındaki taraklı arayüzey IMC, bakır altlık ve lehim alaşımı arasında oluştuğu rapor edilmiştir. Sn-Cu-Al lehim alaşımının mekanik özelliklerinin alüminyum ilavesiyle biraz azaldığı ve artan alüminyum konsantrasyonu ile uzama hızının arttığı gözlemlenmiştir. Sn-0.7Cu'nun çekme mukavemetinin Sn-0.7Cu-(0.05-0.075)Al,  $Al_2Cu$  tarafından dislokasyonun kaymasını engellemesi ve IMC'nin değişmesi nedeniyle üstün olduğu tespit edilmiştir. Sn-0.7Cu-(0.05-0.075)Al alaşımının uygulanabilir bir kurşunsuz lehim alaşımı olarak kabul edildiği rapor edilmiştir [56].

Jiang ve arkadaşlarının “Yüksek sıcaklıkta tavlamanın Sn-3.7Ag-0.9Zn-xAl kurşunsuz lehimin mikroyapısal oluşumu üzerindeki etkisi” çalışmasında Sn-3.7Ag-0.9Zn lehiminin mikroyapısal oluşumuna küçük Al ilavesi ve yüksek sıcaklıkta yaşlandırma sırasında karşılık gelen yapısal stabilite mikroskobik analizlerle araştırmışlardır. Sn-3.7Ag-0.9Zn lehimine küçük Al ilavesinin AgZn ve  $Ag_3Sn$

IMC'lerin oluşumunu kısıtlayabildiği ve  $Ag_2Al$  fazının oluşumunu teşvik ettiği ve oluşan IMC'lerin morfolojisinin homojen parçacıklardan rastgele yığınlara evrimleştiği bulunmuştur. Al miktarı arttıkça, keşfedilen  $Sn-3.7Ag-0.9Zn$  lehimlerinin mikro yapısında. Yüksek sıcaklıkta tavlamadan sonra,  $Ag_2Al$  IMC'lerin lehimde ağırlıkça %0.5 Al ile ayrılmasının teşvik edildiği ve ağırlıkça %1.0 Al ile lehime kıyasla büyük ölçüde parçalandığı rapor edilmiştir [57].

Kolenak ve arkadaşlarının “SAC405 ve SAC405+0.1%Al kurşunsuz lehimlerin karşılaştırma çalışması” çalışmasında SAC 405 lehim alaşımına %0.1 Al eklenerek ince bir yapı oluşturulduğu bildirilmiştir.  $Ag_3Sn$  iğneli birincil kalay matrisinde, tüm lehim hacmi boyunca eşit olmayan bir şekilde dağılmış, stokiometrik olmayan yeni bir Cu-Al fazı olduğu rapor edilmiştir. EDX analizi, Cu-Al fazının yaklaşık olarak ağırlıkça %77 Cu ve ağırlıkça %21 Al'den oluştuğunu ortaya koydu. Bu durumun,  $\zeta_2$  fazının yüzde oranı  $\delta$  fazının oranını aşan  $\zeta_2$  ve  $\delta$  fazlarının katı bir çözümünü temsil ettiğini bildirmişlerdir. İlk olarak  $Cu_6Sn_5$  fazı, yeni Cu-Al fazının oluşumuyla ortadan kaybolduğu rapor edilmiştir. SAC 405+0.1%Al lehim alaşımının ergime aralığı 217-219°C'den 221°C'ye yükseldiği bildirilmiştir. 221°C'lik sıcaklık, Ag-Sn ötektiklerinin erime sıcaklığına karşılık geldiğini ve lehim alaşımının böylece ötektik gibi davrandığı rapor edilmiştir. SAC 405+%0.1 Al lehim/Cu alt tabaka sınırı üzerinde IMC ( $Cu_6Sn_5$  ve  $Cu_3Sn$ ) kalınlığının ölçümü, bir alüminyum ilavesinin bir bakır alt tabaka ile temas yüzeyindeki IMC'lerin büyümesini engellediği gösterilmiştir. %0,1 Al içerikli lehim durumunda, IMC kalınlığı lehimleme sıcaklığına bağlı olarak 2-3  $\mu m$  azaldığı tespit edilmiştir. Lehimli bağlantıların mekanik özelliklerinin ölçümlerinin, SAC 405+0.1%Al lehimin kesme mukavemetinin azaldığını göstermiştir. Ortalama gücün, SAC 405 lehim alaşımına kıyasla 8 MPa azaldığı ve mukavemetteki bu düşüşün, sert  $Cu_6Sn_5$  fazlarının büyümesi kötüleştikçe yumuşak Cu-Al fazlarının oluşumundan kaynaklandığı rapor edilmiştir. Kesme mukavemetindeki bu düşüşe dayanarak, yüksek Ag içeriğine sahip lehimlerde ( $Ag \geq 3$  wt.%) düşük düşme güvenilirliği ile sonuçlanan akma noktasında da bir düşüşün meydana geldiğinin varsayılabildiği not edilmiştir. SAC405 lehim alaşımına %1'e kadar Al ilavesinin, taşınabilir elektronikteki uygulamalar için uygun bir alternatif olduğu bildirilmiştir. Doğal olarak, bu uygulamalarda ıslanabilirlik ve yayılabilirlik gibi hafif bozulan lehimleme özelliklerini hesaba katmak gerekir. SAC 405+Al lehim alaşımının ıslatma açısının

ortalama 2°-6° arttığı rapor edilmiştir. Cu<sub>6</sub>Sn<sub>5</sub> fazının büyümesini engelleyen düşük alüminyum ilaveleri nedeniyle bakır altlıkların ıslanabilirliğinin bozulduğu tespit edilmiştir [58].

Lee ve arkadaşlarının “SnAgCu Lehimde Al İlavesi ile Islanabilirlik ve Düşme Darbesi Güvenilirliğinin İyileştirilmesi” çalışmasında Al metalinin eklenmesi, lehimin ıslanabilirliğini iyileştirebildiği rapor edilmiştir. Al içeriği ağırlıkça %0.1'den yüksekse, yüzey oksidi arttığından zayıf ıslanabilirlik olduğu tespit edilmiştir. Dolayısıyla bu deneyde optimum Al miktarı ağırlıkça %0.01–0.02 olarak seçilmesi gerektiği bildirilmiştir. Al metalinin eklenmesiyle, bağlanma özelliğinde veya IMC arayüzünde herhangi bir değişikliğin gözlenmediği rapor edilmiştir. Al katkılı lehimin, daha yüksek süneklik özelliğinden dolayı geliştirilmiş düşme performansına sahip olduğu tahmin edilmektedir. Düşürme darbe testinde, Al katkılı lehim, Ref'den daha iyi düşme performansı gösterdiği rapor edilmiştir [59].

Li ve arkadaşlarının “Sn bazlı lehimler ve Cu altlık arasındaki intermetalik bileşik katmanların büyüme oranları üzerinde Al'in etkisi” çalışmasında temel 100Sn, 96,5Sn–3.5Ag (SA) ve 95,5Sn–3.8Ag–0.7Cu (SAC) lehimlerine ağırlıkça %1 Al ilavesinin lehimler arasındaki intermetalik bileşik (IMC) katmanlarının büyüme oranları üzerindeki etkisi ve bir Cu substrat araştırmışlardır. SA/Cu ve SAC/Cu sistemlerinde Cu<sub>6</sub>Sn<sub>5</sub> ve Cu<sub>3</sub>Sn katmanlarının büyüme oranları ve kalınlıkları, mevcut literatürde bildirilen benzer yeniden akış süreleri için olanlarla karşılaştırılabilir olduğu bildirilmiştir. Temel 100Sn, SA ve SAC lehimlerine ağırlıkça %1 Al eklenmesi, lehim/Cu arayüzlerinde oluşan IMC'lerin büyüme oranlarını yavaşlattığı ve en iyi sonucun ağırlıkça SAC lehiminde %1 Al ilavesiyle elde edildiği rapor edilmiştir. IMC'lerin büyüme oranlarındaki azalma, lehimlerin büyük kısmı içinde ve arayüzlerde Al içeren IMC'lerin bir tabakasının oluşumu ve evriminin yanı sıra iz varlığı nedeniyle Sn'nin aktivitesinde azalmaya bağlanabildiği tespit edilmiştir. İzotermal yaşlandırma sırasında SAC/Cu numunelerindeki Cu<sub>6</sub>Sn<sub>5</sub> ve Cu<sub>3</sub>Sn katmanlarının büyüme oranları hem enterpolasyonlu hem de ekstrapolasyonlu olanlardan daha düşük olduğu ve mevcut çalışmada rapor edilen Cu/Sn, Cu/Cu<sub>6</sub>Sn<sub>5</sub> ve Cu<sub>3</sub>Sn/Sn difüzyon çiftlerinin sonuçlarından hesaplanabildiği bildirilmiştir. Temel SAC lehimine ağırlıkça %1 Al

ilavesi, havada izotermal yaşlandırmaya tabi tutulan numunelerdeki IMC'lerin büyüme oranlarını da önemli ölçüde yavaşlatabildiği tespit edilmiştir. Buna, gaz oluşturma altında yeniden akış işlemi sırasında bulunana benzer şekilde, lehim kütlesi içinde katmanlı Al içeren IMC'lerin evriminin eşlik ettiği gözlemlenmiştir [60].

Maslinda ve arkadaşlarının “Al ilavesinin düşük Ag-G SAC lehimin toplu mikroyapısına, IMC oluşumuna, ıslatma ve mekanik özelliklerine etkisi” çalışmasında SAC0305 lehiminin mikroyapı, ıslatma ve mekanik özelliklerine ağırlıkça %0,5, 1, 1,5 ve 2 Al ilavesinin etkisi araştırmışlardır. Al miktarının artmasıyla lehimin ergime ve kristalleşme sıcaklığı artarken aşırı soğuma derecesinin azaldığı rapor edilmiştir. Al-eklenmiş lehimlerin SAC0305 lehimine kıyasla daha hızlı çekirdeklenme oranına sahip olduğu gözlemlenmiştir. Al ilavesi,  $\beta$ -Sn dendritlerini rafine ettiğini ve Cu–Al ve Ag–Al IMC'lerin oluşumunu teşvik ettiğini göstermişlerdir. Aynı zamanda  $Cu_6Sn_5$  ve  $Ag_3Sn$  IMC'lerin oluşumunu baskılayarak daha az interdendritik (ötektik) bölge oluşmasına neden olduğu rapor edilmiştir. Artan Al miktarı ile ıslanma açısı ve ıslanma süresinin arttığı ve yayılma alanının azaldığı bildirilmiştir. Islatma kuvvetinin ağırlıkça %0.5 Al ilavesinden sonra arttığı, ancak ağırlıkça %0.5'in üzerinde Al ilavesinden sonra azaldığı rapor edilmiştir. Al ilavesinin SAC0305 lehiminin ıslatma özelliklerini biraz azalttığını gösterdiği not edilmiştir. Yeniden akıtılan numuneler için, artan Al ilavesi miktarı ile lehim eklemesindeki IMC tabakasının kalınlığının arttığı ve bununla birlikte, Al-eklenmiş tüm lehimler, SAC0305'ten daha ince IMC tabakasının oluştuğu rapor edilmiştir. Al katkılı lehimlerin kesme mukavemetinin SAC-0.5Al ile SAC0305'ten biraz daha yüksek olduğu ve SAC-1Al, SAC-1.5Al ve SAC-2Al'e kıyasla daha yüksek değer verdiği gözlemlenmiştir [61].

Shnawah ve arkadaşlarının “Elektronik Uygulamaları için Sn-1 Ag-0.5Cu Lehim Alaşımına Al İlavesinin Mikroyapısı ve Çekme Özellikleri” çalışmasında ağırlıkça %0,1 Al eklenmesinin  $Ag_3Sn$  IMC parçacıklarının miktarını azalttığı ve daha büyük Sn-Ag-Al IMC parçacıklarını oluşturduğu ve ağırlıkça %0,5 Al eklenmesi ile  $Ag_3Sn$  IMC parçacıklarının oluşumunu bastırdığı ve ince Al-Ag IMC parçacıklarını oluşturduğunu rapor etmişlerdir. Hem ağırlıkça %0,1 hem de ağırlıkça %0,5 Al ilaveleri,  $Cu_6Sn_5$  IMC partiküllerinin oluşumunu baskıladığı ve daha büyük Al-Cu

IMC partiküllerinin oluşumuna yol açtığı gözlemlenmiştir. SAC105 alaşımına ağırlıkça %0.5 Al ilavesinin aşırı soğumayı önemli ölçüde bastırdığı ve  $\beta$ -Sn dendritlerini rafine ettiği not edilmiştir. İri birincil  $\beta$ -Sn dendritlerine ek olarak, büyük Sn-Ag-Al ve Al-Cu IMC partiküllerinin oluşumu, ağırlıkça %0.1 Al içeren SAC105 alaşımının elastik modülünü ve akma mukavemetini önemli ölçüde azalttığı rapor edilmiştir. Büyük miktarda ince Al-Ag IMC partiküllerinin yanı sıra fine  $\beta$ -Sn dendritlerinin oluşumu, ağırlıkça %0,5 Al içeren SAC105 alaşımının elastik modülünü ve akma mukavemetini önemli ölçüde artırdığı bildirilmiştir. Hem ağırlıkça %0,1 hem de ağırlıkça %0,5 Al ilavelerinin uzamayı kötüleştirdiği ancak, uzamadaki azalmanın çok daha güçlü olduğu ve ağırlıkça %0,5 Al ilavesi ile sünek kırılma yerine gevrek kırılma meydana geldiği bildirilmiştir. Al ilavesi, SAC105 alaşımının hem katı hem de sıvı sıcaklıklarını arttırdığı not edilmiştir [62].

Sun ve arkadaşlarının “Nano-Al ilavesinin düşük Ag içerikli Sn-1Ag-0.5Cu lehimlerin özellikleri ve mikro yapısı üzerindeki etkisi” çalışmasında Sn-1.0Ag-0.5Cu lehime Al nanoparçacıklarının eklenmesiyle, ergime noktasının önemli bir değişiklik getirmediği not edilmiştir. Ancak Sn-1Ag-0.5Cu lehimin ıslanabilirliği ve mekanik özelliklerini açıkça iyileştirdiği rapor edilmiştir. Bununla birlikte, aşırı Al nanoparçacıklarının eklenmesi, lehimin ıslanabilirliğini ve mekanik özelliklerini azalttığı ve optimum Al nanoparçacık içeriği ağırlıkça %0,1 olduğu rapor edilmiştir. Ayrıca, Al nanoparçacıkları, Sn-1Ag-0.5Cu lehimin mikro yapısını iyileştirebildiği ve Al nanoparçacıklarının lehim/Cu'daki arayüzey IMC üzerindeki kısıtlayıcı etkisi de belirtilmiştir [63].

Fayeka ve arkadaşlarının “Alüminyum ilavesinin ağırlıkça %3,5 NaCl çözeltisinde Sn-3Ag-0.5Cu lehim alaşımının elektrokimyasal korozyon davranışı üzerindeki etkisi” çalışmasında SAC 305 Al ile alaşımlanmış lehim alaşımının elektrokimyasal korozyon direnci özelliklerini araştırmışlardır. Al ilavesinin potansiyeli negatif değere kaydırırken korozyon akımının yoğunluğunun azaltıldığı not edilmiştir. Ek olarak, kritik akım yoğunluğu ve pasivasyon akım yoğunluğunun daha düşük pasivasyon ve korozyon direncini gösteren daha küçük pasivasyon aralığı sergileyerek arttığı bildirilmiştir. Elektrokimyasal testlerin sonunda gerçekleştirilen karakterizasyon,

maruz kalan yüzeyde kalay oksit-hidroksit klorürden oluşan ve SAC 305 için daha yapışkan ve kompakt görünen bir korozyon ürünleri tabakasının varlığını kanıtladığı bildirilmiştir. Bu durumun Al ile artan yüzey pürüzlülüğü ile daha da doğrulandığı gözlemlenmiştir. Al ile alaşımlı SAC 305 için, korozyon ürünleri esas olarak Al ve Sn oksitlerinden ve hidroksitlerinden oluştuğu not edilmiştir. Elektrokimyasal empedans spektroskopisinden, Al ilavesiyle yük transfer direnci, empedans ve maksimum faz açısının azaldığı bildirilmiştir. Al ilaveli SAC 305, SAC 305 lehim alaşımından daha zayıf korozyon direncinin sergilendiği rapor edilmiştir [64].

Tezel ve arkadaşlarının “Sn-Al alaşımlarının yapısal ve termo-elektriksel özellikleri” çalışmasında Sn-Al alaşımlarının yapısal ve termo-elektriksel iletkenlik özellikleri incelenmiştir. Numunelerin yapısal özelliklerini netleştirmek için XRD, SEM ve EDAX ölçümleri yapılmıştır. Numunelerin kristal simetrisi saf Al için kübik, alaşımlı numuneler ve saf Sn için tetragonal olarak indekslendi. Numunelerin ısı iletkenlikleri radyal ısı akışı yöntemi ile belirlenmiş ve artan sıcaklıkla çok yavaş bir şekilde azaldığı görülmüştür. Saf Al ve ötektik numunelerin termal iletkenlikleri, saf Sn'nin termal iletkenliğinden daha yüksektir. Bu sonuç Al içeriğinin termal iletkenliği arttırdığını göstermektedir. Isıl iletkenlik sıcaklık katsayısı değerleri, ısıl iletkenlik değerlerinden hesaplanmıştır. Numunelerin elektrik özdirenç değerleri de dört noktalı prob tekniği ile ölçülmüştür. Değerler artan sıcaklık ve Sn bileşimi ile artmıştır. Özdirenç sıcaklık katsayıları, elektrik özdirenç değerlerinden hesaplanmıştır. Numunelerin Lorenz sayıları, elektriksel ve termal iletkenlik değerleri kullanılarak hesaplanmıştır ve elektronik bileşen toplam termal iletkenliğe baskın olarak katkıda bulunduğu, Wiedemann-Franz ilişkisi geçerli olduğu rapor edilmiştir [65].

Yang ve arkadaşlarının “Alüminyum konsantrasyonunun Sn-Cu-Al lehim alaşımının mikro yapısı ve mekanik özellikleri üzerindeki etkisi” çalışmasında Sn-Cu-Al lehim alaşımının ıslanabilirliğinin alüminyum ilave edilerek iyileştirildiği ve artan alüminyum konsantrasyonu ile yayılma katsayısının arttığı rapor edilmiştir. Sn-Cu-Al lehim alaşımının mikro yapısının  $\beta$ -Sn, ötektik ve IMC'den oluştuğu ve mikro yapının alüminyum eklenerek rafine edildiği bildirilmiştir. Ötektik ve IMC'nin hacim oranının artan alüminyum konsantrasyonu ile arttığı bildirilmiştir. IMC, Sn-Cu-

(0.01–0.025)Al'de  $Cu_6Sn_5$ 'ten Sn–0.7Cu–(0.05–0.075)Al'de  $Al_2Cu$  ile değiştiği rapor edilmiştir. Sn–Cu–Al lehim alaşımının çekme mukavemeti ve uzaması, alüminyum konsantrasyonunun ağırlıkça %0.025'e çıkarılmasıyla sırasıyla azaldığı ve arttığı not edilmiştir. Yüksek mikrosertlik ile IMC ve  $Al_2Cu/Sn$  ötektiğinin varyasyonu ve tek tip stres dağılımı nedeniyle, artan alüminyum konsantrasyonu ile ağırlıkça %0.075'e yükseltildiği gösterilmiştir. Sn–0.7Cu–0.075Al, bakır alt tabaka için optimize edilmiş kurşunsuz bir lehim alaşımı olduğu rapor edilmiştir [66].

Sabri ve arkadaşlarının “Sn–1Ag–0.5Cu–xAl (x = 1, 1.5 ve %2 wt.) lehim alaşımlarının mikroyapısal kararlılığı ve yüksek sıcaklıkta yaşlandırmanın mekanik özellikleri üzerindeki etkileri” çalışmasında Al eklenmesi, birincil  $\beta$ -Sn dendritlerinin önemli ölçüde iyileştirilmesine ve interdendritik bölgelerin genişlemesine yol açtığı rapor edilmiştir. Al ilavesinin  $Ag_3Sn$  ve  $Cu_6Sn_5$  IMC parçacıklarının oluşumunu bastırđıđı ve ince  $Ag_3Al$  IMC parçacıklarının ve büyük  $Al_2Cu$  IMC'lerin oluşumuna yol açtığı bildirilmiştir. Al eklenmesi, Al açasından zengin bir fazın ayrılmasına yol açtığı not edilmiştir. Al ilavesi, akma mukavemetinin ve nihai çekme mukavemetinin önemli ölçüde arttığı ve elastik modülü biraz arttırdığı ve toplam uzamayı azalttığı not edilmiştir. SAC105 lehim alaşımına benzer şekilde, Al ile modifiye edilmiş SAC105 lehim alaşımlarının mikro yapıları, yaşlanmadan sonra belirgin şekilde kabalaştığı ve bu durumun da mekanik özelliklerini bozduğu bildirilmiştir. Al ilavesinin sünek kırılma yerine taneler arası kırılmaya neden olduğu rapor edilmiştir [67].

Sun ve arkadaşlarının “Elektronik Paketlemede Sn-Ag-Cu-X Kurşunsuz Lehim Bağlantılarının Özellikleri ve Mikroyapıları” çalışmasında alaşım elementlerinin ve nanopartiküllerin eklenmesiyle, SnAgCu lehim ve lehim bağlantılarının ıslanabilirliği, mekanik özellikleri ve sertlik özelliklerinin belirgin bir şekilde iyileştirildiği rapor edilmiştir. Ancak aşırı elementlerin bu özellikleri azaltabildiği bildirilmiştir. Aşırı miktarda nanoparçacık eklenmesiyle, metal nanoparçacıkların matris ile kolayca reaksiyona girdiği dolayısıyla tane büyümesi olgusu meydana geldiği ve lehim bağlantılarının güvenilirliğini etkilediği not edilmiştir. Alaşım elementlerinin ve nanopartiküllerin, SnAgCu lehimlerinin mikro yapısını iyileştirebildiği ve



elementlerin lehim/bakırdaki intermetalik bileşikler üzerindeki geciktirici etkisi de gösterilmiştir [68].

Li ve arkadaşlarının “Corrosion behavior of Sn-based lead-free solder alloys: a review” çalışmasında Sn tabanlı (Sn-Bi, Sn-Cu, Sn-Zn, Sn-Ag, Sn-Ag-Cu) kurşunsuz lehim alaşımlarının morfolojik yapısı ve korozyon direncini araştırmışlardır. Yaptıkları çalışmalar sonucunda Sn-tabanlı lehim alaşımlarının ve bunlara element ekleyerek korozyon direncinin iyileştirilmesinin mümkün olduğu vurgulanmıştır [69]

Rosalbina ve arkadaşlarının “Electrochemical corrosion study of Sn-3Ag-3Cu solder alloy in NaCl solution” çalışmasında Sn-3Ag-3Cu alaşımının korozyon davranışı potansiyodinamik polarizasyon ve empedans spektroskopisi ölçümleriyle 0,1M NaCl çözeltisinde araştırılmış ve ambalajda kullanılan Sn-3Ag-0,5Cu (SAC305) lehim alaşımı ile kıyaslama yapılmıştır. Elektrokimyasal testlerden önce ve sonra numunelerin morfolojik yapılarının karakterize edilmesi için taramalı elektron mikroskopu (SEM) ve elektron probu (EPMA) analizlerini yapmışlardır. NaCl çözeltisinde Sn-3Ag-3Cu lehim alaşımının SAC305 lehim alaşımına kıyasla daha iyi bir korozyon davranışı sergilediğini rapor etmişlerdir. Elektrokimyasal testlerin sonunda yapılan SEM-EPMA karakterizasyonu, incelenen her iki alaşımın yüzeyinde kalay oksiklorür veya oksid-hidroksiklorürden oluşan bir korozyon ürünleri tabakasının varlığını kanıtlamışlardır [70].

Andersson ve arkadaşlarının “Effect of corrosion on the low cycle fatigue behavior of Sn-4.0Ag-0.5Cu lead-free solder joints” çalışmasında Sn-4,0Ag-0,5Cu (SAC405) lehim alaşımlarının yorulma testleri sıcaklık, nem ve tuz solüsyonunu literatüre göre değiştirerek deneyler yapılmıştır. Tuz çözeltisinin uygulanması, lehim bağlantılarının yoğun bir şekilde aşınmasına ve yorulma ömrünün azalmasına neden olduğunu rapor etmişlerdir. Yorulma ömrü üzerinde en fazla etkiye sahip olan faktörün tuz çözeltisi ve sıcaklık olduğunu vurgulamışlardır. Tuz çözeltisinin uygulanması, SAC405 lehim bağlantılarının yüzeyinde gözle görülür çukurlaşma ile kapsamlı bir korozyona sebep olduğunu ve tuz çözeltisi uygulanmayan lehim bağlantılarında da oyuklaşma

gözlendiğini rapor etmişlerdir. Tüm test koşullarında, tuz solüsyonu uygulanan numunelerin yorulma ömrünü azalttığını bildirmişlerdir [71].

Tamasi ve arkadaşlarının “Effect of Bismuth and Silver on the Corrosion Behavior of Lead-free Solders in 3.5 wt% NaCl Solution” çalışmasında farklı kurşunsuz mikro alaşımlı lehim alaşımlarının korozyon özellikleri, potansiyodinamik polarizasyon testleri ve SEM-EDS yöntemleri kullanılarak incelenmiştir. Bizmut alaşımlı (%3 ağırlık) lehim alaşımının en zayıf korozyon direncini gösterdiğini rapor etmişlerdir. Korozyon derinliği sonuçları, bizmut taşıyan (%3 ağırlığında) kurşunsuz lehim alaşımının (numune V) diğerlerine kıyasla en düşük korozyon direncine sahip olduğunu doğruladığını vurgulamışlardır. Daha düşük korozyon direnci, enerji dağılımlı spektroskopi ile aşınmış katmanlarda tespit edilen ilgili gümüş ve bizmut içerikleri ve hacimleri ile açıklanabildiğini ve bunun nedenini bizmut ve gümüşün eklenmesiyle korozyon potansiyelinin ( $E_{corr}$ ) daha az asil değerlere kayması olabileceğini bildirmişlerdir. Böylece, bizmutun ağırlıkça %3,5 NaCl çözeltisinde Sn bazlı mikro alaşımlı lehim alaşımlarıyla ilgili korozyon davranışı üzerinde önemli bir etkiye sahip olabileceğini göstermişlerdir. Bu sebepten dolayı gümüş ve bizmut içeriğinin mikro alaşımlı lehim alaşımlarında da nispeten yüksek bir korozyon riski oluşturabileceğini rapor etmişlerdir [72].

Miernik ve arkadaşlarının “Corrosion behavior of lead-free SAC-type solder alloys in liquid media” çalışmasında Sn-Ag-Cu (SAC) lehim alaşımlarının NaCl (deniz suyu dahil) hava ile doymuş sulu çözeltilerdeki korozyon direncini araştırmışlardır. Aşındırıcı ortamdaki Ag, Cu ve Sn konsantrasyonlarını belirlemek için Atomik Absorpsiyon Spektrometresi (AAS) kullanmışlardır. Korozyon potansiyeli ve akımı, potansiyodinamik polarizasyon tekniğinin kullanılarak elde edildiği bildirilmiştir. SAC alaşımlarının potansiyodinamik yöntemle korozyon direnci deneyleri, lehimlerin kullanılan sıvı ortamda korozyona karşı oldukça dirençli olduğunu ortaya koymuşlardır. Kendiliğinden çözünme sırasındaki korozyon hızı, reaksiyon yüzeyini korozyon ürünleri ile bloke ettiği için potansiyodinamik deneylerden elde edilenden önemli ölçüde daha düşük olduğu rapor edilmiştir [73].

Gharaibeh ve arkadaşlarının “Electrochemical corrosion of SAC alloys: a review” çalışmasında potansiyodinamik polarizasyon yöntemini kullanmışlardır.  $E_{corr}$  değerleri daha iyi bir korozyon davranışını gösterdiği ve  $i_{corr}$  değerinin korozyon hızını değerlendirmek için daha güvenilir olduğunu belirtmişlerdir. Elektrokimyasal Empedans Spektroskopisi (EIS) tekniğinin güvenilir bir teknik olduğunu, pasif film direncini ve pasif film/metal arayüzündeki yük transfer direncini daha detaylı olarak incelendiğini ve elektrolit tabakası oluşumu hakkında da bilgi sağladığını belirtmişlerdir. Her iki tekniğin de lehim alaşımı korozyon işlemlerinin tipik türlerinden biri olan oyuklaşma korozyon tespiti için kullanışlı olduğunu raporlamışlardır [74].

Wu ve arkadaşlarının “Electrochemical corrosion study of Pb-free solders” çalışmasında Sn-9Zn, Sn-8Zn-3Bi, Sn-3.5Ag-0.5Cu, Sn-3.5Ag-0.5Cu-9In ve Sn-37Pb lehim alaşımlarının polarizasyon ve elektrokimyasal empedans spektroskopisi (EIS) ölçümleri ile %3,5 NaCl çözeltisi ve ağırlıkça %0,1 adipik asit çözeltisi içerisindeki korozyon davranışlarını incelemişlerdir. Polarizasyon eğrileri, Sn-9Zn ve Sn-8Zn-3Bi lehiminin, korozyon akımı yoğunluğu, korozyon potansiyeli, doğrusal polarizasyon direnci ve pasivasyon akımı yoğunluğu açısından hem tuz hem de asit çözeltilerinde en kötü korozyon direncini gösterdiğini rapor etmişlerdir. Sn-3.5Ag-0.5Cu lehimini her iki çözeltide de en iyi korozyon özellikleri gösterdiğini bildirmişlerdir. Sn-9Zn lehimine eklenen Bi katkısının mikro yapı değişikliği nedeniyle tuz çözeltisinde korozyon davranışını iyileştirdiği, asit çözeltisinde ise azalttığı bulunmuşlardır. Bununla birlikte, In katkısı her iki çözeltide de Sn-3.5Ag-0.5Cu lehimini bozduğu gösterilmiştir [75].

Nordin ve arkadaşlarının “Impact of aluminium addition on the corrosion behaviour of Sn-1.0Ag-0.5Cu lead-free solder” çalışmasında Sn-1.0Ag-0.5Cu-xAl ( $x = \%0.2, 0.5$  ve  $1.0$ ) lehim alaşımlarının korozyon direnci davranışına Al' elementinin etkisi, potansiyodinamik polarizasyon ve tuz kullanılarak %5 NaCl solüsyonunda araştırmışlardır. FESEM ve XRD sonuçları Al içeren lehimde baz lehime göre daha yoğun pasif filmlerin oluştuğunu bildirmişlerdir.  $Al_2O_3$ ,  $AlCuO_4$ , SnO ve  $SnO_2$  gibi intermetalik bileşikler içeren bu pasivasyon filmlerinin, malzeme yüzeyinde daha fazla reaksiyonun önlendiğini rapor etmişlerdir. Polarizasyon çalışmaları, korozyon

potansiyelinin daha negatif değerlere doğru kaymasına rağmen, ağırlıkça %0,5 ve ağırlıkça %0,2 Al içeriğine sahip alaşımlarda korozyon oranının sırasıyla %30 ve %60 daha düşük olduğunu bildirmişlerdir [76].

Fazal ve arkadaşlarının “A critical review on performance, microstructure and corrosion resistance of Pb-free solders” çalışmasında Sn-Ag lehiminin Sn-37Pb lehiminden daha aşındırıcı olduğunu ifade etmişlerdir. Sn-Ag bazlı lehimin artan korozyonu,  $\beta$ -Sn fazından daha asil olan  $Ag_3Sn$  intermetalik bileşenlerin (IMC's) oluşumuna bağlanabilir.  $Ag_3Sn$  trombositlerinin oluşumu ayrıca çatlaklar için potansiyel bir başlangıç bölgesi oluşturabilir. Bu nedenle, bu tür olasılıklardan kaçınmak için gümüş yüzdesinin %3'ün altında olması önermişlerdir. Cu, Bi, Zn, Al, In ve Sb dahil olmak üzere çeşitli metal katkı maddeleri, lehimlerin termal, mekanik ve elektriksel özelliklerini iyileştirmek için etkili olabildiklerini vurgulamışlardır. Cu katkılı lehim alaşımları üstün korozyon direnci gösterdiğini, ancak Zn ve Alcan ilavesi lehimlerin korozyon direncini düşürdüğünü rapor etmişlerdir. Yüksek bakır konsantrasyonları, IMC'lerin oluşumuna yol açabilir ve kalay kıllarının büyümesini teşvik edebilir. Şu anda, SAC305 olarak da bilinen Sn-3.5Ag-0.5Cu alaşımının, Sn-37Pb lehimine benzer özelliklere sahip olduğu bulunmuştur, ancak onu aşındırıcı ve oksitleyici yapan bazı IMC'ler oluşturabildiğini belirtmişlerdir [77].

Mohanty ve arkadaşlarının “The effect of alloying element gallium on the polarization characteristics of Pb-free Sn-Zn-Ag-Al-XGa solders in NaCl solution” çalışmasında Sn-8.5Zn-0.5Ag-0.1Al-XGa kurşunsuz lehimlerin polarizasyon özellikleri %3,5 NaCl çözeltisinde  $x=0,05-1,5$  arasında değiştiği bildirilmiştir. Sonuçlar, Ga'nın lehimlerin anodik polarizasyon davranışını etkilediğini göstermektedir. İncelenen tüm Sn-8.5Zn-0.5Ag-0.1Al-XGa lehimleri için pasivasyon davranışı gözlemlendi. Ga içeriğinin ağırlıkça %0,05'ten %0,25'e çıkarılması pasivasyon kabiliyetini artırır ancak pasiflik nedeniyle oluşan oksit film o kadar koruyucu değildir. Ancak Ga içeriği ağırlıkça %0,25'ten büyükse korozyonu artırır ve pasif filmin koruyucu gücünü azaltır. Pasivasyon akım yoğunluklarının büyüklüğü, lehimlerin bileşimine ve uygulanan potansiyellere bağlıdır. Pasivasyon davranışından kalay ve çinko oksit katmanları sorumludur. XRD ve SEM sonuçları, polarizasyon çalışması sırasında farklı

potansiyelerde SnO, ZnO, SnO<sub>2</sub> gibi korozyon ürünlerinin oluştuğunu ortaya koymuştur [78].

Mohanty ve arkadaşlarının “Effect of Al on the electrochemical corrosion behaviour of Pb free Sn–8.5 Zn–0.5 Ag–XAl–0.5 Ga solder in 3.5% NaCl solution” çalışmasında %3,5 NaCl solüsyonunda Pb içermeyen Sn–8,5 Zn–0,5 Ag–XAl–0,5 Ga lehimin elektrokimyasal korozyon davranışına Al'ın etkisi potansiyodinamik polarizasyon teknikleri kullanılarak araştırmışlardır. Lehim alaşımındaki X içeriği ağırlıkça %0,1 ila %3 arasında değiştiği bildirilmiştir. Polarizasyon çalışmalarında Al içeriğinin ağırlıkça %1,5'e kadar artmasının, korozyon akımı yoğunluğunu ( $I_{corr}$ ), lehimin korozyon hızını azalttığını ve korozyon potansiyelini ( $E_{corr}$ ) daha asil değerlere kaydırıldığını ortaya koymuştur. Bununla birlikte, beş elementli lehimde daha yüksek Al içeriği, yani 3 (%wt.) korozyon oranını artırdı ve  $E_{corr}$ 'da daha negatif değerlere doğru önemli bir artışla sonuçlandı. Pasivasyon davranışı, değişen Al içeriğine sahip tüm lehimlerde fark edildi, ancak ağırlıkça %1,5 Al'de oluşan pasif film, düşük pasivasyon akım yoğunluğu ( $i_p$ ) ve düşük kritik akım yoğunluğu ( $i_{cc}$ ) değeri nedeniyle en kararlıydı. Diğer lehimler. XPS ve Auger derinlik profili sonuçları, pasif filmin lehim yüzeyinde oluşan Al ve Zn oksitlerinden/hidroksitlerinden oluştuğunu ve sonraki katmanda Sn oluştuğunu ortaya çıkardı. Beş elementli lehimde Al içeriğinin ağırlıkça %1,5'e çıkarılmasıyla, yüzeye doğru önemli ölçüde alüminyum ayrışması, esas olarak Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Al(OH)<sub>3</sub> olarak meydana geldi. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> oluşumu, lehim yüzeyindeki çinko oksidasyonunu engellediği rapor edilmiştir [79].

Ahmido ve arkadaşlarının “Effect of bismuth and silver on the corrosion behavior of Sn–9Zn alloy in NaCl 3 wt.% solution” çalışmasında gümüş (Ag) ve bizmutun (Bi) Sn–9Zn alaşımının ağırlıkça %3 NaCl çözeltisi içindeki korozyon direnci üzerindeki etkisini elektrokimyasal teknikler kullanılarak incelemişlerdir. Sonuçların Bi ve Ag ilavesinin korozyon hızının artmasına neden olduğunu ve  $E_{corr}$  korozyon potansiyelinin daha az asil değerlere doğru kaydığını göstermişlerdir. Daldırmadan sonra, aşınmış alaşım yüzeyinin X-ışını kırınımı (XRD), taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve spektroskopinin enerji dağılımı (EDS) analizi, korozyon ürünlerinin doğasını ortaya çıkardığını bildirmişlerdir [80].

Jaffery ve arkadaşlarının “Electrochemical corrosion behavior of Sn-0.7Cu solder alloy with the addition of bismuth and iron” çalışmasında Fe ve Bi katkılı Sn-0.7Cu lehiminin korozyon davranışı ağırlıkça %3.5 NaCl çözeltisinde incelemiştir. Fe ve Bi'nin eklenmesi, daha yüksek korozyon akımı yoğunluğu, pasivasyonda azalma ve sözde pasivasyon alanı ile sonuçlandığını bildirmişlerdir. FeSn<sub>2</sub> oluşumu sürekli olarak Sn'yi çözünmeye zorlayarak SnCl<sub>2</sub> ve SnCl<sub>4</sub> oluşturduğu rapor edilmiştir. Bu işlem, elektrik akımı akışı oluşturarak daha pürüzlü bir yüzey sağlar. Modifiye edilmiş alaşımların yüzeyinde daha kaba korozyon ürünleri gözlemlendiği bildirilmiştir. Bi bakımından zengin bir fazın varlığı, Bi ve Sn arasında galvanik etki ile sonuçlanır. EIS sonuçları, değiştirilmiş alaşımların daha yüksek kapasitansını ve daha düşük genel elektrik direncini gösterdiği rapor edilmiştir [81].

Fayeka ve arkadaşlarının “Electrochemical Corrosion Behaviour of Pb-free SAC 105 and SAC 305 Solder Alloys: A Comparative Study” çalışmasında Sn-3,0Ag, Sn-1,0Ag-0,5Cu ve Sn-3,0Ag-0,5Cu gibi farklı kurşunsuz lehim alaşımlarının korozyon davranışını potansiyodinamik polarizasyon ve elektrokimyasal empedans spektroskopisi ile %3,5 NaCl çözeltisinde incelemiştir. Testler sonrasında örneklerin karakterizasyonu için taramalı elektron mikroskobu (SEM), enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi (EDX) ve X-ışını kırınımı (XRD) kullanmışlardır. Sonuçlar, Sn-3,0Ag lehim alaşımı ile ağırlıkça %0,5 bakır ilavesinin daha iyi bir korozyon direncine yol açtığını, Ag içeriğinin ağırlıkça %3,0'dan %1,0'a düşürülmesinin direnci azalttığını gösterdiğini rapor etmişlerdir. Sn-3,0Ag-0,5Cu lehim alaşımının artan yük transfer direnci ve empedans değerleri ile en düşük kapasitans açısından daha iyi bir korozyon direnci sergilediğini vurgulamışlardır [82].

Cong ve arkadaşlarının “Corrosion Assessment of Sn-0.7Cu Lead-Free Solder in 1 M Hydrochloric Acid” çalışmasında Sn-0.7Cu lehim alaşımının korozyon performansını 1 M HCl çözeltisinde -2V<sub>SCE</sub> ve 1 V<sub>SCE</sub> tarama aralığında ve numuneye 1mV/s tarama hızında potansiyodinamik polarizasyon tekniği ile araştırmışlardır. Destekleyici morfolojik analiz Taramalı Elektron Mikroskobu kullanılarak yapılırken, faz analizi X-ışını Kırınım analizi kullanılarak doğrulandığı bildirilmiştir. Morfolojik analiz, korozyon ürünü olarak SnO ve SnO<sub>2</sub> olduğu doğrulanan korozyon analizinden sonra kompakt oksit tabakası ve gevşek çubuk benzeri oksit tabakası olmak üzere iki tip oksit

tabakasının oluştuğunu göstermiştir. Bu durumun eksik pasivasyon tabakası oluşumu nedeniyle daha fazla korozyona karşı tam korumanın imkânsız olduğunu gösterdiği vurgulanmıştır [83].

Al-Ezzi ve arkadaşlarının “Effect of bismuth addition on physical properties of Sn-Zn lead-free solder alloy” çalışmasında Sn-Zn lehim alaşımının elektriksel özelliklerini araştırmışlardır. Sn-Zn matrisinde oluşan ve çözünen bizmut fazı yüksek özdirence sahip bir yarı metal olduğundan, hazırlanan alaşımların oda sıcaklığındaki elektrik özdirençinin hafifçe arttığını belirtmişlerdir. Bi ilavesiyle özdirençte gözlenen artışın, düşük sıcaklıklarda bizmutun aşırı doygunluğuyla ilişkilendirilebilir. Bu sonuçların %3 Bi ilaveli lehimin iletkenliğinin Sn-9Zn alaşımının iletkenliğine en yakın olduğunu gösterdiklerini raporlamışlardır. Çoğu mikroelektronik uygulamada, lehim ara bağlantısının direnci, elektronik devrenin işlevselliğini etkilememek için mümkün olduğunca düşük olması gerektiğini belirtmişlerdir [84].

Esener ve arkadaşlarının “Effect of Sb and In additives on thermal and electrical properties of Sn-9Zn-4Bi” alternative lead-free solder alloy” çalışmasında Sn-9Zn-4Bi alaşımına kütlece %0,5-2 (wt.%) antimon (Sb) ve kütlece %0,5-1,5 (wt.%) indiyum (In) ilavesinin ısıl iletkenlik, elektriksel iletkenlik ve erime davranışındaki değişimler incelenmiştir. Sıcaklık ile termal ve elektriksel iletkenlik ölçümleri sırasıyla doğrusal ısı akışı ve dört noktalı prob yöntemleri ile yapıldığını bildirmişlerdir. Termal ve elektriksel iletkenliğin sıcaklıkla doğrusal olarak azalmasının beklendiğini belirtmişlerdir. Sn-9Zn-4Bi alaşımına Sb ve In metallerinin eklenmesi ile termal ve elektriksel iletkenlikteki değişimler incelenmiştir. In elementinin farklı oranlarda ilavesi ısıl ve elektriksel iletkenliği artırırken, Sb'nin termal ve elektriksel iletkenliği azalttığını rapor etmişlerdir [85].

Dong ve arkadaşlarının “Machine learning assisted design of high-strength Sn-3.8Ag-0.7Cu alloys with the co-additions of Bi and In” çalışmasında SAC387-3,5 wt%Bi-2,8 wt%In (SAC-9) alaşımının, aynı miktarda Bi veya In içeren alaşımlara kıyasla gelişmiş bir elektrik iletkenliği gösterdiğini raporlamışlardır. Genel olarak, elektriksel direncin alaşım elementlerinin içeriği arttıkça artan bir eğilim göstermekte olduğunu vurgulamışlardır. Alaşım elementlerinin (Bi, In) içeriğinin artırılması kafes

kusurlarının artmasına neden olduğu, bunun da elektron hareketinin ortalama serbest yolunu azalttığı ve elektriksel iletkenliğini düşürdüğünü bildirmişlerdir [86].

Altıntaş ve arkadaşlarının “The measurements of electrical and thermal conductivity variations with temperature and phonon component of the thermal conductivity in Sn-Cd-Sb, Sn-In-Cu, Sn-Ag-Bi and Sn-Bi-Zn alloys” çalışmasında dört nokta prob yöntemi ve radyal ısı akışı aparatı ile elektriksel ve termal iletkenlik değişimlerini ölçmüşlerdir. Deneysel sonuçlara göre, kurşunsuz üçlü lehimlerin elektriksel iletkenliğinin artan sıcaklıkla doğrusal olarak azalmakta olduğu vurgulanmıştır. Elektriksel iletkenliğin, sıcaklığa ve üçlü lehimlerde kullanılan alaşım elementlerine güçlü bir şekilde bağlı olduğunu rapor etmişlerdir [87].

Kang ve arkadaşlarının “The effect of Bi and Zn additives on Sn-Ag-Cu lead-free solder alloys for Ag reduction” çalışmasında bir metalin elektriksel iletkenliğinin, elektronların hareketiyle ilgili bir özellik olduğunu, alaşımı oluşturan bileşen elementlerinin saflığı, ortalama tane boyutu, tane sınırlarının dağılımı ve metaller arası bileşikler gibi faktörlerin karmaşık etkileşimi tarafından belirlendiğini raporlamışlardır. Genel olarak çoklu element faktörlerinin eklenmesi, metaller arası bileşiklerin oluşumu ve aktivasyon enerjisindeki değişiklikler de dahil olmak üzere elektriksel iletkenliğini olumsuz yönde etkileyen mikro yapıdaki değişiklikleri artırdığını belirtmişlerdir [88].

Qin ve arkadaşlarının “Effect of addition of Al and Cu on the properties of Sn-20Bi solder alloy” çalışmasında Sn-20Bi lehim alaşımına Al ve Cu ilavesi için, en iyi elektriksel iletkenlik sonucunun 0,1Al ilaveli (Sn-20Bi-0.1Al) alaşımında görüldüğü rapor edilmiştir. Sn-20Bi-0.1Al-0.5Cu alaşımı ile Al ve Cu elementlerinin birlikte eklenmesi ile elektriksel iletkenliğin düştüğü belirtilmiştir. Yani, Al ve Cu'nun kompozit ilavesi lehim alaşımının erime özelliklerini iyileştirmekte, ancak lehim alaşımının elektriksel iletkenliğini ve mekanik özelliklerini bozmakta olduğu vurgulanmıştır [89].

Arı ve arkadaşlarının “Microstructure and thermo-electrical transport properties of Cd-Sn alloys” çalışmasında Cd-Sn alaşımının elektriksel öz direncinin artan sıcaklıkla



doğrusal olarak arttığını ve elektriksel iletkenliğin sıcaklıkla ters orantılı olduğunu rapor etmişlerdir. Sonuçlar ayrıca elektrik akımının tercihen daha düşük öz dirence sahip matris içindeki saf Sn fazından geçtiğini belirtmişlerdir [90].

## BÖLÜM 4

### DENEYSEL ÇALIŞMALAR

#### 4.1. ÜRETİM İŞLEMİ

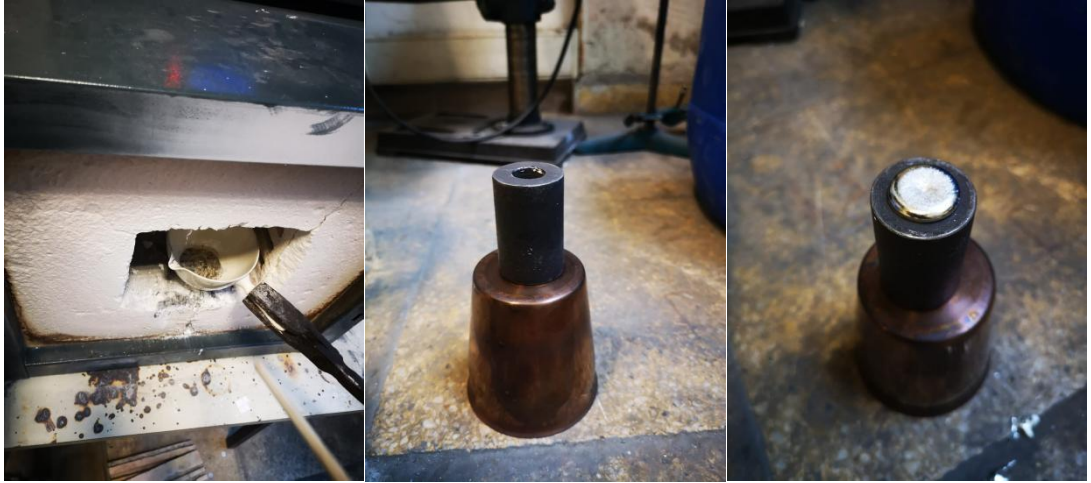
Sarf malzemelerinin oranlarının hesaplanması ile birlikte üretim sürecine başlanmıştır. Seramik pota içerisine sarf malzemeler birlikte atılarak ergimesi ve ötektik nokta oluşturması öngörülmektedir. Üretim süreci için gerekli aşamalar listelenmiştir (Şekil 4.1):

- ❖ Döküm yapılacak olan fırın 400°C ayarlandı.
- ❖ Pota fırının içerisine konularak malzemelerin ergimesi için belirli sürelerde kontrol edilerek alaşım karıştırılır.
- ❖ Pota içerisinde katı malzeme olmadığı ve malzemenin tamamen ergidiği görüldüğünde kalıba dökülür.
- ❖ Kalıpta soğuyan alaşım çıkarılır.

#### 4.2. HOMOJENİZASYON İŞLEMİ

Üretilen kurşunsuz lehim alaşımları alüminyum folyo ile kaplanarak homojenizasyon işlemine hazırlanır. Homojenizasyon işlemi için fırın 180°C sıcaklık değerine ayarlanır. Alaşımlar fırın içerisinde 48 saat beklemeye alınır. 48 saat sonra alaşımlar tek tek soğuk su dolu kabın içerisine atılır ve soğuması beklenir.

Birden fazla element bulunan alaşımların döküm yapıldıktan sonra homojen dağılmadığı için belirli bir sıcaklık değerinde (ergime sıcaklığından düşük) 48 saat fırında bekletilir. Verilen iç enerji ile atomların homojen dağılması sağlanır ve soğuk su içerisine atılarak şoklama yapılır (Şekil 4.2).



Şekil 4.1. Lehim alaşımının üretim aşaması.



Şekil 4.2. Homojenizasyon işlemi.

### 4.3. ISLATMA DENEYLERİ

Lehim alaşımlarının Cu altlık üzerindeki temas açılarının ölçülmesi için kullanılan düzenek, Şekil 4.3'de gösterilmiştir. Bu deney seti, özellikle sıvıların yüzey özelliklerini ve temas açılarını belirlemek amacıyla tasarlanmıştır. Sistem, bir sıvının katı yüzey ile temasını ve bu temasın özelliklerini hassas bir şekilde ölçmek için kullanılır. Lehimleme işlemlerinin optimize edilmesi ve malzeme yüzeylerinin özelliklerinin geliştirilmesi gibi uygulamalarda önemli katkılar sağlamak için tasarlanmıştır.



Şekil 4.3. Islatma deney düzeneği.

Deneysel çalışmalar öncesinde, düzenekte kullanılan tüm parçaların temizlenmesi ve hazırlanması, yapılan çalışmanın güvenilirliği açısından son derece kritiktir. Çünkü lehimleme işlemi sırasında oluşabilecek herhangi bir oksit tabakası, deney sonuçlarını olumsuz yönde etkileyebilir.

Her bir deney için üretilen SACBi-xAl ( $x=0,05, 0,1, 0,3, 0,5$  ve  $0,6$ ) lehim alaşımlarından yaklaşık 1,25 g ağırlığında parçalar kesildi. Lehim alaşımı, ergitildikten sonra bir ucu kapalı ve yaklaşık 1mm çapında bir deliğe sahip olan seramik tüp içine yerleştirildi. Lehim alaşımı, baskı yapılarak çelik çubuk üzerine monte edilmiş çelik uç seramik tüpe temas etmeyecek şekilde bırakıldı. Bakalit ile kaplanmış olan bakır altlık, kıl testere ile kesilerek çıkarıldı ve lehim damlatılacak yüzey, oksitlerden temizlendi.

Deney seti Çizelge 4.1’te belirtilen özelliklerde ve parçalardan oluşmuştur.

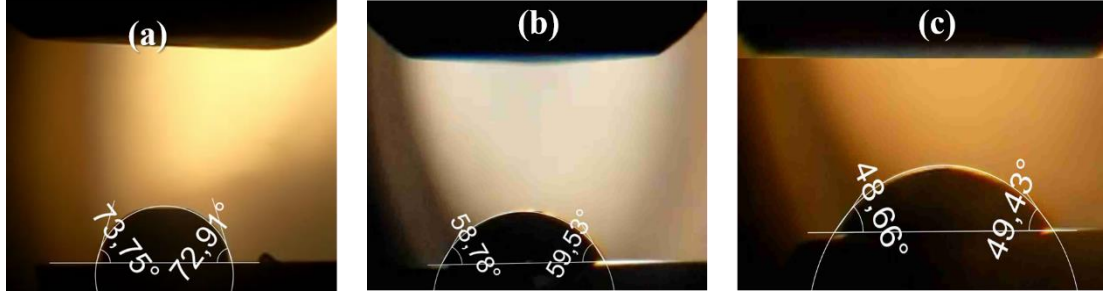
Çizelge 4.1 Deney düzeneğini oluşturan parçalar.

<b>Elektrik fırını</b>	<b>300x300x200 mm boyutlarında</b>
<b>1500°C’ye kadar dayanıklı bir ucu kapalı seramik tüp</b>	Dış çapı 15,60 mm, iç çapı 11,10 mm ve boyu 279 mm
<b>Çelik çubuk</b>	Çapı 6,8 mm ve boyu 300 mm
<b>Çelik uç</b>	Çapı 11,7 mm ve boyu 38 mm
<b>Kuartz cam tüp</b>	Dış çapı 24,72 mm, iç çapı 21,70 mm ve boyu 450 mm
<b>Argon gazı</b>	%99,999 saflıkta
<b>Step motor</b>	1 hp gücüne sahip
<b>Dijital video kamera</b>	600 fps çekim kalitesine sahip
<b>Cu altlık malzeme</b>	12x18x3 mm boyutlarında

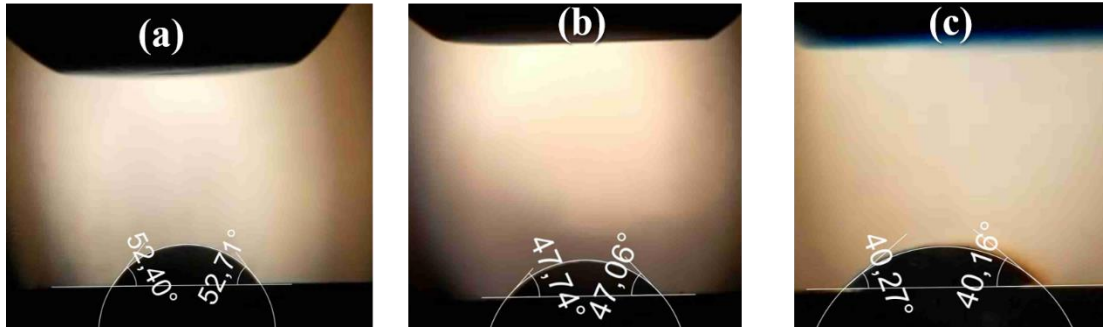
Cu altlık temizlendikten sonra, deney setinin içine grafit tabanı üzerine yerleştirildi. Lehim alaşımı seramik tüpe konuldu ve deney düzeneğine, Cu altlık üzerine düşeceği şekilde yaklaşık 1cm aralıklarla kuartz camın içine yerleştirildi. Damlanın Cu altlığa düşeceği nokta fırında belirlenerek ortalandı. Kuartz camın alt ve üst kısmında yüksek saflıkta argon gazının dolaşabilmesi için gerekli aparatlar kullanıldı ve argon tüpü bağlandı. 300fps hızında çekim yapabilen dijital kamera, damla görüntüsünü almak için en uygun yere yerleştirilerek deney başlamaya hazır hale getirildi.

Gerekli kontroller sağlandıktan sonra düzenek kuruldu ve yüksek saflıkta argon gazı önce 10 dakika alttan, sonra 20 dakika üstten dolaştırıldı. Bu 30 dakikalık sürenin ardından fırın istenilen sıcaklığa (275, 300 ve 325 °C) ayarlanarak lehimin erimesi beklendi. Fırın sağ ve sol olmak üzere iki bölmeye sahip olduğundan, ayarlanan sıcaklık değerini gösteren sağ ve sol termokupların gösterdiği denge sıcaklığının eşitlenmesi için 30 dakika beklendi. Deneyin başlangıcından 60 dakika sonra lehim alaşımı ergimiş halde damlamaya hazır hale geldi ve motorun miline bağlı çelik demir adım motoru aracılığıyla belirli bir dönme frekansı sağlandı. Bu esnada dijital kamera ile video kaydı yapılmıştır. Lehim alaşımının sıvı halde Cu substrat üzerine damlatıldığı andan itibaren 10 dakikalık bir video kaydı yapıldı. Tüm bu işlemler tamamlandıktan sonra deney düzeneği kapatıldı ve süreç sonlandırıldı.

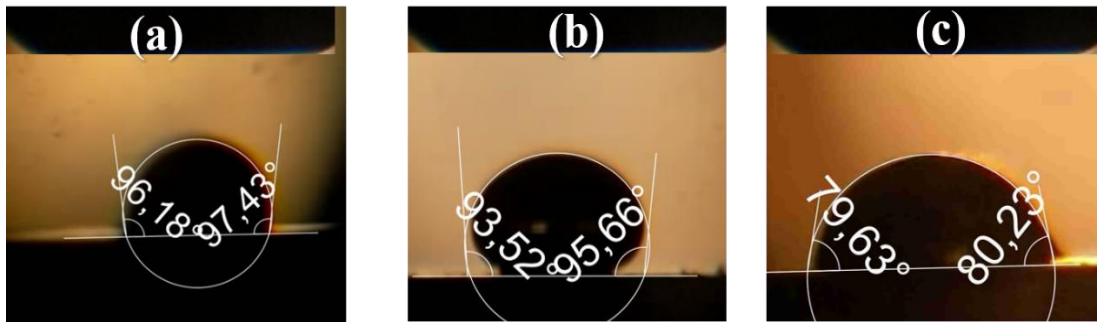
Video kaydındaki 5, 10, 15, 30, 60, 90, 120, 150, 300 ve 600. saniyelerdeki ekran görüntüleri alınarak kaydedildi. Bilgisayarda “Corel Draw” çizim programı kullanılarak lehim alaşımının Cu altlık üzerindeki ıslatma açısı ölçüldü ve kaydedildi.



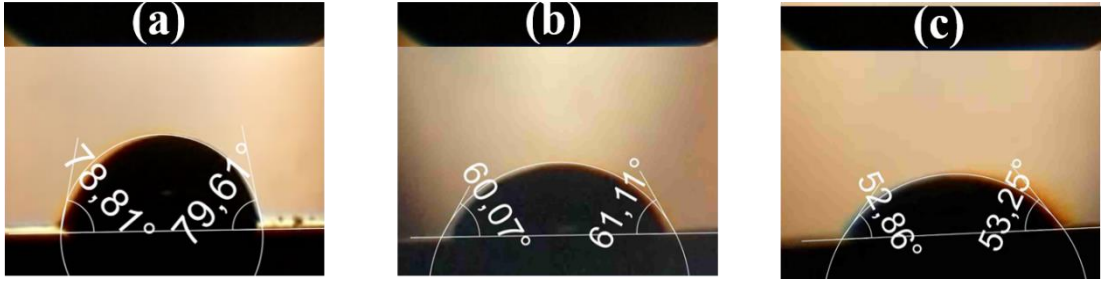
Şekil 4.3. SACBi-0,05Al lehim alaşımının ıslatma açısı değerleri a) 275 b) 300 ve c) 325°C.



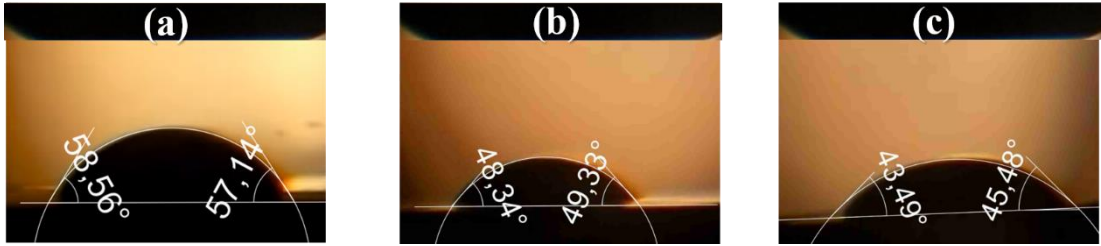
Şekil 4.4. SACBi-0,1Al lehim alaşımının ıslatma açısı değerleri a) 275 b) 300 ve c) 325°C.



Şekil 4.5. SACBi-0,3Al lehim alaşımının ıslatma açısı değerleri a) 275 b) 300 ve c) 325°C.



Şekil 4.6. SACBi-0,5Al lehim alaşımasının ıslatma açısı değerleri a) 275 b) 300 ve c) 325°C.



Şekil 4.7. SACBi-0,6Al lehim alaşımasının ıslatma açısı değerleri a) 275 b) 300 ve c) 325°C.

#### 4.4. KOROZYON TESTLERİ

##### 4.4.1. Potansiyodinamik Polarizasyon Analizi

Çalışma elektrotlarının numuneleri, 400'den başlayıp 1200'e kadar gözenek boyutuna sahip Silisyum Carbide (SiC) kağıtlarıyla parlatıldı. Parlatılan numuneler alkol ile temizlendi ve hemen kurutuldu. Polarizasyonlardan önce, çalışan elektrot yüzeylerinin potansiyostatik stabilizasyonunu sağlamak için 10 dakika açık devre izlemesi yapıldı. Bu testler ladet referans elektrot (Ag/AgCl), karşıt elektrot (1çift grafit çubuk) ve çalışma elektrodundan (beşli kurşunsuz lehim alaşımı) oluşan toplam 3 elektrotlu hücre kullanılarak gerçekleştirildi. Bir mikro benchmark (karşılaştırmalı değerlendirme) test çalışmasına uygun olacak şekilde çalışma ortamı olarak agresif bir çözelti (1M HCl) kullanmayı tercih ettik. Muhtemel pasivasyon ve depasivasyon bölgelerini bulmak için -1,0V- Ag/ AgCl ve +1,0V- Ag/AgCl arasındaki potansiyelleri tarandı. Tarama hızı 1 mV/s olarak ayarlandı.

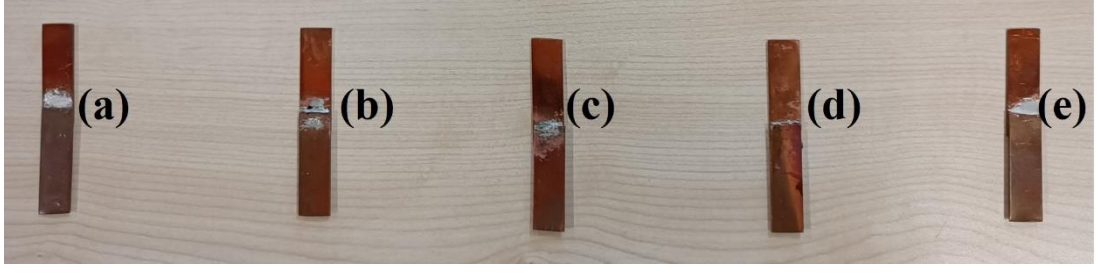


#### 4.5. SHEAR STRENGTH (ÇEKME GERİLİMİ) TESTİ

Kesme dayanımı değerleri, numunelerin yük kapasitesinin bir ölçüsünü temsil eder. Uzun vadeli güvenilirlik elde etmek için, bir lehim bağlantısı, yüksek termal gerilimlere veya şok yüküne dayanacak şekilde yüksek mukavemet göstermelidir. Üretilen yeni beşli SACBi-xAl ( $x=0,05, 0,1, 0,3, 0,5$  ve  $0,6$ ) kurşunsuz lehim alaşımları Zwick/Roell Z050 marka cihazla shear test gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.8). İlk önce daha önceden belirlenen (15mm x 50mm x 1,5mm) boyutlarda bakır plakalar kesilerek iki plaka birbirine lehimlenerek tutturulmuştur. Bakır plakalar arasına lehimleme işlemi lehim havyası ile gerçekleştirildi. İki ayrı lehim havyası ile yaklaşık 330-350°C arasında bir sıcaklıkta 15mm x 15mm lik bir bölge için lehimleme işleme yapıldı (Şekil 4.9).



Şekil 4.8. Shear test cihazı.



Şekil 4.9. SACBi-xAl kurşunsuz lehim alaşımı shear test numunesi.

Lehimleme işleminden önce bakır plakaların yüzeyi zımparalanarak yüzeyin pürüzsüz ve etil alkol kullanılarak yüzeyin oksitlerden temizlenmesi sağlanmaktadır. Şekil 4.9'da gösterildiği gibi sırasıyla SACBi-0,05Al, SACBi-0,1Al, SACBi-0,3Al, SACBi-0,5Al ve SACBi-0,6Al beşli kurşunsuz lehim alaşımlarının bakır plakalar arasına lehimlenmesini göstermektedir.

#### 4.6. ELEKTRİKSEL İLETKENLİK ÖLÇÜMÜ

Ölçümler Keithly 2400 source meter yardımı ile two-point prop yöntemi ile ölçülmüştür (Şekil 4.10). Propların çapları 0,5 mm ve numune yüzeylerine nazik bir şekilde aralarında  $s=3$  mm olacak şekilde dokundurulmuştur.

$$R = \frac{V}{I} \quad (4.1)$$

R direnci kullanılarak

$$\rho = G \frac{V}{I} \quad (4.2)$$

Eşitlik 4.2 ile alaşımların öz dirençleri hesaplanmıştır. G; geometrik düzeltme faktörünü ifade eder. Hesaplamalarda Toppasa ve Smith'in [91] numune geometrisine bağlı olarak elde ettikleri G hesabı kullanılmıştır.

Simetrik numuneler için Eşitlik 4.3 denklemleri kullanılmaktadır.

$$G = 2\pi s T_1 \left( \frac{t}{s} \right) \quad (4.3)$$

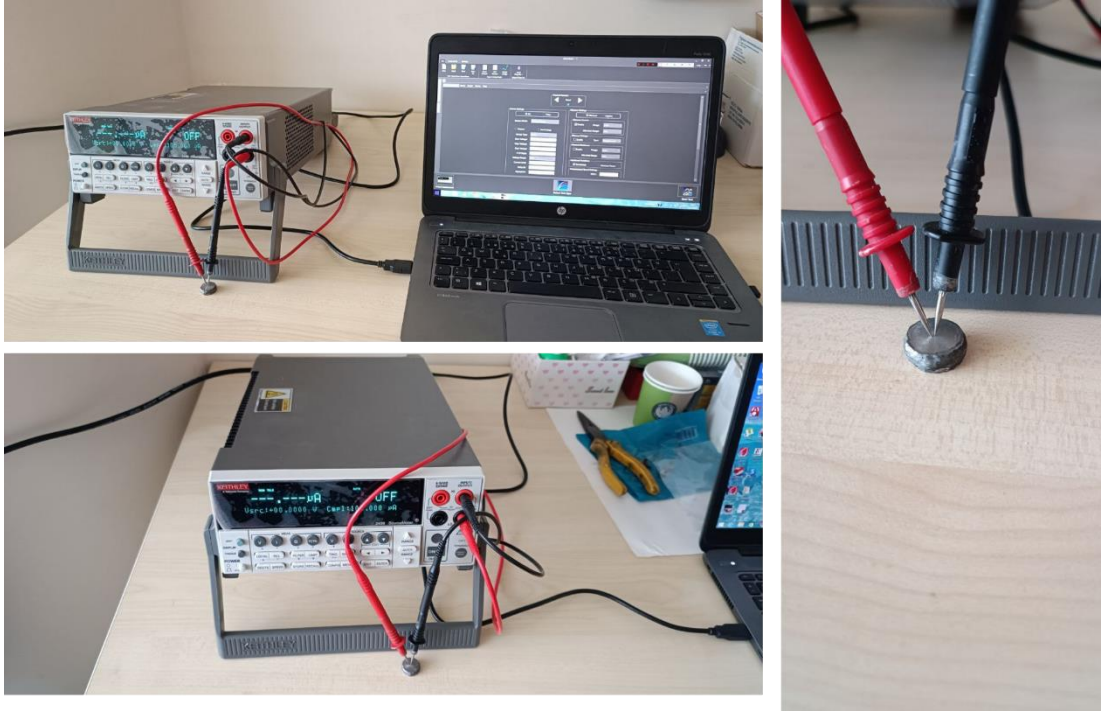
Eşitlik 4.3'te s proplar arası mesafe, t numune kalınlığı,  $T_1 \left( \frac{t}{s} \right)$  değeri ise Topase'nin makalesindeki tablodan 0,665 olarak belirlenmiştir ve hesaplanan

$$G = 2(3,14)(3 \times 10^{-3} m)(0,665) = 12,52 \times 10^{-3} m \quad (4.4)$$

olarak hesaplanmıştır. Eşitlik 4.2'de yerine yazılırsa

$$\rho = G \left( \frac{v}{I} \right) = (12,52 \times 10^{-3} m)(R) = 12,52 \times 10^{-6} R \Omega m \quad (4.5)$$

Eşitlik 4.5 elde edilir.



Şekil 4. 10. Elektriksel iletkenlik ölçüm cihazı.

## BÖLÜM 5

### BULGULAR

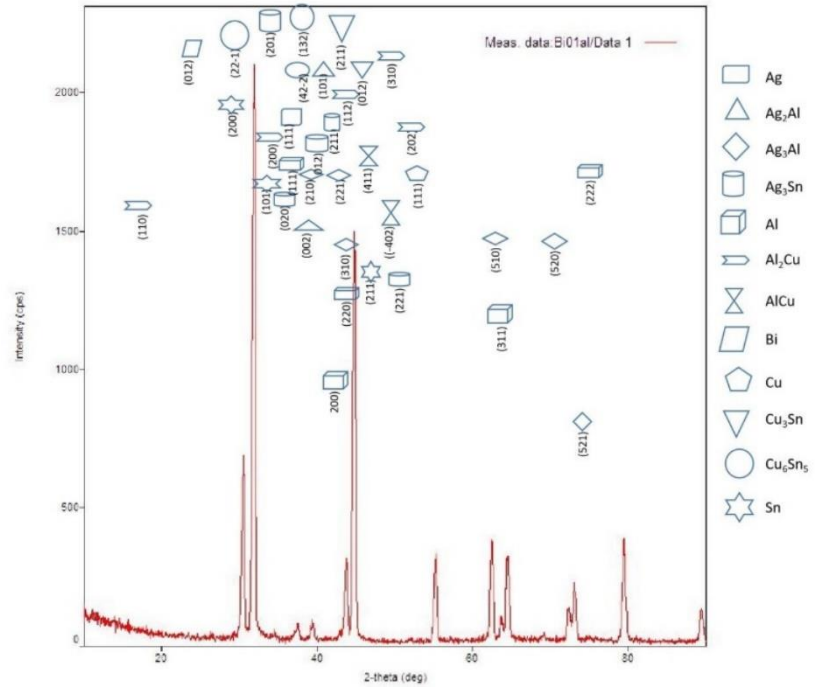
#### 5.1. XRF ANALİZİ

Üretilen yeni kurşunsuz lehim alaşımlarının içeriğindeki oranların belirlenmesi için XRF analizi yapılması öngörülmüştür. XRF analizleri sonuçları aşağıda listelenmiştir:

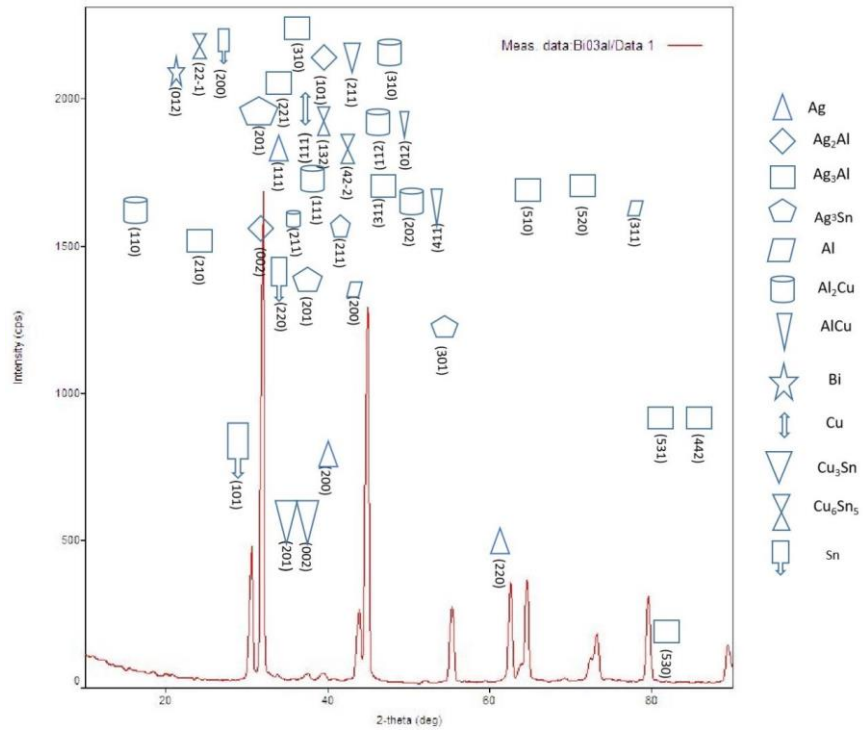
Çizelge 5.1. Üretilen Kurşunsuz lehim alaşımlarının XRF analiz sonuçları.

Lehim Alaşımları	Sn	Ag	Cu	Bi	Al	Si	S
<b>96,45Sn-2Ag-0,5Cu-1Bi-0,05Al</b>	95,8238	2,1218	0,4386	1,0128	0,0591		
<b>96,4Sn-2Ag-0,5Cu-1Bi-0,1Al</b>	95,9457	1,9535	0,4229	0,9122	0,0915	0,9224	0,1180
<b>96,2Sn-2Ag-0,5Cu-1Bi-0,3Al</b>	95,7768	1,9446	0,4058	0,9635	0,3115	0,8978	
<b>96Sn-2Ag-0,5Cu-1Bi-0,5Al</b>	96,3919	1,5754	0,4648	0,9963	0,5198	2,5519	
<b>95,9Sn-2Ag-0,5Cu-1Bi-0,6Al</b>	95,9000	1,9738	0,4195	0,9435	0,6194	1,1437	

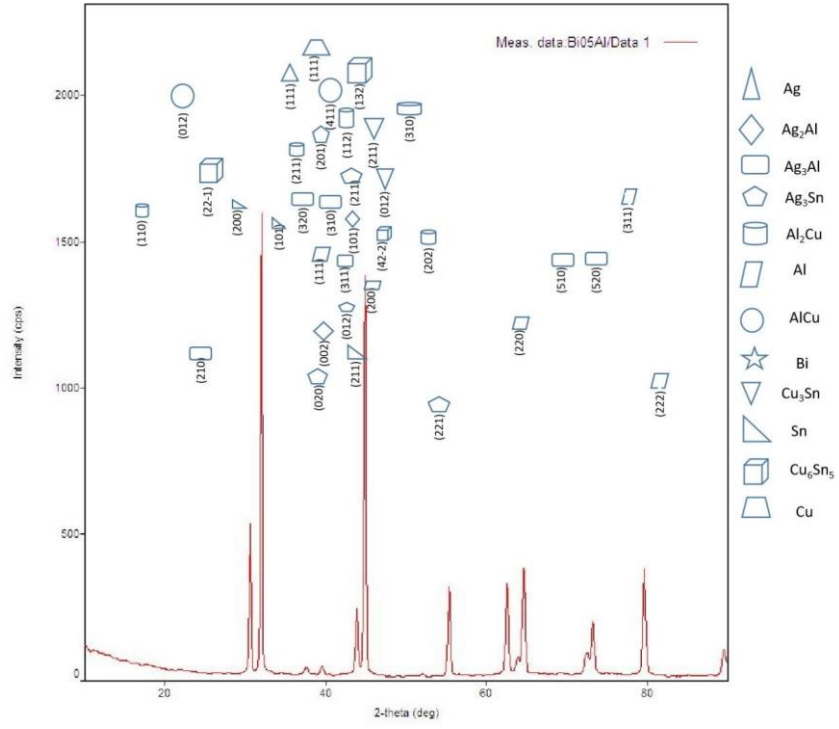




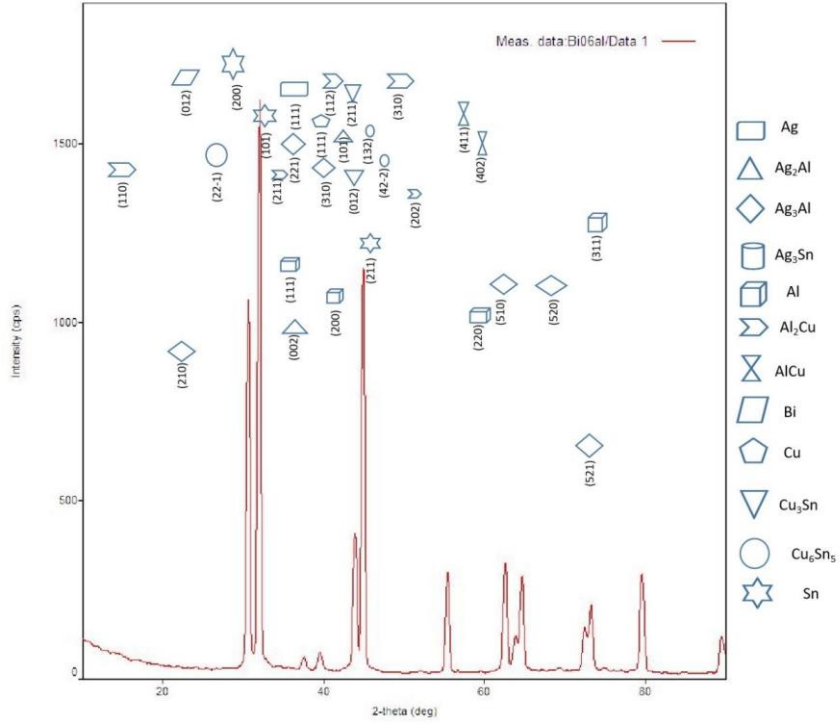
Şekil 5.2. SACBi-0,1Al lehim alaşımasının XRD analiz raporu.



Şekil 5.3. SACBi-0,3Al lehim alaşımasının XRD analiz raporu.



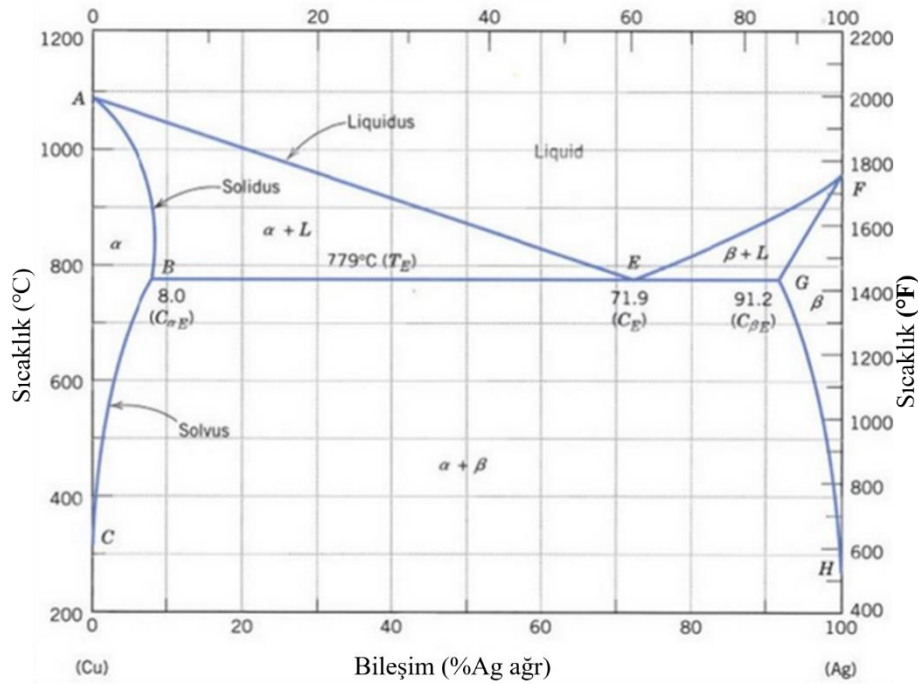
Şekil 5.4. SACBi-0,5 Al lehim alaşımasının XRD analiz raporu.



Şekil 5.5. SACBi-0,6Al lehim alaşımasının XRD analiz raporu.

Cu-Sn faz diyagramına göre, 300°C'nin altında kararlı kalan intermetalik fazlar  $\epsilon$  ve  $\eta$  fazlarıdır.  $\epsilon$  fazı, ağırlıkça %25.7 ile %27.1 arasında değişen bir kalay içeriğine sahiptir ve bu aralık,  $\text{Cu}_3\text{Sn}$  bileşiğinin bileşimine oldukça yakındır (Şekil 5.6). Bu sonuçlar, Cu-Sn sisteminin düşük sıcaklıklarda hangi fazların var olduğunu ve bileşimlerinin nasıl değiştiğini anlamak için önemli bir rehberlik sağlar. Cu-Sn faz diyagramına göre,  $\eta$  fazı ağırlıkça %44.8 ile %45.5 arasında Sn içeriğine sahiptir ve bu bileşim,  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$  bileşiğini oluşturur. Pb-Sn lehim-Cu alt tabaka etkileşimlerinin araştırılmasında her iki faz da belirlenmiştir [38,39]. Bu bulgular, Pb-Sn lehimlerinin Cu alt tabakalarla etkileşiminde hangi fazların meydana geldiğini ve bu fazların bileşimlerini anlamak için önemli bir kaynak teşkil eder.

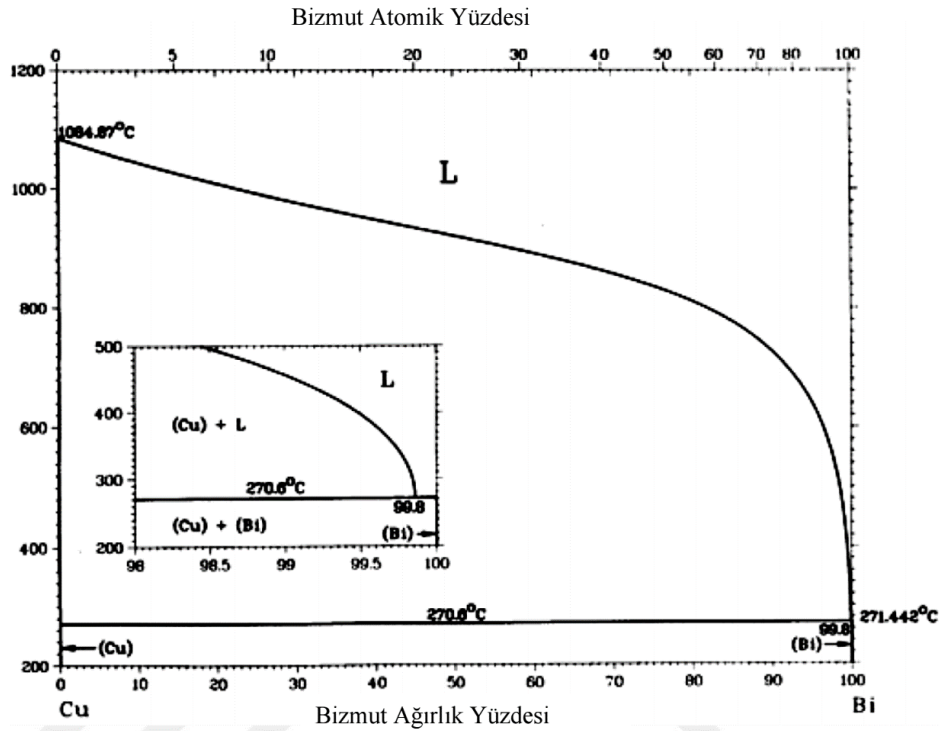
Mikroelektronik uygulamalarda sıkça kullanılan bakır, genellikle üç farklı formda bulunur: (a) kurşun çerçeveler için haddeleme yöntemiyle üretilen bakır, (b) kurşun izleri için tercih edilen haddeleme ile üretilmiş bakır folyo ve (c) elektrolizle kaplanmış bakır yollar veya pedler. Bu çeşitli bakır türlerinde,  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$  ve  $\text{Cu}_3\text{Sn}$ 'nin oluşumu ve gelişimi için aktivasyon enerjilerinin tek kristal bakırdan farklı olması muhtemeldir ve bu konuda daha fazla araştırmaya ihtiyaç vardır [30].



Şekil 5.6. Cu-Sn ikili faz diyagramı.

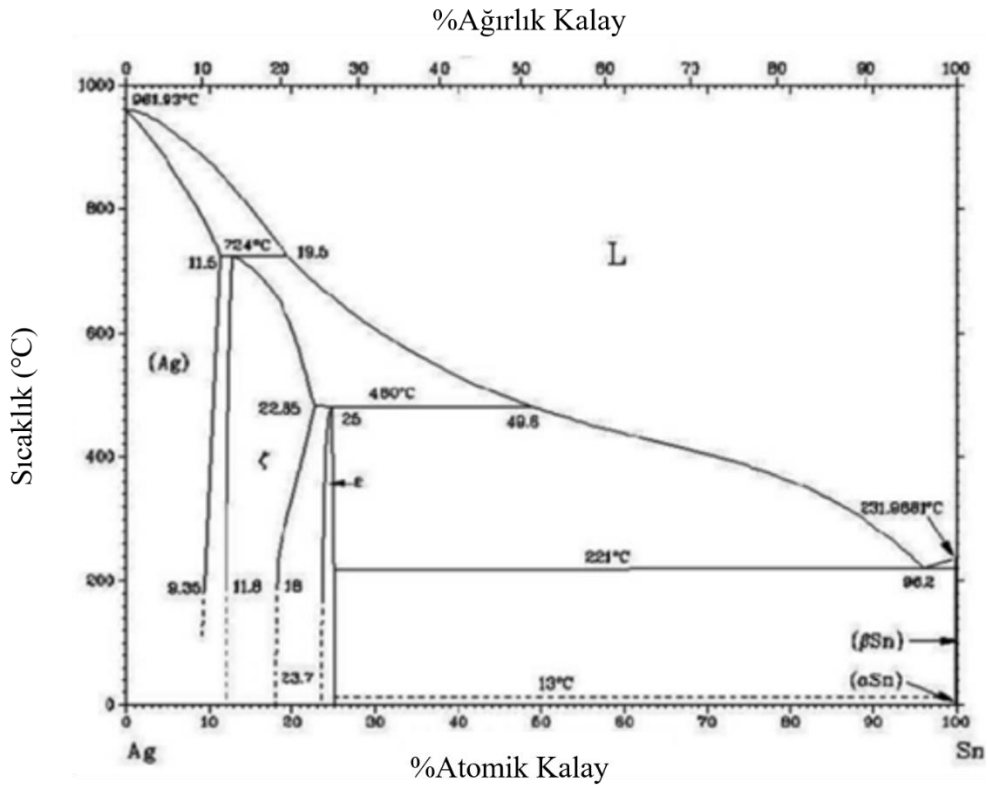


Bi-Cu ikili IMCs fazı, ağırlıkça %99,5 Bi ötektik bileşimine sahiptir ve ötektik sıcaklığı 270°C'dir (Şekil 5.7). Yüksek sıcaklıklarda (1200°C'ye yakın) Cu ve Bi karışımı tamamen sıvı fazdadır. Sıcaklık düşürüldüğünde, eutektik sıcaklıkta (270°C) sıvı faz, (Cu) ve (Bi) katı fazlarına ayrılır. Daha düşük sıcaklıklarda, alaşım tamamen katı fazlarda bulunur: saf bakır ve saf bizmut. Bi, Cu ile intermetalik bileşikler oluşturmaz [30].



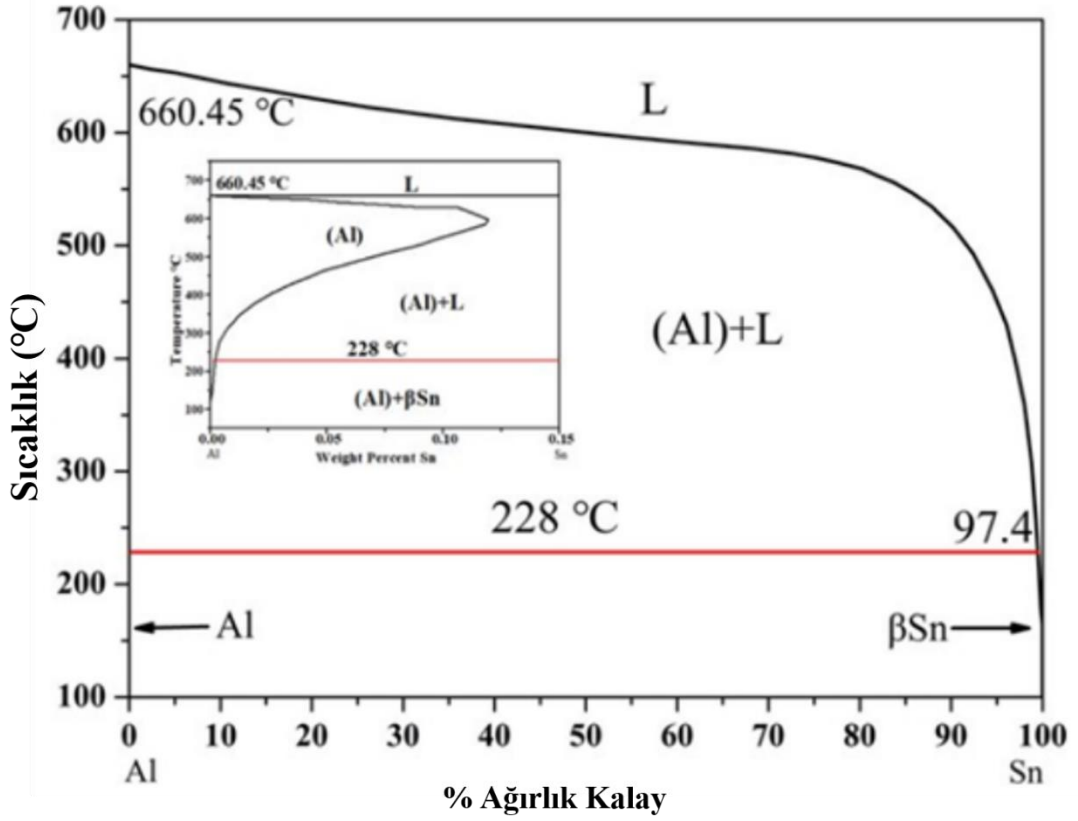
Şekil 5.7. Cu-Bi ikili faz diyagramı.

Ag-Sn IMCs fazı, Sn-%3,5Ag ötektik bileşimi ve 221°C ötektik sıcaklığı sahiptir (Şekil 5.8). Bu sıcaklıkta, belirli bir bileşimde sıvı faz doğrudan iki katı faza dönüşür. Ötektik bileşim, yaklaşık %97.8 Sn ve %2.2 Ag'dir. Eutektik noktada, sıvı faz doğrudan (Ag) ve (Sn) katı fazlarına dönüşmektedir. Bu dönüşüm, alaşımın hızlı katılaşması sırasında önemli bir rol oynar ve mikro yapının homojenliğini artırır. Sn bakımından zengin intermetalik faz ( $\epsilon$ ),  $Ag_3Sn$ 'dir. Sn konsantrasyonu ağırlıkça %25.5 ile %26 arasında değişir. Ag'nin Sn içindeki katı çözünürlüğü ağırlıkça %0,1 değerinden daha düşüktür [30].



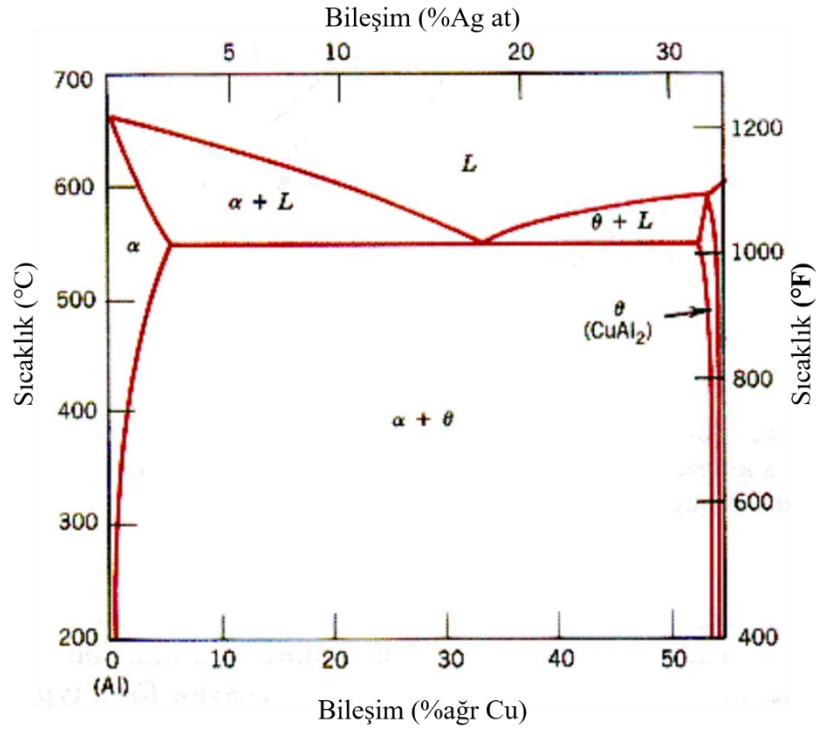
Şekil 5.8. Sn-Ag ikili faz diyagramı.

Al-Sn alaşımasının denge faz diyagramı Şekil 5.9’da görülmektedir. İkili faz diyagramında Al ve Sn arasındaki erime noktasındaki önemli fark nedeniyle, kristalizasyon işlemi sırasında Al-Sn ayrılmış bir ötektik oluşturmak kolaydır [37]. Sıvı bir çözelti oluşturmak için ötektik nokta 228°C olabildiği zaman Al ve Sn atomlarının karşılıklı difüzyonu avantajlıdır. Ötektik bileşim yaklaşık olarak %97.4 Sn ve %2.6 Al'dir. Yüksek Sn içerikli lehim alaşımlarında  $Al_2Sn$  fazları oluşması muhtemeldir. Sıcaklık düşürüldüğünde, ötektik sıcaklıkta (228°C) sıvı faz, (Al) ve ( $\beta Sn$ ) katı fazlarına ayrılır. [93].



Şekil 5.9. Sn-Al ikili faz diyagramı.

Difüzyonla bağlanmış Cu/Al arayüzey, düzlemsel bir morfoloji sergiler ve bu arayüzeyde Cu'dan Al'a doğru sıralanan  $Al_4Cu_9$ , AlCu ve  $Al_2Cu$  olmak üzere üç ara metalik faz oluşur (Şekil 5.10). Cu-Al faz diyagramında görüldüğü gibi, bu ara metalik fazlar, belirli sıcaklık ve bileşim aralıklarında denge durumundadır. Etkin oluşum ısısı (EHF) modeli, difüzyon bölgesinde ilk faz olarak  $Al_2Cu$ 'nun ortaya çıkışını açıklamaktadır. AlCu fazına göre tercihen  $Al_4Cu_9$  oluşumu, oluşum için daha yüksek itici güce bağlanabilir. Bu yüksek itici güç,  $Al_4Cu_9$  fazının daha kararlı bir yapı oluşturmasını sağlar. Ayrıca, her bir katman kalınlığı ve reaksiyon süresi arasındaki ilişkiler parabolik yasayı takip eder, bu da intermetalik fazların büyüme kinetiklerinin difüzyon kontrollü olduğunu gösterir. Cu-Al alaşımının bu özellikleri, malzeme mühendisliğinde önemli uygulamalara sahip olup, faz diyagramındaki fazların oluşumu ve dağılımı, alaşımın mekanik ve termal özelliklerini belirlemede kritik bir rol oynar [94].



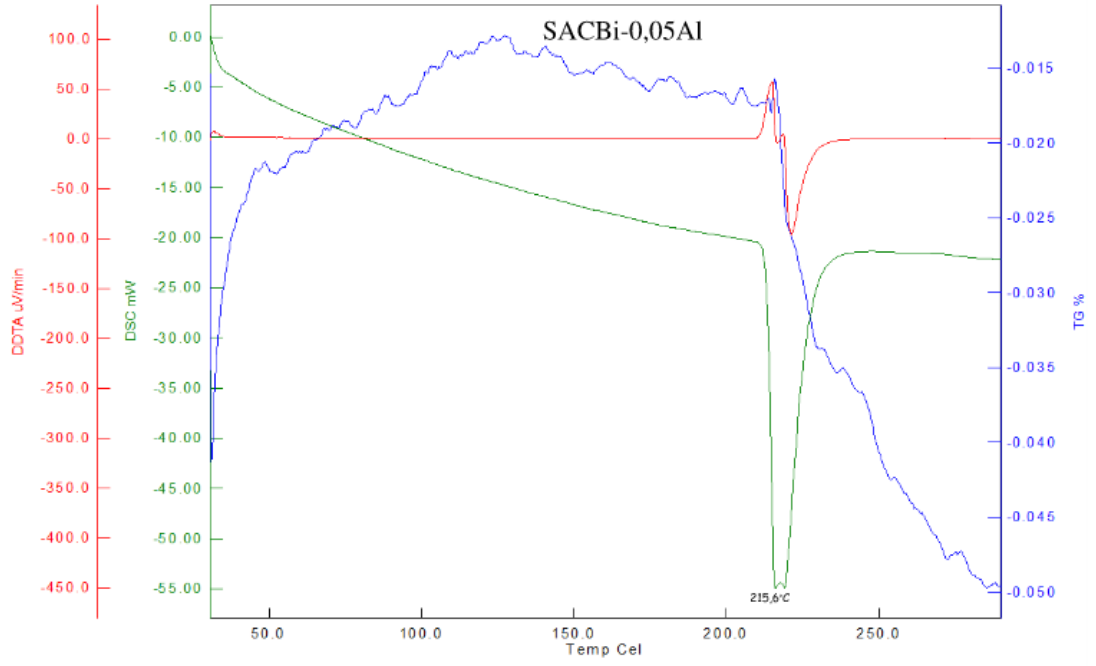
Şekil 5.10. Cu-Al ikili faz diyagramı.

### 5.3. DSC ANALİZİ

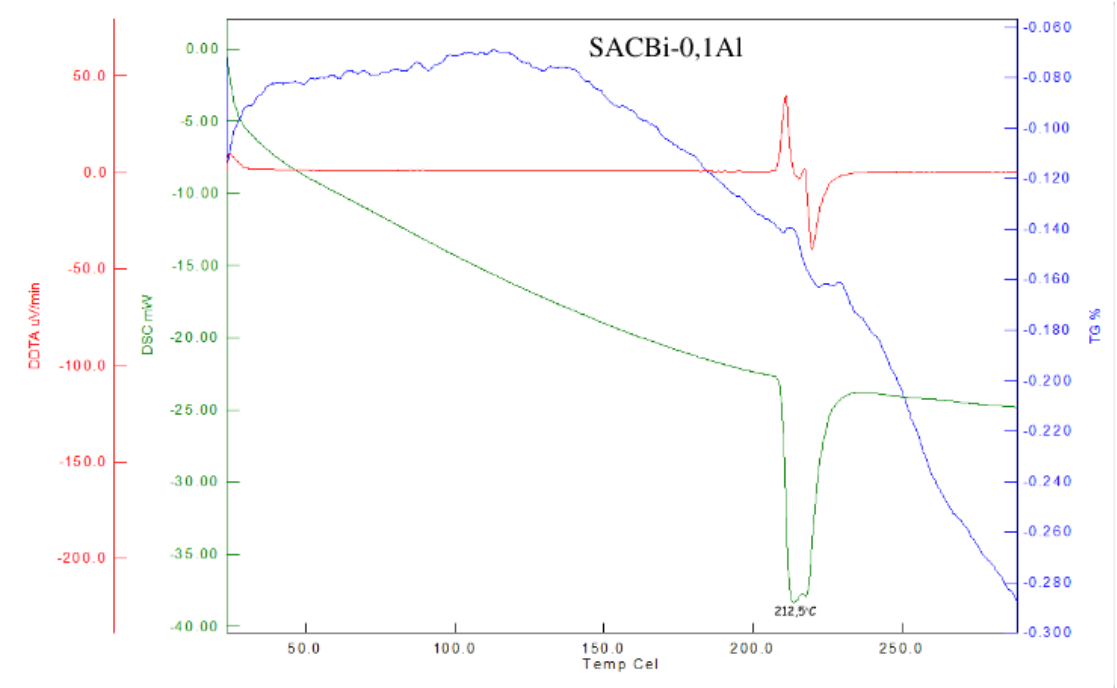
DSC analiz sonuçlarına göre lehim alaşımlarının ergime sıcaklıkları SACBi-xAl (0,05, 0,1, 0,3, 0,5 ve 0,6) alaşımlarına göre sırasıyla; 215,6°C, 212,5°C, 221°C, 220°C ve 213,5°C olarak rapor edilmiştir.

Çizelge 5.2. DSC analiz sonuçlarına göre alaşımların ergime sıcaklıkları.

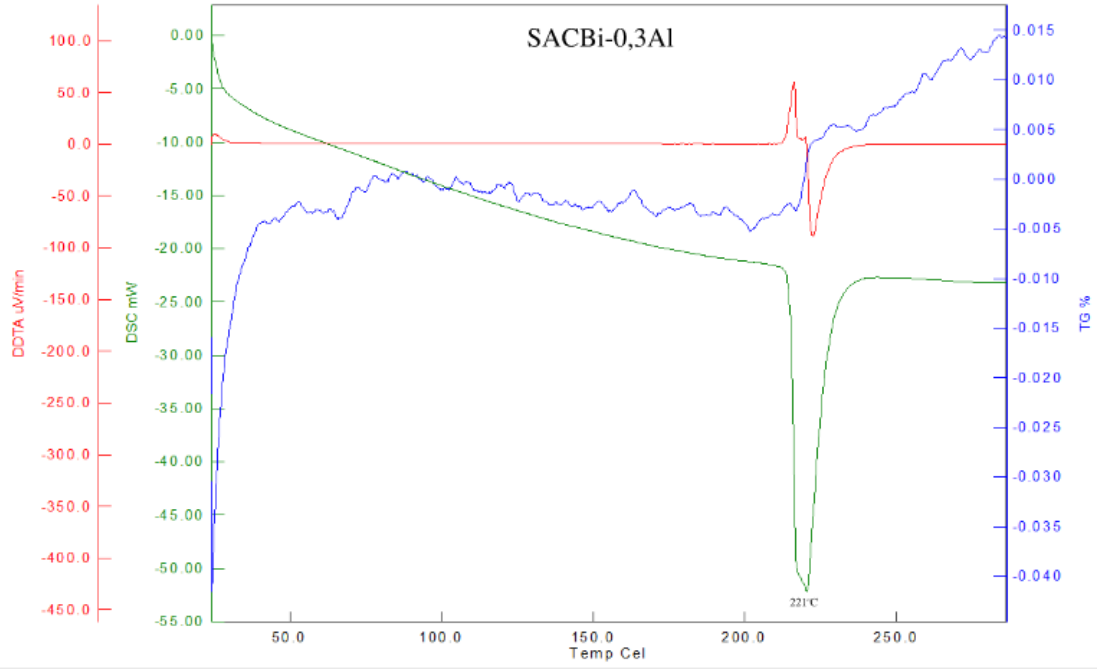
Kurşunsuz Lehim Alaşımı	Ergime Sıcaklığı (°C)
SAC-1Bi	219,0
SAC1Bi-0,05Al	215,6
SAC1Bi-0,1Al	212,5
SAC1Bi-0,3Al	221,0
SAC1Bi-0,5Al	220,0
SAC1Bi-0,6Al	213,5



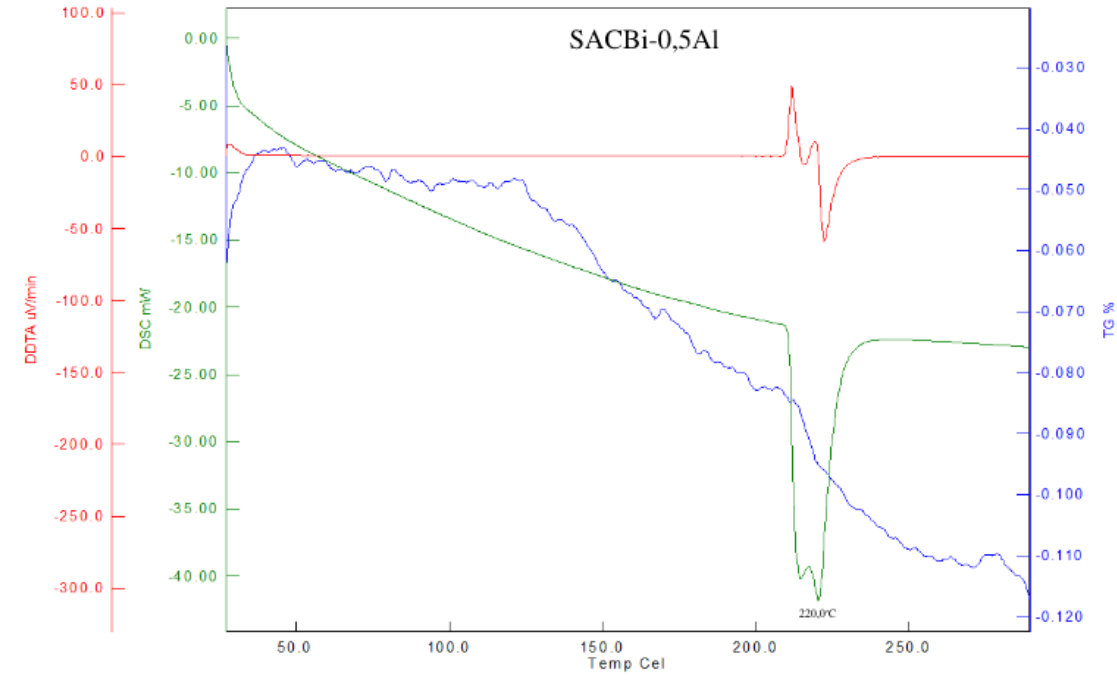
Şekil 5.11. SACBi-0,05Al lehim alaşımasının DSC analiz raporu.



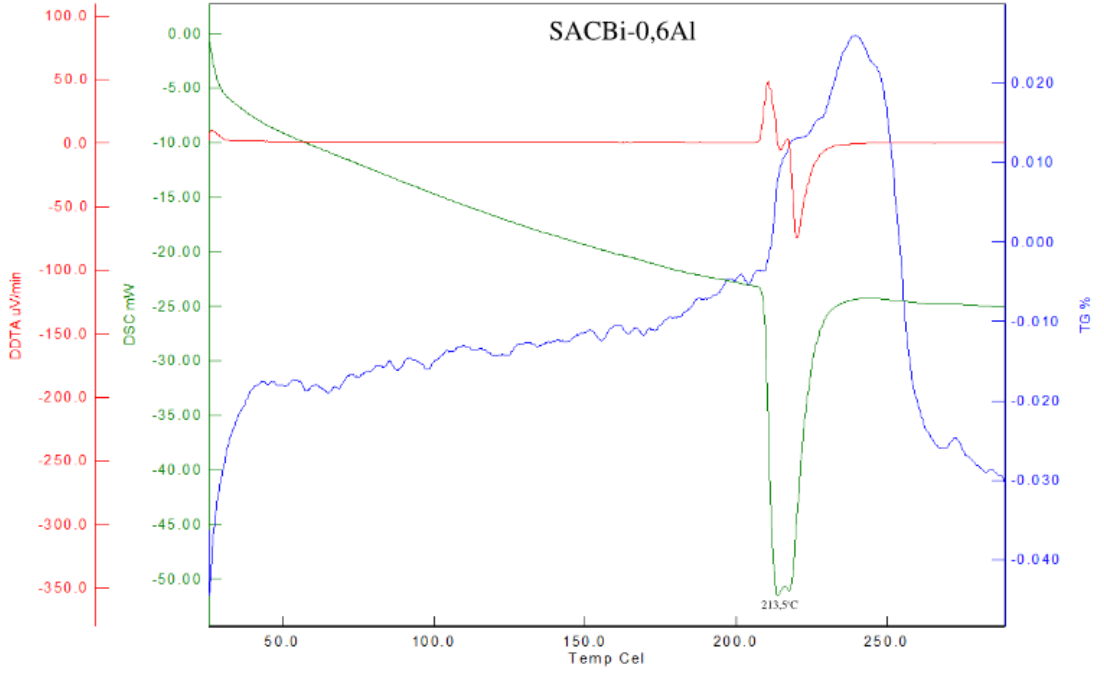
Şekil 5.12. SACBi-0,1Al lehim alaşımasının DSC analiz raporu.



Şekil 5.13. SACBi-0,3Al lehim alaşımının DSC analiz raporu.



Şekil 5. 14. SACBi-0,5Al lehim alaşımının DSC analiz raporu

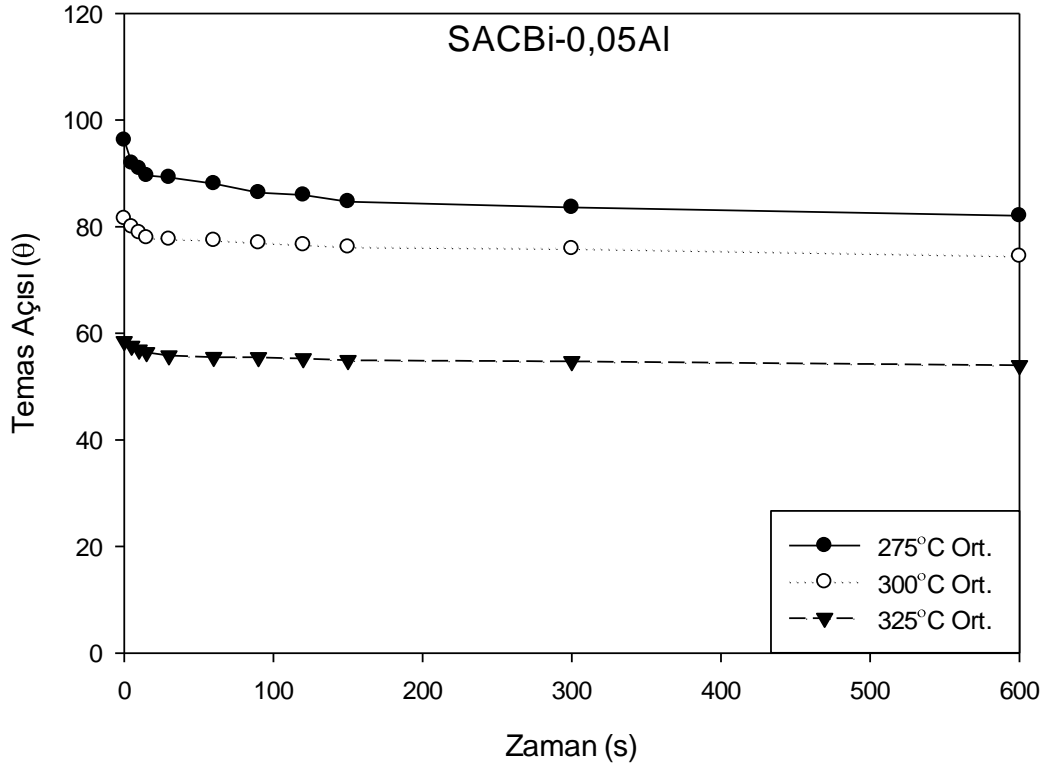


Şekil 5. 15. SACBi-0,6Al lehim alaşımının DSC analiz raporu.

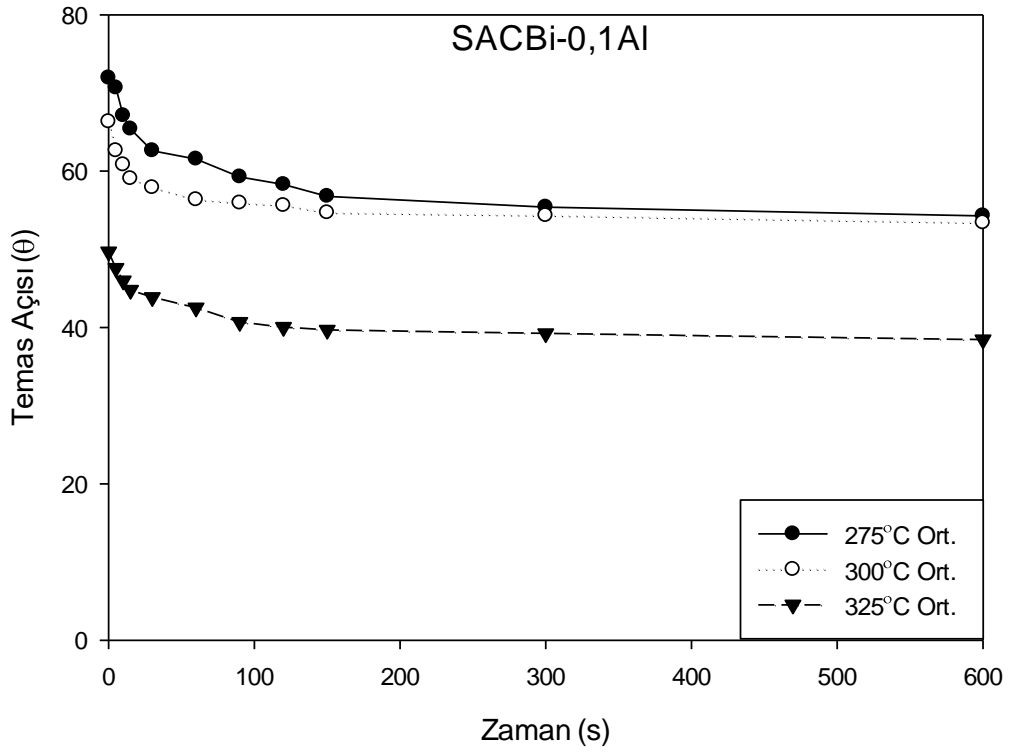
SAC-1Bi lehim alaşımının ergime sıcaklığı 219°C olarak rapor edilmişti [1]. SAC-1Bi lehim alaşımına 0,05, 0,1, 0,3, 0,5 ve 0,6 Al ilavesi ile mikro alaşımlandırılmış lehim alaşımları için 0,5 oranında Al ilavesine kadar ergime sıcaklığının düştüğü görülmektedir. 0,5Al içerikli alaşımın ergime sıcaklığı SAC-1Bi lehim alaşımına göre artış göstermektedir. 0,6Al içerikli lehim alaşımı ile tekrar bir düşüş sağlanmıştır.

#### 5.4. ISLATMA DENEYLERİ

(96,5-x)Sn-2Ag-0,5Cu-1Bi-xAl (x = %0,05, 0,1 0,3, 0,5 ve 0,6) SACBi-xAl lehim alaşımlarının 275, 300 ve 325°C sıcaklıklarda bakır (Cu) altlık üzerindeki temas açılarının zamana bağlı değişimleri grafiklerde gösterilmiştir (Şekil 5.16-5.20).

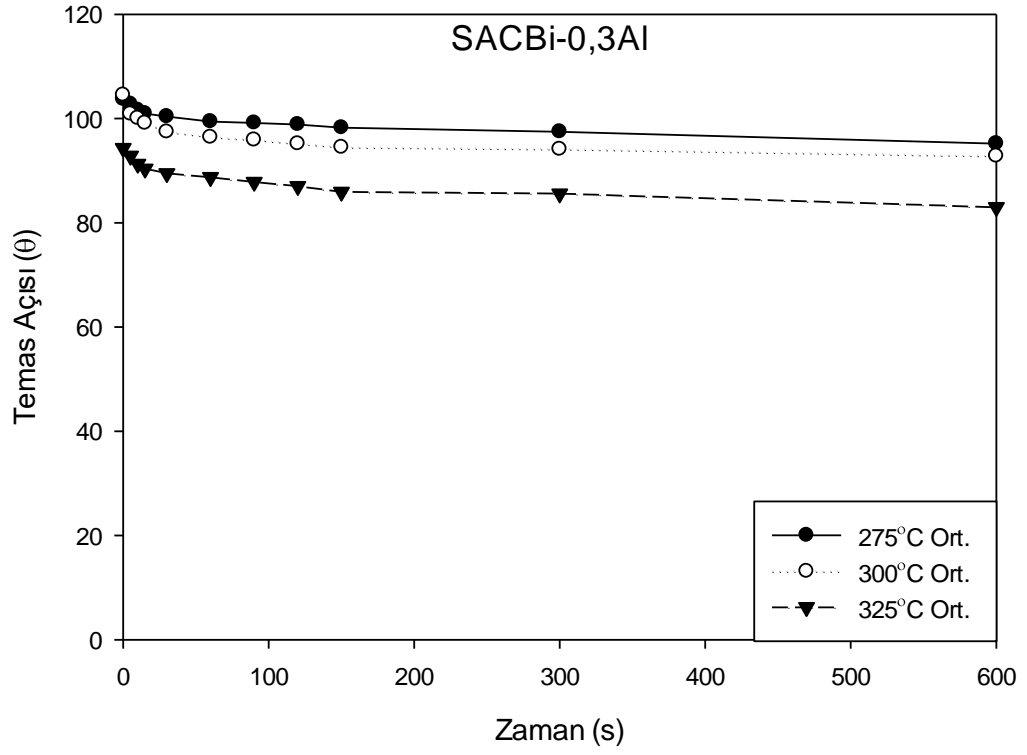


Şekil 5.16. SACBi-0,05Al lehim alaşımının temas açısı değerlerinin zaman karşı grafiği.

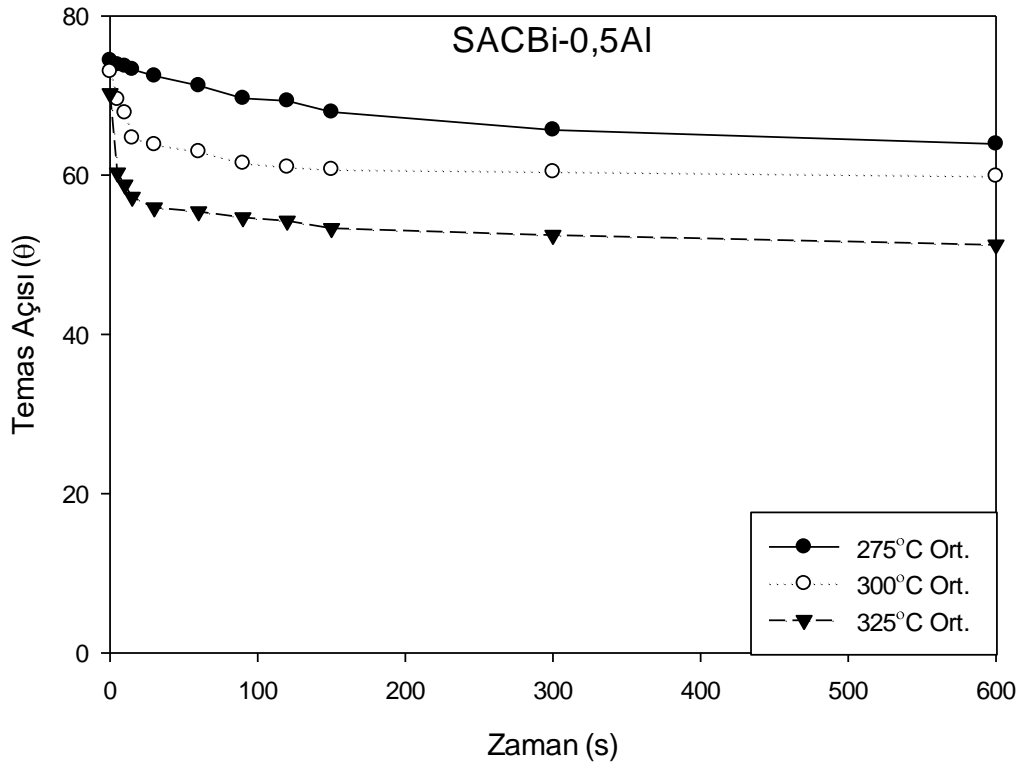


Şekil 5.17. SACBi-0,1Al lehim alaşımının temas açısı değerlerinin zaman karşı grafiği.

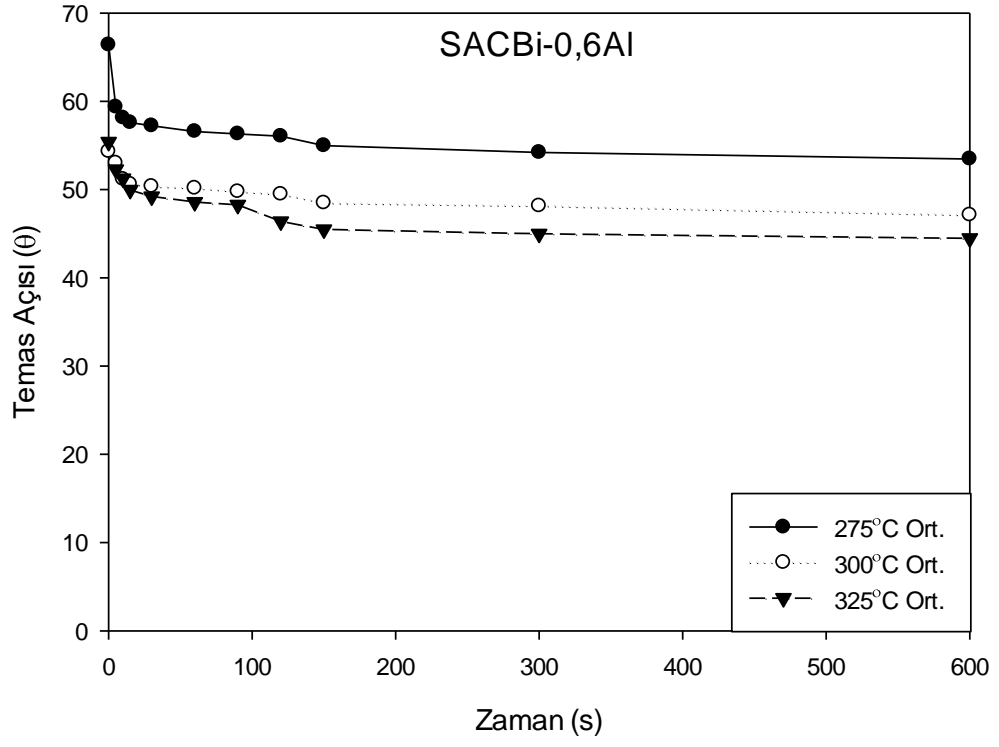




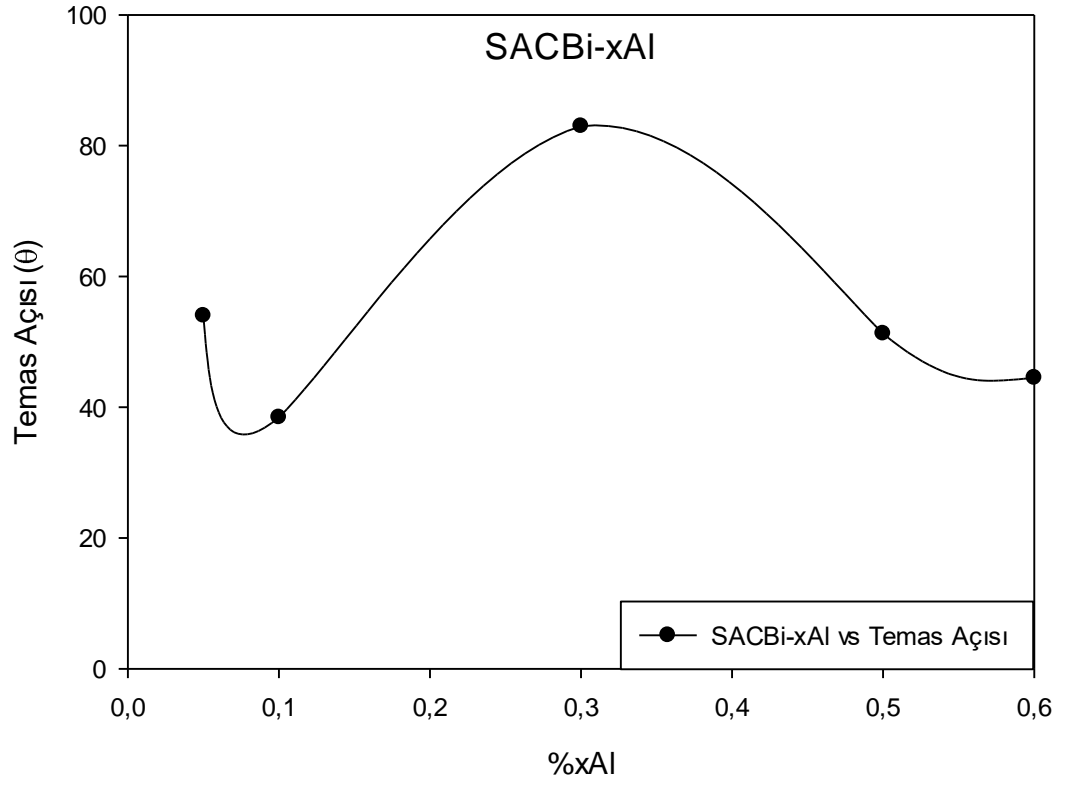
Şekil 5.18. SACBi-0,3Al lehim alaşımasının temas açısı değerlerinin zaman karşı grafiği.



Şekil 5.19. SACBi-0,5Al lehim alaşımasının temas açısı değerlerinin zaman karşı grafiği.



Şekil 5.20. SACBi-0,6Al lehim alaşımının temas açısı değerlerinin zaman karşı grafiği.



Şekil 5.21. SACBi-xAl lehim alaşım sisteminin 325°C sıcaklıktaki temas açısı değerleri.

Çizelge 5.3. SACBi-xAl (x = %0,05, 0,1 0,3, 0,5 ve 0,6) kurşunsuz lehim alaşımlarının sıcaklıklara göre zamanla temas açılarındaki değişim değerleri.

Zaman (s)	Kurşunsuz Lehim Alaşımları														
	SACBi-0,05Al			SACBi-0,1Al			SACBi-0,3Al			SACBi-0,5Al			SACBi-0,6Al		
	275°C	300°C	325°C	275°C	300°C	325°C	275°C	300°C	325°C	275°C	300°C	325°C	275°C	300°C	325°C
<b>0</b>	96,23°	81,55°	58,49°	71,90°	66,30°	49,68°	103,69°	104,49°	94,31°	74,39°	73,02°	70,25°	66,39°	54,31°	55,38°
<b>5</b>	91,95°	79,96°	57,60°	70,65°	62,60°	47,58°	102,74°	100,86°	92,83°	73,87°	69,50°	60,29°	59,35°	52,99°	52,27°
<b>10</b>	90,91°	78,90°	56,87°	67,09°	60,80°	45,99°	101,64°	100,03°	91,26°	73,68°	67,85°	58,79°	58,11°	51,16°	51,23°
<b>15</b>	89,62°	77,92°	56,40°	65,37°	59,03°	44,79°	100,94°	99,09°	90,36°	73,28°	64,68°	57,26°	57,57°	50,61°	49,95°
<b>30</b>	89,24°	77,65°	55,81°	62,59°	57,88°	43,86°	100,38°	97,43°	89,47°	72,47°	63,84°	55,92°	57,24°	50,35°	49,21°
<b>60</b>	88,07°	77,45°	55,51°	61,54°	56,34°	42,52°	99,44°	96,40°	88,70°	71,24°	62,93°	55,42°	56,58°	50,13°	48,58°
<b>90</b>	86,39°	76,97°	55,46°	59,27°	55,91°	40,68°	99,16°	95,88°	87,80°	69,65°	61,51°	54,68°	56,30°	49,76°	48,26°
<b>120</b>	85,93°	76,60°	55,27°	58,29°	55,61°	40,05°	98,83°	95,17°	87,00°	69,33°	61,01°	54,25°	56,04°	49,47°	46,38°
<b>150</b>	84,69°	76,20°	54,92°	56,78°	54,67°	39,69°	98,25°	94,47°	85,91°	67,94°	60,70°	53,32°	54,96°	48,48°	45,47°
<b>300</b>	83,59°	75,90°	54,71°	55,41°	54,31°	39,22°	97,46°	94,12°	85,56°	65,68°	60,44°	52,46°	54,20°	48,13°	44,98°
<b>600</b>	82,04°	74,45°	53,98°	54,27°	53,39°	38,44°	95,20°	92,80°	82,97°	63,90°	59,86°	51,24°	53,46°	47,11°	44,46°

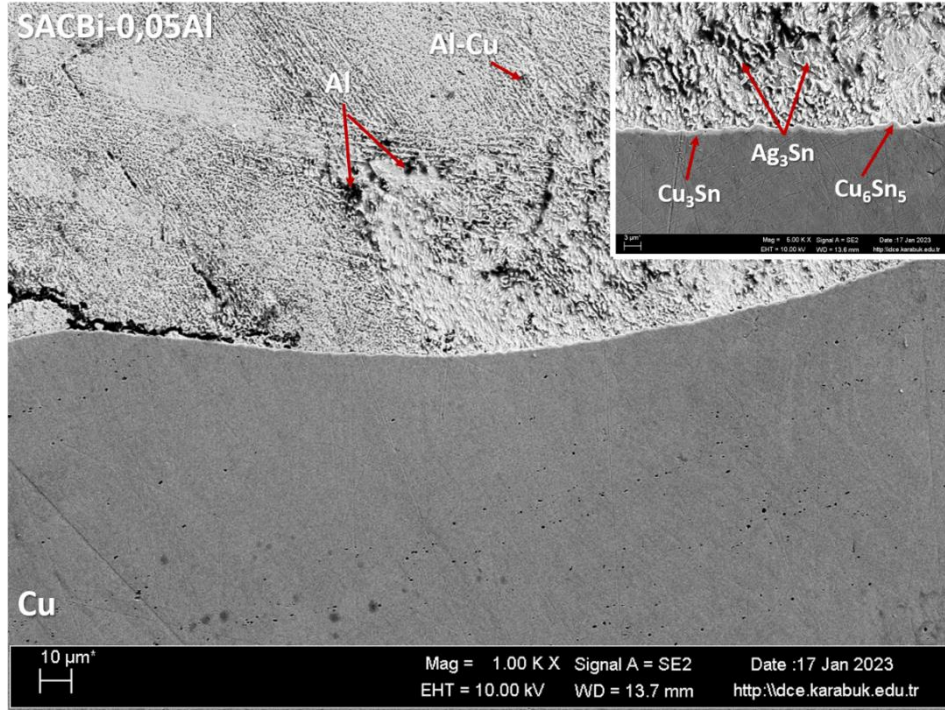
96,45Sn-2Ag-0,5Cu-1Bi-0,05Al (SACBi-0,05Al) kurşunsuz lehim alaşımı için 275, 300 ve 325°C sıcaklıklarda Cu altlık üzerindeki temas açıları sırasıyla 82,04°, 72,45° ve 53,98° olarak rapor edilmiştir. 96,4Sn-2Ag-0,5Cu-1Bi-0,1Al (SACBi-0,1Al) kurşunsuz lehim alaşımı için 275, 300 ve 325°C sıcaklıklarda Cu altlık üzerindeki temas açıları sırasıyla 54,27°, 53,39° ve 38,44° olarak rapor edilmiştir. 96,2Sn-2Ag-0,5Cu-1Bi-0,3Al (SACBi-0,3Al) kurşunsuz lehim alaşımı için 275, 300 ve 325°C sıcaklıklarda Cu altlık üzerindeki temas açıları sırasıyla 95,20°, 92,80° ve 82,97° olarak rapor edilmiştir. 96Sn-2Ag-0,5Cu-1Bi-0,5Al (SACBi-0,5Al) kurşunsuz lehim alaşımı için 275, 300 ve 325°C sıcaklıklarda Cu altlık üzerindeki temas açıları sırasıyla 63,90°, 59,86° ve 51,24° olarak rapor edilmiştir. 95,9Sn-2Ag-0,5Cu-1Bi-0,6Al (SACBi-0,6Al) kurşunsuz lehim alaşımı için 275, 300 ve 325°C sıcaklıklarda Cu altlık üzerindeki temas açıları sırasıyla 53,46°, 47,11° ve 44,46° olarak rapor edilmiştir.

Her bir alaşım kendi içerisinde sıcaklıklara göre kıyaslandığında sıcaklık değeri arttıkça temas açısı değerlerinin azaldığı açıkça görülmektedir (Çizelge 5.3). Sn-Ag-Cu-Bi kurşunsuz lehim alaşımına Al ilavesi üretilen yeni beşli kurşunsuz lehim alaşımında %0,3Al ilavesine kadar (%0,05Al ve 0,1Al) ıslatma açısı değerlerinin düştüğü görülmektedir. %0,3Al ilaveli kurşunsuz lehim alaşımının Cu altlık üzerinde yayılmadığı ve ıslatma bakımından kötü bir sonuç elde edildiği rapor edilmiştir. %0,3Al dan biraz daha fazla ilave edildiğinde (%0,5Al ve 0,6Al) temas açısı değerlerinin tekrar düştüğü gözlenmiştir. Ancak en iyi temas açısı değeri %0,1Al içerikli kurşunsuz lehim alaşımına aittir.

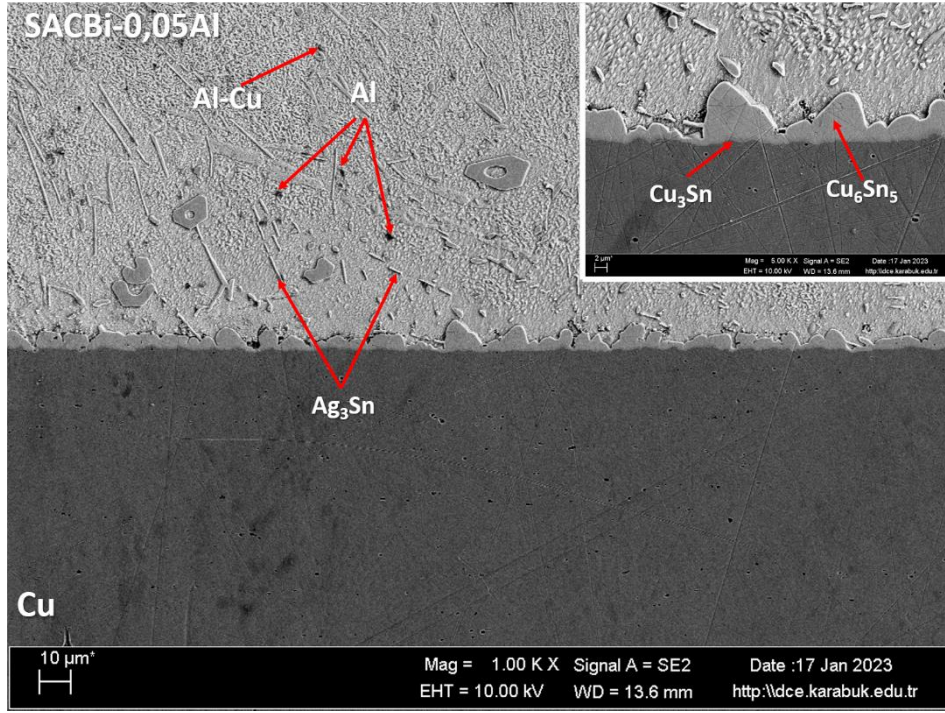
## 5.5. SEM-EDX ANALİZLERİ

Bir alaşımın mikroyapısal özelliklerinin mekanik performansını büyük ölçüde belirlediği iyi bilinmektedir. Bu nedenle, Sn-Ag-Cu-Bi-Al lehim alaşımının mekanik performansını ve güvenilirliğini anlamak için mikroyapısal özelliklerini anlamak çok önemlidir. İntermetalik bileşenlerin (IMC's) morfolojik yapısını göstermek için alaşımların SEM analizleri yapılmıştır. SACBi-xAl (x = %0,05, 0,1 0,3, 0,5 ve 0,6) lehim alaşımlarının 275, 300 ve 325°C sıcaklık değerlerindeki damlaların Cu altlık ile arasındaki intermetalik bileşenler SEM-EDX analizi ile incelenmiştir.

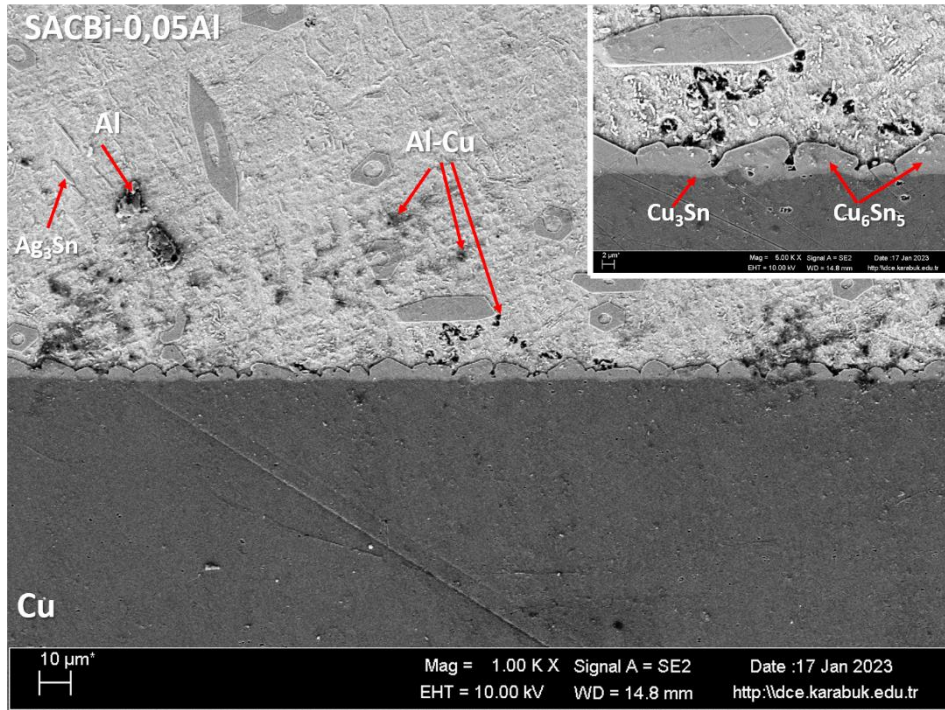
$\text{Cu}_6\text{Sn}_5$  ve  $\text{Cu}_3\text{Sn}$  intermetalik bileşenleri lehim alaşımının mekanik özellikleri açısından önemli bir yere sahiptir. Lehim ve Cu altlık arasında oluşan birincil ve ana intermetalik fazdır [95]. Literatürde Al ilaveli SAC lehim alaşımları ile ilgili çalışmalarda birincil CuSn fazlarının büyümesinin engellendiği ve Al içeriğinin artmasıyla CuSn fazlarının baskılandığı rapor edilmiştir [96].



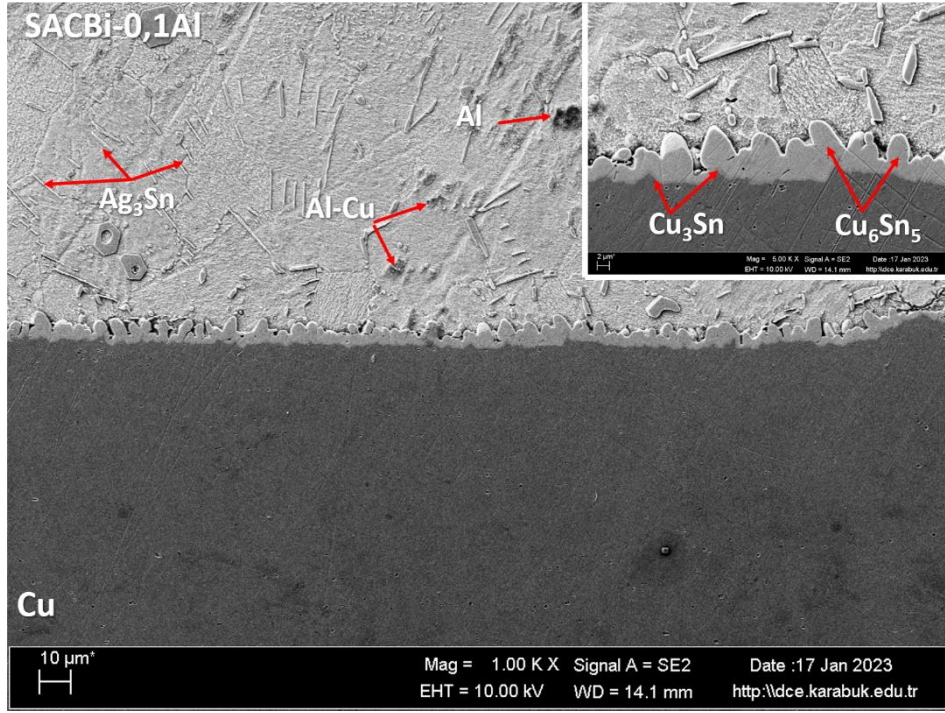
Şekil 5.22. SACBi-0,05Al kurşunsuz lehim alaşımının 275°C sıcaklık değerindeki SEM analizi.



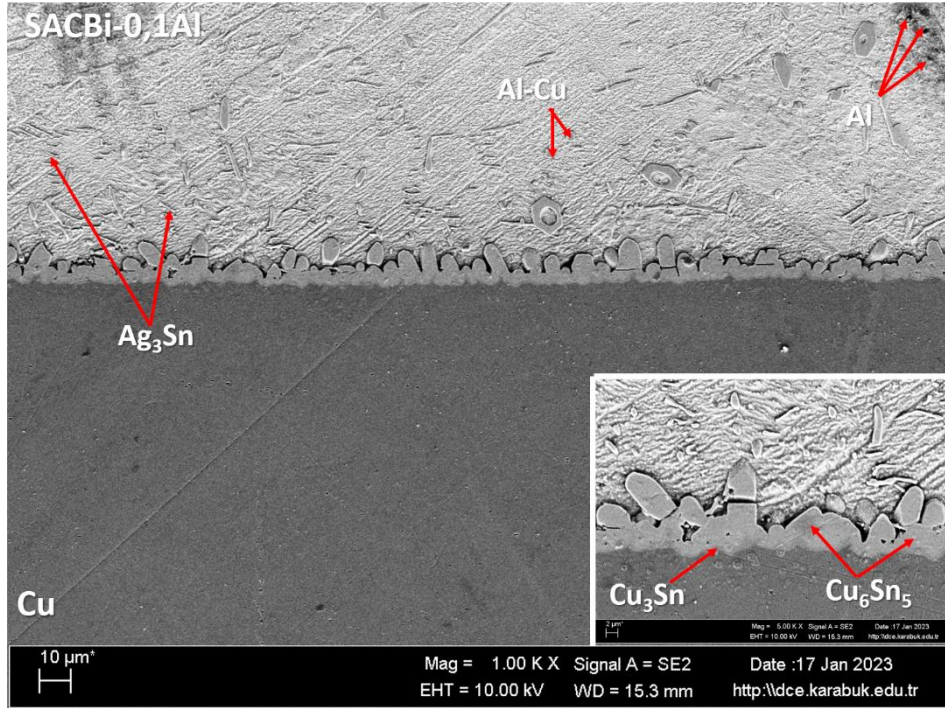
Şekil 5.23. SACBi-0,05Al kurşunsuz lehim alaşımının 300°C sıcaklık değerindeki SEM analizi.



Şekil 5.24. SACBi-0,05Al kurşunsuz lehim alaşımının 325°C sıcaklık değerindeki SEM analizi.

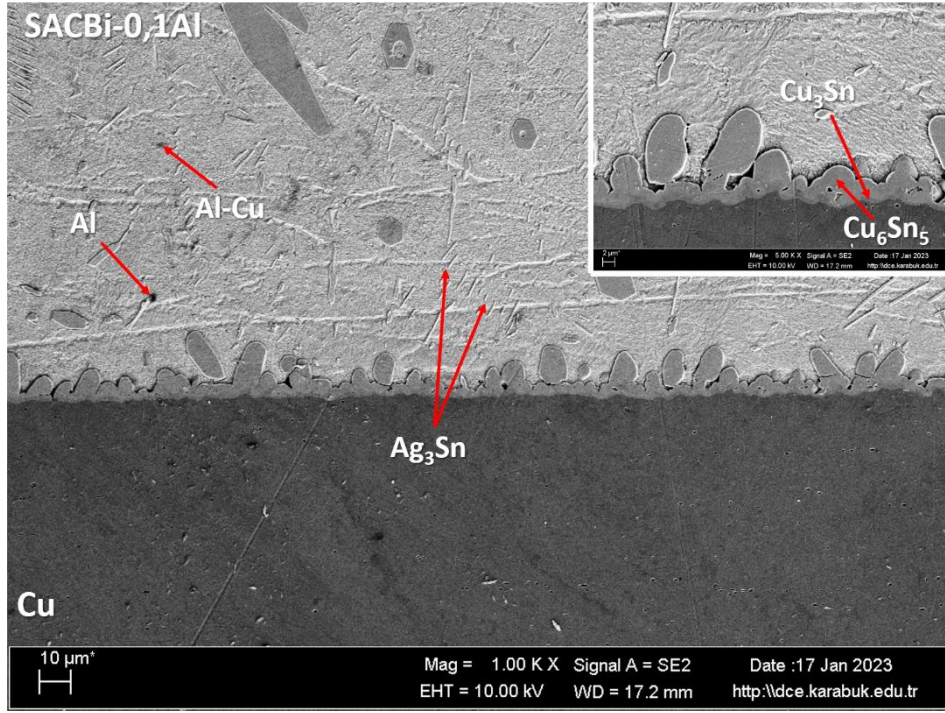


Şekil 5.25. SACBi-0,1Al kurşunsuz lehim alaşımının 275°C sıcaklık değerindeki SEM analizi.

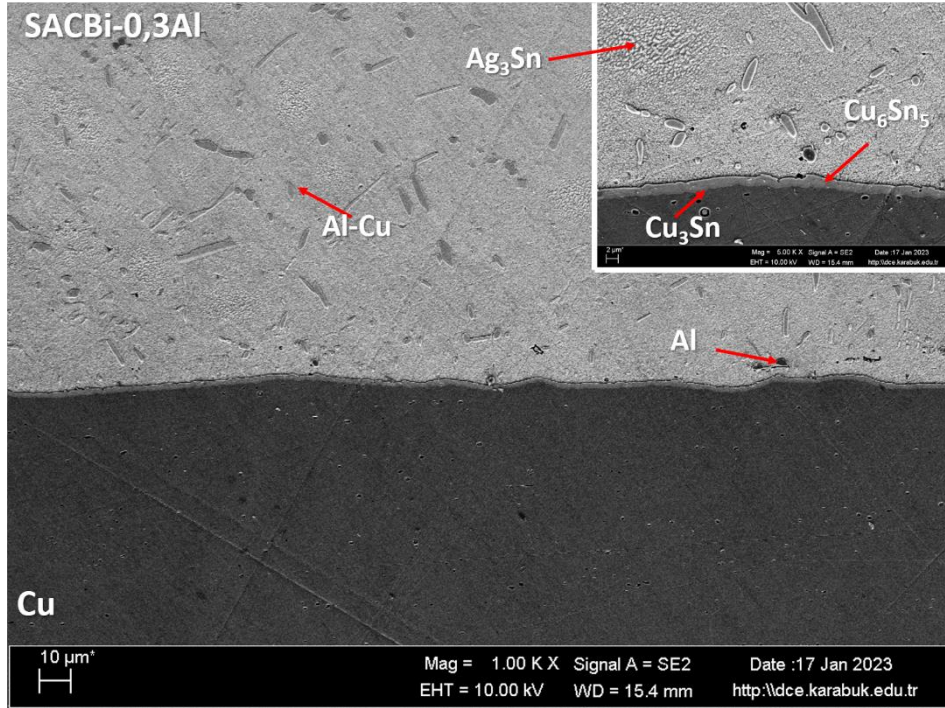


Şekil 5.26. SACBi-0,1Al kurşunsuz lehim alaşımının 300°C sıcaklık değerindeki SEM analizi.

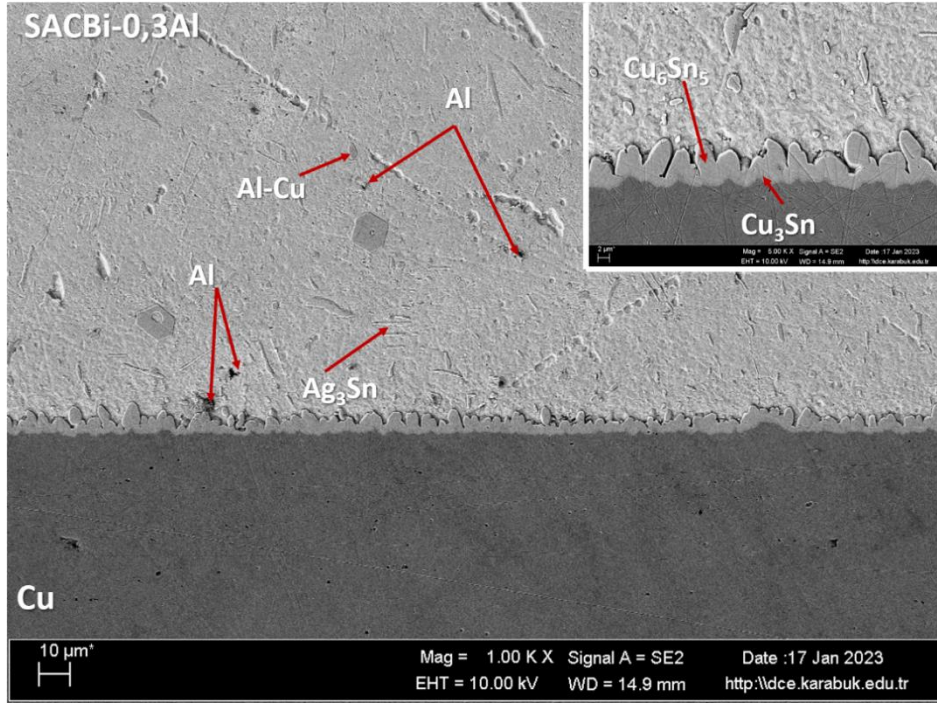




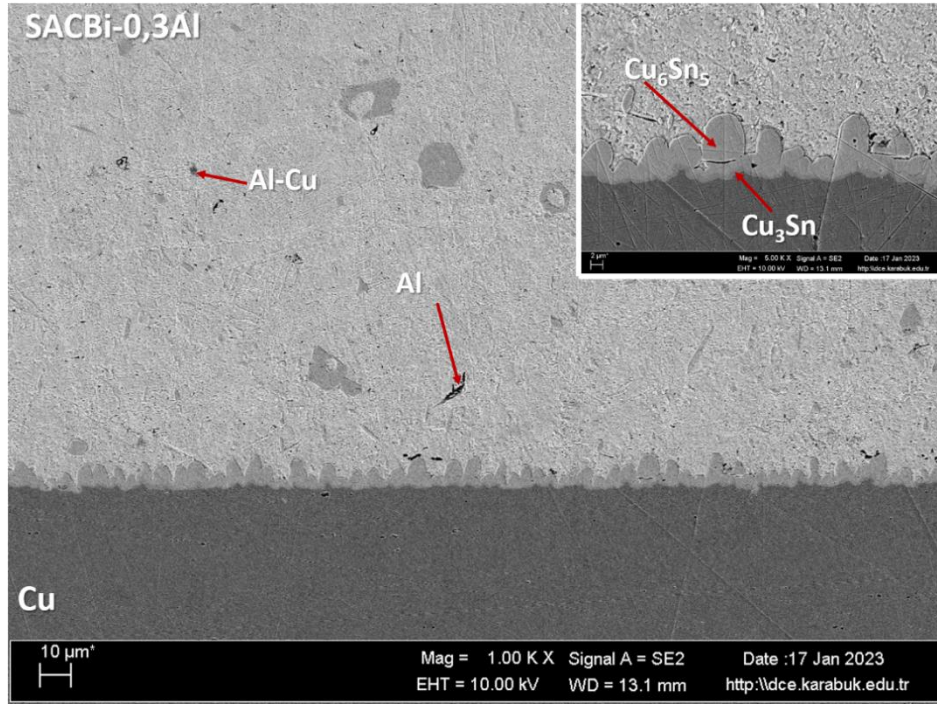
Şekil 5.27. SACBi-0,1Al kurşunsuz lehim alaşımının 325°C sıcaklık değerindeki SEM analizi.



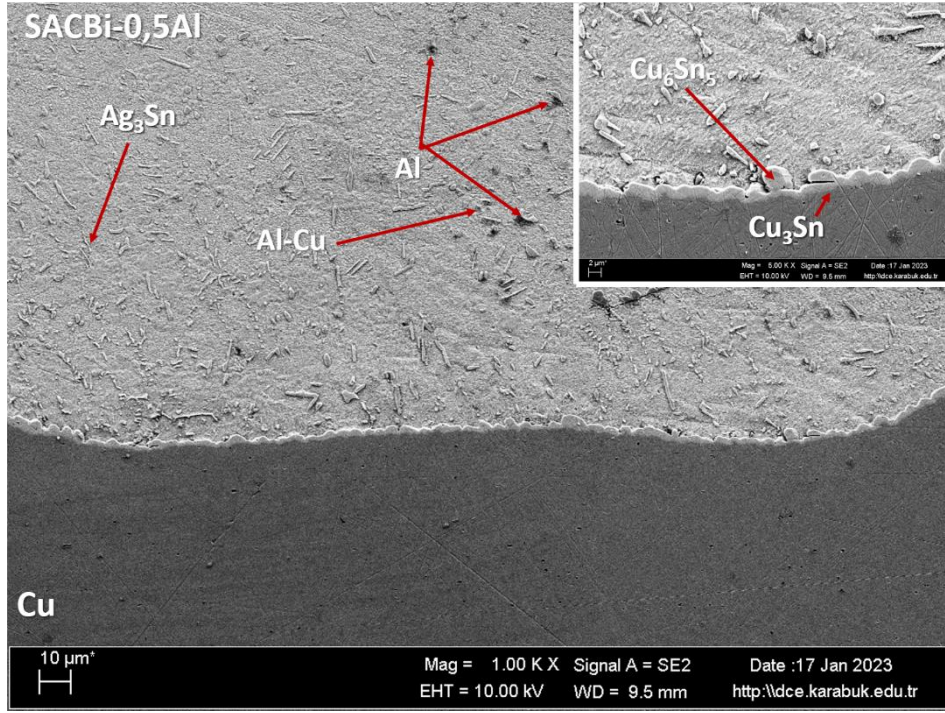
Şekil 5.28. SACBi-0,3Al kurşunsuz lehim alaşımının 275°C sıcaklık değerindeki SEM analizi.



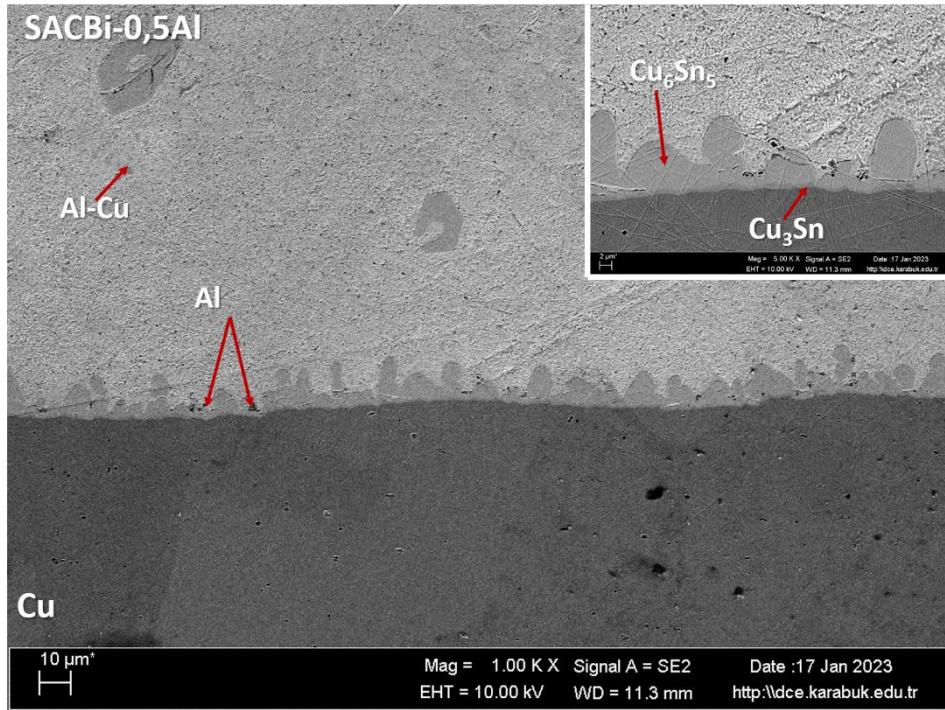
Şekil 5.29. SACBi-0,3Al kurşunsuz lehim alaşımının 300°C sıcaklık değerindeki SEM analizi.



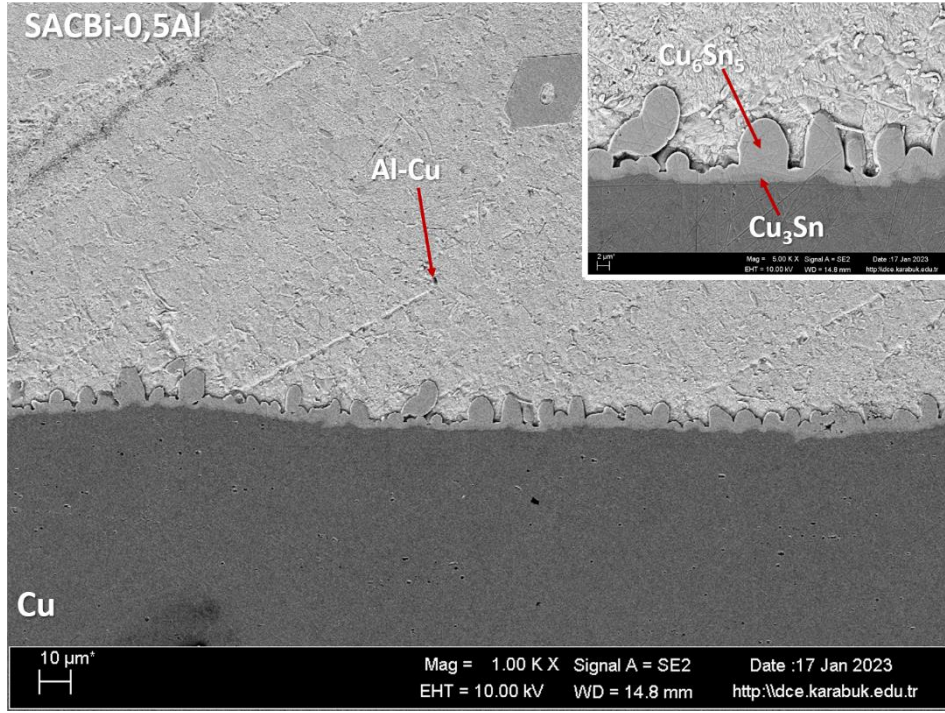
Şekil 5.30. SACBi-0,3Al kurşunsuz lehim alaşımının 325°C sıcaklık değerindeki SEM analizi.



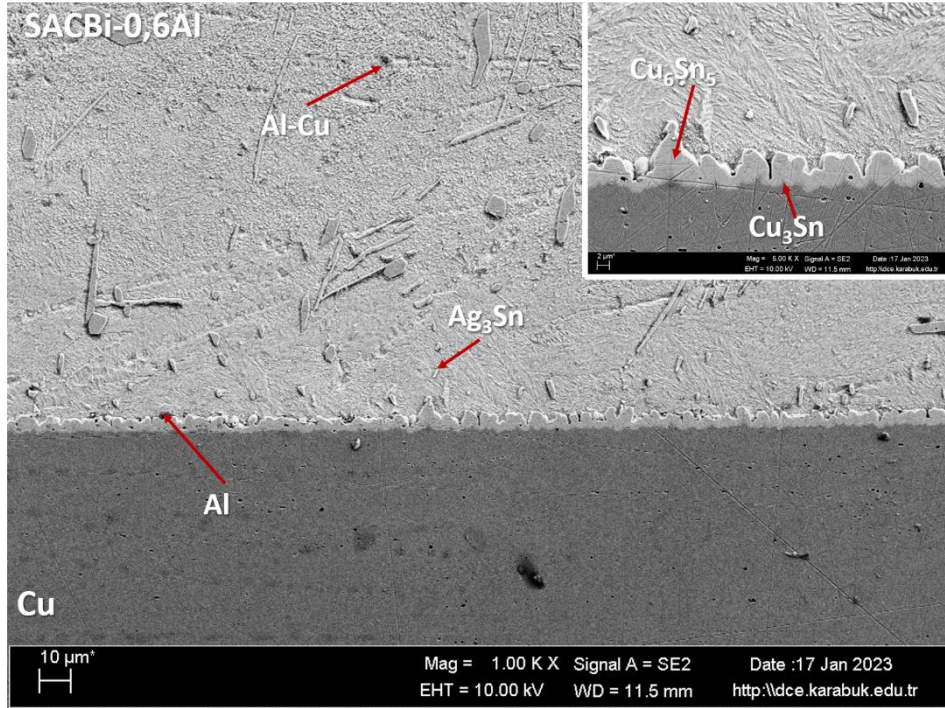
Şekil 5.31. SACBi-0,5Al kurşunsuz lehim alaşımının 275°C sıcaklık değerindeki SEM analizi.



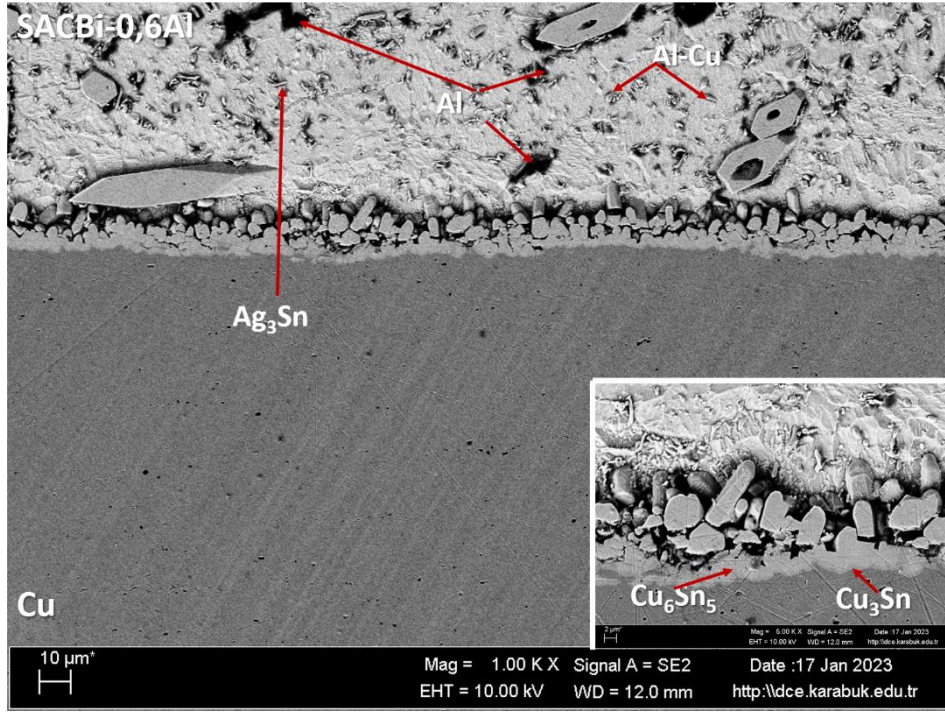
Şekil 5.32. SACBi-0,5Al kurşunsuz lehim alaşımının 300°C sıcaklık değerindeki SEM analizi.



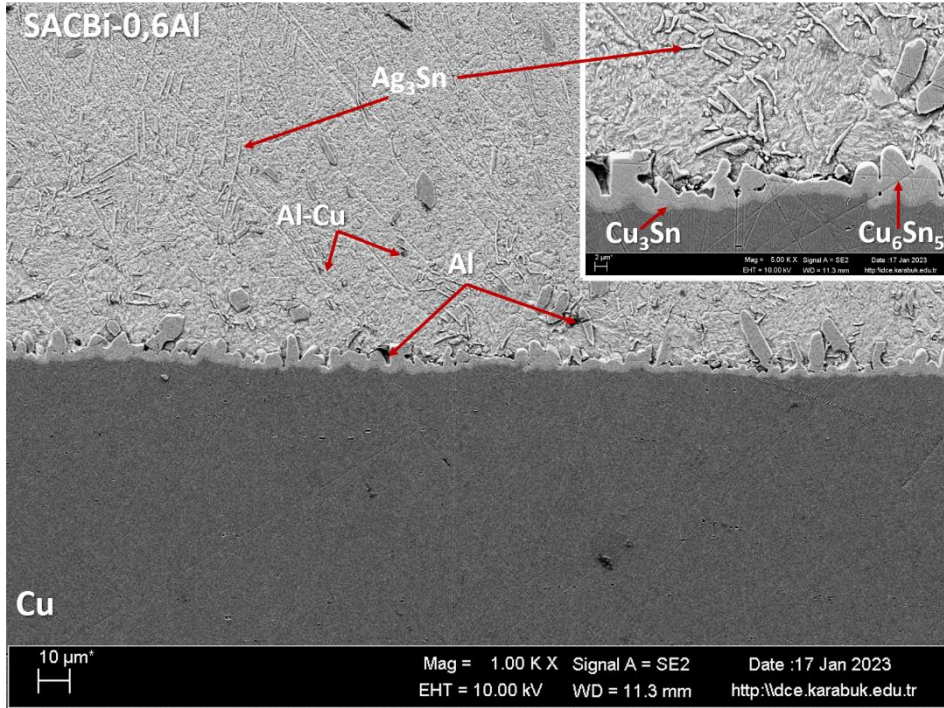
Şekil 5.33. SACBi-0,5Al kurşunsuz lehim alaşımının 325°C sıcaklık değerindeki SEM analizi.



Şekil 5.34. SACBi-0,6Al kurşunsuz lehim alaşımının 275°C sıcaklık değerindeki SEM analizi.



Şekil 5.35. SACBi-0,6Al kurşunsuz lehim alaşımının 300°C sıcaklık değerindeki SEM analizi.

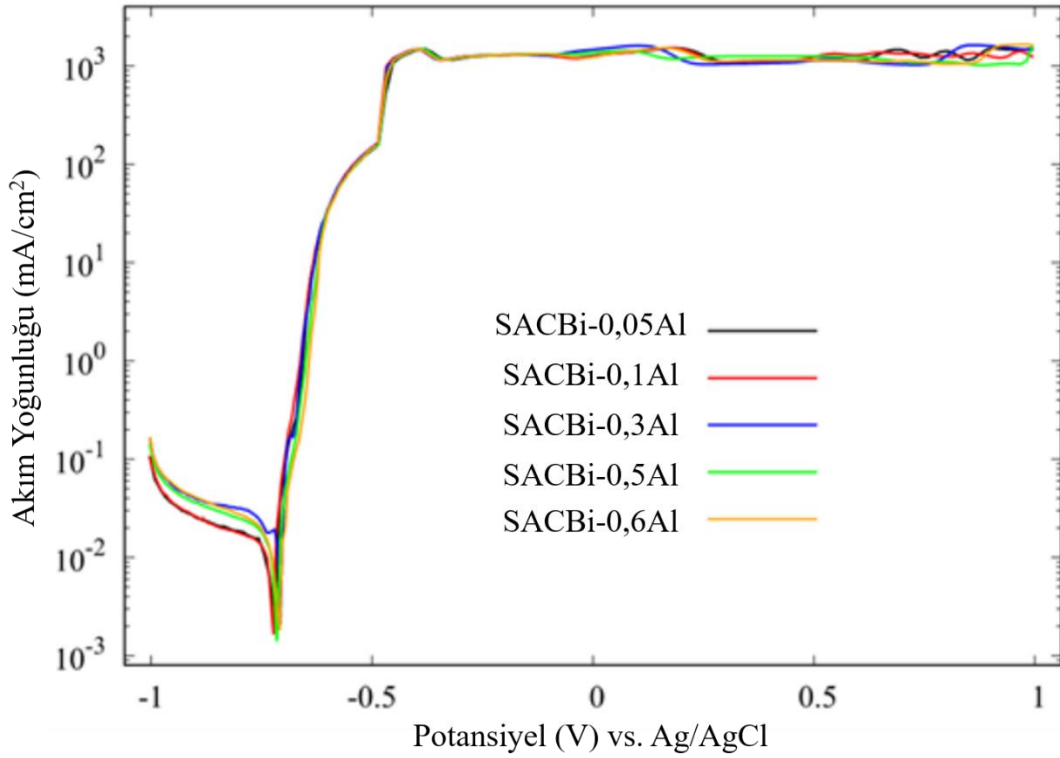


Şekil 5.36. SACBi-0,6Al kurşunsuz lehim alaşımının 325°C sıcaklık değerindeki SEM analizi.

SEM analizleri incelendiğinde her bir kurşunsuz lehim alaşımı için sıcaklık değeri arttıkça arayüzde oluşan intermetalik bileşenler daha belirgin hale gelmiştir. %0,3Al ilaveli lehim alaşımının arayüzündeki intermetalik bileşenlerin baskılandığı görülmektedir. %0,05, 0,1, 0,5 ve 0,6Al ilaveli lehim alaşımlarında daha belirgin bir durum söz konusudur.

## 5.6. KOROZYON TESTİ SONUÇLARI

### 5.6.1. Potansiyodinamik Polarizasyon Analiz Sonuçları



Şekil 5. 37. SACBi-xAl lehim alaşımının potansiyodinamik polarizasyon eğrileri.

Potansiyodinamik polarizasyon taramasının grafikleri Şekil 5.37'da verilmiştir. Pasivasyon bölgelerinin olmadığı açıktır. Bir pasivasyon bölgesinde, akım yoğunluğu belirli bir anodik polarizasyon potansiyelinde rotasını değiştirmeli ve bölgeye girmeden hemen önce gözlemlenen değerlere kıyasla çok düşük değerleri kabul etmelidir. Bunun yerine, SACBi-xAl (ağırlıkça %0,05, 0,1, 0,3, 0,5 ve 0,6) yalnızca,

akım yoğunluklarının sabit olduğu ve yaklaşık -0,47 V değerinden taramanın sonuna kadar tarama potansiyellerindeki değişikliklere tepki vermediği bir sözde (pseudo) pasifleştirme bölgesine sahiptir. Benchmark ortamının aşırı asitliği nedeniyle pseudo-pasivasyon bölgelerindeki akım yoğunluğu oldukça büyüktür. Bir diğer ilgi çekici nokta ise pseudo-pasivasyon bölgesinin sona erdiği bir reaktivasyon noktasının bulunmamasıdır. Şekil 5.36'dan kolayca görülebileceği gibi, tarama bölgesinin sonunda bile (+1V) sözde pasivasyon bölgesi tutulur. Bu, esas olarak NaCl bazlı solüsyonları kullanan diğer çalışmalar tarafından bildirilen ve gözlemlenen davranışlardan farklıdır [92-93]. Potansiyodinamik polarizasyon ölçümlerinin kantitatif sonuçları Tablo 5.4'de verilmiştir. Bu çalışmadaki tüm alaşımlar için benzer korozyon potansiyelleri gözlemlenmiştir.

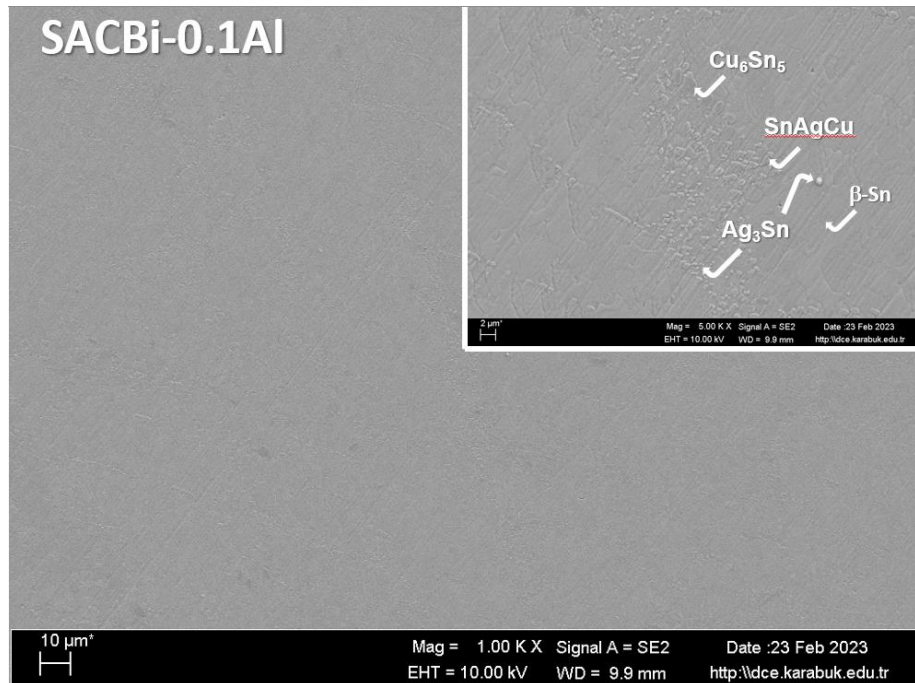
Bu alaşımlardaki alüminyum (Al) oranları önemli bir değişikliği tetikleyecek kadar yüksek olmadığından bu beklenen bir durumdur. Tafel ekstrapolasyonlarını kullanarak, her bir alaşımın karşılık gelen korozyon hızlarıyla birlikte korozyon akımı yoğunluklarını elde ederiz. Genel korozyon oranları, kalay (Sn) elementinin %0,1 Al ikamesinin korozyon hızında düşüşe neden olduğu bir model izliyor gibi görünüyor. Bununla birlikte, kalayın alüminyum ile daha fazla yer değiştirmesi sonucunda korozyon hızı %0,3Al alaşımında artar ve %0,5Al alaşımında bir düşüşe neden olmaktadır. 0,6Al alaşımında ise küçük miktarda bir artışa neden olduğu gözlemlenmektedir.

Çizelge 5.4. SACBi-xAl lehim alaşımının korozyon parametreleri.

Kurşunsuz Lehim Alaşımı	$i_{corr}$ ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	CR (mm/yıl)	$E_{corr}$ (V)
SAC-1Bi [99]	11,06	0,298	-0,52
SACBi-0,05Al	14,00	0,388	-0,78
SACBi-0,1Al	11,75	0,326	-0,78
SACBi-0,3Al	17,83	0,494	-0,76
SACBi-0,5Al	13,58	0,376	-0,76
SACBi-0,6Al	14,00	0,388	-0,76



Şekil 5.38. SACBi-0,05Al lehim alaşımının mikroyapı incelemesi.

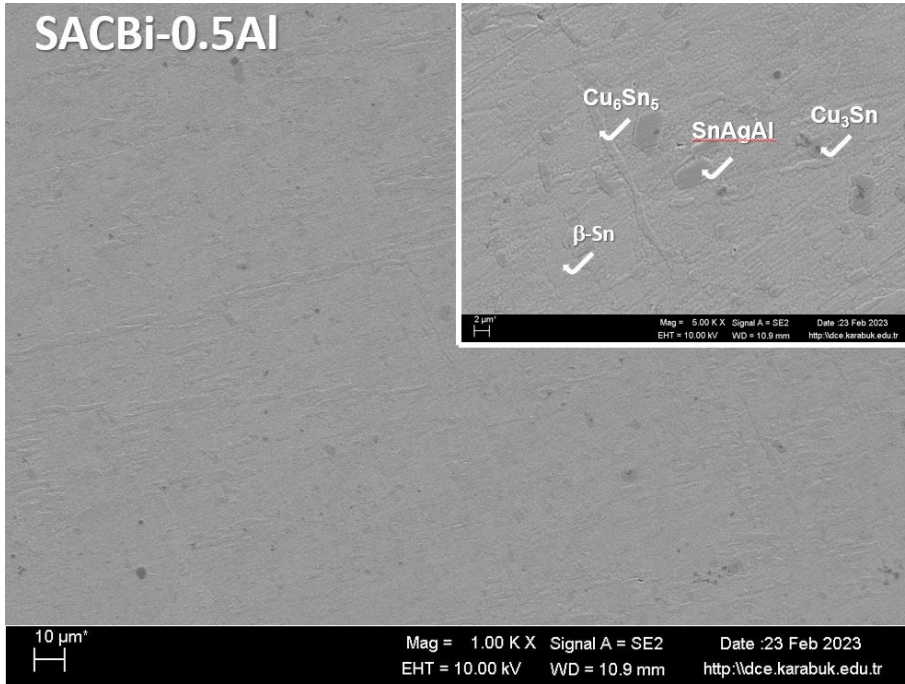


Şekil 5.39. SACBi-0,1Al lehim alaşımının mikroyapı incelemesi.

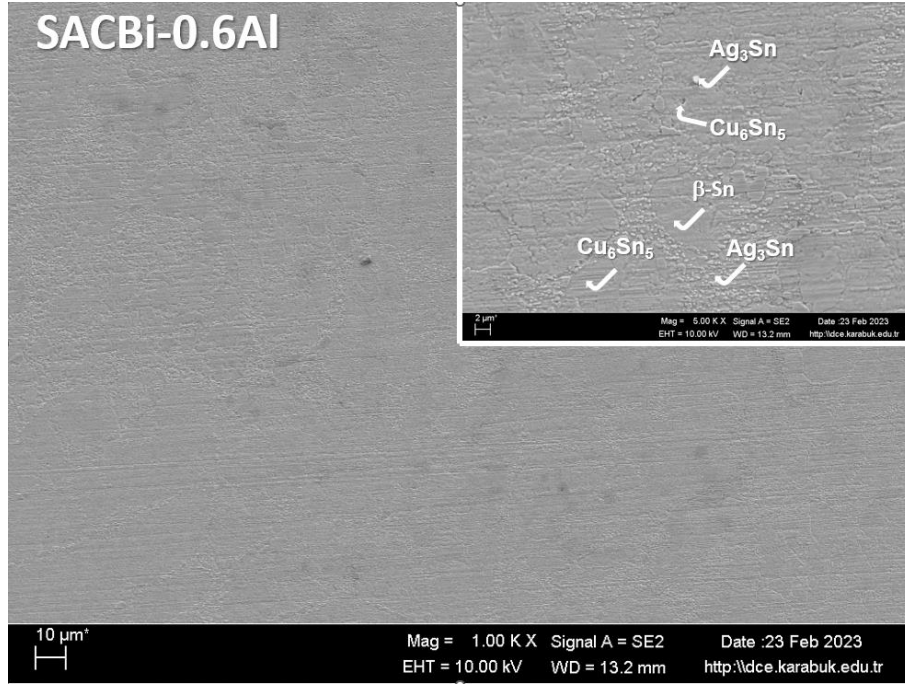




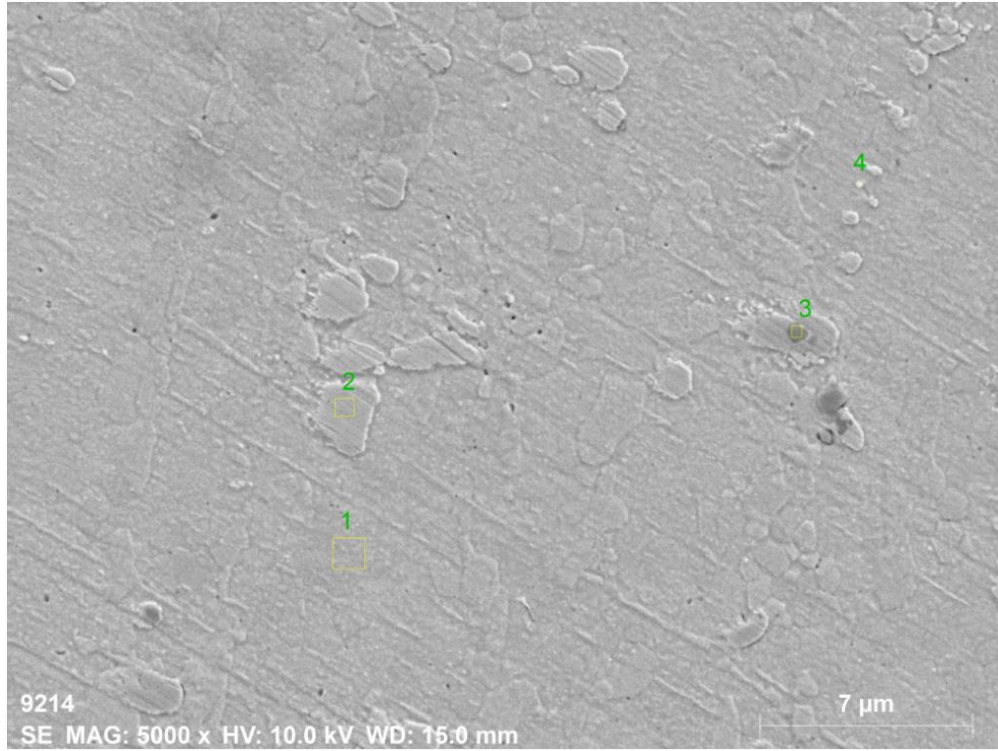
Şekil 5.40. SACBi-0,3Al lehim alaşımının mikroyapı incelemesi.



Şekil 5.41. SACBi-0,5Al lehim alaşımının mikroyapı incelemesi.



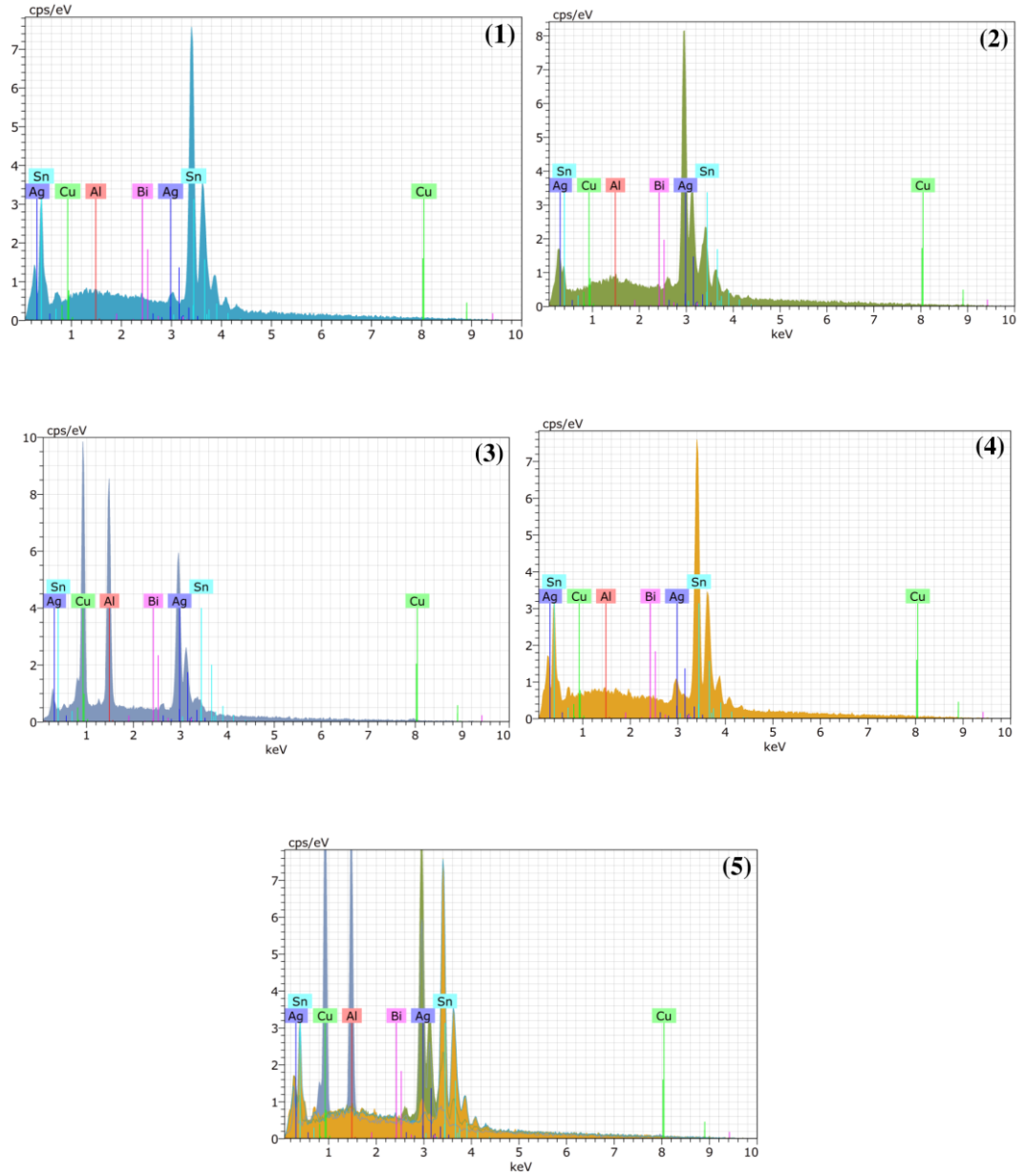
Şekil 5.42. SACBi-0,6Al lehim alaşımının mikroyapı incelemesi.



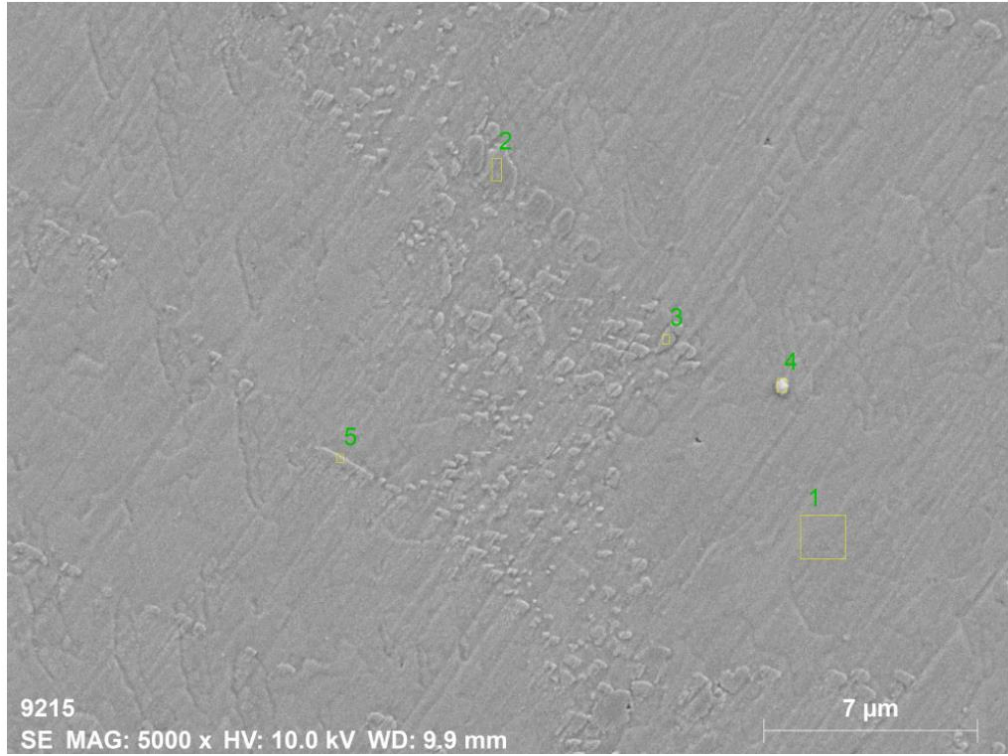
Mass percent (%)

Spectrum	Al	Cu	Ag	Sn	Bi
1	0.46	1.54	3.28	94.35	0.37
2	0.60	0.74	73.92	24.40	0.33
3	15.36	34.01	46.41	4.23	0.00
4	0.33	2.45	7.21	90.01	0.00
Mean value:	4.19	9.68	32.71	53.25	0.17
Sigma:	7.45	16.23	33.68	45.74	0.20
Sigma mean:	3.72	8.11	16.84	22.87	0.10

Şekil 5.43. SACBi-0,05Al alaşımının SEM-EDX görüntüleri.



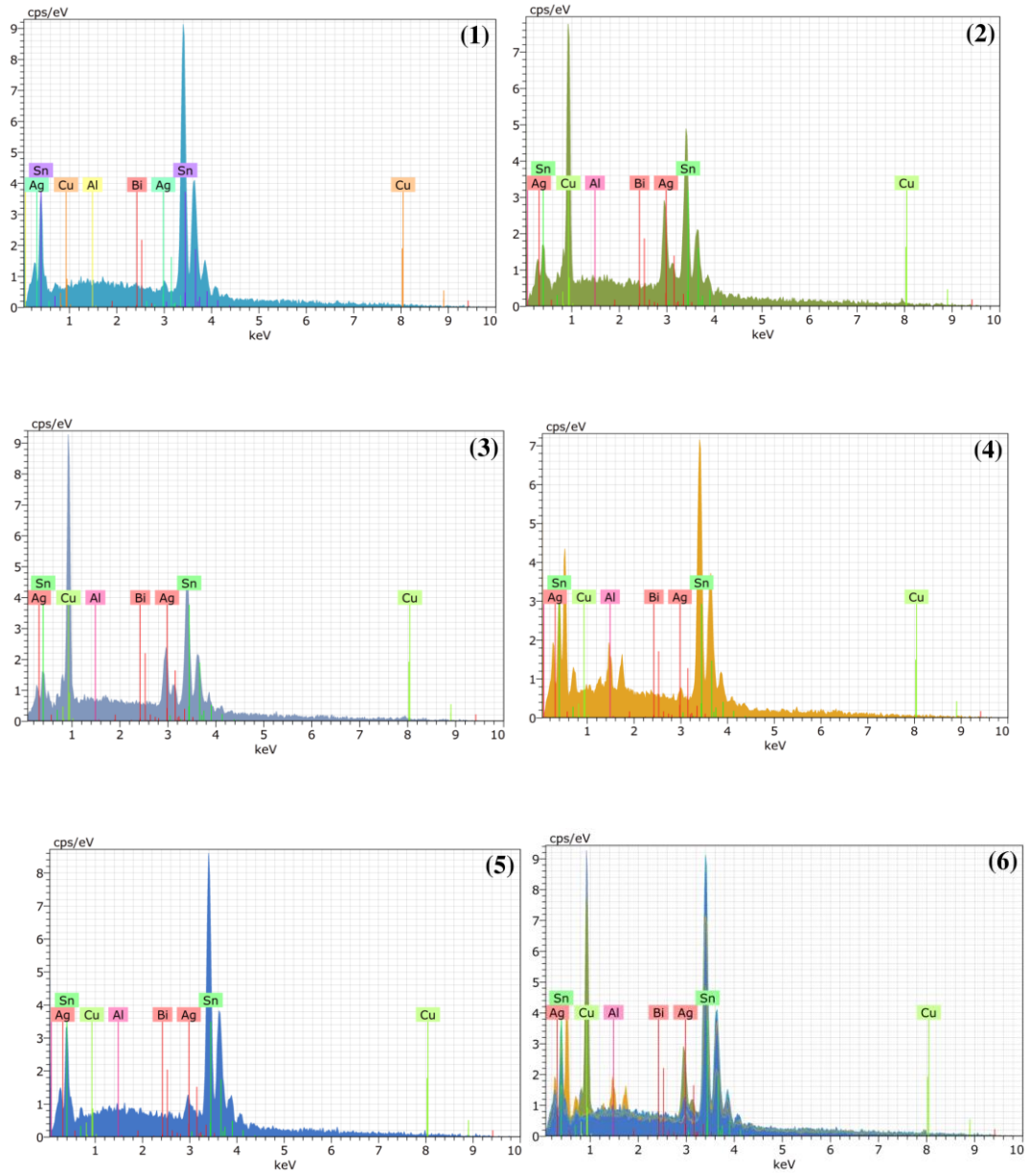
Şekil 5.44. SACBi-0,05Al alaşımının EDX analizi.



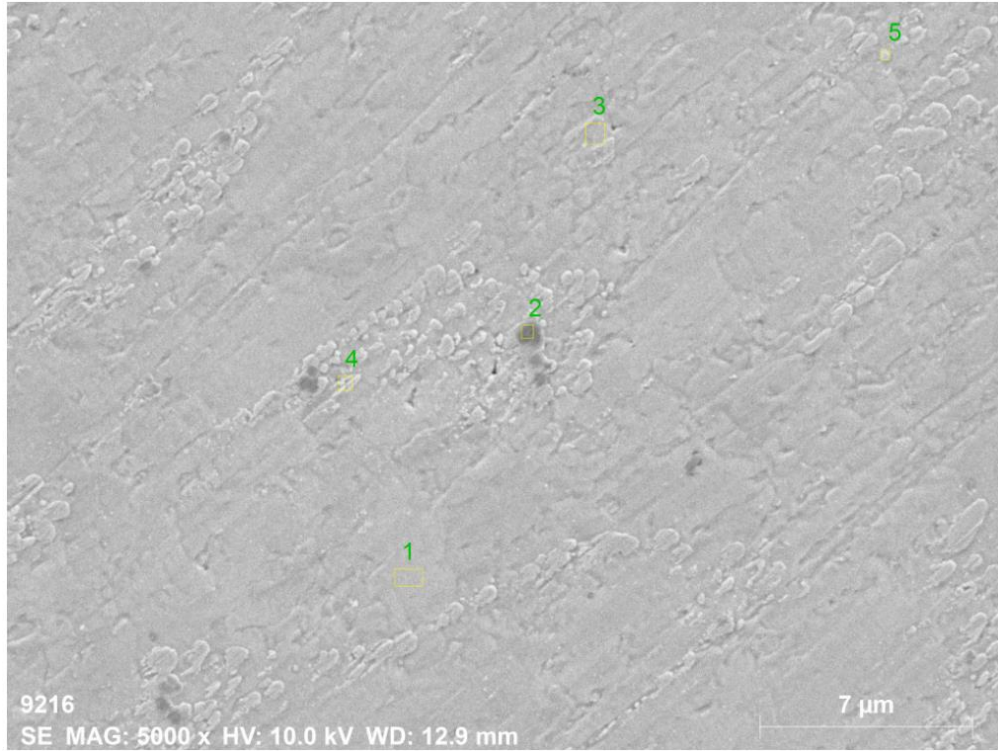
Mass percent (%)

Spectrum	Al	Cu	Ag	Sn	Bi
1	0.00	0.83	2.55	96.46	0.16
2	0.00	39.67	17.78	42.55	0.00
3	0.00	45.41	14.17	40.42	0.00
4	2.99	3.45	3.37	89.93	0.25
5	0.34	0.83	7.50	91.33	0.00
Mean value:	0.67	18.04	9.07	72.14	0.08
Sigma:	1.31	22.49	6.69	28.10	0.12
Sigma mean:	0.59	10.06	2.99	12.57	0.05

Şekil 5.45. SACBi-0,1Al alaşımının SEM-EDX görüntüleri.



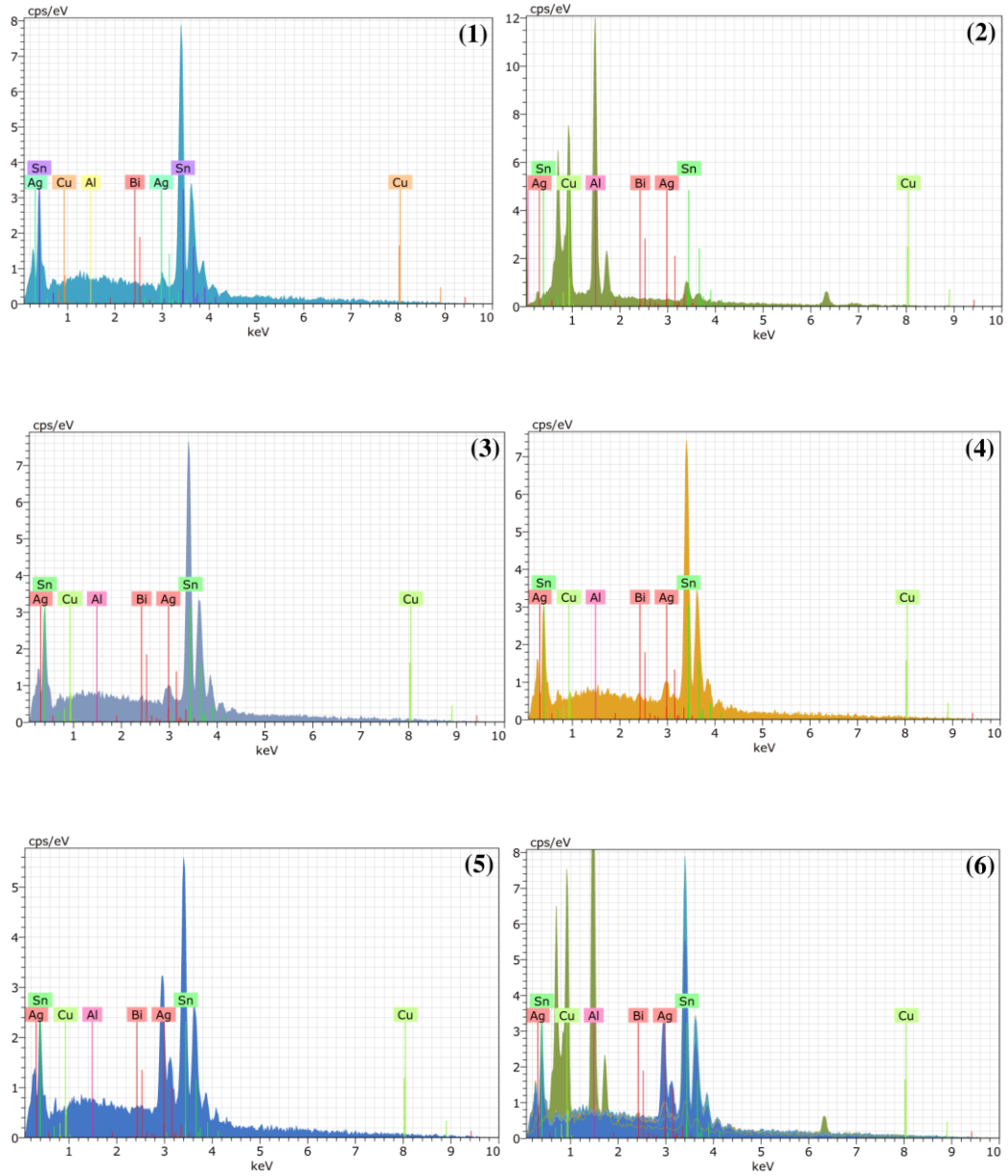
Şekil 5.46. SACBi-0,1Al alaşımının EDX analizi.



Mass percent (%)

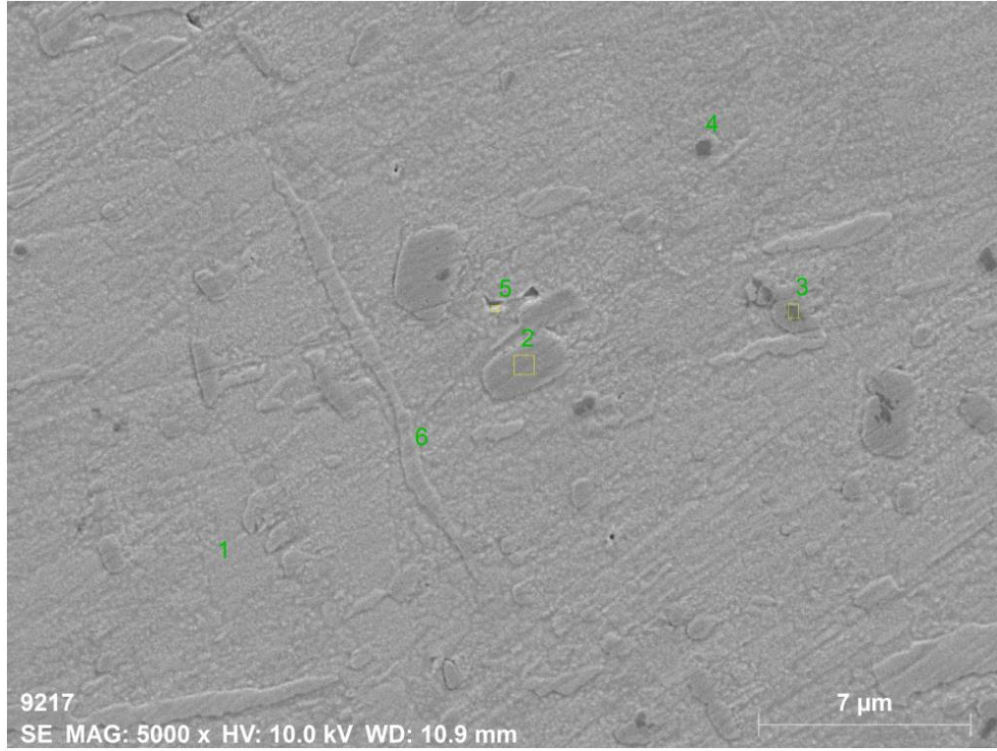
Spectrum	Al	Cu	Ag	Sn	Bi
1	0.00	0.29	3.44	96.27	0.00
2	35.50	48.08	0.01	16.41	0.00
3	0.29	1.98	7.02	90.11	0.61
4	0.43	2.04	7.43	89.32	0.77
5	0.19	0.00	29.19	70.27	0.35
Mean value:	7.28	10.48	9.42	72.47	0.35
Sigma:	15.77	21.04	11.46	32.82	0.35
Sigma mean:	7.05	9.41	5.12	14.68	0.16

Şekil 5.47. SACBi-0,3Al alaşıımının SEM-EDX görüntüleri.



Şekil 5.48. SACBi-0,3Al alaşımının EDX analizi.

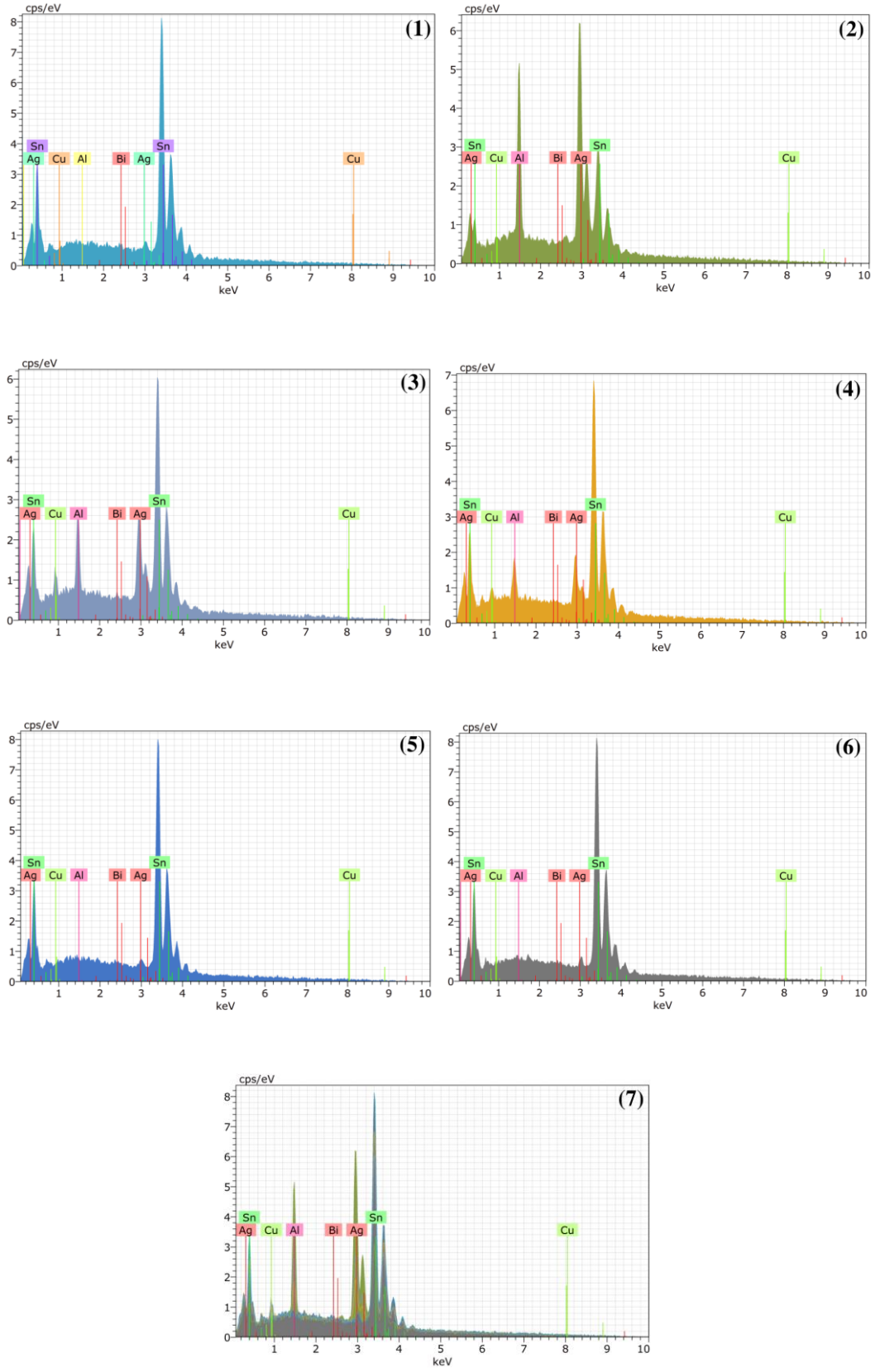




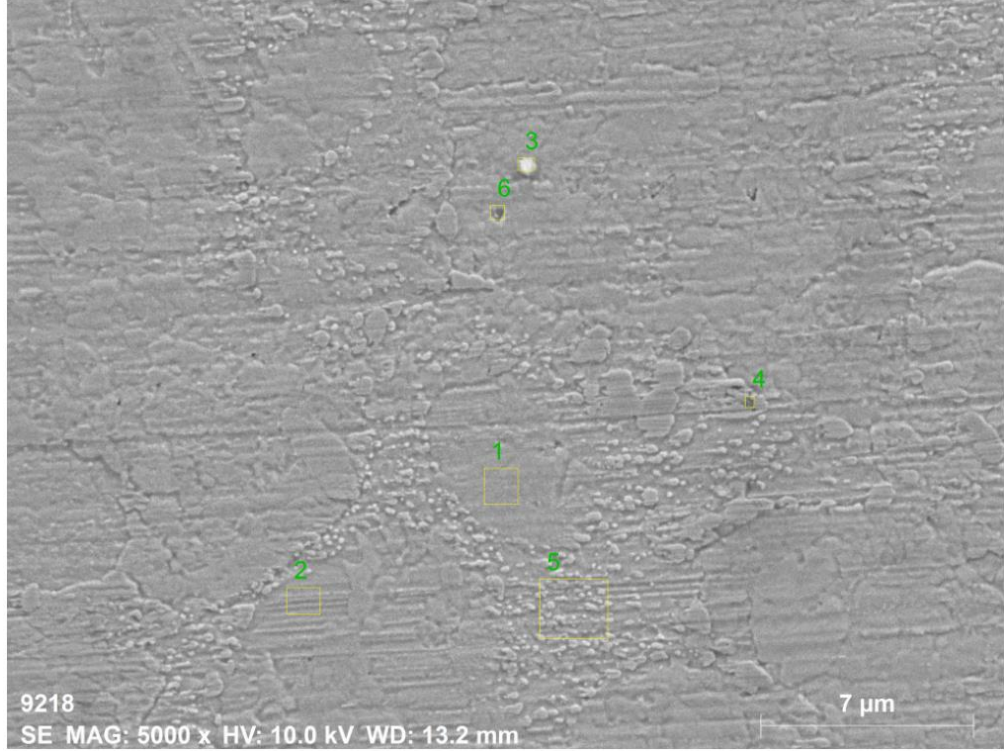
Mass percent (%)

Spectrum	Al	Cu	Ag	Sn	Bi
1	0.05	0.45	3.17	96.09	0.24
2	9.90	0.62	56.06	33.42	0.00
3	4.40	5.77	21.55	68.13	0.13
4	2.73	4.77	14.16	77.92	0.42
5	0.32	1.72	3.31	93.99	0.66
6	0.29	0.94	2.95	95.53	0.29
Mean value:	2.95	2.38	16.87	77.52	0.29
Sigma:	3.82	2.31	20.64	24.39	0.23
Sigma mean:	1.56	0.94	8.43	9.96	0.09

Şekil 5.49. SACBi-0,5Al alaşımının SEM-EDX görüntüleri.



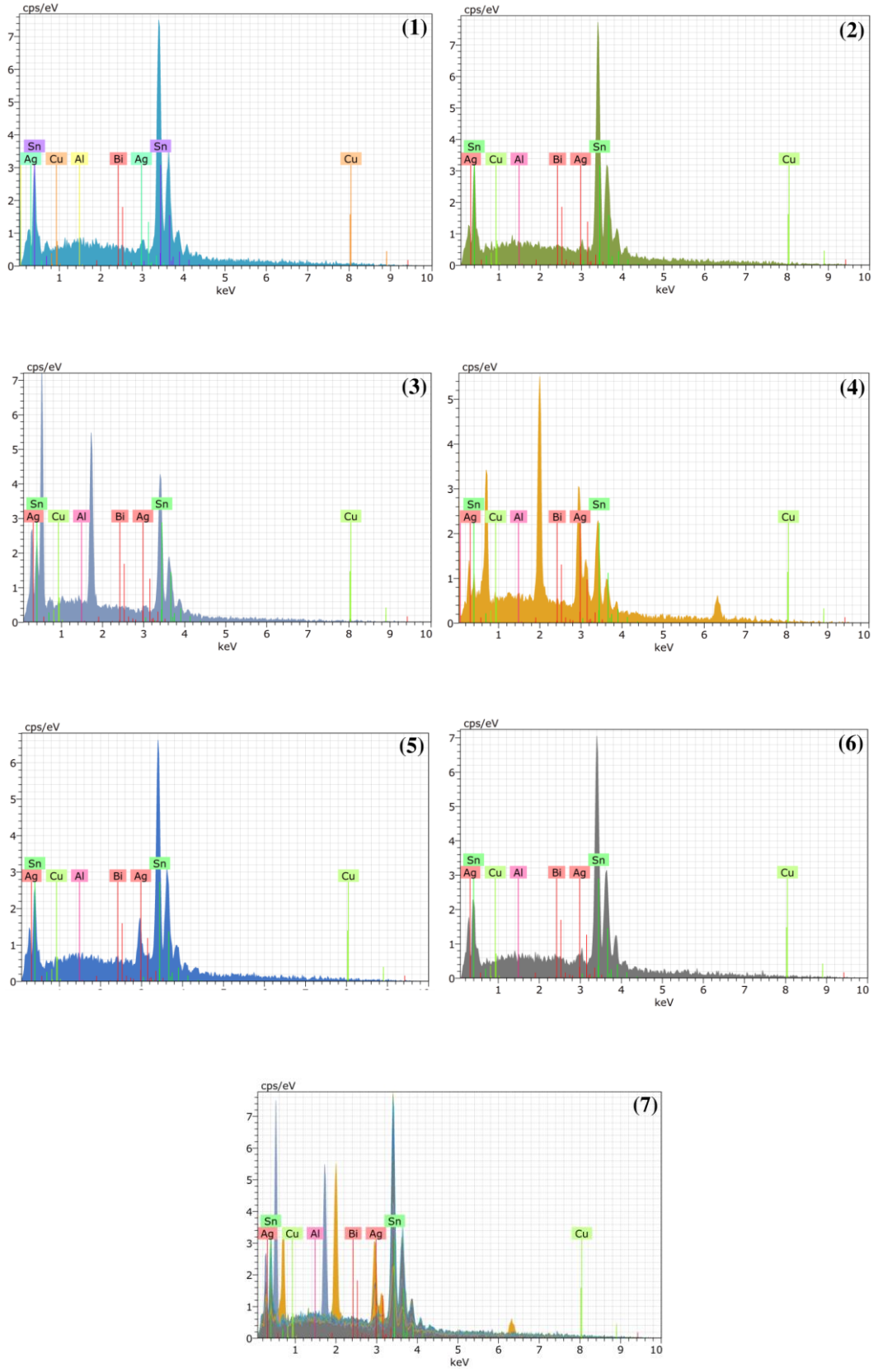
Şekil 5.50. SACBi-0,5Al alaşımının EDX analizi.



Mass percent (%)

Spectrum	Al	Cu	Ag	Sn	Bi
1	0.57	1.37	4.26	93.19	0.62
2	0.38	1.68	3.46	93.12	1.37
3	1.01	5.88	3.61	87.99	1.52
4	0.58	3.31	48.15	46.20	1.75
5	0.17	0.94	13.43	84.81	0.64
6	0.00	0.38	4.55	93.41	1.65
Mean value:	0.45	2.26	12.91	83.12	1.26
Sigma:	0.35	2.03	17.68	18.42	0.51
Sigma mean:	0.14	0.83	7.22	7.52	0.21

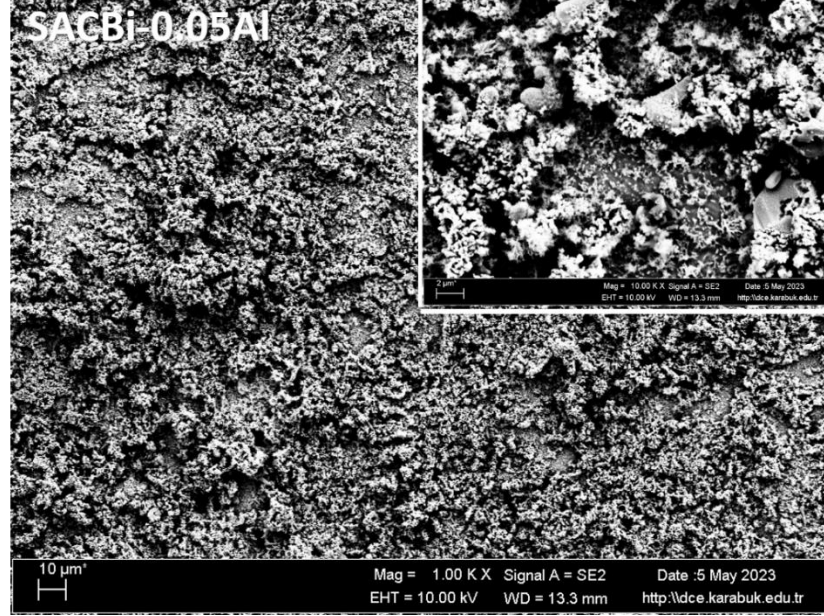
Şekil 5.51. SACBi-0,6Al alaşımının SEM-EDX görüntüleri.



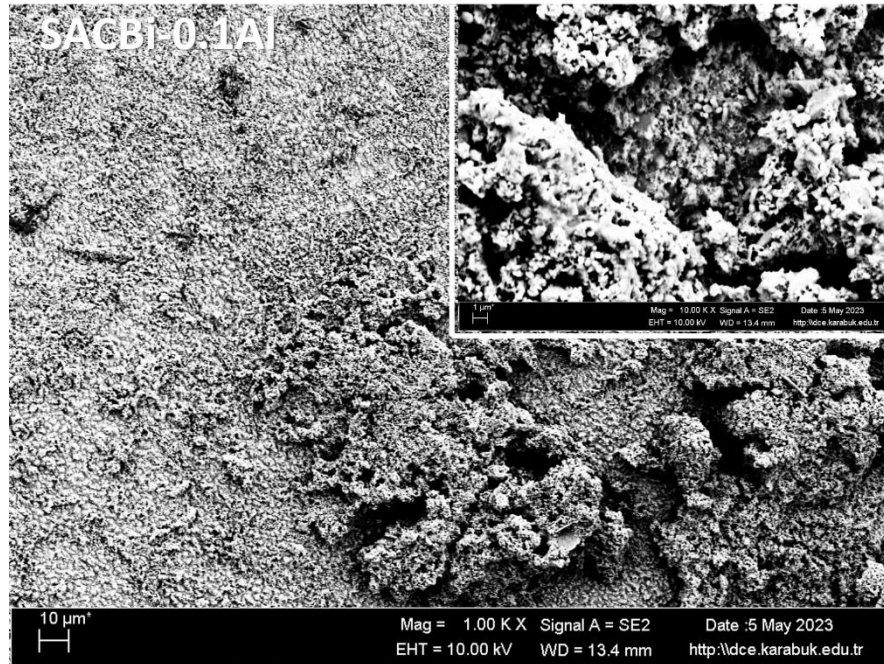
Şekil 5.52. SACBi-0,6Al alaşımının EDX analizi.

### 5.6.3. Korozyon Sonrası Mikroyapı Analizi

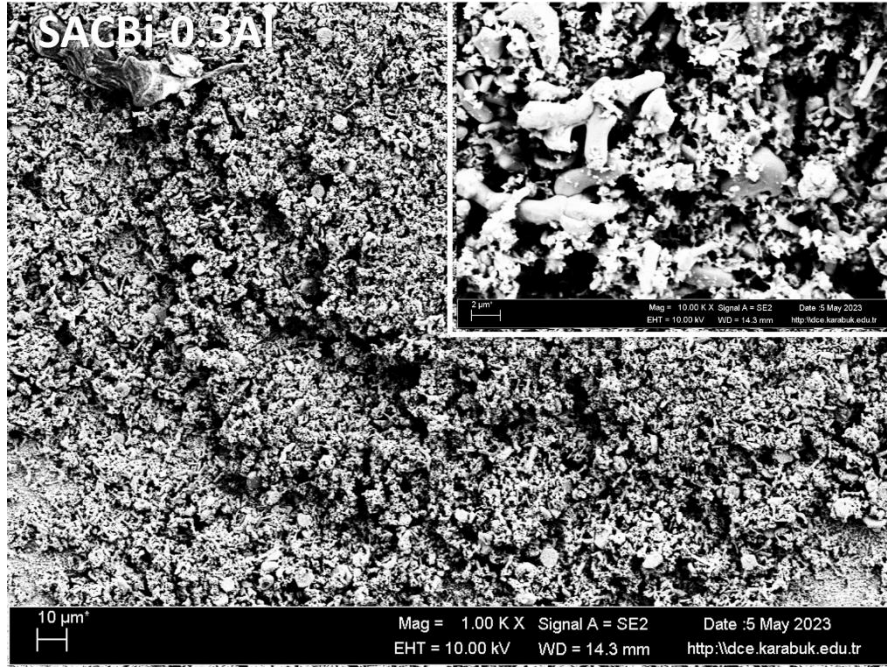
Şekil 5.52-5.56'da üretilen SACBi-xAl ( $x = \%0,05, 0,1, 0,3, 0,5$  ve  $0,6$ ) beşli kurşunsuz lehim alaşımlarının korozyon sonrası SEM görüntülerini göstermektedir.



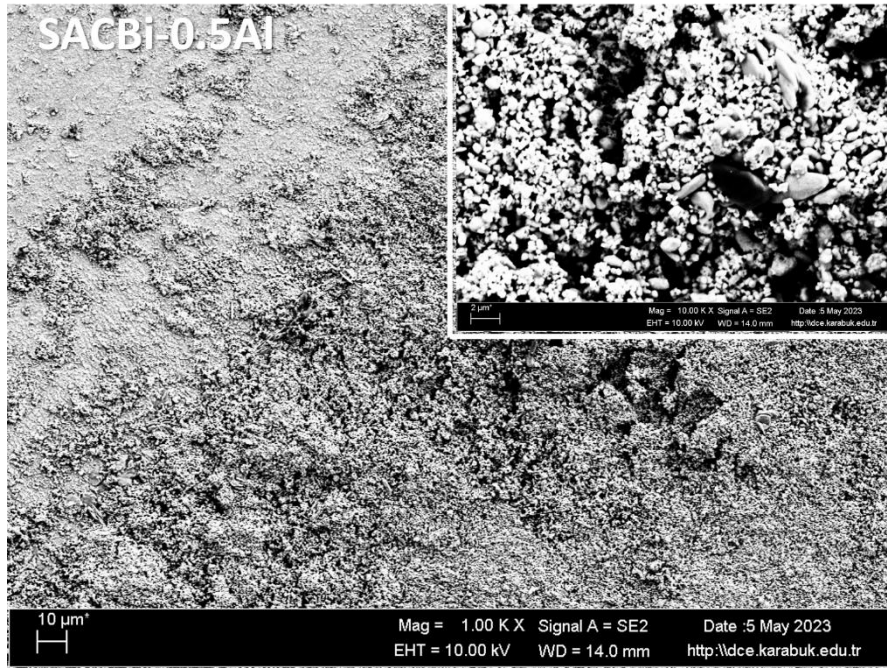
Şekil 5.53 SACBi-0,05Al lehim alaşımının korozyon sonrası mikroyapı incelemesi.



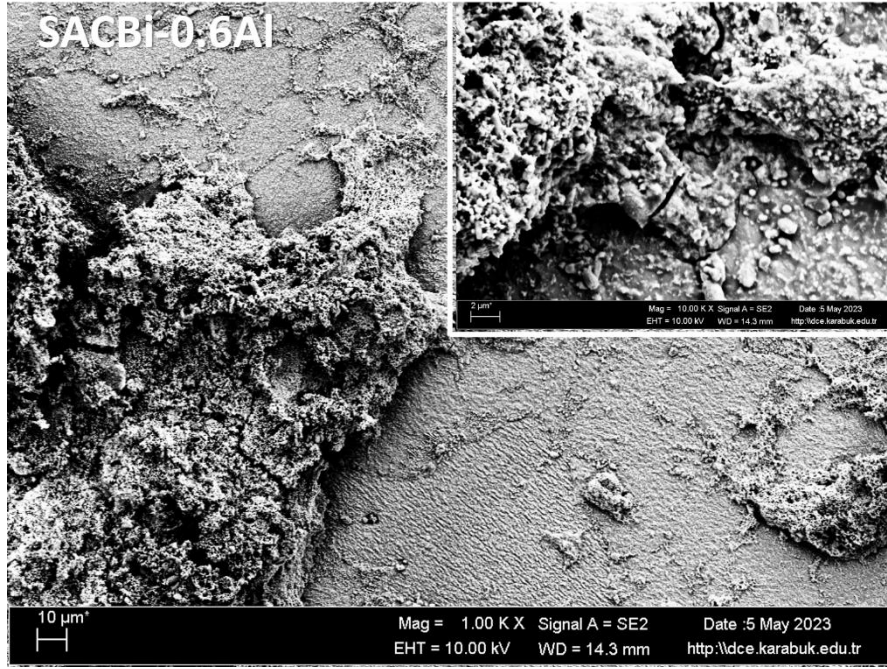
Şekil 5.54. SACBi-0,1Al lehim alaşımının korozyon sonrası mikroyapı incelemesi.



Şekil 5.55. SACBi-0,3Al lehim alaşımının korozyon sonrası mikroyapı incelemesi.



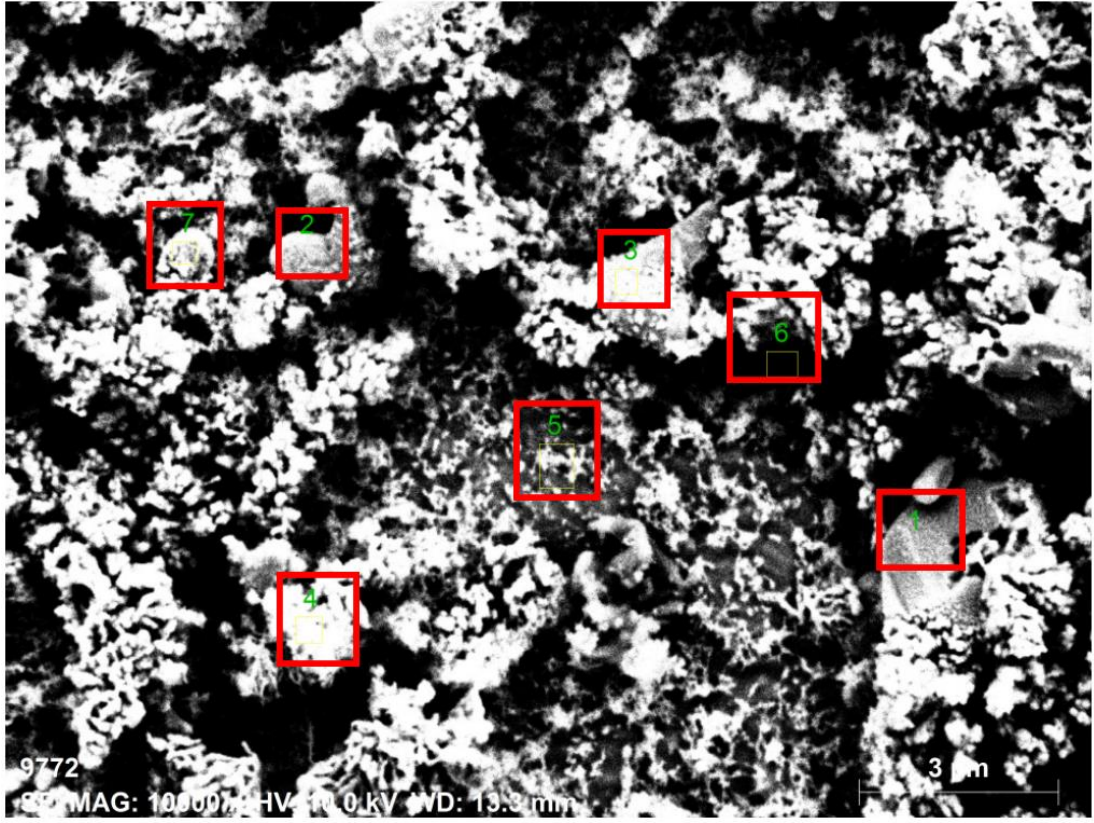
Şekil 5.56. SACBi-0,5Al lehim alaşımının korozyon sonrası mikroyapı incelemesi.



Şekil 5.57. SACBi-0,6Al lehim alaşımının korozyon sonrası mikroyapı incelemesi.

Al değeri arttıkça akım değeri ( $i_{corr}$ ) artıyor.  $i_{corr}$  değeri %0,05Al ilaveli alaşımında 14 iken %0,1Al ilaveli alaşımında 11,75 değerine düşüyor. %0,3Al ilaveli alaşım için 17,83, %0,5Al ilaveli alaşım için 13,58 ve %0,6Al için 14 değerine sahip olduğu raporlandı (Tablo 5.4). SACBi-0,1Al alaşımı için korozyon sonrası SEM görüntüleri incelendiğinde çubuksu yapı olmayanlar homojen dağılmış gibi görünüyor. 0,1Al alaşımı için  $i_{corr}$  akım değerinin en küçük olduğu açıkça görülmektedir. SACBi-0,3Al alaşımı için SEM görüntüleri incelendiğinde biraz daha çubuksu yapı var. Çubuksu yapı oluşması  $i_{corr}$  değerini arttırmış. SACBi-0,5Al alaşımı için iri ve çubuksu yapılar var  $i_{corr}$  değeri düşmesine rağmen aynı yapıların var olduğu görülmektedir. SACBi-0,6Al alaşımı için de gene aynı çubuksu yapının olduğundan bahsedebiliriz.

Lehim yüzeyinde oluşan fazlar veya oksitlenmeler  $i_{corr}$  değerlerini yani korozyon direncini etkileyen nedenlerdir.  $i_{corr}$  değeri düştükçe yüzeyde oksit filmi oluşmaya başladığı görülmektedir. SEM analizlerinde karlı yapı gibi görünen kısımlar oksit film tabakasıdır. Oksit filmi oluşmayan fazların doğrudan ve açıkça görüldüğü tespit edilmiştir. Al ilaveli alaşımların arasında korozyona en dirençli SACBi-0,1Al alaşımının olduğu raporlanmıştır.

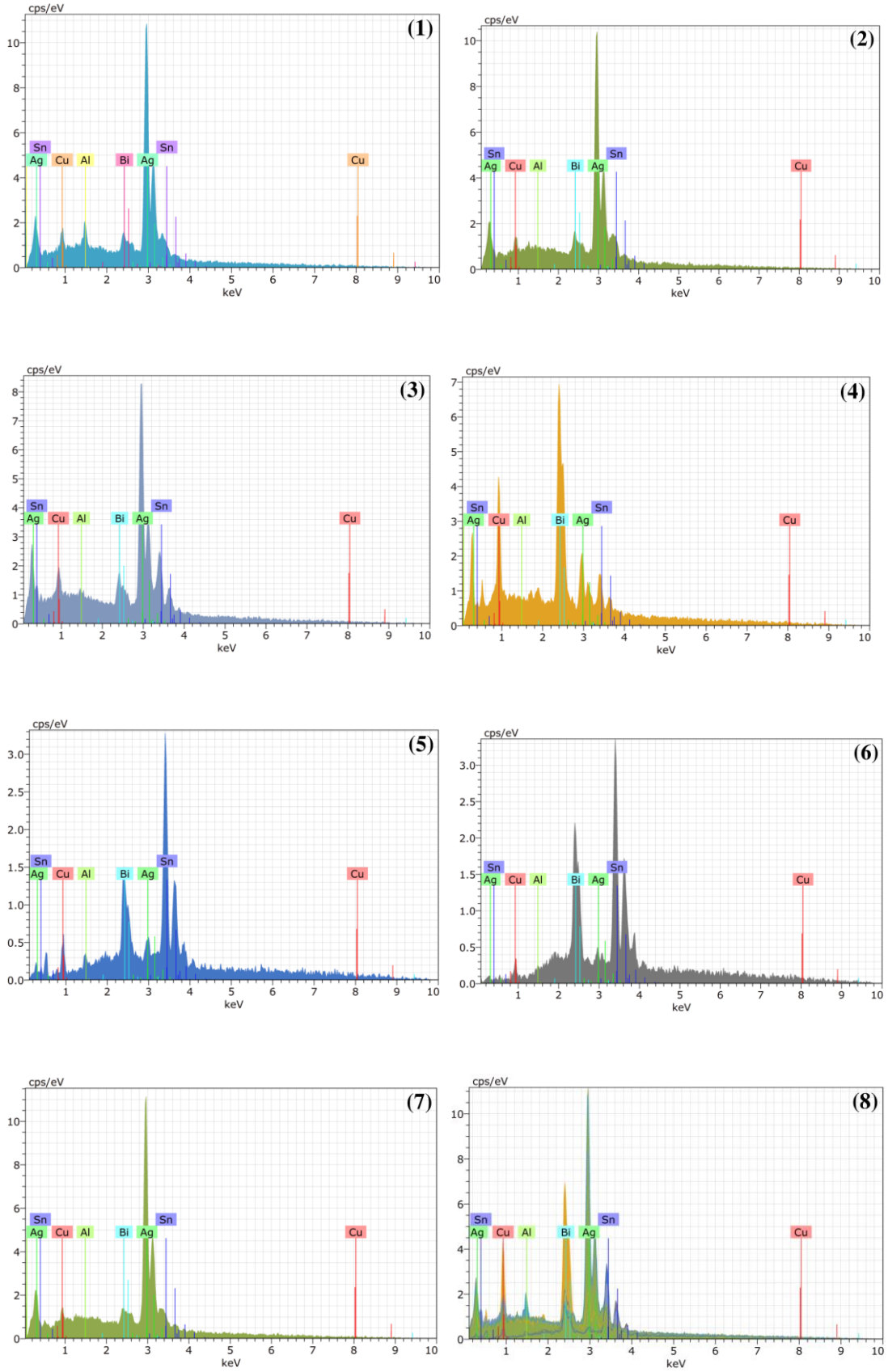


Mass percent (%)

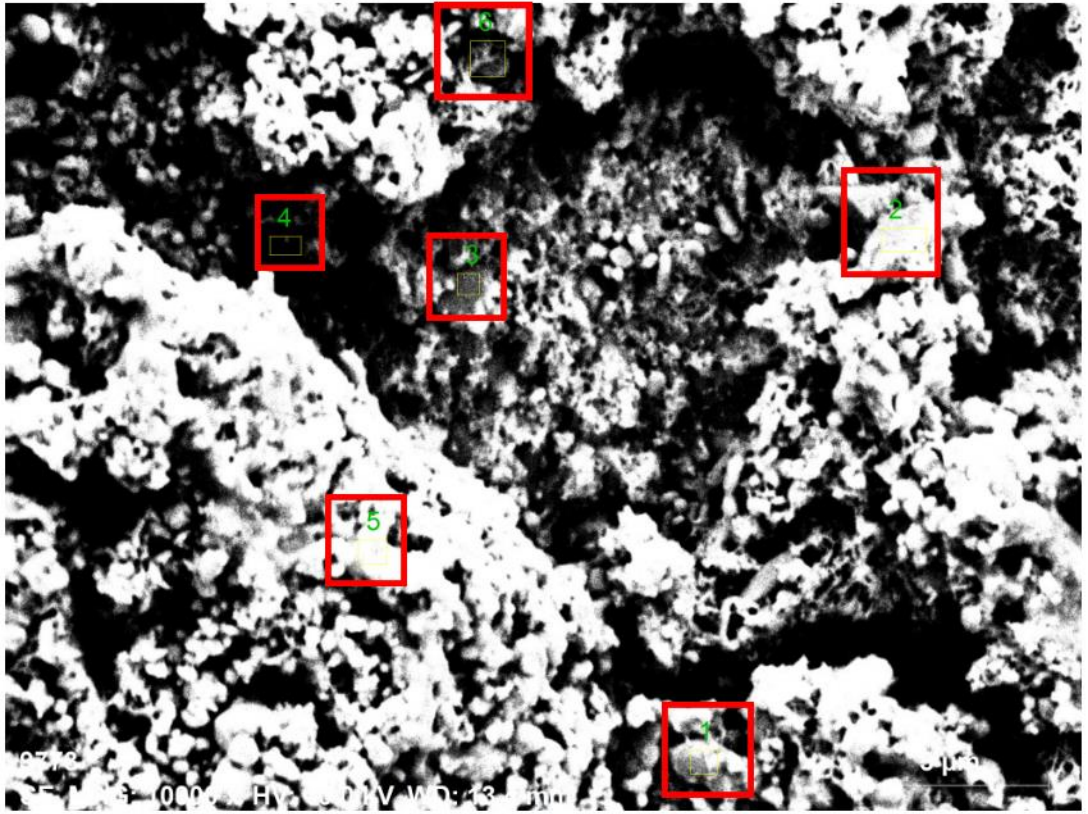
Spectrum	Al	Cu	Ag	Sn	Bi
1	2.30	4.70	79.82	6.14	7.03
2	0.34	3.81	78.64	9.78	7.44
3	0.49	6.41	64.23	21.02	7.86
4	0.00	11.93	17.07	13.56	57.43
5	0.76	0.00	2.83	77.06	19.35
6	0.18	2.22	0.00	69.50	28.09
7	0.29	3.52	83.01	6.63	6.55
Mean value:	0.62	4.66	46.51	29.10	19.11
Sigma:	0.78	3.78	38.13	30.67	18.78
Sigma mean:	0.29	1.43	14.41	11.59	7.10

Şekil 5.58. SACBi-0,05Al alaşımı için SEM-EDX analiz sonuçları.





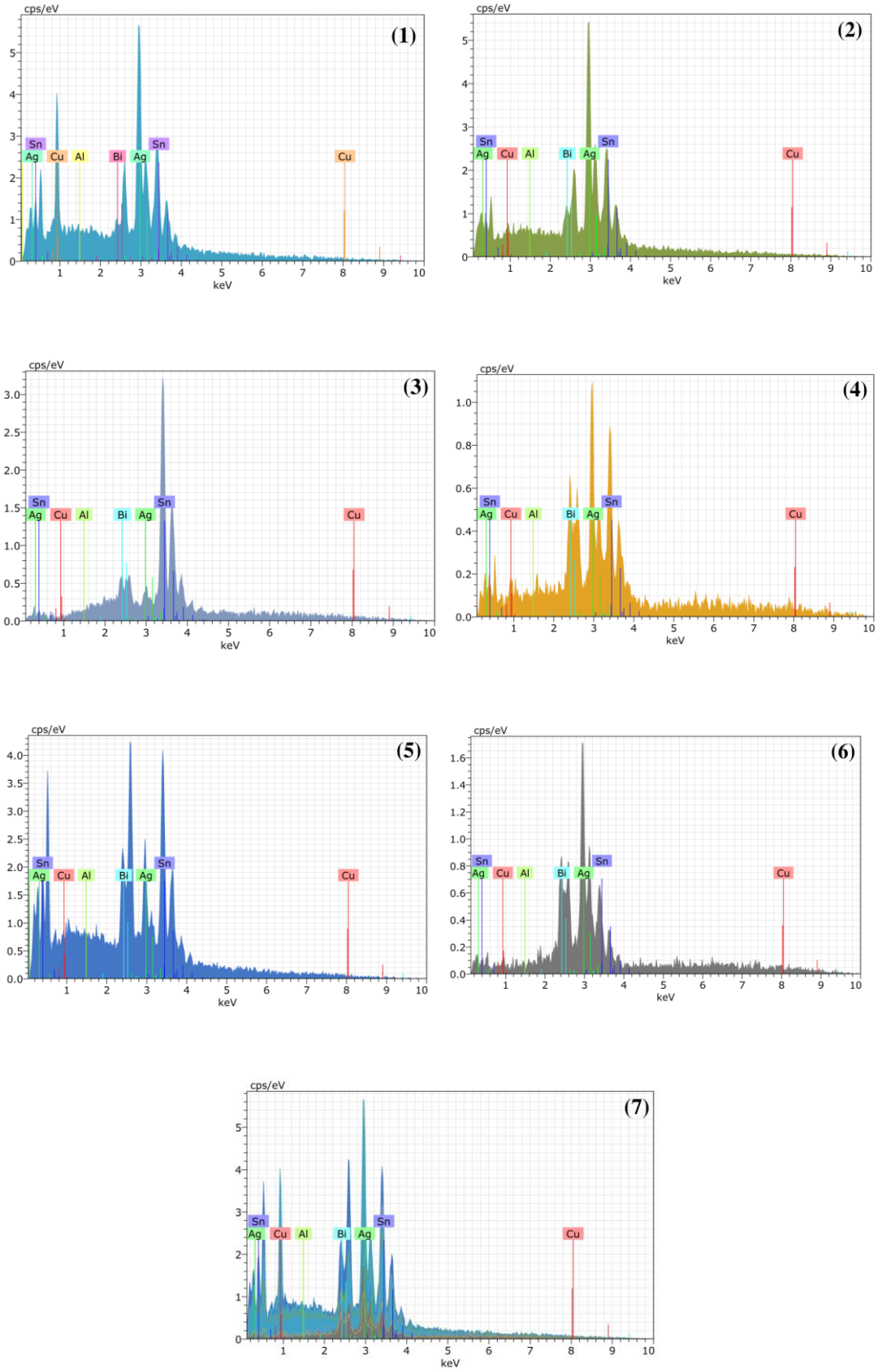
Şekil 5.59. SACBi-0,05Al alaşımı için EDX analiz analizi.



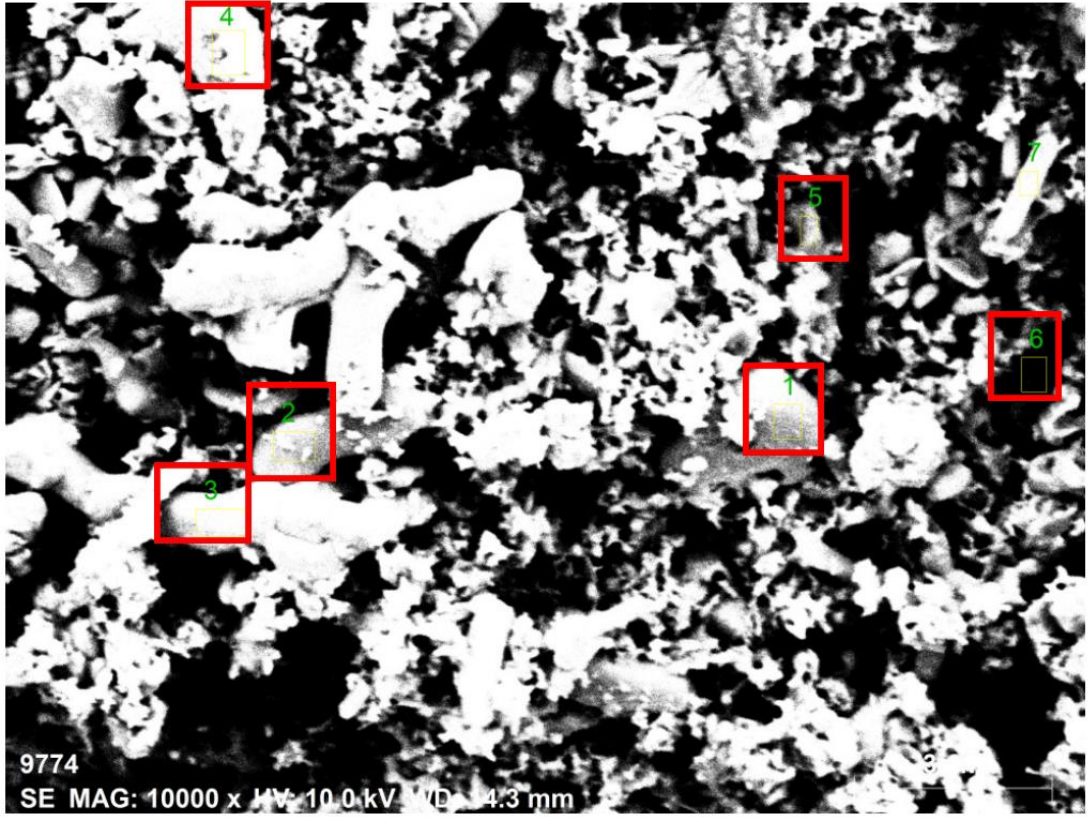
Mass percent (%)

Spectrum	Al	Cu	Ag	Sn	Bi
1	0.11	16.76	46.68	30.14	6.30
2	0.08	1.75	55.39	32.93	9.86
3	0.00	0.78	5.72	85.83	7.67
4	0.00	0.00	39.12	42.41	18.47
5	0.29	2.13	22.03	51.55	24.01
6	0.00	0.89	57.42	18.03	23.66
Mean value:	0.08	3.72	37.72	43.48	15.00
Sigma:	0.11	6.43	20.26	23.65	8.05
Sigma mean:	0.05	2.63	8.27	9.66	3.29

Şekil 5.60. SACBi-0,1Al alaşımı için SEM-EDX analiz sonuçları.



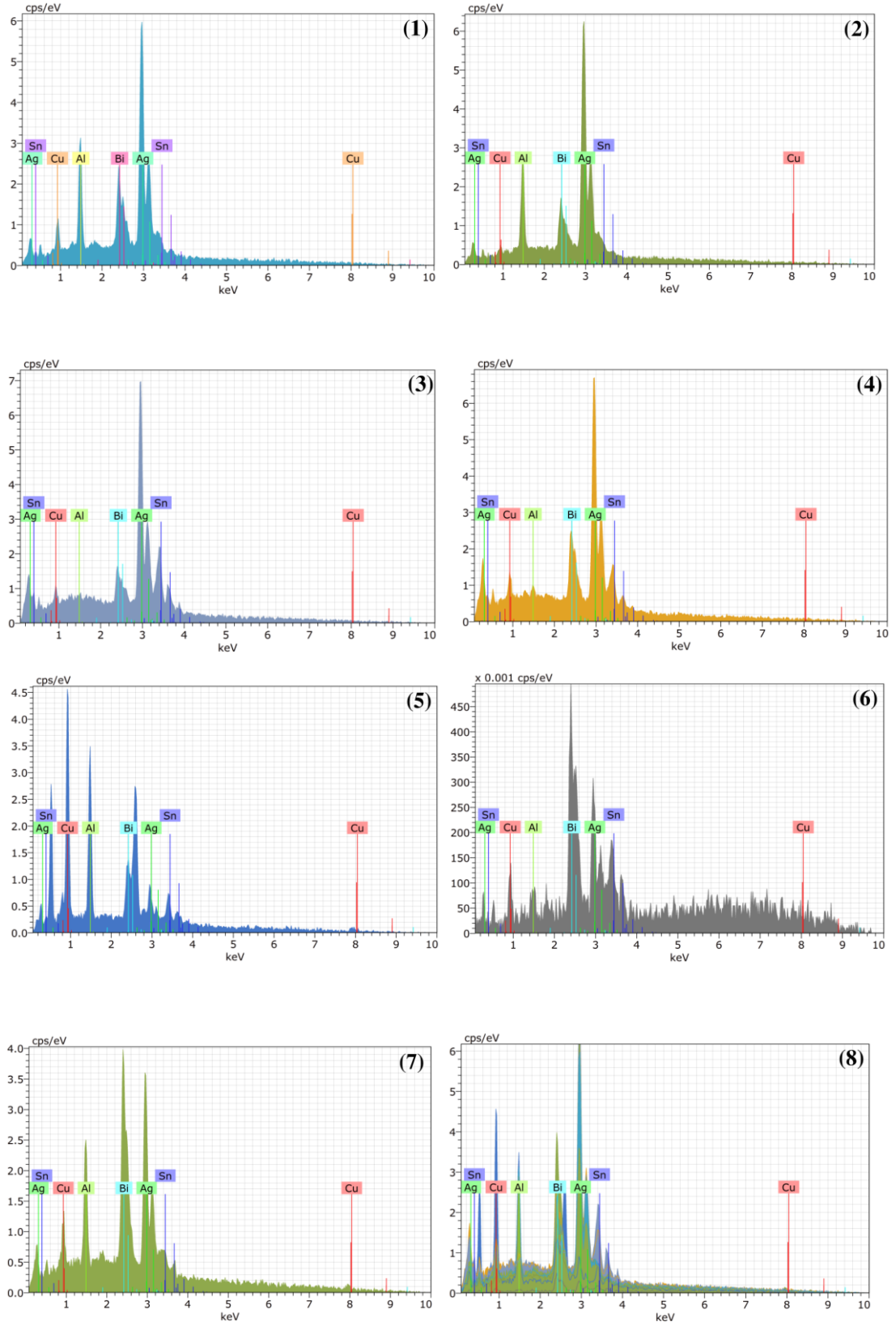
Şekil 5.61. SACBi-0,1Al alaşımı için EDX analiz analizi.



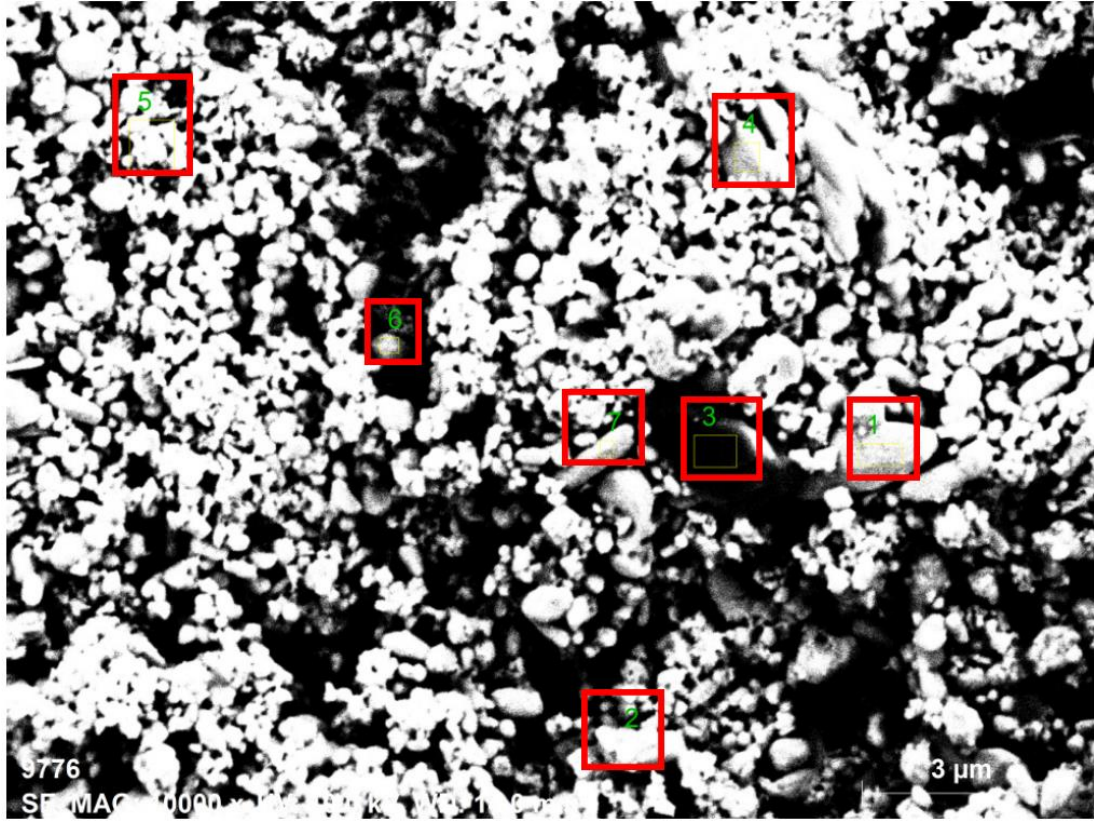
Mass percent (%)

Spectrum	Al	Cu	Ag	Sn	Bi
1	6.32	3.15	66.65	3.75	20.14
2	6.16	0.88	76.74	2.37	13.85
3	0.09	2.60	64.02	23.67	9.62
4	0.59	3.83	63.05	13.45	19.08
5	12.72	29.75	13.96	13.85	29.72
6	1.91	6.31	28.44	12.00	51.34
7	5.15	3.43	44.08	6.39	40.96
Mean value:	4.71	7.13	50.99	10.78	26.39
Sigma:	4.38	10.10	22.92	7.34	15.15
Sigma mean:	1.66	3.82	8.66	2.77	5.73

Şekil 5.62. SACBi-0,3Al alaşımı için SEM-EDX analiz sonuçları.



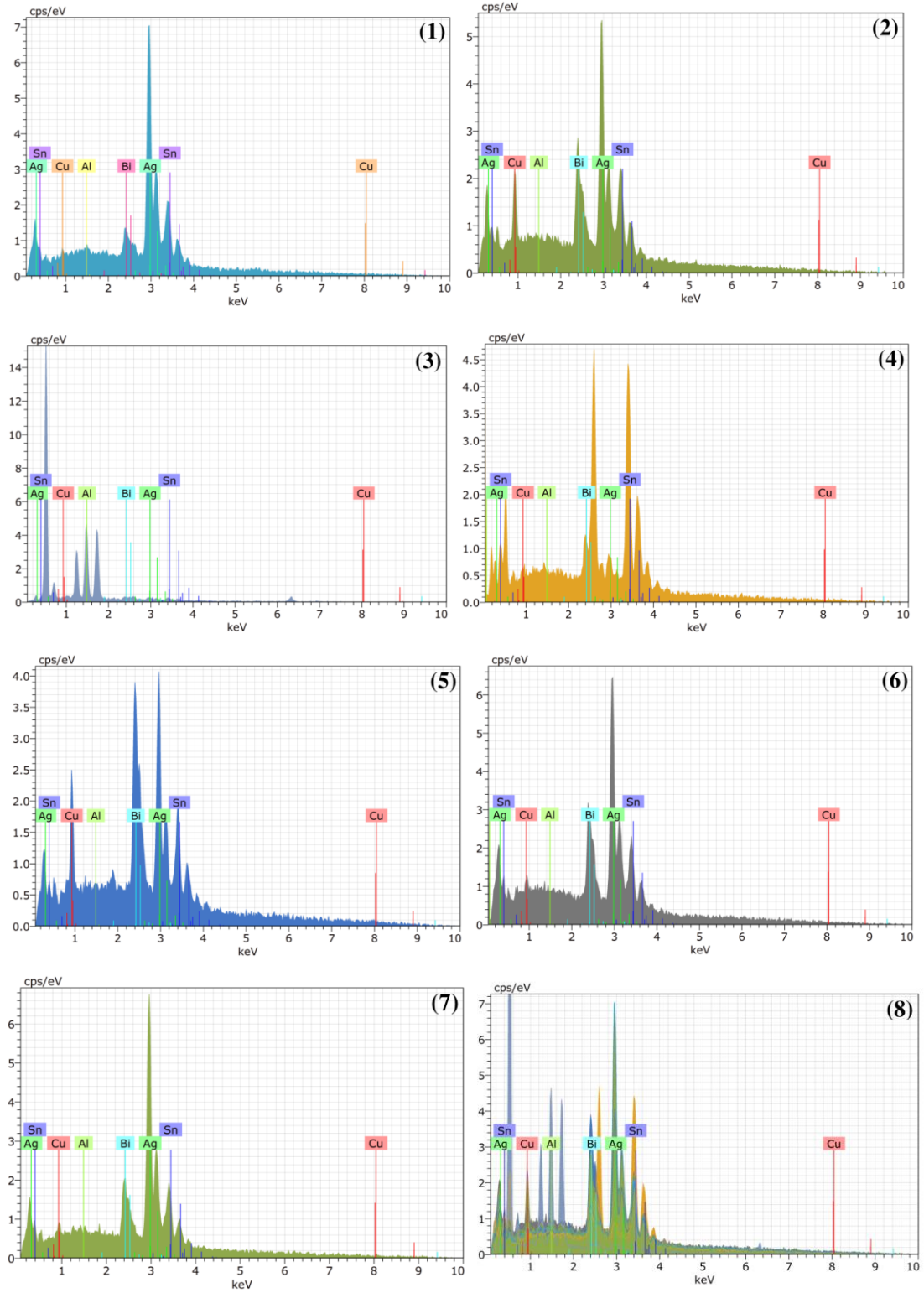
Şekil 5.63. SACBi-0,3Al alaşımı için EDX analiz analizi.



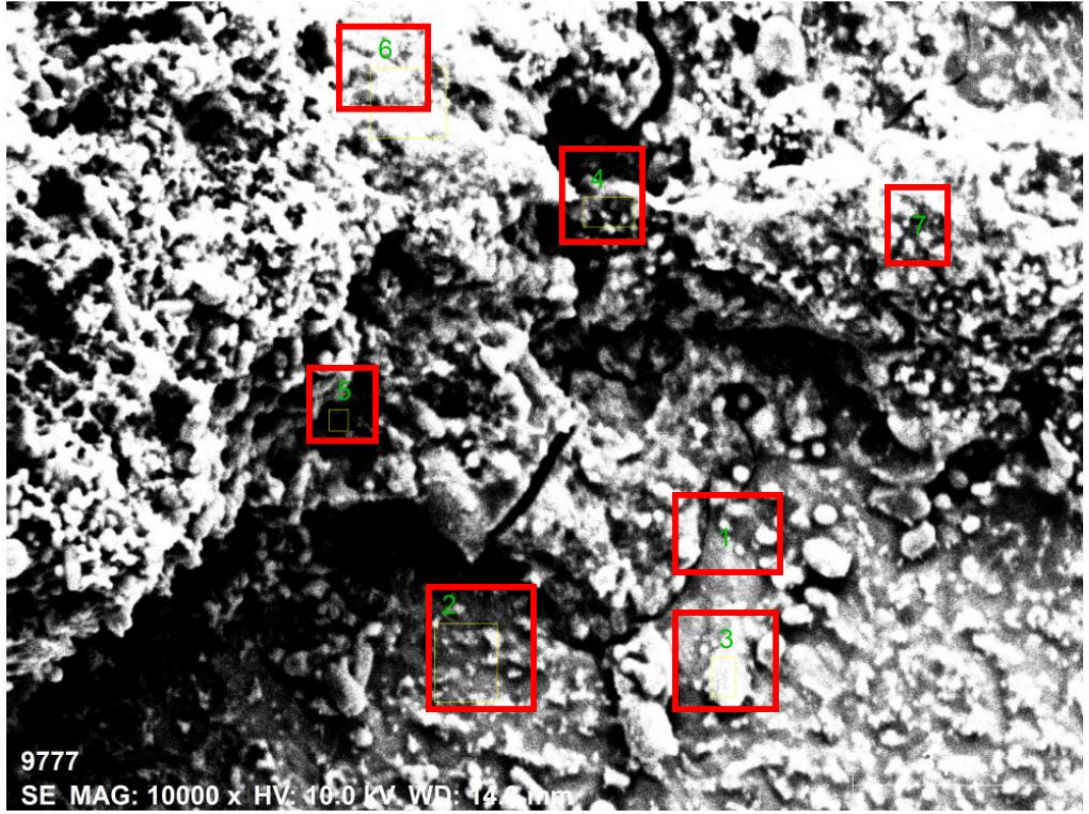
Mass percent (%)

Spectrum	Al	Cu	Ag	Sn	Bi
1	0.35	1.33	66.79	23.66	7.87
2	0.02	7.81	48.53	23.70	19.94
3	54.91	0.78	14.09	17.29	12.93
4	0.14	2.17	9.84	69.15	18.70
5	0.27	8.16	37.67	20.92	32.98
6	0.01	2.91	54.76	20.58	21.74
7	0.04	2.10	62.82	20.08	14.97
Mean value:	7.96	3.61	42.07	27.91	18.45
Sigma:	20.70	3.06	22.68	18.32	7.95
Sigma mean:	7.83	1.16	8.57	6.92	3.00

Şekil 5.64. SACBi-0,5Al alaşımı için SEM-EDX analiz sonuçları.



Şekil 5.65. SACBi-0,5Al alaşımı için EDX analiz analizi.

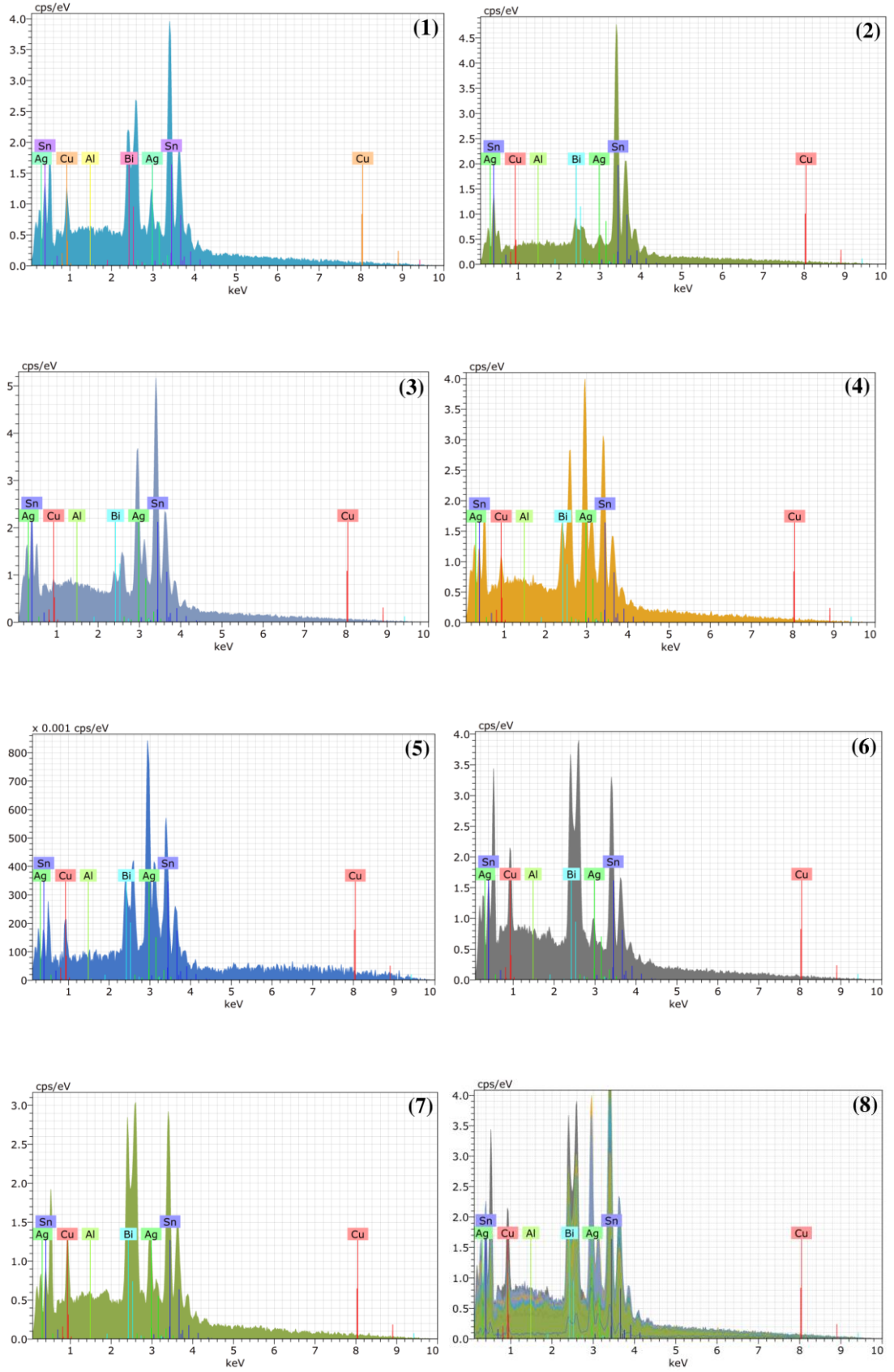


Mass percent (%)

Spectrum	Al	Cu	Ag	Sn	Bi
1	0.00	5.51	11.71	57.37	25.41
2	0.00	0.12	5.48	86.58	7.82
3	0.37	3.05	31.10	59.65	5.83
4	0.09	3.74	40.41	39.95	15.80
5	0.06	0.82	50.65	36.03	12.44
6	0.21	9.31	8.02	44.39	38.08
7	0.04	5.67	14.96	45.96	33.38
Mean value:	0.11	4.03	23.19	52.85	19.82
Sigma:	0.14	3.14	17.59	17.19	12.64
Sigma mean:	0.05	1.19	6.65	6.50	4.78

Şekil 5.66. SACBi-0,6Al alaşımı için SEM-EDX analiz sonuçları.





Şekil 5.67. SACBi-0,6Al alaşımı için EDX analiz analizi

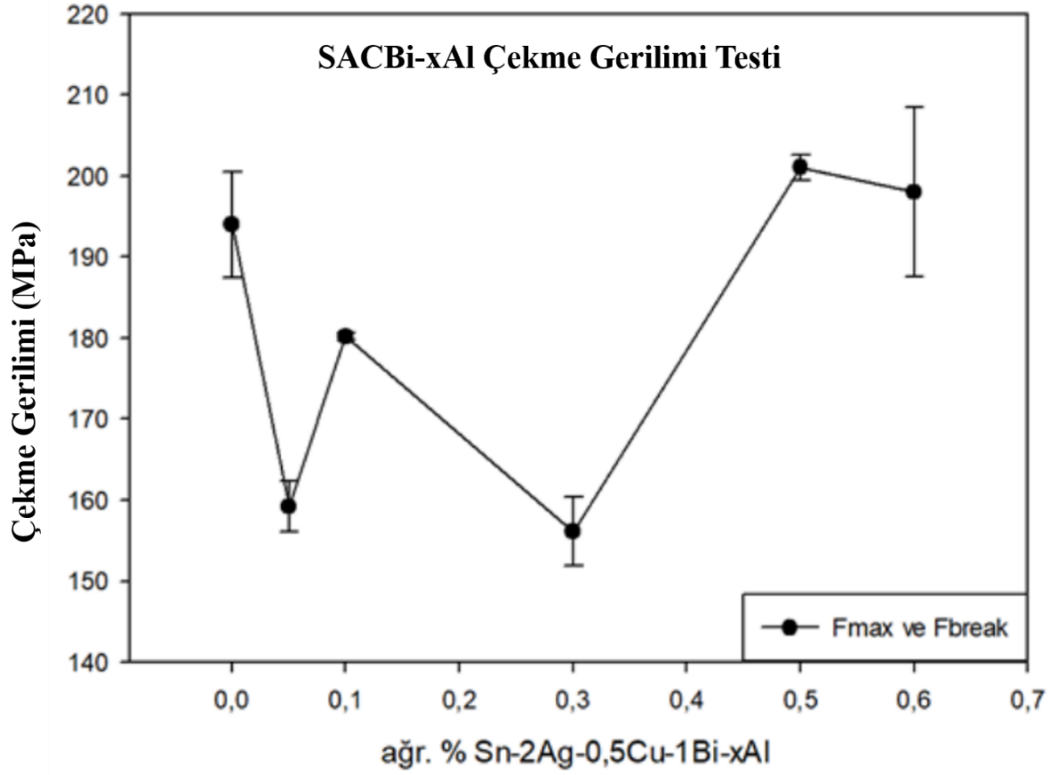
## 5.7. ÇEKME GERİLİMİ TESTİ SONUÇLARI

Sn-2Ag-0,5Cu-1Bi (SAC-1Bi) ve SACBi-xAl (x=%0,05, 0,1, 0,3, 0,5 ve 0,6) kurşunsuz lehim alaşımları Zwick/Roell Z050 marka cihazla çekme gerilimi testleri gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.8). Birleştirilen bakır plakalar daha sonra standart bir tensometrenin çenelerine takılmış ve burada, bağlantı boyunca bir kesme kuvveti uygulanarak 2,0 mm/dk'lık bir çapraz kafa hızında çekilmiştir. Çekme gerilimi test sonuçları Tablo 5.5'de listelenmiştir.

Çizelge 5.5. SACBi-xAl lehim alaşımlarının shear test sonuçları.

Lehim Alaşımları	Kalınlık (mm)	En (mm)	F <sub>max</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	F <sub>Break</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	ε <sub>Break</sub> (%)	ε- F <sub>max</sub> (%)
SAC-1Bi	1,5	15	200,53	187,48	0,81	0,81
SACBi- 0,05Al	1,5	15	162,38	156,04	1,09	1,08
SACBi- 0,1Al	1,5	15	180,71	179,72	0,51	0,51
SACBi- 0,3Al	1,5	15	160,33	151,90	0,50	0,49
SACBi- 0,5Al	1,5	15	202,63	199,54	0,66	0,65
SACBi- 0,6Al	1,5	15	208,46	187,57	0,61	0,59

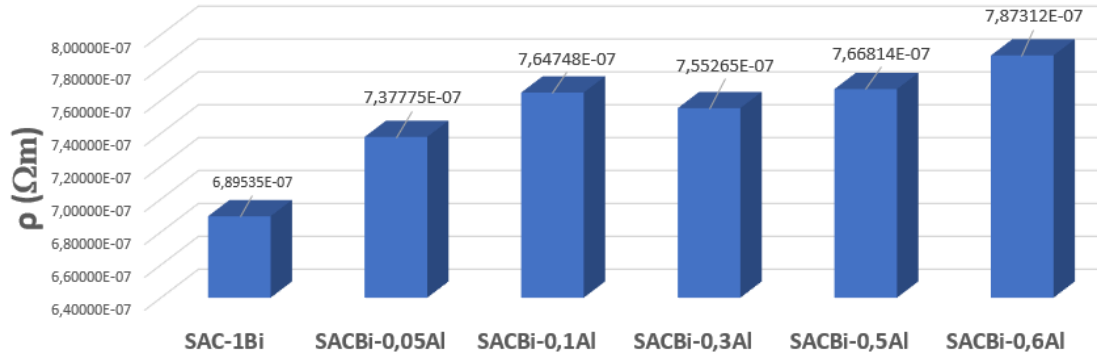
Küçük uzamalar için, maksimum gerilime ulaşılan kadar kesme mukavemeti gerilim hızla artar. Numuneler daha sonra aniden kırılmaz; bunun yerine, iç gerilim direnci sıfır olduğunda (maksimum çekme gerilimi) sona eren gerilimde yavaş bir azalma görülür (F<sub>max</sub> ve F<sub>break</sub>). Gerilme-uzama eğrisinin bu şekli, kesme geometrisinin ve Sn alaşımlarının yüksek plastisitesinin bir sonucudur. Çalışılan tüm alaşım bileşimleri için benzer eğriler gözlemlendi ve maksimum kesme açısından analiz edildi.



Şekil 5.68. SACBi-xAl lehim alaşımı için çekme gerilimi değerleri.

## 5.8. ELEKTRİKSEL İLETKENLİK ÖLÇÜM SONUÇLARI

SACBi-xAl lehim alaşımı için ortalama özdirenç değerleri; Al ilavesiz SAC-1Bi lehim alaşımı için  $6,89 \times 10^{-07} \Omega m$ , 0,05Al lehim alaşımı için  $7,38 \times 10^{-07} \Omega m$ , 0,1Al alaşımı için  $7,65 \times 10^{-07} \Omega m$ , 0,3Al alaşımı için  $7,55 \times 10^{-07} \Omega m$ , 0,5Al alaşımı için  $7,67 \times 10^{-07} \Omega m$  ve 0,6Al alaşımı için  $7,87 \times 10^{-07} \Omega m$  olarak hesaplanmıştır (Tablo Ek B.1-5). Özdirenç değeri ile iletkenlik ters orantılıdır. Bu durumda akımı en iyi geçiren 0,05Al katkılı lehim alaşımıdır.



Şekil 5.69. SACBi-xAl lehim alaşımlarının öz direnç değerleri.

Elektriksel iletkenlik açısından, intermetalik fazlar lehim alaşımlarının performansında önemli bir rol oynar. İletkenliği etkileyen bazı intermetalik fazlar vardır ( $Ag_3Sn$ ,  $Cu_6Sn_5$ ).  $Ag_3Sn$  fazı yüksek iletkenliğe sahip olduğu için elektriksel iletkenliği artırır.  $Cu_6Sn_5$  elektriksel iletkenliği korur ve termal stabilite sağlar.  $Al_2Cu$  fazı genellikle SAC alaşımlarında  $Ag_3Sn$  veya  $Cu_6Sn_5$  fazlarının yerine oluşabilir. Bu değişim, alaşımın bileşimine Sn elementinin azalması ve Al eklenmesiyle gerçekleşir. Al eklendiğinde, Al atomları Cu atomları ile birleşerek  $Al_2Cu$  fazını oluşturur.  $Al_2Cu$  fazı, genellikle düşük iletkenliğe sahiptir ve alaşımın genel elektriksel iletkenliğini azaltır. Bu fazın oluşumu, elektrik akışını engelleyerek elektriksel direnci artırır [99,100].

## BÖLÜM 6

### TARTIŞMA VE SONUÇLAR

(96,5-x)Sn-2Ag-0,5Cu-1Bi-xAl ( $x = \%0,05, 0,1, 0,3, 0,5$  ve  $0,6$ ) kurşunsuz lehim alaşımlarının Ar gazı atmosferinde Cu altlık üzerindeki ıslatma özellikleri incelenmiştir. Tablo 5.3’de verilen değerlerin arasında  $\%0,05$  ve  $\%0,1$ Al ilaveli kurşunsuz lehim alaşımlarında Al ilavesi arttıkça temas açısı değerlerinin düştüğü görülmektedir.  $\%0,3$ Al ilaveli lehim alaşımının ıslatmayı olumsuz yönde etkilediği açıkça görülmektedir.  $\%0,5$  ve  $\%0,6$ Al ilaveli alaşımlarda ise ıslatma özellikleri bakımından temas açısı değerlerinde tekrar bir düşüş gözlenmiştir. En düşük temas açısı değeri SACBi-0,1Al alaşımında  $325^{\circ}\text{C}$  sıcaklık değerinde  $38,44^{\circ}$  olarak ölçülmüştür. Bu sonuçlar, lehimleme süreçlerinde istenilen temas açısına ulaşmak için Al konsantrasyonunun ve sıcaklığın dikkatli bir şekilde kontrol edilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır. Sıcaklık artışı da temas açılarının azalmasına neden olmuştur. Düşük sıcaklıklarda ( $275^{\circ}\text{C}$ ) lehim alaşımlarının temas açılarının genellikle daha yüksek olduğu, ancak sıcaklık arttıkça ( $300^{\circ}\text{C}$  ve  $325^{\circ}\text{C}$ ) temas açılarının azaldığı gözlemlenmiştir. Bu durum, yüksek sıcaklıklarda lehim alaşımlarının viskozitesinin azalması ve alt yüzeyle daha iyi bir temas kurmasına olanak tanınması ile açıklanabilir [102]. Bu eğilim, sıcaklığın artmasıyla birlikte lehim alaşımının yüzey gerilimini azalttığını ve dolayısıyla daha iyi bir ıslatma sağladığını göstermektedir.

SACBi-0,05Al, SACBi-0,1Al, SACBi-0,3Al, SACBi-0,5Al ve SACBi-0,6Al lehim alaşımlarının korozyon öncesi mikroyapıları detaylı SEM-EDX analizleri ile incelenmiştir. Her bir alaşımın faz dağılımını ve elementel bileşimini belirlemek amacıyla yapılan bu analizler, alaşımların SAC-1Bi lehim alaşımına göre mekanik ve kimyasal özelliklerini anlamak için kritik bilgiler sunmaktadır.  $\beta$ -Sn,  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$ ,  $\text{Ag}_3\text{Sn}$ , AlCu fazları oluşmaktadır.  $\beta$ -Sn fazı, yüksek elektriksel iletkenliği ile dikkat çekerken,  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$  fazı mekanik dayanımı artırmakta,  $\text{Ag}_3\text{Sn}$  fazı ise mekanik dayanım ve termal kararlılık sağlamaktadır [30].  $0,05$ Al ve  $0,1$ Al içerikli lehim alaşımında AlCu fazı ile

birlikte diğ er intermetalik fazlar da gözlemlenmiştir. 0,3Al alaşımında  $Cu_6Sn_5$  fazının AlCu fazına dönüşmesi, mekanik özelliklerin olumsuz yönde etkilenmesine neden olmuştur. 0,5Al ve 0,6Al ilaveli alaşımlarda ise AlCu fazı nispeten bir artışa neden olmuş ve mekanik özellikleri bakımından olumsuz etkilendiği raporlanmıştır. Bu bulgular, SACBi-Al lehim alaşımlarının başlangıçtaki mikro yapı özelliklerinin, alaşımların performansını ve dayanıklılığını nasıl etkilediğini göstermektedir [94]. Özellikle  $Ag_3Sn$  ve  $Cu_6Sn_5$  fazlarının varlığı, alaşımların mekanik ve termal özelliklerini iyileştirdiği görülmektedir. Bu nedenle, alaşımların uygulama alanlarına uygun olarak optimize edilmesi ve faz dağılımının kontrol edilmesi, performanslarının maksimize edilmesi açısından önem taşımaktadır.

Düşük korozyon akım yoğunluğu ( $i_{corr}$ ) değeri, korozyon hızının düşük olduğu ve akım yoğunluğu ne kadar yüksekse korozyon hızının o kadar yüksek olduğu anlamına gelir [103]. %0,1Al ilavesi ile  $i_{corr}$  değeri düşer. Bu değerden sonra tekrar yükselme eğilimindedir. Korozyon hızı incelendiğinde en düşük orana sahip SACBi-0,1Al alaşımının korozyona karşı daha dirençli olduğu söylenemez. Yine de ilgili korozyon akım büyüklüklerinin birbirine çok yakın olduklarını vurgulamak gerekir.

SACBi-0,05Al, SACBi-0,1Al, SACBi-0,3Al, SACBi-0,5Al ve SACBi-0,6Al lehim alaşımlarının korozyon sonrası mikroyapıları detaylı SEM-EDX analizleri ile incelenmiştir. Korozyon sonrası yapılan bu analizler, her bir alaşımın faz dağılımını, elementel bileşimini ve korozyonun mikroyapıya olan etkilerini belirlemekte kritik bir rol oynamıştır. %0,05Al içerikli lehim alaşımı korozyon sonrası yüzeyde belirgin bozulmalar ve çatlaklar gözlemlenmiştir. Faz dağılımında değişiklikler meydana gelmiş, özellikle  $Cu_6Sn_5$  ve  $\beta$ -Sn fazlarında bozulmalar tespit edilmiştir. %0,1Al lehim alaşımı için yüzeyde düzensizlikler ve korozyon ürünlerinin birikimi gözlemlenmiştir.  $\beta$ -Sn fazının bozulması ve  $Cu_6Sn_5$  fazının azalması,  $Ag_3Sn$  fazının ise kısmen korunduğu gözlemlenmiştir. %0,3Al lehim alaşımı için korozyon sonrası yüzeyde mikroskopik boşluklar ve çatlaklar belirgin hale gelmiştir.  $Cu_6Sn_5$  ve  $\beta$ -Sn fazlarının bozulduğu gözlemlenmiştir. AlCu fazının korunması mekanik dayanımı kısmen desteklemiştir. %0,5Al lehim alaşımı için yüzeydeki düzensizlikler ve korozyon ürünleri belirginleşmiştir.  $Cu_6Sn_5$  ve  $\beta$ -Sn fazlarında önemli bozulmalar

gözlemlenmiştir. %0,6Al lehim alaşımı için korozyon sonrası yüzeydeki pürüzlülük ve çatlaklar artmıştır.  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$  ve  $\beta\text{-Sn}$  fazlarında ciddi bozulmalar görülmüştür [76].

Çekme gerilimi testi, malzemenin genel mukavemet ve dayanıklılık özelliklerini değerlendirmede önemli bir rol oynamaktadır. Çekme gerilimi testi sonuçları,  $F_{\max}$  (maksimum kuvvet) ve  $F_{\text{break}}$  (kırılma kuvveti) değerlerinin farklı Al oranlarına bağlı olarak değiştiğini göstermiştir.  $F_{\max}$ , numunenin kırılmadan önce dayanabildiği en yüksek kuvveti,  $F_{\text{break}}$  ise malzemenin kırıldığı noktadaki kuvveti ifade etmektedir. Elde edilen veriler, Al oranının hem maksimum kuvvet hem de kırılma kuvveti üzerinde belirgin bir etkisi olduğunu ortaya koymaktadır. %0,05 Al içerikli lehim alaşımında elde edilen  $F_{\max}$  ve  $F_{\text{break}}$  değerleri nispeten düşüktür, ancak aralarındaki fark oldukça minimaldir. Bu durum, malzemenin çekme geriliminin sınırlı olduğunu ancak kırılma anında ani bir zayıflık göstermediğini ifade etmektedir. %0,1 Al içerikli lehim alaşımında  $F_{\max}$  ve  $F_{\text{break}}$  değerlerinin bu oranda önemli ölçüde arttığı gözlemlenmiştir. Bu artış, malzemenin daha yüksek bir mukavemet sergilediğini ve çekme geriliminin iyileştiğini göstermektedir. %0,3 Al içerikli lehim alaşımında elde edilen en düşük  $F_{\max}$  ve  $F_{\text{break}}$  değerlerini göstermektedir. Malzemenin çekme geriliminin zayıf olduğu ve kırılma eğilimi gösterdiği anlaşılmaktadır. %0,5 Al içerikli lehim alaşımında en yüksek  $F_{\max}$  ve  $F_{\text{break}}$  değerlerinin bu oranda elde edilmesi, malzemenin maksimum dayanıklılığını ve mukavemetini ifade etmektedir. Bu oran, lehim alaşımının mekanik performansını optimize etmektedir. %0,6 Al içerikli lehim alaşımında yüksek  $F_{\max}$  değerine rağmen,  $F_{\text{break}}$  değeri %0,5 oranına kıyasla biraz daha düşüktür. Bu, malzemenin dayanıklılığının yüksek olduğunu ancak en yüksek kuvvetlerde biraz daha kırılma eğilimi gösterdiğini göstermektedir.  $F_{\max}$  ve  $F_{\text{break}}$  değerlerinin ortalaması, malzemenin genel mukavemetini temsil etmekte ve farklı Al oranlarının bu ortalamalar üzerindeki etkisini göstermektedir. %0,3 Al içerikli lehim alaşımında düşük mukavemet sergilemesi nedeniyle bu oran, daha az yük taşıyan uygulamalar için uygun olabilir. Çekme gerilimi testinin sonuçları, farklı Al oranlarına sahip lehim alaşımlarının mekanik performanslarının belirgin bir şekilde değiştiğini göstermektedir. Al oranının dikkatli bir şekilde ayarlanması, lehim alaşımlarının istenen mukavemet ve dayanıklılık özelliklerine ulaşmasını sağlamak için önemlidir. Bu bulgular, mühendislik uygulamalarında malzeme seçimi ve tasarım sürecinde önemli bir rehber niteliği taşımaktadır [104].

Elektriksel iletkenlik ile ilgili Şekil 5.68’te görüldüğü üzere, SAC-1Bi alaşımına farklı oranlarda Al ilavesi yapıldığında (0,05, 0,1, 0,3, 0,5 ve 0,6), özdirenç değerlerinde belirgin değişiklikler gözlemlenmiştir. Al ilavesiz SAC-1Bi alaşımı,  $6,89 \times 10^{-7} \Omega\text{cm}$  özdirenç değeri ile temel referans noktası olarak alınmıştır. Bu alaşıma Al ilave edildiğinde, özdirenç değerleri artış göstermiştir. Özellikle 0,05Al katkılı alaşım, en düşük özdirenç değerine ( $7,38 \times 10^{-7} \Omega\text{cm}$ ) sahip olup, bu oran en iyi elektriksel iletkenliği sağlamaktadır. Bu, 0,05Al katkısının, alaşımın elektriksel performansını olumlu yönde etkilediğini göstermektedir. Bununla birlikte, Al katkı oranı arttıkça (0,1, 0,3, 0,5 ve 0,6), özdirenç değerlerinde artış gözlenmiştir. Özellikle 0,6Al alaşımı, en yüksek özdirenç değerine ( $7,87 \times 10^{-7} \Omega\text{cm}$ ) sahiptir. Bu artış,  $\text{Al}_2\text{Cu}$  fazının oluşumu ile ilişkilidir.  $\text{Al}_2\text{Cu}$  fazı, düşük iletkenliğe sahip olduğu için elektriksel direnci artırmakta ve böylece alaşımın genel elektriksel iletkenliğini azaltmaktadır [65].

SAC-1Bi alaşımına Al ilavesi, mikroyapı, korozyon, intermetalik fazlar, çekme gerilimi ve elektriksel iletkenlik gibi farklı performans kriterleri üzerinde karmaşık ve çeşitlendirilmiş etkiler yaratmıştır. Çalışmanın bulguları aşağıdaki gibi özetlenebilir:

SACBi-1Bi alaşımına Al ilavesi ile,  $\text{Ag}_3\text{Sn}$  ve  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$  fazlarının yerinde AlCu fazının oluşması mikroyapı değişikliğinde bir dezavantaj oluşturmuştur. Bu dezavantaj korozyon direnci, çekme gerilimi ve elektriksel iletkenliğin bozulmasında temel nedenlerden olduğu tespit edilmiştir. Al ilavesinin ergime sıcaklığını düşürdüğü (%0,1Al) rapor edilmiştir. Bu çalışma, Al katkısının optimize edilmesi gerektiğini göstererek diğer araştırmacılara yol göstermektedir. Al katkı oranlarının dikkatli bir şekilde kontrol edilmesi, lehim alaşımlarının genel performansını iyileştirmek için kritik öneme sahiptir.



## KAYNAKLAR

- [1] S. Zhang *et al.*, “Wettability and interfacial morphology of Sn-3.0Ag-0.5Cu solder on electroless nickel plated ZnS transparent ceramic,” *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, vol. 30, pp. 17972–17985, 1234, doi: 10.1007/s10854-019-02151-w.
- [2] S. Li *et al.*, “Corrosion behavior of Sn-based lead-free solder alloys: a review,” *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, vol. 31, pp. 9076–9090, 1234, doi: 10.1007/s10854-020-03540-2.
- [3] B. O. Liu, T.-K. Lee, and K.-C. Liu, “Impact of 5% NaCl Salt Spray Pretreatment on the Long-Term Reliability of Wafer-Level Packages with Sn-Pb and Sn-Ag-Cu Solder Interconnects”, doi: 10.1007/s11664-011-1705-y.
- [4] L. M. Satizabal, D. Costa, P. B. Moraes, D. Bortolozzo, and W. R. Osório, “Microstructural array and solute content affecting electrochemical behavior of SnAg and SnBi alloys compared with a traditional SnPb alloy,” 2018, doi: 10.1016/j.matchemphys.2018.11.003.
- [5] M. Firdaus Mohd Nazeri *et al.*, “Corrosion characterization of Sn-Zn solder: a review”, doi: 10.1108/SSMT-05-2018-0013.
- [6] Z. Hou, T. Niu, · Xiuchen Zhao, Y. Liu, and T. Yang, “Intermetallic compounds formation and joints properties of electroplated Sn-Zn solder bumps with Cu substrates,” *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, vol. 30, pp. 20276–20284, 1234, doi: 10.1007/s10854-019-02412-8.
- [7] M. Hasnine and M. J. Bozack, “Effects of Ga Additives on the Thermal and Wetting Performance of Sn-0.7Cu Solder,” vol. 48, doi: 10.1007/s11664-019-07171-0.
- [8] H. Ma *et al.*, “Shielding effect of Ag 3 Sn on growth of intermetallic compounds in isothermal heating and cooling during multiple reflows,” vol. 29, pp. 4383–4390, 2018, doi: 10.1007/s10854-017-8428-7.
- [9] N. Jiang *et al.*, “Influences of doping Ti nanoparticles on microstructure and properties of Sn58Bi solder,” *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, vol. 30, pp. 17583–17590, 2019, doi: 10.1007/s10854-019-02107-0.

- [10] H. M. Ae and J. C. Suhling, "A review of mechanical properties of lead-free solders for electronic packaging", doi: 10.1007/s10853-008-3125-9.
- [11] Tsao, L.-C. "Corrosion resistance of Pb-free and novel nano-composite solders in electronic packaging." In: *Corrosion Resistance*. Ed. Tsao, L.-C. Taiwan: IntechOpen, 2012, pp. 107-108.
- [12] D. Jaiswal, S. Kumar, and C. K. Behera, "Electrochemical behavior of Sn-9Zn-xCu solder alloy in 3.5 wt% NaCl solution at room temperature," *Mater Today Commun*, vol. 33, pp. 2352–4928, 2022, doi: 10.1016/j.mtcomm.2022.104627.
- [13] S. Zhou, O. Mokhtari, M. G. Rafique, V. C. Shunmugasamy, B. Mansoor, and H. Nishikawa, "Improvement in the mechanical properties of eutectic Sn58Bi alloy by 0.5 and 1 wt% Zn addition before and after thermal aging," *Mechanical Engineering Program*, 2018, doi: 10.1016/j.jallcom.2018.06.121.
- [14] W. Qin *et al.*, "Effect of addition of Al and Cu on the properties of Sn-20Bi solder alloy," *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, vol. 33, doi: 10.1007/s10854-021-07283-6.
- [15] S. Amore, E. Ricci, G. Borzone, and R. Novakovic, "Wetting behaviour of lead-free Sn-based alloys on Cu and Ni substrates," *Materials Science and Engineering A*, vol. 495, pp. 108–112, 2008, doi: 10.1016/j.msea.2007.10.110.
- [16] P. Fima, T. Gancarz, J. Pstrus, K. Bukat, and J. Sitek, "Thermophysical properties and wetting behavior on Cu of selected SAC alloys," *Soldering & Surface Mount Technology*, vol. 24, no. 2, pp. 71–76, Apr. 2012, doi: 10.1108/09540911211214640/FULL/XML.
- [17] S. Aksö Z, P. Ata Esener, E. O. " Ztü Rk, and N. M. Maras,lı, "Effects of Bi content on thermal, microstructure and mechanical properties of Sn-Bi-In-Zn solder alloy systems," *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, doi: 10.1007/s10854-021-07144-2.
- [18] Puttlitz, K. J., & Stalter, K. A. (2004). *Handbook of Lead-Free Solder Technology for Microelectronic Assemblies*. CRC Press. Erişim: 16 Şubat 2024. [Online].
- [19] Kantarcıoğlu, A. (2012). "Development of New Lead-Free Solders for Electronics Industry". Yüksek Lisans Tezi, Fen ve Mühendislik Bilimleri Enstitüsü. Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara, Türkiye.
- [20] Y. L. Shabtay, M. Ainali, and A. Lea, "New brazing processes using anneal-resistant copper and brass alloys," *Mater Des*, vol. 25, no. 1, pp. 83–89, 2004, doi: 10.1016/S0261-3069(03)00162-6.

- [21] Abtew, M., & Selvaduray, G. "Lead-free Solders in Microelectronics." *Journal of Electronic Materials*, vol. 33, no. 10, 2004, pp. 1234-1245.
- [22] M. R. Harrison, J. H. Vincent, and H. A. H. Steen, "Lead-free reflow soldering for electronics assembly," *Soldering and Surface Mount Technology*, vol. 13, no. 3, pp. 21–38, 2001, doi: 10.1108/09540910110407388.
- [23] P. Arulvanan, Z. Zhong, and X. Shi, "Effects of process conditions on reliability, microstructure evolution and failure modes of SnAgCu solder joints," *Microelectronics Reliability*, vol. 46, no. 2–4, pp. 432–439, Feb. 2006, doi: 10.1016/j.microrel.2005.05.005.
- [24] K. Zeng and K. N. Tu, "Six cases of reliability study of Pb-free solder joints in electronic packaging technology."
- [25] E. P. Wood and K. L. Nimmo, "In search of new lead-free electronic solders," *J Electron Mater*, vol. 23, no. 8, pp. 709–713, Aug. 1994, doi: 10.1007/BF02651363/METRICS.
- [26] S. Cheng, C. M. Huang, and M. Pecht, "A review of lead-free solders for electronics applications," *Microelectronics Reliability*, vol. 75. Elsevier Ltd, pp. 77–95, Aug. 01, 2017. doi: 10.1016/j.microrel.2017.06.016.
- [27] I. Anderson, "Sn±Ag±Cu: a lead-free solder for board applications," in *Proceedings of the NEPCON West*, 1996, pp. 882–887.
- [28] C. M. Miller, I. E. Anderson, and J. F. Smith, "A viable tin-lead solder substitute: Sn-Ag-Cu," *J Electron Mater*, vol. 23, no. 7, pp. 595–601, Jul. 1994, doi: 10.1007/BF02653344/METRICS.
- [29] P. G. Harris, "The role of intermetallic compounds in lead-free soldering."
- [30] M. Abtew and G. Selvaduray, "Lead-free Solders in Microelectronics," *Materials Science and Engineering: R: Reports*, vol. 27, no. 5–6, pp. 95–141, Jun. 2000, doi: 10.1016/S0927-796X(00)00010-3.
- [31] R. J. K. Wassink and M. M. F. Verguld, *Manufacturing techniques for surface mounted assemblies*. Electrochemical Publications, 1995.
- [32] F. Pelik. (2010) Contact Angle Change and Wetting of Droplets on Planar Surfaces. Doktora Tezi Koç University.
- [33] R. J. K. Wassink, "Soldering in electronics : a comprehensive treatise on soldering technology for surface mounting and through-hole techniques," (*No Title*), Accessed: Mar. 05, 2024. [Online]. Available: <https://cir.nii.ac.jp/crid/1130000798391121536>

- [34] F. H. Howie and C. Lea, “Blowholing in PTH solder fillets-towards a solution,” *Proceedings of INTERNEPCON UK*, pp. 104–111, 1984.
- [35] N. Takehara, M. Inoue, T. Horie, and R. Shiba, “Measuremen of Solder-Flux-Vapor Surface Tension by a Modified Maximum Bubble Pressure Technique,” *Rev. Sci. Instr.*, vol. 47, no. 3, pp. 324–325, 1976, doi: 10.5104/JIEP.4.483.
- [36] R. A. Deighan, “Surface tension of solder alloys,” in *ISHM*, 1982, p. 307.
- [37] S. Oguz. (2013) “Sn-(3-x)Ag-0,5Cu-xBi Dörtlü Kurşunsuz Lehim Alaşimlarının Islatma Özelliklerinin Cu Altlik Üzerinde İncelenmesi,” Yüksek Lisans, Karabük Üniversitesi.
- [38] Atkins, P., Overton, T., Rourke, J., Weller, M., & Armstrong, F. (2010). *Shriver and Atkins’ Inorganic Chemistry*. Oxford University Press. Erişim: 27 Mayıs 2024. [Online].
- [39] Pashley, R. M., & Karaman, M. E. (2004). *Applied Colloid and Surface Chemistry*. Wiley. Erişim: 27 Mayıs 2024. [Online].
- [40] Israelachvili, J. N. (2011). *Intermolecular and Surface Forces*. Academic Press. Erişim: 27 Mayıs 2024. [Online].
- [41] D. J. Shaw, “Introduction to colloid and surface chemistry,” 1970.
- [42] P. Zarras and J. D. Stenger-Smith, “Corrosion processes and strategies for prevention: an introduction,” *Handbook of Smart Coatings for Materials Protection*, pp. 3–28, Jan. 2014, doi: 10.1533/9780857096883.1.3.
- [43] U. Riaz, C. Nwaoha, and S. M. Ashraf, “Recent advances in corrosion protective composite coatings based on conducting polymers and natural resource derived polymers,” *Prog Org Coat*, vol. 77, pp. 743–756, 2014, doi: 10.1016/j.porgcoat.2014.01.004.
- [44] R. L. Elsenbaumer, J. R. Reynolds, and T. A. Skotheim, *Handbook of conducting polymers*. Marcel Dekker, 1997.
- [45] McCafferty, E. (2010). **Introduction to Corrosion Science**. Springer. Erişim: 24 Şubat 2024. [Online].
- [46] A. Palta *et al.*, “Yerinde Oluşturulmuş Magnezyum Slst Partkül Takvyel Alüminyum-Magnezyum-Silisyum Matrsı Kompozitlerin Aşınma Ve Korozyon Davranışlarına Titanyum Ve Bakırın Etkisinin İncelenmesi,” 2009.
- [47] S. VAROL, (2012). Alüminyum-Bakır Alaşimlarının Korozyon Davranışına Tane Boyutunun Etkisi Kocaeli Üniversitesi. .

- [48] Uzun, H. (2012). Mühendisler için Malzeme Biliminin Temel İlkeleri. İstanbul: Değişim Yayınları.
- [49] T. Savaşkan, “Malzeme bilimi ve malzeme muayenesi,” *Celpler Matbaacılık*, vol. 347, p. 350, 2017.
- [50] C. ming Chen, Y. min Hung, C. pu Lin, and W. C. Su, “Effect of temperature on microstructural changes of the Sn–9 wt.% Zn lead-free solder stripe under current stressing,” *Mater Chem Phys*, vol. 115, no. 1, pp. 367–370, May 2009, doi: 10.1016/J.MATCHEMPHYS.2008.12.019.
- [51] P. J. Kay and C. A. Mackay, “The Growth of Intermetallic Compounds on Common Basis Materials Coated with Tin and Tin-Lead Alloys,” *Transactions of the IMF*, vol. 54, no. pt 1, pp. 68–74, 1976, doi: 10.1080/00202967.1976.11870376.
- [52] W. D. Callister and D. D. Rethwisch, *Malzeme bilimi ve mühendisliği*. Nobel, 2013.
- [53] K. Suganuma, “Advances in lead-free electronics soldering,” *Curr Opin Solid State Mater Sci*, vol. 5, no. 1, pp. 55–64, Jan. 2001, doi: 10.1016/S1359-0286(00)00036-X.
- [54] T. Dan, “İKİLİ KURŞUNSUZ LEHİM ALAŞIMLARININ ISI İLETİMİNİN ÖLÇÜMÜ,” Doktora Tezi, Nevşehir Üniversitesi, 2013.
- [55] Heaney, M. B. (2003). **Electrical Conductivity and Resistivity**. In J. G. Webster (Ed.), *Electrical Measurement, Signal Processing, and Displays* (pp. 7-1). CRC Press.
- [56] L. Yang, Y. Zhang, J. Dai, Y. Jing, J. Ge, and N. Zhang, “Microstructure, interfacial IMC and mechanical properties of Sn-0.7Cu-xAl (x = 0-0.075) lead-free solder alloy,” 2014, doi: 10.1016/j.matdes.2014.11.036.
- [57] P. A. Jiang Yongchang Liu AE Chen Wei AE Jingbo Wan AE Ronglei Xu AE Zhiming Gao, “Effect of high-temperature annealing on the microstructural formation of Sn-3.7Ag-0.9Zn-xAl lead-free solder”, doi: 10.1007/s10854-008-9666-5.
- [58] R. Koleňák, R. Augustin, M. Martinkovič, and M. Chachula, “Comparison study of SAC405 and SAC405+0.1%Al lead free solders,” *Soldering and Surface Mount Technology*, vol. 25, no. 3, pp. 175–183, 2013, doi: 10.1108/SSMT-AUG-2012-0018/FULL/XML.
- [59] Y. W. Lee, I. H. Kim, E. S. Kim, J. H. Lee, and J. T. Moon, “Improvement of wettability and drop impact reliability by Al addition in SnAgCu solder,” in

2010 12th Electronics Packaging Technology Conference, IEEE, 2010, pp. 429–432.

- [60] J. Li, P. Agyakwa, and C. Johnson, “Effect of trace Al on growth rates of intermetallic compound layers between Sn-based solders and Cu substrate,” 2012, doi: 10.1016/j.jallcom.2012.08.023.
- [61] K. Maslinda, • A S Anasyida, and • M S Nurulakmal, “Effect of Al addition to bulk microstructure, IMC formation, wetting and mechanical properties of low-Ag SAC solder,” *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, vol. 27, doi: 10.1007/s10854-015-3780-y.
- [62] D. Abdul-ameer Shnawah *et al.*, “Microstructure and Tensile Properties of Sn-1Ag-0.5Cu Solder Alloy Bearing Al for Electronics Applications”, doi: 10.1007/s11664-012-2135-1.
- [63] L. Sun, L. Zhang, L. Xu, S.-J. Zhong, J. Ma, and L. Bao, “Effect of nano-Al addition on properties and microstructure of low-Ag content Sn-1Ag-0.5Cu solders,” *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, vol. 27, doi: 10.1007/s10854-016-4751-7.
- [64] M. Fayeka, • M A Fazal, and • A S M A Haseeb, “Effect of aluminum addition on the electrochemical corrosion behavior of Sn-3Ag-0.5Cu solder alloy in 3.5 wt% NaCl solution,” *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, vol. 27, doi: 10.1007/s10854-016-5374-8.
- [65] F. Meydaneri Tezel, B. Saatçi, • Mehmet Arı, S. Durmus, acer, D. Durmus, acer, and • Emine Altuner, “Structural and thermo-electrical properties of Sn-Al alloys,” *Applied Physics A*, vol. 122, doi: 10.1007/s00339-016-0398-8.
- [66] L. Yang, Y. Zhang, C. Du, J. Dai, and N. Zhang, “Effect of aluminum concentration on the microstructure and mechanical properties of Sn-Cu-Al solder alloy,” 2015, doi: 10.1016/j.microrel.2014.12.017.
- [67] M. Faizul *et al.*, “Microstructural stability of Sn-1Ag-0.5Cu-xAl (x = 1, 1.5, and 2 wt.%) solder alloys and the effects of high-temperature aging on their mechanical properties,” 2013, doi: 10.1016/j.matchar.2013.01.015.
- [68] L. Sun and L. Zhang, “Properties and Microstructures of Sn-Ag-Cu-X Lead-Free Solder Joints in Electronic Packaging,” 2015, doi: 10.1155/2015/639028.
- [69] S. Li *et al.*, “Corrosion behavior of Sn-based lead-free solder alloys: a review,” *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, vol. 31, no. 12. Springer, pp. 9076–9090, Jun. 01, 2020. doi: 10.1007/s10854-020-03540-2.

- [70] F. Rosalbino, E. Angelini, G. Zanicchi, R. Carlini, and R. Marazza, “Electrochemical corrosion study of Sn-3Ag-3Cu solder alloy in NaCl solution,” *Electrochim Acta*, vol. 54, no. 28, pp. 7231–7235, Dec. 2009, doi: 10.1016/j.electacta.2009.07.030.
- [71] C. Andersson and J. Liu, “Effect of corrosion on the low cycle fatigue behavior of Sn-4.0Ag-0.5Cu lead-free solder joints,” *Int J Fatigue*, vol. 30, no. 5, pp. 917–930, May 2008, doi: 10.1016/j.ijfatigue.2007.06.009.
- [72] P. Tamási, G. Kósa, B. Szabó, R. Berényi, and B. Medgyes, “Effect of bismuth and silver on the corrosion behavior of lead-free solders in 3.5 wt% NaCl solution,” *Periodica polytechnica Electrical engineering and computer science*, vol. 60, no. 4, pp. 232–236, 2016, doi: 10.3311/PPee.9706.
- [73] A. Wierzbicka-Miernik, J. Guspiel, and L. Zabdyr, “Corrosion behavior of lead-free SAC-type solder alloys in liquid media,” *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, vol. 15, no. 1, pp. 206–213, Jan. 2015, doi: 10.1016/j.acme.2014.03.003.
- [74] A. Gharaibeh, I. Felhósi, Z. Keresztes, G. Harsányi, B. Medgyes, and B. Illés, “Electrochemical corrosion of sac alloys: A review,” *Metals*, vol. 10, no. 10, MDPI AG, pp. 1–18, Oct. 01, 2020. doi: 10.3390/met10101276.
- [75] B. Y. Wu, Y. C. Chan, M. O. Alam, and W. Jillek, “Electrochemical corrosion study of Pb-free solders,” *J Mater Res*, vol. 21, no. 1, pp. 62–70, Jan. 2006, doi: 10.1557/jmr.2006.0035.
- [76] N. I. M. Nordin *et al.*, “Impact of aluminium addition on the corrosion behaviour of Sn-1.0Ag-0.5Cu lead-free solder,” *RSC Adv*, vol. 5, no. 120, pp. 99058–99064, 2015, doi: 10.1039/c5ra18453c.
- [77] M. A. Fazal, N. K. Liyana, S. Rubaiee, and A. Anas, “A critical review on performance, microstructure and corrosion resistance of Pb-free solders,” *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, vol. 134, Elsevier B.V., pp. 897–907, Feb. 01, 2019. doi: 10.1016/j.measurement.2018.12.051.
- [78] U. S. Mohanty and K. L. Lin, “The effect of alloying element gallium on the polarization characteristics of Pb-free Sn-Zn-Ag-Al-XGa solders in NaCl solution,” *Corros Sci*, vol. 48, no. 3, pp. 662–678, Mar. 2006, doi: 10.1016/j.corsci.2005.02.003.
- [79] U. S. Mohanty and K. L. Lin, “Effect of Al on the electrochemical corrosion behaviour of Pb free Sn-8.5 Zn-0.5 Ag-XAl-0.5 Ga solder in 3.5% NaCl

- solution,” *Appl Surf Sci*, vol. 252, no. 16, pp. 5907–5916, Jun. 2006, doi: 10.1016/j.apsusc.2005.08.020.
- [80] A. Ahmido *et al.*, “Effect of bismuth and silver on the corrosion behavior of Sn-9Zn alloy in NaCl 3wt.% solution,” *Mater Sci Eng B Solid State Mater Adv Technol*, vol. 176, no. 13, pp. 1032–1036, Aug. 2011, doi: 10.1016/j.mseb.2011.05.034.
- [81] H. A. Jaffery *et al.*, “Electrochemical corrosion behavior of Sn-0.7Cu solder alloy with the addition of bismuth and iron,” *J Alloys Compd*, vol. 810, Nov. 2019, doi: 10.1016/j.jallcom.2019.151925.
- [82] M. Fayeka, A. S. M. A. Haseeb, and M. A. Fazal, “Electrochemical corrosion behaviour of Pb-free SAC 105 and SAC 305 solder alloys: A comparative study,” *Sains Malays*, vol. 46, no. 2, pp. 295–302, Feb. 2017, doi: 10.17576/jsm-2017-4602-14.
- [83] T. X. Cong, A. A. Mohamad, M. Firdaus, and M. Nazeri, “Corrosion Assessment of Sn-0.7Cu Lead-Free Solder in 1 M Hydrochloric Acid”, doi: 10.1088/1757-899X/701/1/012058.
- [84] A. Al-Ezzi, A. Al-Bawee, F. Dawood, and A. A. Shehab, “Effect of Bismuth Addition on Physical Properties of Sn-Zn Lead-Free Solder Alloy,” *J Electron Mater*, vol. 48, no. 12, pp. 8089–8095, Dec. 2019, doi: 10.1007/s11664-019-07577-w.
- [85] P. Ata Esener, B. Demirel, and S. Aksöz, “Effect of Sb and In additives on thermal and electrical properties of Sn–9Zn–4Bi alternative lead-free solder alloy,” *Mater Chem Phys*, vol. 296, Feb. 2023, doi: 10.1016/j.matchemphys.2022.127223.
- [86] Z. Dong *et al.*, “Machine learning assisted design of high-strength Sn-3.8Ag-0.7Cu alloys with the co-additions of Bi and In,” *Materials Science and Engineering: A*, vol. 861, Dec. 2022, doi: 10.1016/j.msea.2022.144257.
- [87] Y. Altıntaş, Y. Kaygıslı, E. Öztürk, S. Aksöz, K. Keşlioglu, and N. Maraşlı, “The measurements of electrical and thermal conductivity variations with temperature and phonon component of the thermal conductivity in Sn–Cd–Sb, Sn–In–Cu, Sn–Ag–Bi and Sn–Bi–Zn alloys,” *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 100, pp. 1–9, Feb. 2016, doi: 10.1016/J.IJTHEMALSCI.2015.09.004.
- [88] Y. Kang, J. J. Choi, D. G. Kim, and H. W. Shim, “The Effect of Bi and Zn Additives on Sn-Ag-Cu Lead-Free Solder Alloys for Ag Reduction,” *Metals (Basel)*, vol. 12, no. 8, Aug. 2022, doi: 10.3390/met12081245.

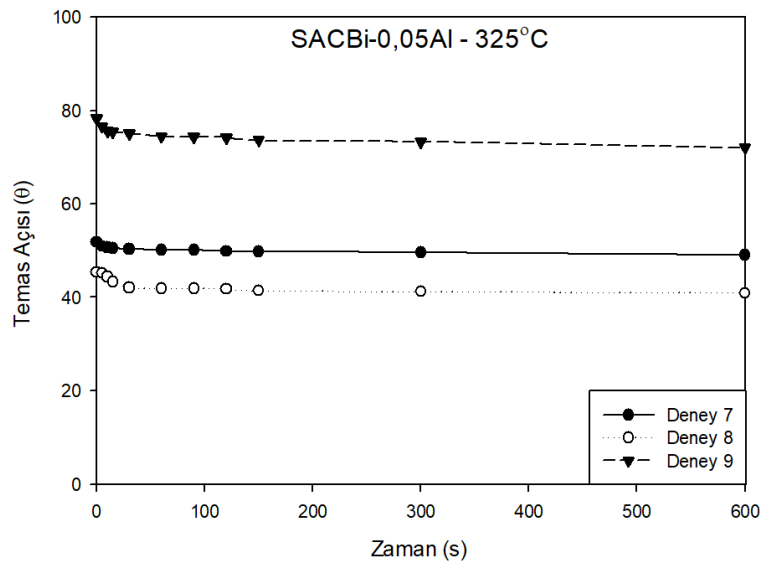
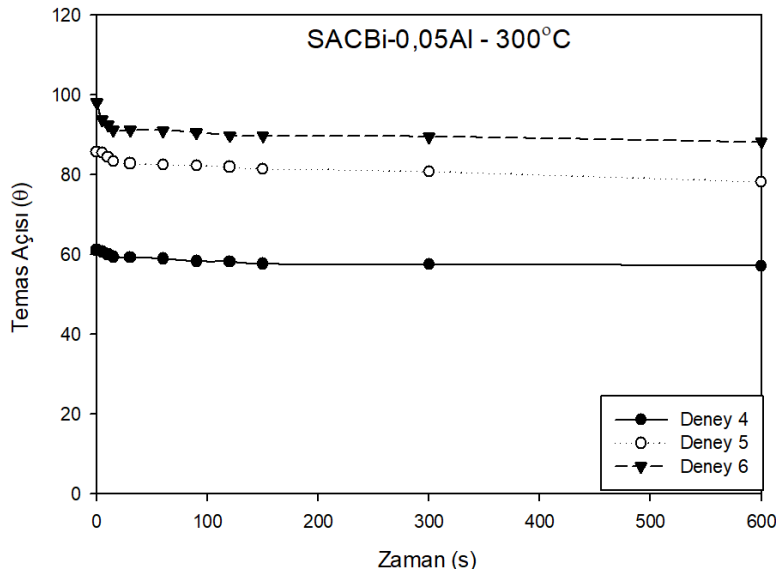
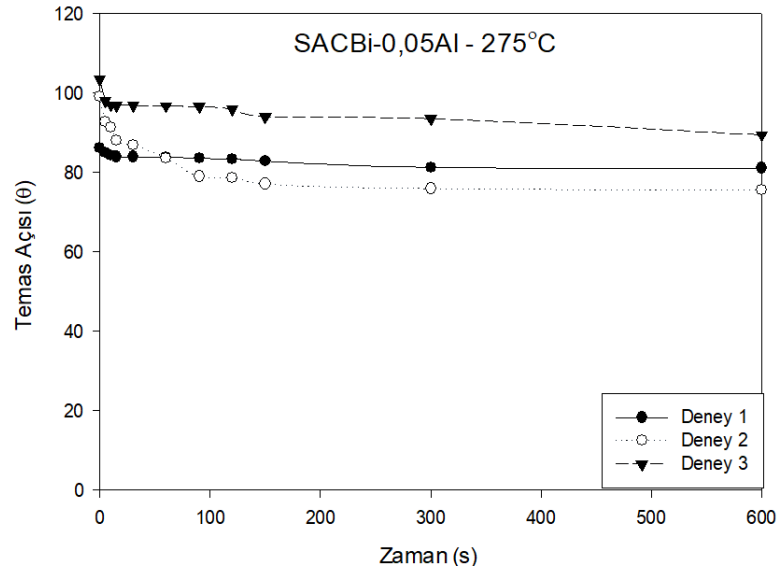


- [89] W. Qin *et al.*, “Effect of addition of Al and Cu on the properties of Sn–20Bi solder alloy,” *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, vol. 33, no. 1, pp. 177–189, Jan. 2022, doi: 10.1007/s10854-021-07283-6.
- [90] M. Ari, B. Saatçi, M. Gündüz, F. Meydaneri, and M. Bozoklu, “Microstructure and thermo-electrical transport properties of Cd–Sn alloys,” *Mater Charact*, vol. 59, no. 5, pp. 624–630, May 2008, doi: 10.1016/J.MATCHAR.2007.05.014.
- [91] “GeometricFactors4ProbeResistivity”.
- [92] K. N. Tu, “Interdiffusion and reaction in bimetallic Cu-Sn thin films,” *Acta Metallurgica*, vol. 21, no. 4, pp. 347–354, Apr. 1973, doi: 10.1016/0001-6160(73)90190-9.
- [93] T. Yang, Q. Chen, X. Li, C. Meng, B. Ye, and B. Gou, “Low-temperature synthesis of Ti<sub>3</sub>Al(Sn)C<sub>2</sub> solid solution using replacement reaction,” *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, vol. 31, no. 22, pp. 20601–20610, Nov. 2020, doi: 10.1007/s10854-020-04580-4.
- [94] Y. Guo, G. Liu, H. Jin, Z. Shi, and G. Qiao, “Intermetallic phase formation in diffusion-bonded Cu/Al laminates,” *J Mater Sci*, vol. 46, no. 8, pp. 2467–2473, Apr. 2011, doi: 10.1007/S10853-010-5093-0.
- [95] J. W. Xian, S. A. Belyakov, T. B. Britton, and C. M. Gourlay, “Heterogeneous nucleation of Cu<sub>6</sub>Sn<sub>5</sub> in Sn-Cu-Al solders,” *J Alloys Compd*, vol. 619, pp. 345–355, Jan. 2015, doi: 10.1016/j.jallcom.2014.08.251.
- [96] T. Wang *et al.*, “Growth behavior of Cu<sub>6</sub>Sn<sub>5</sub> in Sn-6.5 Cu solders under DC considering trace Al: In situ observation,” *Intermetallics (Barking)*, vol. 58, pp. 84–90, 2015, doi: 10.1016/j.intermet.2014.11.010.
- [97] R. K. Kaushik, U. Batra, and J. D. Sharma, “Aging induced structural and electrochemical corrosion behaviour of Sn-1.0Ag-0.5Cu and Sn-3.8Ag-0.7Cu solder alloys,” *J Alloys Compd*, vol. 745, pp. 446–454, May 2018, doi: 10.1016/J.JALLCOM.2018.01.292.
- [98] L. C. Tsao and C. W. Chen, “Corrosion characterization of Cu–Sn intermetallics in 3.5 wt.% NaCl solution,” *Corros Sci*, vol. 63, pp. 393–398, Oct. 2012, doi: 10.1016/J.CORSCI.2012.06.015.
- [99] A. M. ERER, “Effect of bismuth addition on the corrosion dynamics of Sn–3Ag–0.5Cu solder alloy in Hydrochloric Acid Solution,” *International Journal of Innovative Engineering Applications*, Jun. 2021, doi: 10.46460/ijiea.911862.

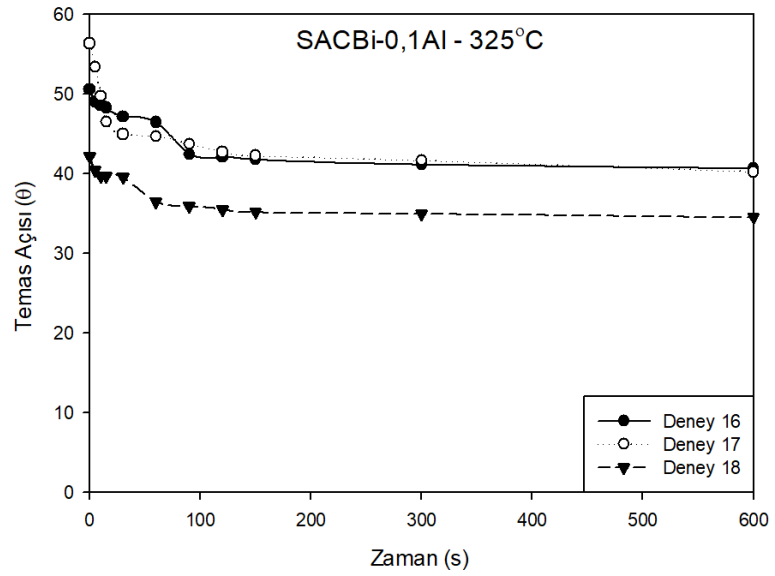
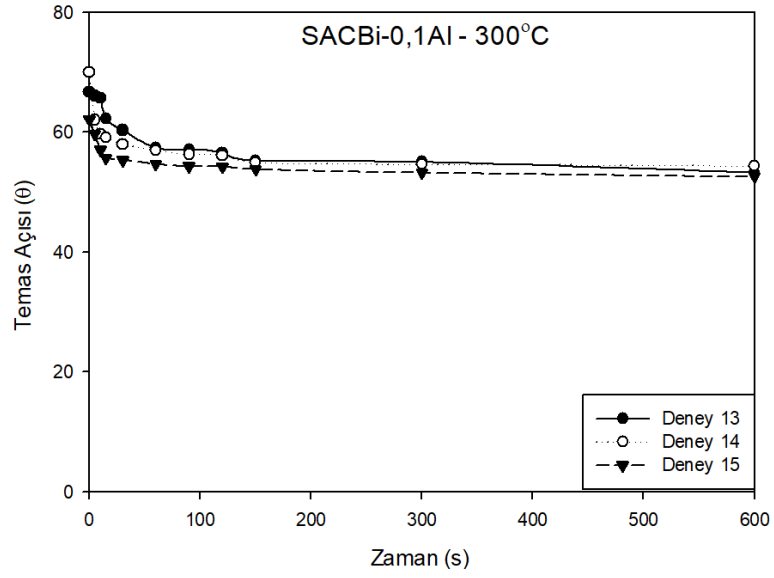
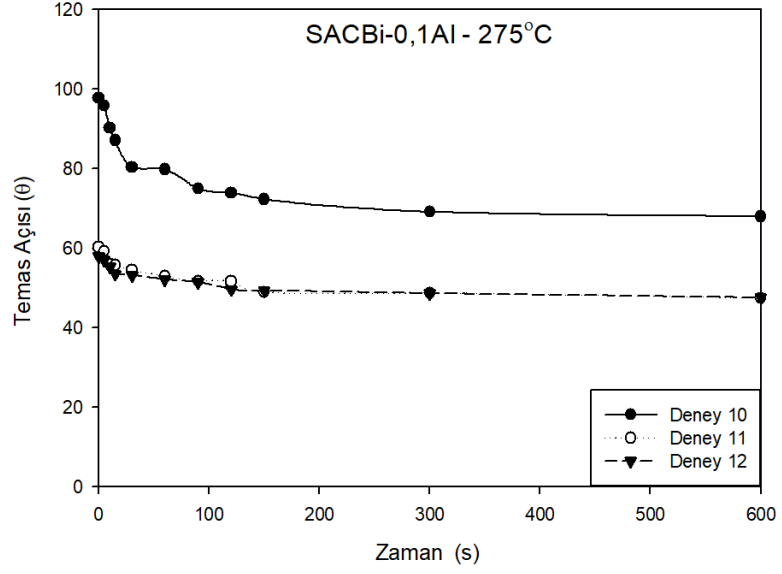
- [100] H. S. Abdo, A. H. Seikh, J. A. Mohammed, and M. S. Soliman, "Alloying Elements Effects on Electrical Conductivity and Mechanical Properties of Newly Fabricated Al Based Alloys Produced by Conventional Casting Process," *Materials* 2021, Vol. 14, Page 3971, vol. 14, no. 14, p. 3971, Jul. 2021, doi: 10.3390/MA14143971.
- [101] M. Drienovsky *et al.*, "Properties of Sn-Ag-Cu Solder Joints Prepared by Induction Heating," *Advances in Materials Science and Engineering*, vol. 2020, 2020, doi: 10.1155/2020/1724095.
- [102] A. M. Erer, E. Candan, M. H. Güven, and Y. Turen, "Measurement and prediction of contact angles of Pb-free Sn-Ag solder alloys on Cu substrate," *The European Physical Journal Applied Physics*, vol. 54, no. 1, p. 11302, Apr. 2011, doi: 10.1051/EPJAP/20111100487.
- [103] A. M. Erer, "Effect of bismuth addition on the corrosion dynamics of Sn3Ag\0.5Cu solder alloy in Hydrochloric Acid Solution," *International Journal of Innovative Engineering Applications*, vol. 5, no. 1, pp. 40–44, Jun. 2021, doi: 10.46460/IJIEA.911862.
- [104] Y. Wan *et al.*, "Shear strength and fracture surface analysis of Sn58Bi/Cu solder joints under a wide range of strain rates," 2018, doi: 10.1016/j.microrel.2018.05.007.

**EK AÇIKLAMALAR A.**

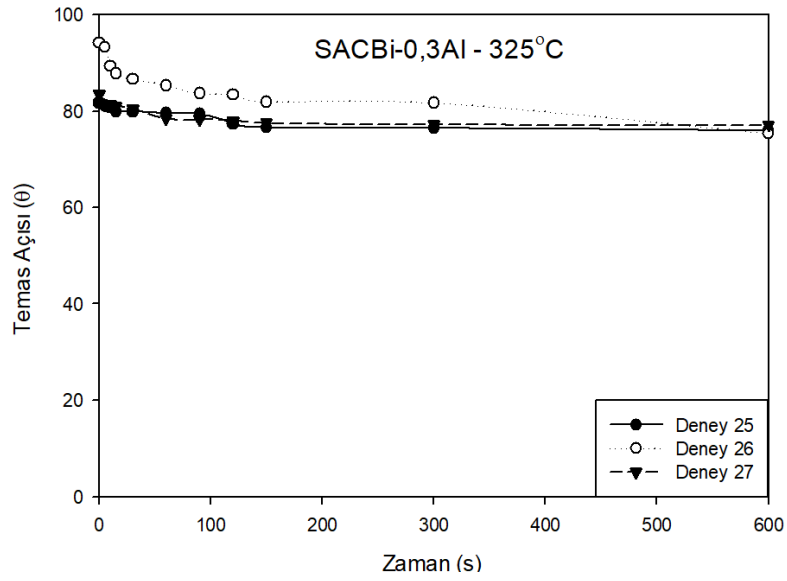
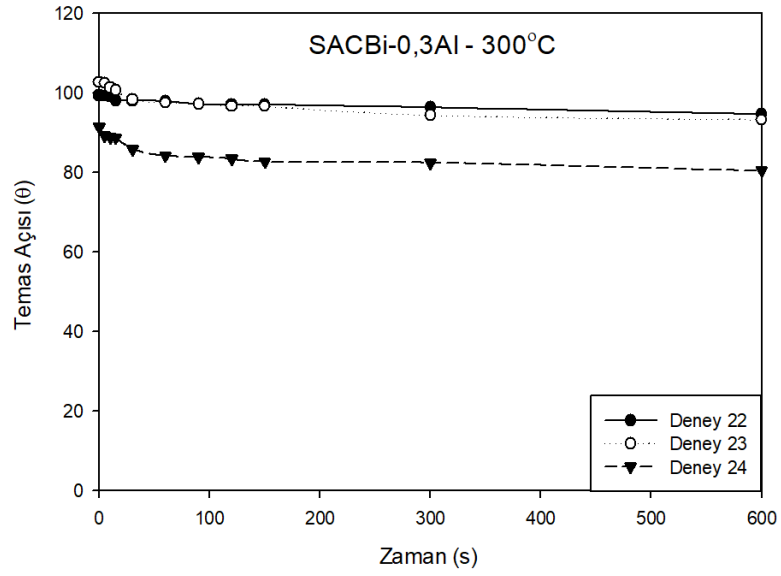
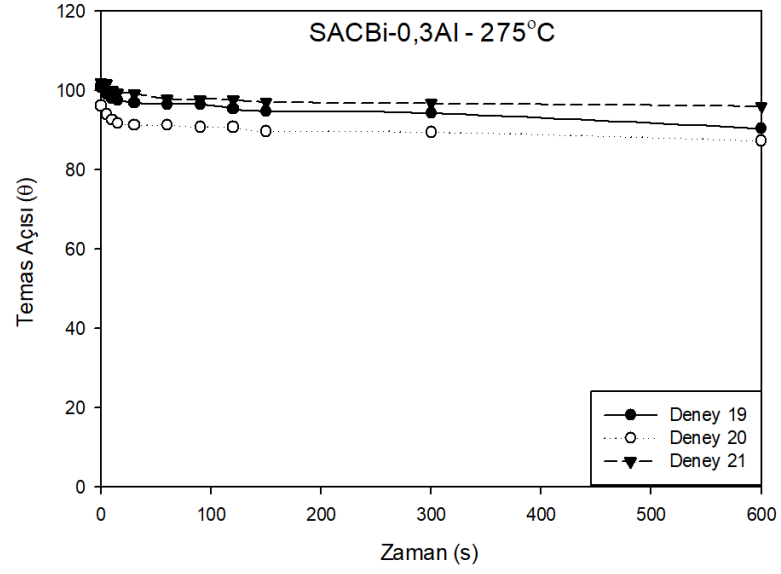
**TEMAS AÇI ÖLÇÜMLERİ**



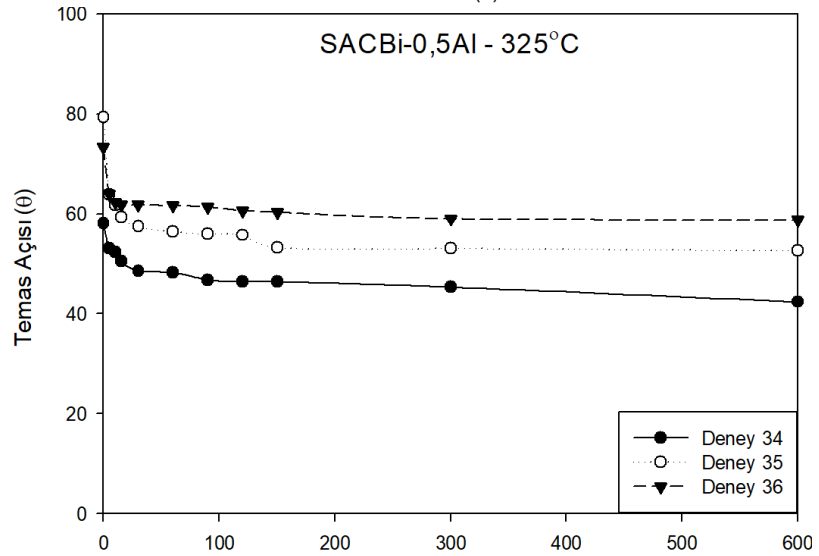
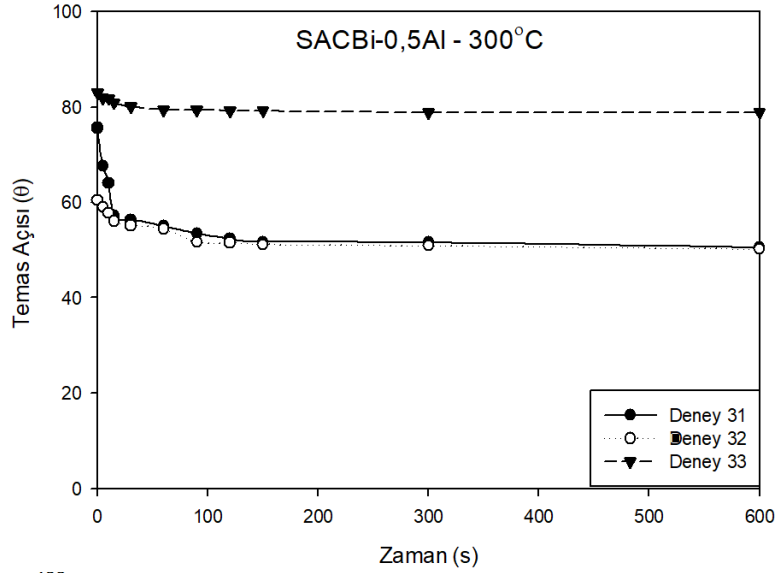
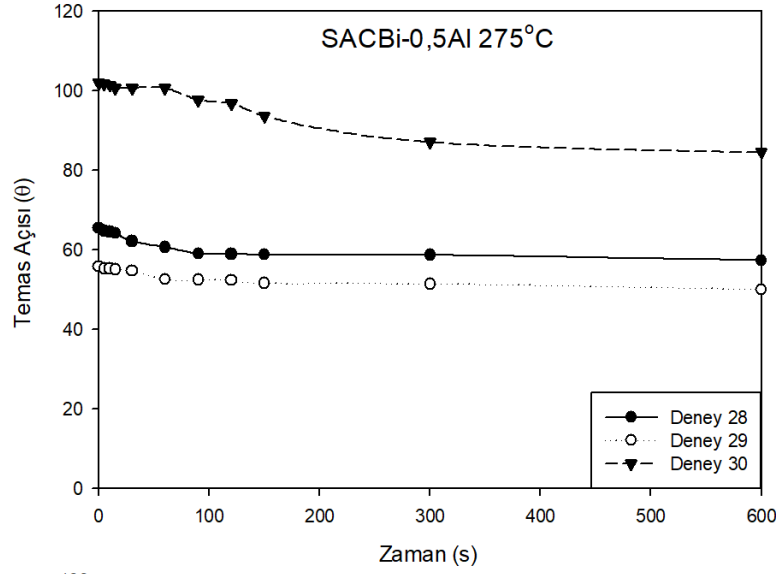
Şekil Ek A.1. SACBi-0,1Al alaşımının temas açısı ölçümleri.



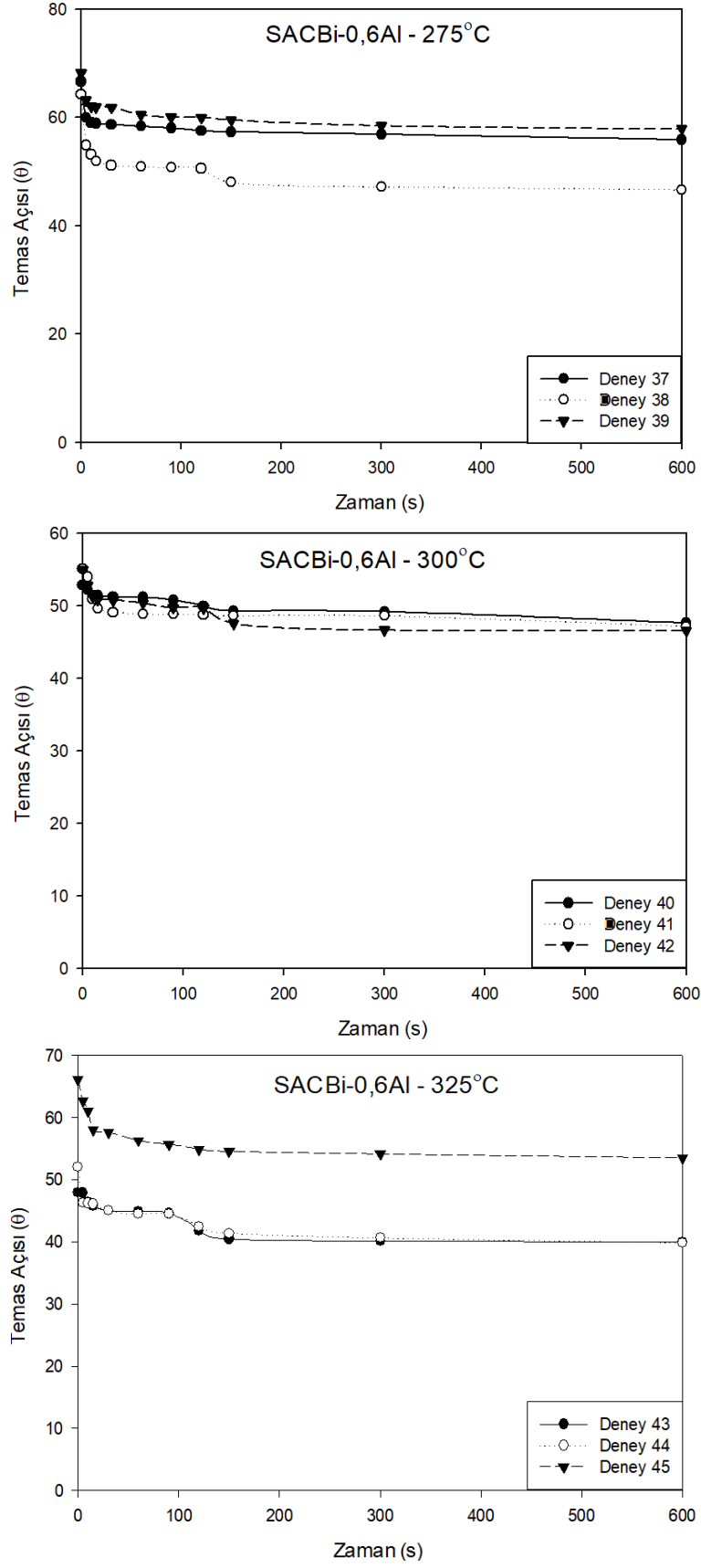
Şekil Ek A.2. SACBi-0,1Al alaşımının temas açısı ölçümleri.



Şekil Ek A.3. SACBi-0,3Al alaşımının temas açısı ölçümleri.



Şekil Ek A.4. SACBi-0,5Al alaşımının temas açısı ölçümleri.



Şekil Ek A.5. SACBi-0,6Al alaşımının temas açısı ölçümleri.



**EK AÇIKLAMALAR B.**

**ELEKTRİKSEL İLETKENLİK ÖLÇÜMLERİ**

Çizelge Ek B.1. SAC-1Bi lehim alaşımı için özdirenç hesaplaması.

V (Volt)	I (A)	R ( $\Omega$ )	Zaman	$\rho$ ( $\Omega\text{m}$ )
0	0,000632	0	0,099609	0
5,00E-06	0,000621	0,008054	0,261719	9,89E-08
5,00E-06	0,000621	0,008048	0,423828	9,88E-08
1,00E-05	0,000611	0,016374	0,586914	2,01E-07
1,50E-05	0,000592	0,025349	0,749023	3,11E-07
1,50E-05	0,000592	0,025349	0,912109	3,11E-07
2,00E-05	0,000583	0,034287	1,074219	4,21E-07
2,00E-05	0,000584	0,034262	1,237305	4,21E-07
2,50E-05	0,000582	0,042952	1,399414	5,27E-07
3,00E-05	0,000561	0,053439	1,561523	6,56E-07
3,00E-05	0,000566	0,053001	1,724609	6,51E-07
3,50E-05	0,000557	0,062865	1,886719	7,72E-07
4,00E-05	0,000539	0,074206	2,049805	9,11E-07
4,00E-05	0,000534	0,074968	2,211914	9,21E-07
4,50E-05	0,000525	0,085762	2,374023	1,05E-06
4,50E-05	0,000525	0,085762	2,537109	1,05E-06
5,00E-05	0,000511	0,097888	2,699219	1,20E-06
5,50E-05	0,000503	0,109392	2,862305	1,34E-06
5,50E-05	0,000505	0,108935	3,024414	1,34E-06
6,00E-05	0,000488	0,122945	3,187500	1,51E-06

Çizelge Ek B.2. SACBi-0.05Al lehim alaşımı için özdirenç hesaplaması.

V (Volt)	I (A)	R ( $\Omega$ )	Zaman	$\rho$ ( $\Omega\text{m}$ )
0	0,000693758	0	0,099609	0
5,00E-06	0,000662978	0,007541724	0,261718	9,444E-08
5,00E-06	0,000668039	0,007484597	0,424804	9,37E-08
1,00E-05	0,000655388	0,015258126	0,586914	1,91E-07
1,50E-05	0,000628404	0,023869982	0,750000	2,98E-07
1,50E-05	0,00062714	0,023918118	0,912109	2,99E-07
2,00E-05	0,000616177	0,032458212	1,074218	4,06E-07
2,00E-05	0,00061955	0,032281496	1,237304	4,04E-07
2,50E-05	0,000605214	0,04130768	1,399414	5,17E-07
3,00E-05	0,000572748	0,052379038	1,562500	6,55E-07
3,00E-05	0,000582025	0,051544219	1,724609	6,45E-07
3,50E-05	0,000565581	0,061883286	1,887695	7,74E-07
4,00E-05	0,000548294	0,072953582	2,049804	9,13E-07
4,00E-05	0,000550822	0,072618678	2,212890	9,09E-07
4,50E-05	0,000526368	0,085491471	2,375000	1,07E-06
4,50E-05	0,000522574	0,086112246	2,538085	1,07E-06
5,00E-05	0,000500649	0,099870428	2,700195	1,25E-06
5,50E-05	0,000490108	0,11222022	2,862304	1,45E-06
5,50E-05	0,000485892	0,113193922	3,025390	1,41E-06
6,00E-05	0,000471556	0,127238438	3,187500	1,59E-06

Çizelge Ek B.3. SACBi-0.1Al lehim alaşımı için özdirenç hesaplaması.

V (Volt)	I (A)	R ( $\Omega$ )	Zaman	$\rho$ ( $\Omega\text{m}$ )
0	0,000659637	0	0,099609	0
5,00E-06	0,000637711	0,007840536	0,261718	9,82E-08
5,00E-06	0,00063729	0,007845727	0,424804	9,82E-08
1,00E-05	0,00062211	0,016074333	0,586914	2,01E-07
1,50E-05	0,000598497	0,02506279	0,750000	3,14E-07
1,50E-05	0,000599762	0,025009919	0,912109	3,13E-07
2,00E-05	0,000593437	0,033701997	1,074218	4,22E-07
2,00E-05	0,000587956	0,034016166	1,237304	4,26E-07
2,50E-05	0,000576992	0,043328121	1,399414	5,42E-07
3,00E-05	0,000558439	0,053721141	1,562500	6,73E-07
3,00E-05	0,000555488	0,054006543	1,724609	6,76E-07
3,50E-05	0,000542417	0,064525984	1,887695	8,08E-07
4,00E-05	0,000517539	0,077288829	2,049804	9,68E-07
4,00E-05	0,000526393	0,075988784	2,211914	9,51E-07
4,50E-05	0,000509106	0,088390224	2,375000	1,11E-06
4,50E-05	0,000507841	0,088610403	2,537109	1,11E-06
5,00E-05	0,00048718	0,102631524	2,700195	1,28E-06
5,50E-05	0,000474109	0,116007119	2,862304	1,45E-06
5,50E-05	0,00047959	0,114681326	3,024414	1,44E-06
6,00E-05	0,000455134	0,131829351	3,187500	1,65E-06

Çizelge Ek B.4. SACBi-0.3Al lehim alaşımı için özdirenç hesaplaması.

V (Volt)	I (A)	R ( $\Omega$ )	Zaman	$\rho$ ( $\Omega\text{m}$ )
0	0,000666773	0	0,099609	0
5,00E-06	0,000646957	0,007728492	0,262695	9,68E-08
5,00E-06	0,000646113	0,007738579	0,424805	9,69E-08
1,00E-05	0,000636837	0,015702603	0,586914	1,97E-07
1,50E-05	0,000604793	0,024801882	0,750000	3,11E-07
1,50E-05	0,000611539	0,024528271	0,912109	3,07E-07
2,00E-05	0,000596361	0,033536751	1,075195	4,20E-07
2,00E-05	0,000596361	0,033536755	1,237305	4,20E-07
2,50E-05	0,000583711	0,042829394	1,400391	5,36E-07
3,00E-05	0,000565159	0,053082399	1,562500	6,65E-07
3,00E-05	0,000566003	0,053003296	1,725586	6,64E-07
3,50E-05	0,000550402	0,063589931	1,887695	7,96E-07
4,00E-05	0,00052932	0,075568631	2,050781	9,46E-07
4,00E-05	0,000527212	0,075870849	2,212891	9,50E-07
4,50E-05	0,000518357	0,086812705	2,375977	1,09E-06
4,50E-05	0,000514985	0,087381184	2,538086	1,09E-06
5,00E-05	0,000490529	0,101930745	2,700195	1,28E-06
5,50E-05	0,000483362	0,113786452	2,863281	1,42E-06
5,50E-05	0,000485048	0,113390908	3,025391	1,42E-06
6,00E-05	0,000456798	0,131348982	3,188477	1,64E-06

Çizelge Ek B.5. SACBi-0.5Al lehim alaşımı için özdirenç hesaplaması.

V (Volt)	I (A)	R ( $\Omega$ )	Zaman	$\rho$ ( $\Omega\text{m}$ )
0	0,000662136	0	0,099609	0
5,00E-06	0,000639368	0,007820222	0,261718	9,79E-08
5,00E-06	0,000643584	0,007768993	0,424804	9,73E-08
1,00E-05	0,000630513	0,015860096	0,586914	1,99E-07
1,50E-05	0,000598891	0,025046311	0,750000	3,14E-07
1,50E-05	0,000608167	0,02466429	0,912109	3,09E-07
2,00E-05	0,000594253	0,033655714	1,075195	4,21E-07
2,00E-05	0,000594253	0,033655714	1,237304	4,21E-07
2,50E-05	0,000584133	0,042798478	1,400390	5,36E-07
3,00E-05	0,000561786	0,053401083	1,562500	6,69E-07
3,00E-05	0,000560521	0,053521585	1,724609	6,70E-07
3,50E-05	0,000550824	0,063541181	1,887695	7,96E-07
4,00E-05	0,000519201	0,077041455	2,049804	9,65E-07
4,00E-05	0,000518358	0,077166773	2,212890	9,66E-07
4,50E-05	0,00050866	0,088467665	2,375000	1,11E-06
4,50E-05	0,000511612	0,087957352	2,537109	1,10E-06
5,00E-05	0,000484627	0,103172131	2,700195	1,29E-06
5,50E-05	0,000474508	0,115909621	2,862304	1,45E-06
5,50E-05	0,000466918	0,117793635	3,025390	1,47E-06
6,00E-05	0,000446258	0,13445133	3,187500	1,68E-06

Çizelge Ek B.6. SACBi-0.6Al lehim alaşımı için özdirenç hesaplaması.

V (Volt)	I (A)	R ( $\Omega$ )	Zaman	$\rho$ ( $\Omega\text{m}$ )
0	0,000644427	0	0,099609	0
5,00E-06	0,000619551	0,00807036	0,261718	1,01E-07
5,00E-06	0,000622501	0,00803211	0,423828	1,01E-07
1,00E-05	0,000611118	0,016363451	0,586914	2,05E-07
1,50E-05	0,000584133	0,025679071	0,749023	3,22E-07
1,50E-05	0,000587506	0,025531657	0,912109	3,20E-07
2,00E-05	0,000574014	0,034842383	1,074215	4,36E-07
2,00E-05	0,000572327	0,034945037	1,237304	4,38E-07
2,50E-05	0,000562629	0,044434216	1,399414	5,56E-07
3,00E-05	0,000537331	0,055831473	1,561523	6,99E-07
3,00E-05	0,000538175	0,055743944	1,724609	6,98E-07
3,50E-05	0,000528477	0,066228062	1,886718	8,29E-07
4,00E-05	0,000504865	0,079229042	2,049804	9,92E-07
4,00E-05	0,000508239	0,07870318	2,211914	9,85E-07
4,50E-05	0,000491795	0,091501586	2,375000	1,15E-06
4,50E-05	0,00049306	0,091266818	2,537109	1,14E-06
5,00E-05	0,000474929	0,105278865	2,699218	1,32E-06
5,50E-05	0,000463124	0,11875879	2,862304	1,49E-06
5,50E-05	0,000463123	0,118758835	3,024414	1,49E-06
6,00E-05	0,000442463	0,135604471	3,187500	1,7E-06

## ÖZGEÇMİŞ

Serkan OGUZ 2008-2013 yılları arasında Karabük Üniversitesi Fen Fakültesi Fizik Bölümü'nü okudu ve bitirdi. 2013 yılında Fen-Edebiyat Fakültesi'nde Pedagojik Formasyon Eğitimi'ni tamamladı.

2013-2018 yılları arasında Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Ana Bilim Dalı'nda Yüksek Lisans programını tamamladı. Yüksek Lisans dönemi boyunca yaptığı çalışmalar:

Çakmak, N., Oguz, S. and Ünlü, S. (2015), Cumhuriyet University Science Journal dergisinde “The Dependence Of Gamow-teller And Isobaric Analogue Resonances On The Mean Field Parameters”, (TR-Dizin)

Erer, A.M. and Oguz, S. (2015), 9<sup>th</sup> International Physics Conference of the Balkan Physical Union dergisinde “Wetting Properties of SAC305 Pb-Free Solder Alloy on Cu Substrate” (Özet Bildiri)

Erer, A.M. and Oguz, S. (2018), Engineering Science and Technology an International Journal dergisinde “Influence of Bismuth (Bi) Addition on Wetting Characteristic of Sn-3Ag-0.5Cu Solder Alloy on Cu Substrate” (SCI-Expanded)

Erer, A.M. and Oguz, S. (2018), AIP Conference Proceeding, “Effect of bismuth on wettability of Sn-2.5Ag-0.5Cu-0.5Bi quaternary solder alloy on Cu substrate” (Tam Metin Bilidiri)

Erer, A.M. and Oguz, S. (2018), 1<sup>st</sup> International Symposium on Light Alloys and Composite Materials “Influence of Bismuth (Bi) Addition on Wetting Characteristic of Sn-3Ag-0.5Cu Solder Alloy on Cu Substrate”



Doktora tez çalışması sürecinde Serkan OGUZ “(96,5-x)Sn-2Ag-0,5Cu-1Bi-xAl LEHİM ALAŞIMLARININ ARAYÜZEY ISLATMA VE FİZİKSEL ÖZELLİKLERİNİN GELİŞTİRİLMESİ” adlı projeye odaklandı. Karabük Üniversitesi'nde devam eden doktora eğitimi boyunca, Doç. Dr. Ahmet Mustafa ERER'in rehberliğinde Fizik Ana Bilim Dalı'nda araştırmayı sürdürdü. 2018-2024 yılları arasında Karabük Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nde Fizik Ana Bilim Dalı'nda Doktora programını tamamladı. Doktora dönemi boyunca yaptığı çalışmalar:

Erer, A. M., & Oğuz, S. (2020). "Wetting characteristic of Sn-(3-x)Ag-0.5Cu-xBi quaternary solder alloy systems." *Soldering & Surface Mount Technology*, 32(1), 19-23. DOI: 10.1108/SSMT-08-2018-0028 (SCI-Expanded)

Oguz, S., & Erer, A. M. (2022). "The Effect Of Indium Addition on The Corrosion Kinetics of Sn-3Ag-0.5Cu Alloy In HCl Acid Solution." *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi (ICAENS)* (TR Dizin)

Oguz, S., & Erer, A. M. (2022). "Studying The Wetting Properties of Sn-0.7Cu Binary Pb-free Solder Alloys on Cu Substrate." *2nd International Conference on Applied Engineering and Natural Science*. (Tam Metin)

Oguz, S., & Erer, A. M. (2023). "Effect of Melting Temperature on Wettability of (96.5-x)Sn-2Ag-0.5Cu-1Bi-xAl Solder Alloy Systems." *6th Pak-Turk International Conference on Emerging Technologies in the field of Sciences and Engineering*. (Tam Metin).

Oguz, S., & Erer, A. M. (2023). "Comparative Study of Effect of Melting Temperature on Wettability of Quinary Pb-free Solder Alloy." *6th International Iron & Steel Symposium*. (Tam Metin).

Oguz, S., & Erer, A. M. (2023). "Effect of Al addition on microstructure and wetting properties of quinary lead-free solder alloy systems." *Physica Scripta*. DOI: 10.1088/1402-4896/abcf72. (SCI-Expanded)

Oguz, S. OBAID, M.G., and ERER, A.M. “Effect of Al addition on the electrical conductivity of SAC-1Bi alloy”. *5th International Eurasian Conference on Science, Engineering and Technology (EurasianSciEnTech 2024), June 26-28, 2024.* (Tam Metin)

OBAID, M.G., Oguz, S. and ERER, A.M. “The Effect of Adding Al on the Electrical Conductivity of Lead-Free Solder Alloys SAC205-1In”. *5th International Eurasian Conference on Science, Engineering and Technology (EurasianSciEnTech 2024), June 26-28, 2024.* (Tam Metin)