



**Sn-0,7Cu İKİLİ KURŞUNSUZ LEHİM
ALAŞIMININ ISLATMA ÖZELLİKLERİNİN Cu
ALTLIK ÜZERİNDE İNCELENMESİ**

AWAM MAHMOOD RAMADHAN BAKR

**2021
YÜKSEK LİSANS TEZİ
FİZİK BÖLÜMÜ**

**Tez Danışmanı
Dr. Öğr. Üyesi Ahmet Mustafa ERER**

**Sn-0,7Cu İKİLİ KURŞUNSUZ LEHİM ALAŞIMININ ISLATMA
ÖZELLİKLERİNİN Cu ALTLIK ÜZERİNDE İNCELENMESİ**

AWAM MAHMOOD RAMADHAN BAKR

**T.C.
Karabük Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Fizik Anabilim Dalında
Yüksek Lisans Tezi
Olarak Hazırlanmıştır**

**Tez Danışmanı
Dr. Öğr. Üyesi Ahmet Mustafa ERER**

**KARABÜK
Haziran 2021**

Awam Mahmood Ramadhan BAKR tarafından hazırlanan “Sn-0,7Cu İKİLİ KURŞUNSUZ LEHİM ALAŞIMININ ISLATMA ÖZELLİKLERİNİN Cu ALTLIK ÜZERİNDE İNCELENMESİ” başlıklı bu tezin Yüksek Lisans Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Dr. Öğr. Üyesi Ahmet Mustafa ERER
Tez Danışmanı, Fizik Anabilim Dalı

.....

Bu çalışma, jürimiz tarafından Oy Birliği ile Fizik Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir. 25/06/2021

Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)

İmzası

Başkan : Prof. Dr. Aybaba HANÇERLİOĞULLARI (KÜ)

.....

Üye : Doç. Dr. Necla ÇAKMAK (KBÜ)

.....

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Ahmet Mustafa ERER (KBÜ)

.....

KBÜ Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulu, bu tez ile, Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Hasan SOLMAZ

.....

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.”

Awam Mahmood Ramadhan BAKR

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

Sn-0,7Cu İKİLİ KURŞUNSUZ LEHİM ALAŞIMININ ISLATMA ÖZELLİKLERİNİN Cu ALTLIK ÜZERİNDE İNCELENMESİ

AWAM MAHMOOD RAMADHAN BAKR

Karabük Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Fizik Anabilim Dalı

Tez Danışmanı:

Dr. Öğr. Üy. Ahmet Mustafa ERER

Haziran 2021, 73 sayfa

Bu çalışmada Sn-0,7Cu ikili kurşunsuz lehim alaşımının ıslatma özellikleri, 250, 280 ve 310 °C sıcaklıklarda, bakır (Cu) altlık üzerinde argon (Ar) ortamında incelenmiştir. Islatma açısı ıslatabilirlik derecesini gösteren önemli bir parametredir. Sessile damla yöntemi ile elde edilen temas açısı değerlerine göre, Sn-0,7Cu ikili kurşunsuz lehim alaşımının ıslatma özellikleri araştırılmıştır. Alaşım damlası görüntüleri yüksek hızlı kamera ile çekilmiş, Cu altlık üzerinde elde edilen damlaların temas açılarının (θ) ölçümünde “Corel Draw X5” programı kullanılmıştır. Elde edilen ıslatma açılarının zamana göre değişim grafikleri oluşturulmuştur. Bu grafikler incelendiğinde en düşük ıslatma açısı değerlerinin yüksek sıcaklıklarda elde edildiği görülmüştür.

Ergiyen lehim alaşımı damlasının Cu altlık üzerine düşmesi işlemi sırasında Sn-0,7Cu kurşunsuz lehim alaşımı Cu altlık ile reaksiyona girerek intermetalik bileşikler (IMC)

oluşturmaktadır. Yapılan X-ışını kırınım yöntemi (XRD), taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve enerji dağılımlı X-ışını spektroskopu (EDX) analizlerine göre, Cu₆Sn₅ ve Cu₃Sn IMC' leri gözlemlenmiştir.

En düşük temas açısı değeri, 310 °C sıcaklığında 57,54° olarak ölçölmüştür. Sonuç olarak, sıcaklık değerleri yükseldikçe temas açısı değerlerinin düştüğu tespit edilmiştir.

Anahtar Sözcükler : Kurşunsuz lehim, sessile damla yöntemi, ıslatma açısı, yüzey ve ara yüzey gerilimleri.

Bilim Kodu : 20210

ABSTRACT

M. Sc. Thesis

INVESTIGATION OF WETTING PROPERTIES OF Sn-0.7Cu BINARY Pb-FREE SOLDER ALLOY ON Cu SUBSTRATE

AWAM MAHMOOD RAMADHAN BAKR

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

Thesis Advisor:

Assist. Prof. Dr. Ahmet Mustafa ERER

June 2021, 73 pages

In this study, wetting properties of Sn-0.7Cu binary lead-free solder alloy were investigated in an argon (Ar) environment on copper (Cu) substrate at temperatures of 250, 280, and 310 °C. The wetting angle is an important parameter that shows the degree of wettability. According to the contact angle values obtained by the sessile drop method, wetting properties of Sn-0.7Cu binary lead-free solder alloy were investigated. Alloy drop images were taken with a high-speed camera, and the “Corel Draw X5” program was used to measure the contact angles (θ) of the drops obtained on the Cu substrate. Variation graphs of the obtained wetting angles over time were created. When these graphs were examined, it was seen that the lowest wetting angle values were obtained at high temperatures.

On the Cu substrate target of the molten solder drop, Sn-0,7Cu cures the lead-free alloy to react with the Cu substrate. Cu_6Sn_5 and Cu_3Sn IMCs were observed according to

the X-ray method (XRD), scanning electron microscope (SEM) and energy X-ray spectroscope (EDX) analyzes.

At the smallest value, it was determined as 310 °C and 57.54°. As a result, it was determined that the contact angle values decreased as the temperature values increased.

Key Words : Lead-free solder alloy, sessile drop method, contact angle, surface and interface tension

Science Code : 20210

TEŞEKKÜR

Bu tez alıőmasının planlanmasında, araőtırılmasında, yürütülmesinde ve oluşumunda ilgi ve desteğini esirgemeyen, engin bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım, yönlendirme ve bilgilendirmeleriyle alıőmamı bilimsel temeller ışığında şekillendiren sayın hocam Dr. Öğr. Üyesi Ahmet Mustafa ERER' e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Laboratuvar alıőmalarımdaki özverili desteğinden dolayı Fizik Bölümü doktora öğrencisi sayın Serkan OGUZ' a teşekkür ederim.

Sevgili aileme, manevi desteklerini esirgemedен yanımda oldukları için tüm kalbimle teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL.....	ii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xiv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xv
BÖLÜM 1	1
GİRİŞ	1
BÖLÜM 2	3
LEHİMLEME UYGULAMALARI	3
2.1. LEHİMLEME İŞLEMİ	3
2.1.1. Lehimlemede Etkili Olan Faktörler	5
2.1.2. Lehim Noktalarında Görülen Hatalar	6
2.1.3. Lehim Noktalarına Uygulanması Gereken Testler	11
2.1.3.1. Sıcaklık Çevrim Testleri	12
2.2. BAKIR VE ALAŞIMLARININ ÖZELLİKLERİ.....	14
2.2.1. Saf Bakırın Kullanım Alanları	14
BÖLÜM 3	17
TEORİK BİLGİ	17
3.1. SIVI METAL ALAŞIMININ KATI YÜZEYİ ISLATABİLİRLİĞİ.....	17
3.1.1. Temas Açısı	17
3.1.2. Temas Açısının Endüstriyel Uygulamaları.....	18
3.1.3. Temas Açısının Ölçüm Metotları	19

	<u>Sayfa</u>
3.1.3.1. Damla Ağırlığı Metodu.....	19
3.1.3.2. Maksimum Kabarcık Metodu	20
3.1.3.3. Wilhelmly Levha (Koparma) Metodu	22
3.1.3.4. Donnan Pipeti Metodu	23
3.1.3.5. Oscillating Jet Metodu	23
3.1.3.6. Kapiller (Kılcal) Yükselme Metodu	23
3.1.3.7. Pendant (Asılı) Damla Metodu	24
3.1.3.8. DuNoüy Halka Metodu.....	25
3.1.3.9. Sessile Damla Metodu	26
3.2. İLERLEME VE GERİLEME TEMAS AÇILARI.....	28
3.3. YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜ VE TEMAS AÇISI ARASINDAKİ İLİŞKİ	30
3.4. YERÇEKİMİNİN TEMAS AÇISI ÜZERİNDEKİ ETKİSİ.....	31
3.5. ISLATMANIN KİMYASAL REAKSİYONLAR İLE ARASINDAKİ İLİŞKİSİ.....	32
3.6. ADSORPSİYON	33
3.6.1. Adsorpsiyon Olayı.....	33
3.6.2. İyonik Adsorpsiyon	33
3.6.3. Kimyasal Adsorpsiyon.....	33
3.6.4. Fiziksel Adsorpsiyon	34
3.6.4.1 Polar Yüzeylerde Gerçekleşen Fiziksel Adsorpsiyon Olayı.....	35
3.6.4.2. Apolar Yüzeylerde Gerçekleşen Adsorpsiyon Olayı.....	35
3.7. ADEZYON VE KOHEZYON KUVVETLERİ.....	35
3.7.1. Adezyon Kuvveti	35
3.7.2. Kohezyon Kuvveti	37
3.8. LİTERATÜR İNCELEMESİ.....	38
 BÖLÜM 4	 42
DENEYSEL YÖNTEM.....	42
4.1. DENEY DÜZENEGİ	42
4.2. DENEYİN YAPILIŞI.....	43
 BÖLÜM 5	 48

	<u>Sayfa</u>
ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA	48
5.1. TEMAS AÇISI ÖLÇÜMLERİ.....	48
5.2. TARAMALI ELEKTRON MİKROSKOBU (SEM) GÖRÜNTÜLERİ VE KİMYASAL ANALİZ (EDX) SONUÇLARI	53
5.3. XRD ANALİZ VE SONUÇLARI	65
BÖLÜM 6	68
SONUÇLAR	68
KAYNAKLAR	69
ÖZGEÇMİŞ	73

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1. Lehimleme prosesinin adımları.....	4
Şekil 2.2. Yüzey Islanabilirliği.....	7
Şekil 2.3. Lehim boşalması	7
Şekil 2.4. Lehim boşluğu	8
Şekil 2.5. Üç aşamalı emme oluşumu	9
Şekil 2.6. Lehim yapılan noktalar arasında köprü oluşumunun aşamaları	9
Şekil 2.7. Dentrit oluşumu	10
Şekil 2.8. Alaşım elementlerinin etkilerinin şematik gösterimi.....	16
Şekil 3.1. Katı yüzey üzerindeki sıvı damlasının katı-sıvı, sıvı-gaz ve katı-gaz olmak üzere üç kuvvet ile dengelenmesi.....	18
Şekil 3.2. Traubestalogmometresi.....	20
Şekil 3.3. Maksimum kabarcık yöntemi	21
Şekil 3.4. Wilhelmy plaka yöntemi ile sıvı yüzey geriliminin belirlenmesi.....	22
Şekil 3.5. Kılcal yükselme işlemi için ara yüzey geriliminin ölçülmesi.....	24
Şekil 3.6. Pendant (asılı) damla.....	25
Şekil 3.7. a) DuNoüy tensiometresi b) arayüz gerilmesinin halka metodu ile ölçülmesi	26
Şekil 3.8. Katı yüzey üzerine düşen sıvı damlanın koordinat sistemi.....	27
Şekil 3.9. İlerleyen ve gerileyen temas açıları	29
Şekil 3.10. a) İlk katı maddenin, sıvının bütün birleşenleri ile ya da bir parçası ile sarılması b) ilk sıvı maddenin, katının bütün bileşenleri ile ya da bir parçası ile ıslanması	32
Şekil 3.11. Fiziksel adsorpsiyona uğramış moleküller.....	34
Şekil 3.12. Kılcallık hareketi.....	36
Şekil 3.13. Kohezyon kuvveti	37
Şekil 4.1. Deney setinin parçaları ve düzeneğin kurulmuş hali	42
Şekil 4.2. Sn-0,7Cu lehim alaşımının 250 °C' de temas açısı.....	45
Şekil 4.3. Sn-0,7Cu lehim alaşımının 280 °C' de temas açısı.....	46
Şekil 4.4. Sn-0,7Cu lehim alaşımının 310 °C' de temas açısı.....	47

Şekil 5.1. Sn-0,7Cu kurşunsuz lehim alaşımının 250 °C sıcaklıkta zamana bağlı temas açısı değerleri	48
Şekil 5.2. Sn-0,7Cu kurşunsuz lehim alaşımının 250 °C sıcaklıkta Deney1-Deney2-Deney3 değerlerinin zamana bağlı temas açısı değerleri	49
Şekil 5.3. Sn-0,7Cu kurşunsuz lehim alaşımının 280 °C sıcaklıkta zamana bağlı temas açısı değerleri	50
Şekil 5.4. Sn-0,7Cu kurşunsuz lehim alaşımının 280 °C sıcaklıkta Deney1-Deney2-Deney3 değerlerinin zamana bağlı temas açısı değerleri	50
Şekil 5.5. Sn-0,7Cu kurşunsuz lehim alaşımının 310 °C sıcaklıkta zamana bağlı temas açısı değerleri	51
Şekil 5.6. Sn-0,7Cu kurşunsuz lehim alaşımının 310 °C sıcaklıkta Deney1-Deney2-Deney3 değerlerinin zamana bağlı temas açısı değerleri	51
Şekil 5.7. Sn-0,7Cu kurşunsuz lehim alaşımının 250, 280 ve 310 °C sıcaklıkta zamana bağlı temas açısı değerleri	52
Şekil 5.8. Sn-0,7Cu kurşunsuz lehim alaşımının 250 °C deki SEM görüntüsü	53
Şekil 5.9. Sn-0,7Cu kurşunsuz lehim alaşımının 280 °C deki SEM görüntüsü	54
Şekil 5.10. Sn-0,7Cu kurşunsuz lehim alaşımının 310 °C deki SEM görüntüsü	54
Şekil 5.11. Sn-0,7Cu kurşunsuz lehim alaşımının 250 °C deki SEM-EDX görüntüsü	57
Şekil 5.12. Sn-0,7Cu kurşunsuz lehim alaşımının 280 °C deki SEM-EDX görüntüsü	61
Şekil 5.13. Sn-0,7Cu kurşunsuz lehim alaşımının 310 °C deki SEM-EDX görüntüsü	65
Şekil 5.14. Sn-0,7Cu kurşunsuz lehim alaşımının Cu için XRD analizi	65
Şekil 5.15. Sn-0,7Cu kurşunsuz lehim alaşımının Cu ₃ Sn için XRD analizi	66
Şekil 5.16. Sn-0,7Cu kurşunsuz lehim alaşımının Cu ₆ Sn ₅ için XRD analizi	66
Şekil 5.17. Sn-0,7Cu kurşunsuz lehim alaşımının Sn için XRD analizi	67

ÇİZELGELER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 4.1. Deney düzeneğini oluşturan parçalar	43
Çizelge 5.1. Sn-0,7Cu temas açısı ölçümleri	53

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER

Sn	: kalay
Ag	: gümüş
Cu	: bakır
Pb	: kurşun
Zn	: çinko
Bi	: bizmut
In	: indiyum
Ar	: argon
Al	: alüminyum
θ	: temas açısı
θ_a	: ilerleyen temas açısı
θ_r	: gerileyen temas açısı
θ_e	: kutupsal açı
m	: kütle
h	: yükseklik
r	: yarıçap
b	: yüzey eğim yarıçapı
g	: yerküre çekim sabiti
γ	: arayüzey gerilimi
W_K	: levhanın koptuğu anda terazide saptanan değer
W	: levha ağırlığı
w	: levha uzunluğu
d	: levha genişliği
$\Delta\rho$: temas halinde iki polimer yoğunlukları arasındaki fark
R_1	: x-z koordinatlarının kesişme noktasındaki eğrilik yarıçapı
γ_{KG}	: katı-gaz arasındaki arayüzey gerilimi

- γ_{KS} : katı-sıvı arasındaki arayüzey gerilimi
 γ_{SG} : sıvı-gaz arasındaki arayüzey gerilimi
 ρ : sıvı yoğunluğu
 ΔP : yükselen sıvının hidrostatik basıncı
 Δp : buhar basıncı
 $P_{mak.}$: maksimum kabarcık basıncı
 P_{hyd} : hidrostatik basınç
 $P_{kılcal}$: kılcal basınç
Cd : kadmiyum
Hg : civa
Cr (VI): hexavalent krom
PBB : polibromlu bifenil
PBDE : polibromlu difenil eter

KISALTMALAR

RoHS : Restriction of The Use of Certain Hazardous Substances (Sağlığa Zararlı Maddelerin Kısıtlanması)

WEEE: Waste Electrical and Electronic Equipment (Atık Elektrik ve Elektronik Cihazlar)

SEM : Scanning Electron Microscope (Taramalı Elektron Mikroskopu)

XRD : X-Ray Diffraction (X-Işını Kırınımı)

DSC : Differential Scanning Calorimetry (Diferansiyel Taramalı Kalorimetre)

EDX : Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy (Enerji Dağımlı X-Işını Spektrosbu)

AFM : Atomic Force Microscopy (Atomik Kuvvet Mikroskopisi)

XRF : X-Ray Fluorescence (X-Ray Floresansı)

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Lehimleme işleminde bağlantılar elektriksel, mekanik ve termal olmak üzere üç ana fonksiyonu yerine getirir. Aynı zamanda, birbirine bağlanan iletken malzemelere mekanik olarak da destek sağlamaktadır. Elektronik devrelerindeki parçalara binen yük arttıkça, sistemin performansının etkilenmesinin önüne geçen devre parçaları ile ısı dağılımı işlevine de yardımcı olur. Elektronik ürünlerin düzgün ve sağlıklı biçimde çalışması, bu ufak ve sayıları oldukça fazla lehimlerin, ürünün kullanım ömrü boyunca, değişebilen kullanım koşullarında sağladığı güvenli bağlantılara bağlıdır. Elektronik endüstrisindeki lehim işlemlerinde bağlantılar öncelikle kalay (Sn) ve kurşun (Pb) alaşımlarından yapılmıştır. Özellikle ötektik kalay kurşun alaşımı Sn-37Pb (%63 Sn ve %37 Pb ağırlıkta), maliyet, kullanılabilirlik, kullanım kolaylığı, elektrik, termal, mekanik ve kimyasal özelliklerinden dolayı genel olarak sadece elektronik malzemeler de kullanılmıştır [1].

Son yıllarda bilim insanları, kurşunlu lehimlerin inşa ve çevreye zararlarının bulunmasından dolayı lehimleme yönteminde zararlı olmayan ve kurşunlu lehim yerine kullanılacak kurşunsuz lehim alaşımlarını yapabilmek adına büyük çaba harcayarak çalışmalar yapmaktadır. Bu çalışmalar; Avrupa ve Avrupa Birliği (AB) tarafından insan ve çevre sağlığına zararlı olabilecek maddelerin önüne geçilmesi (RoHS) direktifleri ve atık elektriksel ve elektronik cihaz (WEEE) yönergeleri ile desteklenmiştir. Şu ana kadar üretilen ve kullanılan ikili ve üçlü kurşunsuz lehim alaşımları ile lehimleme işlemlerinin analizlerine bakılarak, yapılan işlemlerin içinden iki alaşım grubunun, kurşunlu lehim işleminin yerini alabilecek potansiyelinin olduğu öngörülmektedir. Birinci grup, farklı metallerin eklenmesi ile kalay, gümüş (Ag), bakır (Sn-Ag-Cu (SAC)) sistemine dayandırılan alaşımlardır [2,3]. Bakır, gümüş, indiyum (In), antimon (Sb) ve bizmut (Bi) gibi eklemeler içeren kalay-çinko (Sn-Zn) alaşımları ikinci gruptur [4,5]. Zhao ve diğerleri [6] ile Kim ve Jung [7] yapmış oldukları

alışmalarında, SAC alaşımı için mekanik ve teknolojik özelliklerin (ıslanabilirlik, aşınma vb.) genelinin tektik Sn-37Pb lehim alaşımının özelliklerine benzer olduğunu göstermişlerdir.

Bu alışmada, Sn-0,7Cu kurşunsuz lehim alaşımının önceden belirtilen sıcaklıklarda (250, 280 ve 310 C) elektrik ve elektronik endüstrisinde yaygın olarak kullanılan Cu altlık üzerinde sessile damla yöntemi kullanılarak ıslatma açıları llmştr. İgili Sn-0,7Cu kurşunsuz lehim alaşımı için XRD, SEM ve EDX analizleri yapılarak mikro yapıları incelenmiştir.

BÖLÜM 2

LEHİMLEME UYGULAMALARI

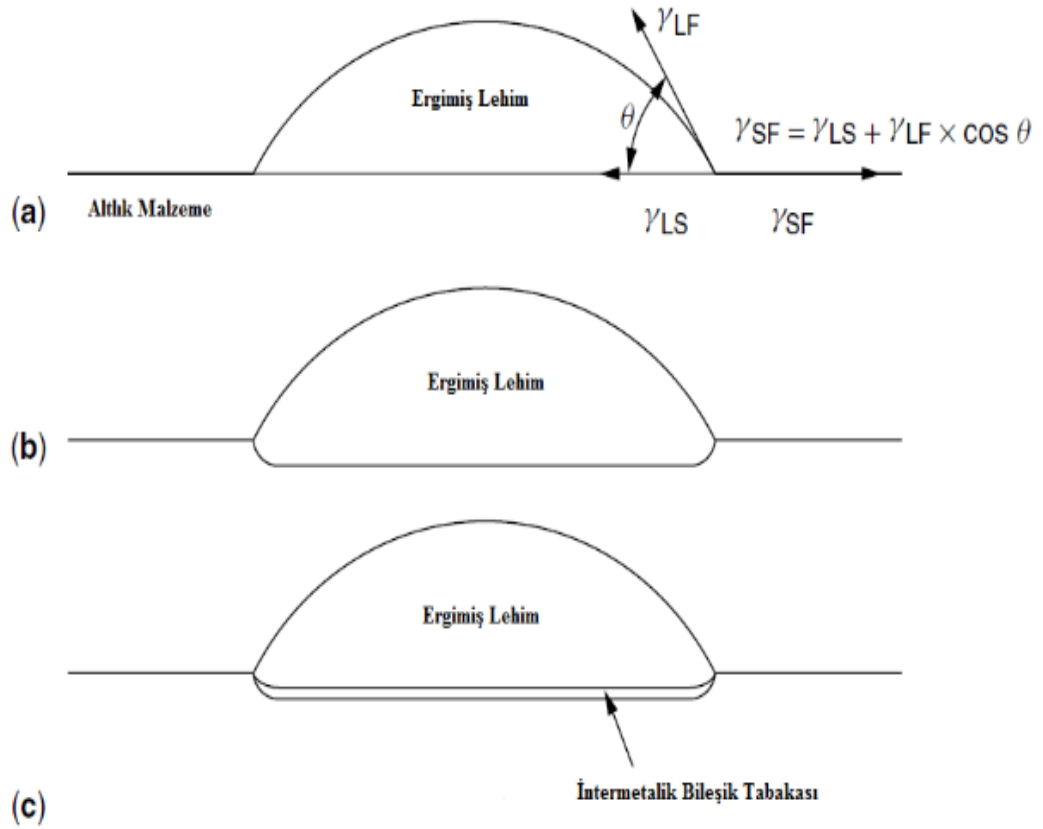
2.1. LEHİMLEME İŞLEMİ

Lehimleme işlemi, iki metalik parçanın, ikisinden de daha düşük ergime ısısına sahip bir parçanın yardımı ile birbirlerine bağlanmasıdır. Bu bağlanma işleminin gerçekleşebilmesi için; lehimin yüzeyin her yerine yayılmasını (kaplamasını) sağlayacak yüzey oksit temizleyici (flaks), birleştirmeyi gerçekleştirmek için uygun olan lehim alaşımı ve lehim alaşımını ergitip yüzeylerin birleştirilmesini sağlamak için de uygun ısının olması gerekmektedir. Birleştirme işlemi, lehimlenmesi gereken yüzeyler ve ergitilmiş lehim alaşımı arasındaki reaksiyona bağlıdır [8].

Lehimleme prosesi; ön temizleme ve flaks uygulanması, ön ısıtma, ön temas sıralaması ile lehimleme aşamalarından oluşmaktadır. Ön temizleme işlemi yüzeydeki toz, kir, leke ve oksit tabakasının ortadan kaldırılması için gerçekleştirilir. Lehim olacak yüzey, zımparalama ve fırçalama işlemi yapılarak mekanik olarak temizlenir, flaks uygulanması ile de kimyasal temizlik yapılır. Flaksların aktifleşerek yüzeydeki oksit tabakasının temizlenebilmesi ve lehim alaşımının kısa sürede soğumasının önüne geçebilmek adına lehim alaşımlarının ergime sıcaklığının 20-30 °C altında ön ısıtma işlemi gerçekleştirilmektedir [9].

Lehim yapılacak alanın daha iyi ıslanabilmesi ve yüzey temizliği yapılabilmesi için ön temas işlemi yapılır. Ön temas genel olarak oksitlenmesi daha güç metallerde yapılmaktadır. Kalay ön temas işlemi yapılırken yaygın olarak kullanılmakta olan bir metaldir. Ön temizleme, ön ısıtma ve ön temas yapıp lehimleme işlemine hazır hale getirilen yüzeylerin ergime ısısının 20-30 °C üzerine de ısıtılmış olan lehim alaşımı tarafından ıslatılarak, parçaların arasındaki boşlukların doldurulup ve birleştirilmek istenen parçalar arasındaki bağların oluşturulması ile lehimleme işlemi

gerçekleştirilmiş olur. Lehimleme işlemi üç aşamada gerçekleştirilir. İlk aşama lehim taban parçasının üzerine ergitilip, ara yüzey gerilimini dengeleyebilmek için temas açısıyla (θ) yayılmalıdır. İkinci aşamada taban malzemesi ergimiş lehimin içerisinde çözdürülür ve reaksiyona girerek ara yüzeyde yeni bileşime sahip bir tabaka oluşturmaktadır. Şekil 2.1’ de lehimleme prosesi gösterilmiştir. Lehim alaşımının, kullanılan parçalar arasındaki boşlukları uygun bir şekilde doldurmasının ardından ısıtma işlemi durdurulur ve bileşenleri sabit tutularak soğuması sağlanır. Soğuma işlemi, istenilen mikroyapı ve lehimlenecek komponentlerin termal dayanımları da düşünülerek kontrollü olarak gerçekleştirilir [10,11].



Şekil 2.1. Lehimleme prosenin adımları.

- (a) lehimin altlık malzemesi üzerine ergitilmesi ve yayılması,
- (b) altlık malzemelerinin ergimiş lehim içinde çözünmesi,
- (c) altlık malzemesi ve ergimiş lehimin reaksiyona girip intermetalik bileşik tabakası oluşturması [11].

Lehimleme işleminin de sıcaklığın, lehim parçalarının ergime sıcaklığından yüksek, birleştireceği parçaların ergime sıcaklığından düşük olması gerekmektedir. Lehim yapılan bağlantının maruz kalacağı işletme sıcaklığı, lehimin ergime sıcaklığından düşük olmalıdır. Parçaların birleşmesini sağlayan lehim alaşımının ergime sıcaklığı 450 °C' nin altında ise bu birleştirme işlemi lehimleme, lehim malzemesinin ergime sıcaklığı 450 °C' nin üzerinde ise birleştirme işlemi sert lehimleme olarak adlandırılmıştır [12].

2.1.1. Lehimlemede Etkili Olan Faktörler

Yapılmakta olan lehimleme işleminin kaliteli olabilmesi dolgu malzemesiyle birleştirilecek malzemelerin kombinasyonuna, birleştirilecek olan malzemelere uygulanan yüzey kaplamalarına ve proses koşullarına da bağlıdır. Bu sebepten ötürü kaliteli bir Lehimleme sürecinde meydana gelebilecek metalurjik değişimlerin ve faz oluşumlarının anlaşılabilmesi büyük önem taşımaktadır. Katı olan yüzeylerin mekanik özellikleri (oksitlerin ya da diğer kaplamaların doğası, yüzey sertliği), lehimleme işlemleri sırasında gerçekleşen ısı gradyanı, dolgu malzemesi ve ana bileşen arasındaki etkileşimler, lehim alaşımlarının ve lehimleme yapılacak yüzeylerde kullanılan flakslarla kimyasal reaksiyonları da göz önünde bulundurulması gereken önemli bir faktördür. Lehimleme prosesinde etkin olarak rol alan faktörler aşağıdaki gibi sıralanmıştır:

- Yüzey enerjisi ve yüzey gerilmesi
- Ön temas ve kaplama gereklilikleri
- Lehim alaşımlarının kimyasal kompozisyonu
- Altlık veya lehimleme yapılan parçaların cinsi, lehim alaşımları içindeki çözünürlük davranışı
- Lehimleme işlemi sonrasındaki alaşımların kompozisyonundaki değişimler ve fazların davranışları
- Temas ve temas açıları
- Sıvı halleri ve akışkanlıkları (yoğunluk – vizkozite)
- Bileşenlerin yüzey sertlikleri

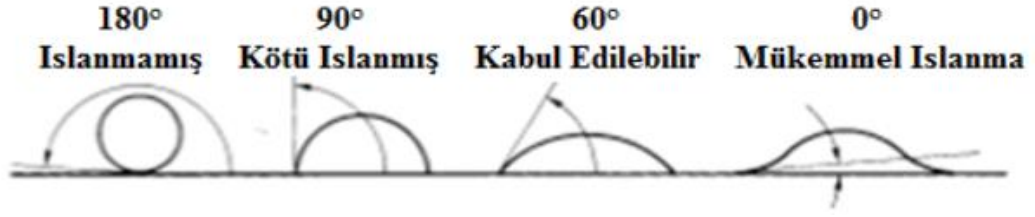
- İntermetalik oluşumu ve mekanizması
- Bağlantı noktalarının aralarındaki oluşabilecek boşluklar, tam ergimeme durumu, ıslatmama
- Alaşımda ve altlık malzemesinde yer alan metalik değerlerin kompozisyon içerisindeki etkileşimi, lehimlemeden önceki ve sonrasındaki dağılımları [12].

2.1.2. Lehim Noktalarında Görülen Hatalar

Lehimleme işlemleri yapılırken görülebilen hatalar, metalürjik ve düzgün yapılmayan lehim noktaları olarak iki ayrı grup da incelenir. Metalürjik hatalar; soğuk lehim, ıslanmama durumu, lehimin boşalması, çözünme ve aşırı metaller arası (intermetalik) oluşumudur. Düzgün yapılmayan lehim alanlarında ise boşluk, çarpıklık, emme, köprü kurma, tam yapışmama-açılma durumu, lehimin topaklanması, sıçrama veya lehim kabarcıklarıdır. Lehimleme işlemlerinden sonra görülebilen problemler ise; beyaz kalıntı, yanma kalıntıları, zayıf temas, yüzey izolasyonunun direnci, elektro ve kimyasal yer değiştirme hataları ve boşluktur [11].

Lehimin gerektiği kadar ısınmaması ile oluşacak olan yetersiz lehimleme durumu soğuk lehimleme olarak ifade edilir. Soğuk lehimlemenin sebepleri; yeteri kadar ısınmama, soğuma sırasında müdahale, lehim yüzeyindeki kontaminasyonlar ve yeteri kadar flaks kullanılmaması olarak sıralanabilir. Yetersiz olan ısıtmanın nedeni, lehimleme yapılırken uygun ısıya çıkılmaması veya uygun ısıda yeteri kadar kalınmamasıdır. Özellikle katılaşmadaki gerekli sıcaklığın hemen altındaki sıcaklık durumlarında lehimde veya lehimleme yapılan parçalarda meydana gelebilecek mekanik müdahaleler soğuk lehimlemeye neden olmaktadır.

Ergimiş lehim alaşımlarının yüzeyi ıslatmaması veya yüzeyi kaplayan lehimin yüzeyle ince intermetalik tabaka oluşturamaması durumları ıslanmama olarak adlandırılır. Islanmama durumunun nedenleri; yüzeylerin ıslanabilme karakterleri, uygun olmayan lehim alaşımları, flaksın verimli çalışmama durumu veya uygun olmayan ısıtma yöntemi olabilir.



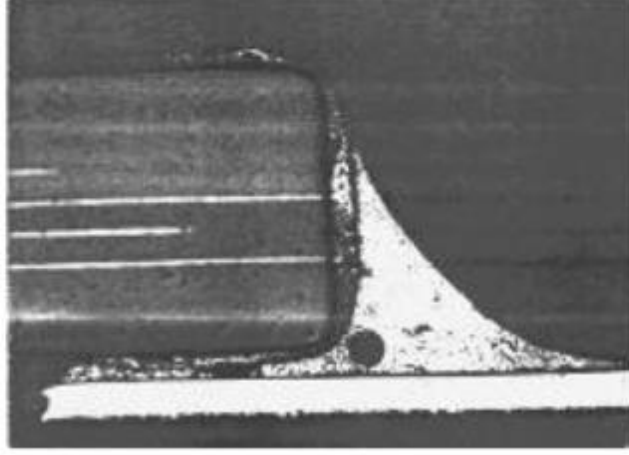
Şekil 2.2. Yüzey ıslanabilirliği [11].

Lehimin boşalma durumu, yüzeyi ıslatan lehimin proses tamamlanamadan yüzeyden kalkmasıdır. Bu hatanın nedeni; yüzeyin ıslanabilme karakteri, gaz çıkışı veya uygun olmayan ısıtma yöntemidir. Şekil 2.3'te lehim boşalması örneklenmiştir.



Şekil 2.3. Lehim boşalması.

Çözünme hatası, birleştirilmekte olan metallere birinin ergimiş lehimin içerisinde çözünmesidir. Çözünmenin nedenleri, lehim yapılacak metalin, lehimin içerisinde çözünürlüğünün yüksek olması, fazla flaks etkinliği, lehim yapılacak malzemenin çok ince olması, lehimleme ısısının yüksek olması veya lehimleme ısısında uzun süre kalınması olabilir. Lehimleme işlemi sırasında lehimin çekilmesi, verimsiz flaks etkinliği veya gaz çıkışından kaynaklanmış olan boşluklar, lehim yapılan noktanın mekanik özelliklerini olumsuz yönde etkilemektedir. Şekil 2.4'te lehimleme işlemi sırasında oluşan boşluk gösterilmektedir.



Şekil 2.4. Lehim boşluğu.

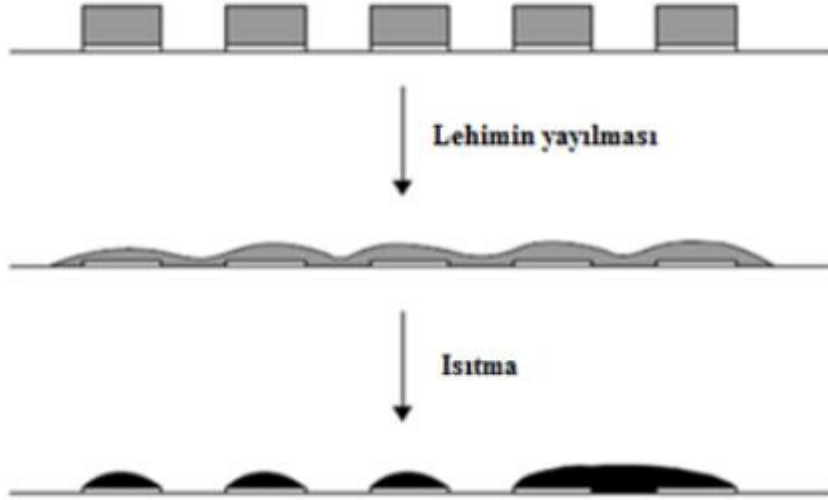
Birbiri içerisinde sınırlı çözünürlüğe sahip olan metallerin meydana getirmiş olduğu alaşımlarda, katılaşma durumlarında yeni fazlar oluşabilir. Kullanılan lehim alaşımının ergime noktasından öteye geçilmesiyle ve ısıtma sürecinin artması ile intermetalik oluşumu hızlanmaktadır. İntermetaliklerin oluşum miktarını etkilemekte olan en önemli faktörler zaman ve ısı durumudur. Bunlardan dolayı lehimleme süreci uzadıkça intermetalik oluşumu hızı da artmaktadır. Ayrıca intermetalik oluşumunda, lehim yapılacak parçaların kaplaması da önemli bir etkidir. Kaplamada bulunan Ni, Ag, Co ve Fe gibi metaller zaman ve ısısında etkisiyle çökerek $FeSn_2$, $CoSn_2$ gibi intermetalik bileşikler oluşturmaktadırlar. Isıtma sürecinde lehim bileşenlerinin yüzmesi sonucu lehim yapılacak parçaların kayması ve asimetric lehim yapılması sonucu çarpıklık meydana gelmektedir. Bu durum, parçaların lehim yapılacağı yerlerdeki yüzeysel geriliminin dengesiz olması durumunda oluşmaktadır. Ayrıca lehim yapılacak yüzeylerin kaplamalarının zayıf lehimlenebilirliğe sahip olmalarından ve lehim yapılacak uçlarının çok dar olmalarından da kaynaklanmaktadır.

Emme hataları ergimiş lehimlerin, kurşun bileşenini ıslatması ve lehim yapılacak noktadan kurşun bileşeni üzerine birikerek lehim boşluğu meydana getirmesidir. Bu olay Şekil 2.5' te ki gibi üç aşamada gerçekleşmektedir. Birinci aşamada ergimiş lehim, kurşun bileşenini ıslatır. İkinci olarak ergimiş lehim, kurşun bileşeni üzerine birikir ve üçüncü aşamada da lehim boşluğu oluşur.



Şekil 2.5. Üç aşamalı emme oluşumu.

Lokal olarak fazla lehim kullanılması sonucunda lehim noktaları köprü oluşturmaktadırlar. Aşırı miktarda pasta kullanılması, fazla olan pastanın akması ve yayılmasıyla da lehim yapılan noktalara aşırı kuvvet uygulanması sonucunda köprü oluşumu görülmektedir. Köprü oluşumu Şekil 2.6' da örneklenmiştir.



Şekil 2.6. Lehim yapılan noktalar arasında köprü oluşumunun aşamaları [11].

Uygulamanın yapıldığı noktalarda yapışmama -açılma, soğuk lehim oluşumu, yeteri kadar ıslanmama, hatalı flaks uygulamaları, düşük lehimleme ısısı veya oksitli ve kirli yüzey gibi nedenlerden dolayı meydana gelmektedir.

Lehimleme işlemleri sürecinde, bir miktar lehimin, ana lehim fazından ayrılarak katılmış olması ve proses sonrasında katılmış olan ana fazla bir daha birleşmemesi

durumlarında lehim topaklanması gerçekleşmektedir. Gözle ayırt edilememekte olan bu durumlar, lehim yapısının mekanik özelliklerini negatif yönde etkilemektedirler. Lehim topaklanmasının muhtemel nedenleri; ısıtma yönteminin uygun olmaması, flaks etkinliğinin az olması veya lehimin aşırı oksitlenmesi olabilmektedir. Flaks veya lehim, lehim noktasından birkaç mm uzağa sıçrayabilmektedir ve sıçrama sonucunda kürecikler oluşmaktadır. Bu kürecikler lehim yapılan parçaların bozulmasına neden olabilir. Ayrıca kürecikler bükülemez, elektriğin iletkenliğini düşürür ve de oksitlenmeye yatkındırlar.

Lehimleme işlemleri tamamlandıktan sonra flaks kalıntılarını ortadan kaldırmak için yapılan temizliğe rağmen halen yüzeyde beyaz kalıntılar duruyor olabilir. Bu kalıntıların nedeni kullanılmakta olan flaksın uygun olmamasıdır.

Elektrokimyasal olan yer değişimleri ise baskı devre kartlarının üzerinde doğru akım ön polarlama potansiyel farkının etkisi altındayken iletken olan metal filamanlarının büyümesi olayıdır. Büyüme olayı dış yüzeylerde, iç yüzeylerde ve tüm gövde boyunca görülebilmektedir. Elektrokimyasal yer değiştirme olayı yüzeyde oluşan dentritlerin ve iletkenanodik filamanların oluşması durumudur. Kalay ve kurşun lehimleri içinde zaman içerisinde nemli olan ortamda iğnesel kurşun dentritleri oluşmaktadır. Baskı devre üzerinde oluşmakta olan dentritler kısa devre olmasına sebep olmaktadır. Aşağıdaki şekilde dentrit oluşumu gösterilmektedir.



Şekil 2.7. Dentrit oluşumu.

Birleştirme noktalarındaki fazla ısınma işleminden dolayı yanmadan kaynaklı kalıntılar da görülebilmektedir. Lehimleme işlemi yapılan noktalarda doğru olmayan ve fazla flaks kullanılmasından, doğru olmayan lehim alaşımları kullanılmasından, doğru olmayan lehimleme teknikleri seçilmesinden ve lehimleme işlemi yapılacak olan parçaların yanlış tasarımından kaynaklanmakta olan birçok sorun meydana gelebilmektedir. Meydana gelmekte olan bu sorunlar, birleştirme noktalarının mekanik özelliklerini ve görüntülerini olumsuz şekilde etkilemektedirler. Bu olumsuz durumları engelleyebilmek için yapılan hataların kaynağı iyi çözümlenmelidir. Lehimleme işlemi yapılan malzemelerin ve lehim alaşımlarının yapılarına uygun flaks seçilmelidir, doğru lehim alaşımları, doğru lehimleme teknikleri tercih edilmeli, lehimleme işlemi doğru bir şekilde yapılmalı, birleştirme yapılan noktalar düzgün olarak yerleştirilmelidir. Lehimleme işlemi yapılırken ısıtma durumu, temas durumu ve soğutma durumu lehimin kalitesini direkt olarak etkilemektedir. Bu durumdan ötürü köprü oluşumunu, çarpıklığı, emme durumunu, yapışmamayı, lehim noktalarının topaklanmasını ve lehim yapılan parçalarda meydana gelebilen çatlama durumlarını en aza indirmek için sıcaklık artımının yavaş olması gerekmektedir. Temasyapılan bölgenin minimize edilmesi ıslanmama durumu, boşluk oluşumu, yapışmama durumu ve lehim topaklanmaları gibi sorunların görülmesini azaltmaktadır. Lehim ısını azaltmak; yanma durumu, katman oluşması, intermetalik oluşumu, çözünme durumu, lehim boşalması ve boşluk gibi sorunların oluşmasını önlemektedir. Ani soğutma durumunda ise intermetalik oluşumunu, yanma olayını, çözünme durumunu, lehim boşalmasını ve tane boyutunu azaltmada yardımcı olmaktadır. Lakin yavaş soğutma lehimleme işlemini olumsuz olarak etkilemektedir. Kaliteli bir lehimleme işlemi yapabilmek için yukarıda anlatılmakta olan lehim işlemi hataları, hataların nedenleri ve bu hataların çözümlerinin analizi iyi yapılmalıdır [11].

2.1.3. Lehim Noktalarına Uygulanması Gereken Testler

Lehim işlemi birbirinden farklı endüstrilerde, birden çok malzemenin birleştirilebilmesi için sık kullanılan bir yöntemidir. Lehimleme yapılan noktaların kullanılmakta olduğu endüstri grubuna göre karşı karşıya kaldığı çevresel koşullar, ısı aralıkları, aşındırıcı etkiler ve yükler bir diğerinden farklılık göstermektedir. Servis şartları, birleştirilme yapılan malzemeler, kullanılmakta olan lehim malzemeleri ve

birleştirme işlemi yapılırken tercih edilen yöntemleri lehimleme işlemi yapılan noktalarda oluşabilecek deformasyon durumları, yorulma durumlarını, intermetalik oluşumlarını direkt etkiler. Lehimleme işlemi yapılan noktaların güvenilirliği ciddi önem taşımaktadır. Bu sebeple lehimleme işlemi yapılan noktalar, kullanım sürelerinin uzun olması amacı ile lehimleme işlemi bitikten sonra da birçok testlere kontrolü sağlanır. İntermetalik bileşik oluşumunu gözlemleyebilmek ve oluşmakta olan intermetalik bileşiklerin lehim işlemi yapılan noktaların direncine etkisini anlayabilmek için termal çevrim yaşlandırması ve izotermal yaşlandırma işlemleri yapılmalıdır. Lehim işlemi yapılan noktaların aşındırma durumundaki davranışlarını belirleyebilmek adına nem ve tuz testleri yapılmaktadır. Titreşime maruz kalındığı durumlarda lehim işlemi yapılan noktaların dirençlerinde meydana gelen değişimi görebilmek için titreşim testleri yapılmaktadır. Lehim işlemi yapılan noktaların kullanım süreleri boyunca karşılaşılabilecek kimyasal maddeler düşünülerek kimyasal testler yapılmaktadır. Test koşulları ve test işlemlerinden sonra lehim işlemi yapılan noktaların gösterebilmesi gereken performans uygulanılan endüstriye göre farklılık gösterebilmektedir [13,14].

2.1.3.1. Sıcaklık Çevrim Testleri

Lehimleme işlemi yapılarak birleştirilmesi gerçekleştirilmiş ürünler değişik ısı durumlarında çalışmaktadırlar. Bu durumlardaki çalışma şartlarında birleştirme yapılan noktaların mikro yapılarında birtakım değişimler meydana gelebilmektedir ve malzemeler arasında intermetalik bileşikler oluşmaktadır. Isı ve zamanla mikro yapılarda meydana gelebilmekte olan değişimler ve intermetalik bileşiklerin oluşum durumu, birleştirme yapılmakta olan noktaların kayma durumu ve yorulma dirençlerini doğrudan etkilemektedir. Zaman içinde lehim işlemi yapılan noktaların çalışma ısılarında meydana gelebilen bu değişiklikleri görebilmek için; değişik ısı durumlarında ve sabit ısılarda yaşlandırma testleri yapılmaktadır. Bu çevrimler için belirlenen en düşük ve en yüksek sıcaklıklar lehim işlemi yapılan noktaların maruz kalabileceği en düşük ve en yüksek ısı durumlarına göre belirlenmektedir. Değişik ısı durumlarında meydana gelmekte olan yaşlandırma denemeleri termal çevrim odalarında otomotiv endüstrisinde -40 °C ile 125 °C aralığında, elektrik elektronik endüstrisinde -55 °C ile 125 °C aralığında 12,7 °C /dakika değişim hızıyla 1000 veya

daha çok çevrimde yapılmaktadır. En yüksek ve en düşük ısı durumlarına gelindiğinde 15'er dakika beklenilerek çevrim tamamlanmaktadır. Sabit ısı durumlarında meydana gelmekte olan yaşlandırma testleri ise lehim işlemi yapılan malzemelerin 85 °C, 90 °C, 100 °C, 125 °C, 150 °C ve 175 °C gibi değişik ısı durumlarında 168, 504, 500, 1008 saat gibi değişik zaman dilimlerinde bekletilerek gerçekleştirilmektedir. Yaşlandırma işlemi testleri bittiğinde lehimleme işlemi yapılan noktaların mikro yapıların da meydana gelmekte olan değişim durumları ve oluşabilen intermetalik bileşikler optik mikroskobu veya elektron mikroskobu ile incelenebilmektedir. Lehimle işlemi yapılan noktaların mekanik özelliklerindeki değişiklikler ise, lehimleme yapılan parçaların şekillerine uygun olarak çekme durumu veya kayma dirençleri ölçülerek belirlenebilmektedir [13,15].

Kimyasal simgesi "Cu" ile gösterilen Bakır, kırmızımsı renkli, ince tel ve levha haline getirilebilen, ısı ve elektrik iletkenliği yüksek ve kullanım sahası çok geniş olan bir metaldir. Sülfür içeren ve oksitli bakır cevherlerinden zenginleştirme ve izabe (metalleri eriterek sıvı hale getirme) yoluyla metalik bakır elde edilmektedir. Yüksek elektrik ve ısı iletkenliği özellikleri bakırı, elektrik santralleri ve iletken malzemelerin vazgeçilmez girdisi haline getirmektedir. Soğuk hava makine ve teçhizatlarında, paslanmaz özelliğinden dolayı nakliye vasıtalarında ve dış kaplamalarda bakırın büyük kullanım alanları bulunmaktadır. Bunlara ek olarak bakırın kaynak işlerinde, metalürjide ve bronz üretiminde önemli yeri vardır [16].

Bakır esaslı alaşımlar iyi korozyon direnci, yüksek termal ve elektriksel iletkenlik, kendi kendini yağlayabilme ve iyi aşınma direnci gibi özelliklere sahiptirler. Kalay içeren bakır alaşımlarından kalay bronzları yüksek aşınma direncine sahip iken, bakır alaşımlarından biri olan prinç malzemeler ise yüksek mukavemet, iyi korozyon dayanımı, yüksek ısı ve elektrik iletkenliği, kolay şekillenebilme ve güzel görünüm nedeniyle endüstride çok kullanılan mühendislik malzemelerdir [17].

Ana metali, ergimiş sıvı haldeki ilave dolgu metalinin ıslatması, dolgu metalinin lehimleme aralığında yayılması ve ana metal ile dolgu metali arasında metalürjik bir bağ oluşması sonucu meydana gelen birleştirmeye sert lehimleme adı verilir [18].

Binlerce yıldan bu yana insanların bildiği ve vazgeçemediği sert lehim yöntemi, ince ve kalın kesitli, aynı veya farklı özellikteki gereçlerin ergitilmeden birleştirilmesinde kullanılan bir yöntem olarak dikkat çekmektedir. Metallerin kullanıldığı tüm endüstri dallarında, üretimi yapılan gereçlerin çeşitli teknikler kullanılarak birleştirilme ihtiyacı vardır. Bu ihtiyacı karşılamak amacıyla yaygın olarak mekanik birleştirmeler, yapıştırma yöntemleri, kaynaklı birleştirmeler ve lehimleme yöntemleri kullanılır. Özellikle farklı kesitteki ve farklı özellikteki metallerin birbiriyle birleştirilmesinde, metalürjik uygunsuzluktan dolayı bunların kaynaklı birleştirilmesi pek mümkün olamamaktadır. Sızdırmazlık ve yüksek dayanımın da istenmesi durumunda diğer birleştirme yöntemlerinin kullanılması da olanaksızdır. Böyle durumlarda lehimleme tekniği çözüm olarak karşımıza çıkmaktadır. Lehimleme işleminde eğer ilave dolgu metali 450 °C' nin altında ergirse yöntem yumuşak lehimleme, 450 °C' nin üstünde bir sıcaklıkta ergirse sert lehimleme adını alır [18].

2.2. BAKIR VE ALAŞIMLARININ ÖZELLİKLERİ

Doğada 200' den fazla bakır minerali bulunmakla beraber sadece 20 tanesi bakır cevheri olarak endüstriyel öneme sahiptir. Dünya bakır rezervlerinin %68' ine Şili, ABD, Sovyetler Birliği, Zambiya, Peru, Zaire ve Kanada; %32' sine ise diğer ülkeler sahiptir. Yıllık üretim miktarı, 14 milyon ton civarındadır [19].

Endüstride bakırın önemli rol oynamasının ve çeşitli alanlarda kullanılmasının nedeni çok farklı özelliklere sahip olmasıdır. Bakırın en önemli özelliklerinin arasında yüksek elektrik ve ısı iletkenliği, aşınma ve korozyon direnci, iyi çekilebilme ve dövülebilme özellikleri sayılabilir. Ayrıca alaşımları çok çeşitli olup endüstride (otomotiv, basınçlı sistemler, borular, vanalar, elektrik santralleri ve elektrik, elektronik vd.) çok değişik amaçlı kullanılmaktadır [20].

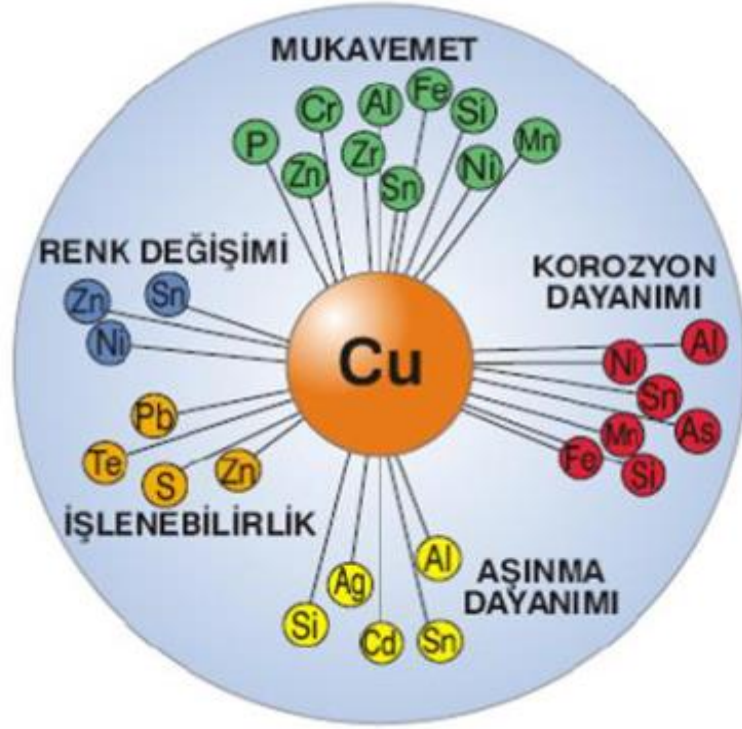
2.2.1. Saf Bakırın Kullanım Alanları

Korozyon dayanımının yüksekliği, elektrik ve ısı iletkenliğinin mükemmelliği, görünüşünün cazipliği, sünekliği ve şekillendirilebilirliğinin kolaylığından dolayı bakır ve alaşımları günümüze kadar en önemli mühendislik malzemelerinden biri

olarak kalmayı başarmıştır. Bu özelliklerinden dolayı motor bobinlerinde, jeneratörlerde, transformatörlerde, elektrikli trenlerin havai hatlarında, trolleybüs baralarında, endüstrilere ve evlere elektrik enerjisi nakleden iletim hatlarında, radyatörler ve yağ soğutucularında, yüksek fırın tüyerlerinin, yastık radyatörlerinin ve monkilerin yapımında, ark ocaklarının elektrot tutucularının ve kollarının yapımında kullanılmaktadır [21].

Kübik sistemde kristalleşen bakır, gümüşten sonra en iyi ısı ve elektrik iletkeni olup özellikle bu ikinci iletkenlik, saflığı bozan maddelerin eser miktarda bile olsa varlığı ile önemli derecede azalır. Safiyet bozan başlıca elementler Fe, Ni, As, Sb, Pb, Ag, Au olup bunların arasında en büyük paya sahip olan oksijendir. Şekil 2.8' de bu elementlerin bakırın elektrik iletkenliğine etkileri gösterilmektedir. Bu element Cu_2O bir alt oksit şeklinde bulunur [22].

Saf bakıra ilave edilebilen elementleri; alüminyum, arsenik, berilyum, kadmiyum, krom, kobalt, demir, kurşun, manganez, nikel, oksijen, fosfor, silisyum, gümüş, kükürt, tellür, kalay, çinko ve zirkonyum olarak sıralanabilir. Bu alaşım elementlerinin saf bakıra olan etkileri ise Şekil 2.8' de gösterilmiştir [22].



Şekil 2.8. Alaşım elementlerinin etkilerinin şematik gösterimi.

BÖLÜM 3

TEORİK BİLGİ

3.1. SIVI METAL ALAŞIMININ KATI YÜZEYİ ISLATABİLİRLİĞİ

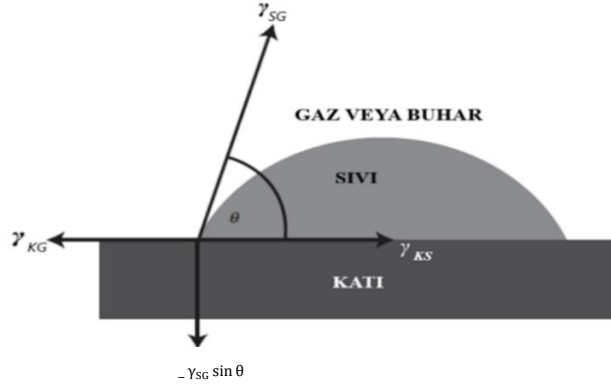
3.1.1. Temas Açısı

Yüzey serbest enerjisi düşük olan polimer gibi katı yüzeylerin gerilimleri fazın elastik ve yapışkan kısıtlamaları sebebiyle dolaylı yöntemlerin kullanılmasını gerektirir. Bu nedenden dolayı katı yüzey gerilimleri doğrudan ölçülemez. Herhangi bir sıvı yüzeyde bulunan molekülün hareketliliği ile katı yüzeydeki molekülün hareketliliğini kıyasladığımızda katı yüzeydeki hareketlilik sıvılara oranla daha düşüktür. Bir sıvı damlasının katı bir yüzey üzerine düşüşü göz önüne alınırsa sıvı damlası; katı-sıvı arasında γ_{KS} , katı-gaz arasında γ_{KG} ve sıvı-gaz arasında γ_{SG} olarak üç farklı ara yüzey gerilimlerinin dengelenmesi ile sıvı damlası ve katı yüzey arasında bir bağıntı kurulabilir.

Temas açısı θ , sıvı, gaz ve katı yüzey ile üç fazlı bir sistemde sıvı damlasının katı yüzeye tutunması ile oluşan bir temas açısıdır ve ıslatmanın nicel bir ölçüsü olarak tanımlanır. Oluşan bu temas açısı sıvının yüzeyine teğet düzlem ile katı yüzeyin teğet düzlemi arasında oluşur. Sıvıların katı yüzeyi ıslatabilirliği ölçülürken düşük viskoziteye sahip ve uçucu olmayan sıvı damlası kullanıldığında daha güvenilir bir sonuç verir.

Katı yüzey ile sıvı damla arasındaki θ temas açısı ne kadar düşük olursa o kadar iyi yayılma eğilimi sergilemiş, θ temas açısı ne kadar yüksek olursa o kadar kötü bir yayılma eğilimi sergilemiştir. Bu tanıma göre θ temas açısı 90° 'den küçük ise katı maddenin yüzeyini ıslattığı anlamına gelir. Temas açısının sıfır ve sıfıra yakın olması tam temas olduğunun bir göstergesidir. Eğer θ temas açısının 90° 'den büyük olduğu

durumda ise sıvı damlasının katının yüzeyini ıslatmadığını ifade eder. Katı madde düşük enerjili yüzeye sahip olduğu durumda yüzey, sıvı moleküllerinin birbirine uyguladıkları çekim kuvvetinden daha az bir kuvvetle sıvı moleküllerini çekeceğinden dolayı, katı yüzeye tutunan sıvı molekülleri sıvı yüzeyinden daha zayıf bir çekim kuvvetine sahiptir [23].



Şekil 3.1. Katı yüzey üzerindeki sıvı damlasının katı-sıvı, sıvı-gaz ve katı-gaz olmak üzere üç kuvvet ile dengelenmesi [23].

Temas açısı ilk olarak 1805 yılında Thomas Young tarafından tanımlanmıştır. Üç kuvvetin dengesi sonucu ortaya çıkan terimler; γ_{KS} katı ve sıvı ara yüz gerilimi, γ_{KG} katı ve gaz arasındaki ara yüz gerilimi ve γ_{SG} sıvı ve gaz arasındaki ara yüz gerilimini ifade eder. Bu denge sonunda oluşan eşitlik Young denklemi olarak adlandırılır.

$$\gamma_{KG} = \gamma_{KS} + \gamma_{SG} \cos \theta \quad (3.1)$$

Eşitlik 3.1'de γ yüzey gerilimi veya yüzey serbest enerjisi olarak adlandırılır. Eğer $[\gamma_{KG} > (\gamma_{KS} + \gamma_{SG})]$ yüksek enerjili bir katı varlığını gösteriyorsa, Young denkleminde bulunan θ temas açısı ($\theta = 0$) a denk gelen ($\cos \theta = 1$) eşitliği sıvının katı yüzey üzerinde tamamen yayıldığı anlamına gelir. Bu üç kuvvet, katı maddenin yüzeyinde oluşan ($-\gamma_{SG} \sin \theta$) kuvveti ile dengelenmiştir [23].

3.1.2. Temas Açısının Endüstriyel Uygulamaları

Katı ve sıvı maddeler arasında oluşan etkileşimler birçok endüstriyel uygulamada fiziksel ve kimyasal etkileşimlerin anlaşılmasında önemli bir rol oynamaktadır. Cam

metal, deri-kumaş gibi farklı bileşenler arasındaki yapışma olayı ve altlık malzemenin üzerinde yüzey üzerine yayılan yapışkan malzemenin ıslanması, temas açısı ile belirlenir. θ temas açısının belirlenmesi boya ve kaplama endüstrisi açısından da büyük önem taşımaktadır.

Aynı zamanda inşaat ve otomotiv endüstri alanında temas açısı yardımı ile katı yüzeyin ara yüzey gerilimini optimize etmek gerekmektedir. Örneğin; baskı sürecinde yer alan tüm malzemelerin optimum baskı kalitesini elde etmek için katı maddenin yüzeyinin belirli bir yüzey serbest enerjisine sahip olması gerektiğinden dolayı baskı işlemi boyunca çoğu aşamada temas açısının ölçülmesine ihtiyaç vardır.

Tekstil endüstri alanındaki halı ipliğinden cerrah önlüklerine kadar birçok şey, tekstil malzemesine uygulanan leke önleyici kaplamalar gibi yüzey işlemleri, kumaşların ıslanabilme, yıkanabilme özelliği ve hidrofobikliği temas açısının ölçümleri ile sağlanabilir.

Tıp, ilaç ve kozmetik endüstrileri alanında bulunan araştırma ve kontrol laboratuvarlarında temas açısı kullanılmaktadır. Tek kullanımlık lensler, diş protezleri gibi materyallerin oluşması için yüzey modifiyeli biyolojik malzemeler kullanılmaktadır. Fakat bunlar biyolojik anlamda uyumlu olup insan vücudu tarafından reddedilmemelidir. Bu sebeplerden dolayı temas açısı biyo uyumluluk incelemelerinde de önemli bir yere sahiptir [23].

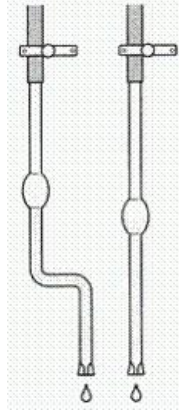
3.1.3. Temas Açısının Ölçüm Metotları

3.1.3.1. Damla Ağırlığı Metodu

Belli bir hacme sahip sıvının sahip olduğu damla sayısı yüzey gerilimi ölçüm hesaplaması için kullanılabilir. Belirli bir V hacmine sahip olan sıvı damlasının akması esnasında oluşan r yarıçaplı sıvı damlalarının kütle ve ağırlığı aşağıdaki eşitlikte gösterilmektedir (Eşitlik 3.2).

$$m = \frac{V}{n} \rho \quad (3.2)$$

$$mg = 2\pi r\gamma \quad (3.3)$$



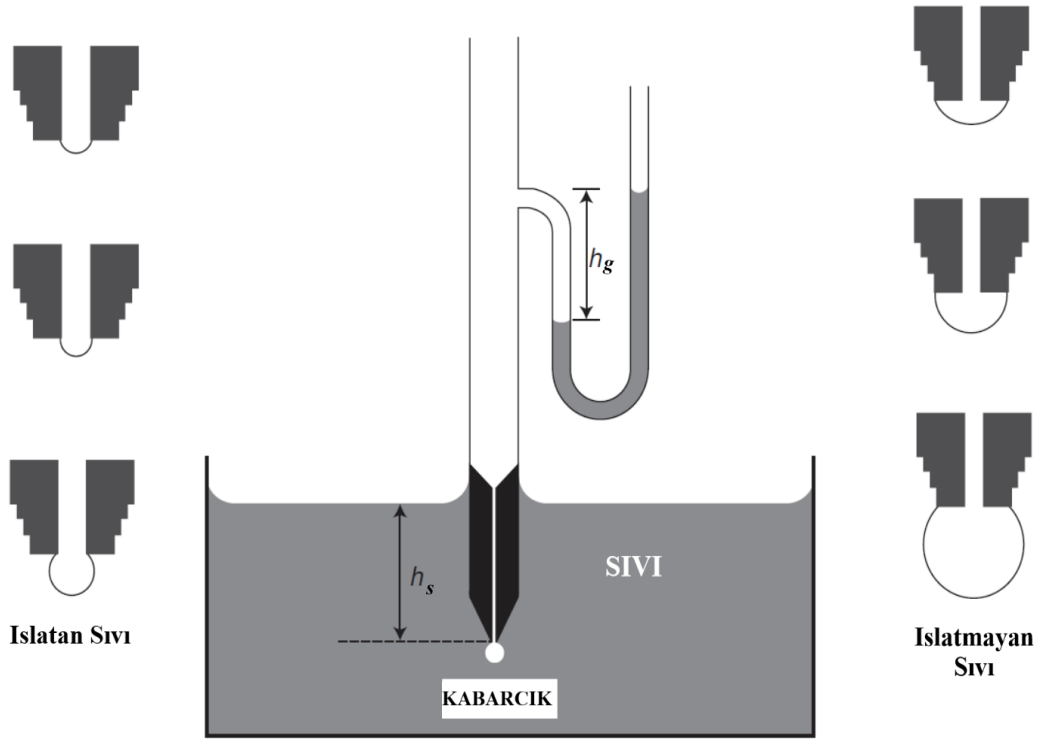
Şekil 3.2. Traubestalogmometresi [24].

Eşitlik 3.2’de ifade edilen n damla sayısı, ρ sıvının sahip olduğu özkütle değeri, g yerçekimi ivmesi ve $2\pi r$ stalogmometrenin alt ucunun çevresi anlamına gelmektedir. Stalogmometre cihazı yüzey gerilimi bilenen bir sıvı ile yüzey gerilimi bilinmeyen diğer sıvının ara yüzey gerilimini belirlemek için kullanılır [24].

3.1.3.2. Maksimum Kabarcık Metodu

Maksimum kabarcık yönteminde bir sıvının yüzey gerilimi Young-Laplace basınç farkına (ΔP) karşı bir sıvının içindeki kılcallıktan kabarcığın itilmesi için gerekli maksimum basınç değerinden belirlenir. Eğer r iç yarıçapına sahip dikey boru bir sıvı içerisine daldırılır ve durağan bir gaz (örneğin hava) tüpün üstünden itilirse Şekil 3.3’de görüldüğü gibi başlangıçta küresel bir şekle sahip olan tüpün alt kısmından bir kabarcık püskürtülür.

Maksimum basınç P_{mak} bir sıvının içerisindeki kılcallıktan dışarı doğru kabarcığın itilmesi için gerekli olan adım kabarcığın ayrılmadan önce belirlenmesidir. h_s sıvının yüzeyinin tüpün ucuna olan uzaklığıdır. h_g su borusunun yüksekliğini ifade eder. P_{mak} değeri is bu h_g değeri ile hesaplanır [25].



Şekil 3.3. Maksimum kabarcık yöntemi [23].

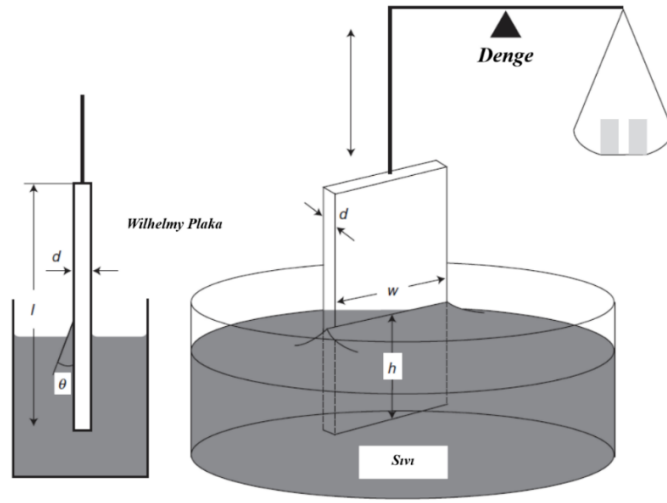
Kabarcık içerisindeki basınç artarsa kabarcık büyür ve eğrilik yarıçapı azalır. Belirli bir zaman diliminden sonra yarı küresel bir şekle sahip olur ve Young-Laplace denklemi bu noktada kabarcığın içindeki basıncı maksimum olarak verir. Kabarcık daha da büyüdüğünde basıncını azaltmak isteyeceğinden kabarcığın yarıçapı daha da büyür ve kılcal borudan kabarcık ayrılabilir. Bu yöntem ile yarı küresel şekilde bir kabarcık oluştuğu anda maksimum basınç ölçülebilirse sıvı yüzey gerilimi hesaplanabilir. Ancak sıvı içerisine eklenen kılcal tüpten kaynaklanan hidrostatik basıncı göz ardı etmemeliyiz. Hidrostatik P_{hyd} ve kılcal P_{kapil} basınçlarının toplamı ölçülen maksimum basınç değerini verir (Eşitlik 3.4).

$$P_{mak} = P_{hyd} + P_{kapil} = gh_s\Delta\rho + \frac{2\gamma}{r} \quad (3.4)$$

Kılcal tüp sıvı ile ıslanır, sıvı madde tüpün alt kenarını tamamen kaplar ve r iç yarıçapına sahip olur. Yüzey geriliminin değeri kabarcığın tüpten ayrılmasında hemen önce ölçüm yapılacak tüpe entegre edilmiş kılcal borudaki suyun yüksekliği ölçülerek elde edilen P_{mak} değerinin belirlenmesiyle hesaplanabilir.

3.1.3.3. Wilhelmy Levha (Koparma) Metodu

Bir denge noktasından asılan ince bir plaka yüzey gerilimi belirlenecek olan sıvının içerisine kısmen ve dikey olacak şekilde daldırılır. Asılı plakanın çevresinde bir menüsküs oluşur. Sıvı ile levha arasında oluşan temas açısı sıfır ise sıvı yüzey hemen hemen dikey şekilde yukarı doğru yönlendirilir. Menüsküste bulunan sıvının yüzey gerilimi aşağı yönde bir kuvvet uygular ve bu kuvvet ince plakanın çevresinde oluşan menüsküsün ağırlığına eşittir.



Şekil 3.4. Wilhelmy plaka yöntemi ile sıvı yüzey geriliminin belirlenmesi [23].

Wilhelmy 1863 yılında bu yöntemi kollu denge kullanarak uygulayan ilk kişidir. İnce tabakalara Wilhelmy tabakası adı verilir ve genellikle platin-iridyum alaşımı, cam, çelik ve plastikten malzemelerden üretilirler. Wilhelmy plakaları olarak kullanılabilenler arasında tek kullanımlık olan filtre ya da kromatografi kağıtları da vardır ve bunlar özellikle sıvı ile sıfıra çok yakın temas açısı veren tek tabaka çalışmalarında kullanılırlar [25].

Şekil 3.4'te l dikdörtgen plakanın uzunluğu, w dikdörtgen plakanın genişliği, d dikdörtgen plakanın kalınlığı, h plakanın sıvı içerisinde daldırılan yüksekliği, θ ise plaka ve sıvı arasındaki temas açısını ifade eder [23].

3.1.3.4. Donnan Pipeti Metodu

Heterojen bir karışım oluşturan, birbirine karışmayan farklı sıvıların ara yüz gerilimleri hesaplanır. Birbiri ile heterojen karışım oluşturan sıvılardan yoğunluğu küçük olan sıvı bir pipetin içerisine doldurulur ve pipet ara yüzey gerilimi bilinmeyen ikinci sıvının içerisine daldırılır.

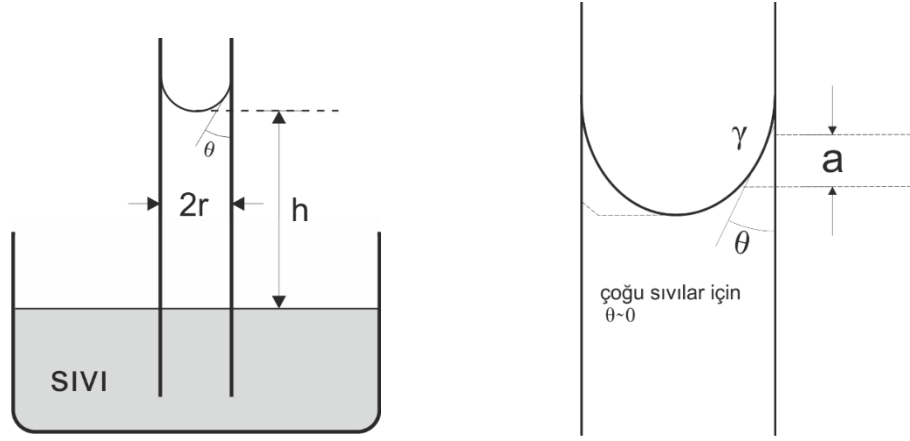
Pipetin üzerinde bulunan üst hava musluğu açılarak yoğunluğu düşük olan sıvının bir miktarının damlalar şeklinde diğer sıvının yüzeyine çıkması sağlanır ve buna bağlı olarak damla sayısı azalır Daha sonra pipetin içerisine dışta bulunan sıvıya karşı ara yüz gerilimi bulunacak sıvı doldurulur. Son olarak ara yüz gerilimleri ile oluşan damla sayıları birbiri ile oranlanır [24].

3.1.3.5. Oscillating Jet Metodu

Yaklaşık olarak 0,01 saniye gibi kısa bir süre içerisinde ara yüzey geriliminin ölçülebilmesi alternatifini sunan bir metottur. Sıvı madde, basınç yardımıyla küçük r yarıçaplı bir delikten geçirilir. Delikten çıkan sıvı elips şeklinde bir kesit alanına sahiptir. Ancak, bir süre sonra elips şeklinden ziyade dairesel bir kesit halini almaya başlar. Sıvı damlanın delikten çıktığı anda dijital kamera yardımıyla fotoğraf olarak görüntüsünün alınması ile sıvı damlanın boyutları ve sıvının ara yüzey gerilimleri arasında bir bağlantı kurulabilir [24].

3.1.3.6. Kapiller (Kılcal) Yükselme Metodu

Birçok sıvı için temas açısı $\theta \sim 0$ değerini alır. Sadece yerçekimi kuvveti etkisinde kalan kaptaki sıvıya ait serbest yüz yatay kısımdadır. Sıvı yüzeyinin kabın kenar bulunan kısmı, sıvının bulunduğu kabı ıslatıp ıslatmaması ile ilgili olarak yukarı yönde veya aşağı yöndedir. Kılcal borularda ara yüzey gerilimden dolayı meydana gelen sıvı yükselmesi veya alçalması işlemine kapilerite adı verilir. Kılcallık olayında ara yüzey geriliminden kaynaklı olarak yükselmeye başlayan sıvı yerçekimi kuvveti etkisi ile dengelenmiş olur [24].



Şekil 3.5. Kılcal yükselme işlemi için ara yüzey geriliminin ölçülmesi [24].

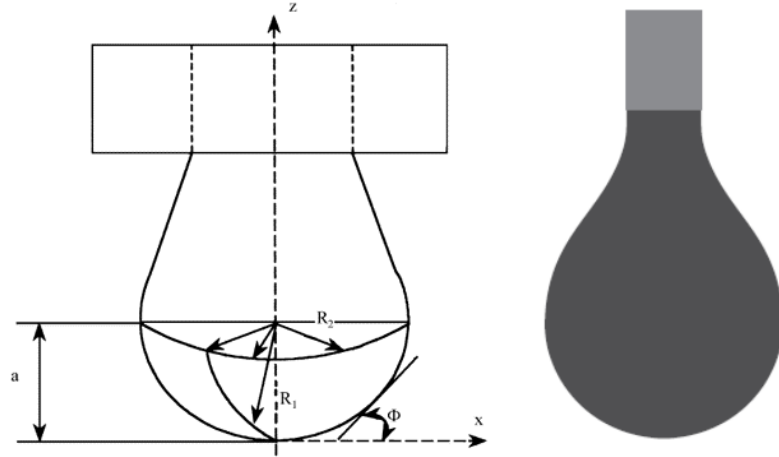
Sıvı damlanın katı bir yüzeyi ıslatıp ıslatmayacağı adezyon ve kohezyon kuvvetleri ile de yorumlanabilir. Eğer sıvı molekülleri ile cam boru arasında oluşan, yapışma olarak adlandırılan adezyon kuvveti, sıvı içerisindeki moleküllerin birbirine tutunmasını sağlayan kohezyon kuvvetinden küçük ise sıvı yüzeyi ıslatmaz. Kohezyon kuvveti adezyon kuvvetinden büyük olan sıvıların yüzeyi konveks (dışbükey) bir şekil alır. Tam tersi olursa yani adezyon kuvveti kohezyon kuvvetinden büyük olursa sıvı, katı yüzeyi ıslatır ve damlanın şekli konkav (içbükey) halini alır (Şekil 3.5) [25].

3.1.3.7. Pendant (Asılı) Damla Metodu

Pendant (asılı) damla metodu katı-sıvı ara yüz gerilimini ölçmek için en yaygın kullanılan metottur. Süspansiyon haline getirilmiş olan sıvı damla profilinin mekanik denge üzerinde belirlenmesi için kullanılır. Bahsedilen damla profili, ara yüzey kuvvetleri ve yerçekiminden kaynaklı kuvvetler arasındaki oluşan denge ile belirlenir. Ara yüz gerilimi hesaplaması için damlanın profiline bağlı Laplace denkleminin bağlı Bashforth ve Adams'ın oluşturduğu eşitlik aşağıda ifade edilmiştir (Eşitlik 3.5).

$$\frac{1}{\frac{R_1}{a}} + \frac{\sin \theta}{\frac{x}{a}} = -B \frac{z}{a} + 2 \quad (3.5)$$

$$B = \frac{a^2 g \Delta \rho}{\gamma} \quad (3.6)$$



Şekil 3.6. Pendant (asılı) damla [23,24].

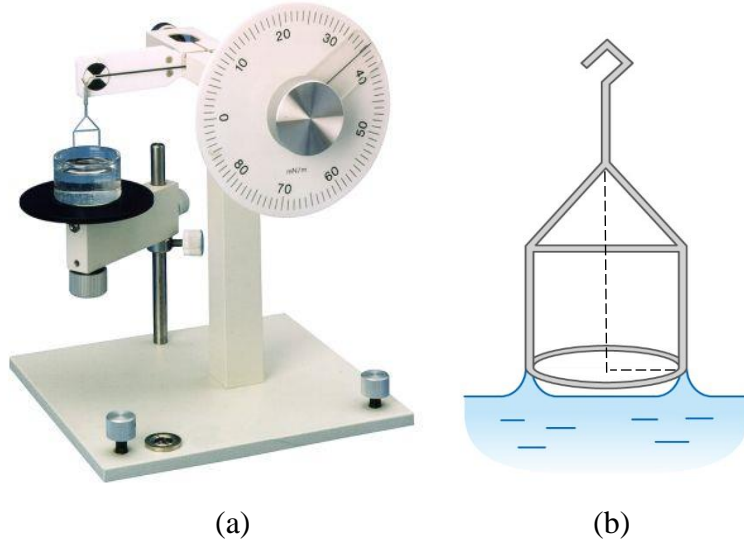
R_1 ve ϕ nin geometrik açıdan tanımı aşağıdaki ifade edildiği gibidir (Eşitlik 3.7).

$$R_1 = \frac{ds}{d\phi} = \frac{\left[1 + \left(\frac{dz}{dx}\right)^2\right]^{3/2}}{\frac{d^2z}{dx^2}} \quad (3.7)$$

$$\sin \phi = \frac{\frac{dz}{dx}}{\left[1 + \left(\frac{dz}{dx}\right)^2\right]^{1/2}} \quad (3.8)$$

3.1.3.8. DuNoüy Halka Metodu

Yüzey gerilimi ve yüzeyler arasında oluşan gerilimlerin ölçülmesi için kullanılan bir yöntemdir. DuNoüy tensiyometre aracı ile ölçüm yapılır. Bu metotta halkanın kopması için gerekli kuvvet ölçümü yapılır. DuNoüy tensiyometresi platin iridyumdan yapılmış olan halkaya sahiptir ve Şekil 3.7' de gösterilmiştir. Halka ara yüzey geriliminin ölçülmesi istenen sıvıya daldırılır ve daldırıldığı ara yüzeyden platin iridyumdan yapılan halkayı koparma işlemi için gerekli kuvvet burulmuş bir tel yardımıyla hesaplanır. Ara yüzey gerilim bağıntısı Eşitlik 3.9'da verilmiştir.



Şekil 3.7. a) DuNoüy tensiyometresi b) arayüz gerilmesinin halka metodu ile ölçülmesi [24].

$$\gamma = \frac{F\beta}{4\pi r} \quad (3.9)$$

Temas açısını sıfır veya sıfıra yakın olmasını sağlamak için platin iridyumdan yapılmış halka tüm kullanımlardan sonra asit ile ya da bünzen alevi yardımıyla dikkat edilerek temizlenmelidir. DuNoüy halka metodunda düzeltme faktörü kullanılması gerekir. Eğer kullanılmaz ise yüzey gerilim ölçüm sonuçları yaklaşık olarak %25 hatalı bulunabilir. Ancak, kullanılan denklemde yüzeyden gelen sıvı hacmi ve kullanılan buruk telin yarıçapı gibi faktörler bulunmaz. Bu durumda aletin prospektüsünde yer alan β , uygulandığı zaman yaklaşık olarak %25 oranında bir hatalı sonuç hesaplanabilir.

3.1.3.9. Sessile Damla Metodu

Katı bir yüzey üzerine damlayan sıvı damlasının zamanla değişimi söz konusu olup bu değişimi inceleyerek temas açısı ölçülebilir. Sıvı damlanın yerçekimi kuvveti etkisi içindeki sıvı yüzeyi ile ilişkisi Eşitlik 3.10'da ifade edilmiştir [25].

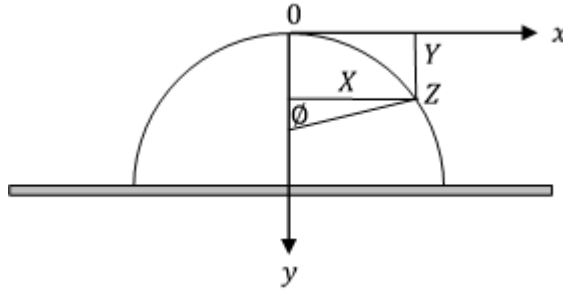
$$\frac{1}{\frac{r_m}{b}} + \frac{\sin \theta}{\frac{x}{b}} = 2 + \frac{z(\rho_2 - \rho_1)r_m B^2}{b \gamma_{SG}} \quad (3.10)$$

Eşitlik 3.10'da yer alan r_m meridyen kısmın düz yüzeyine denk gelen eğim yarıçapını, b en yüksek seviyedeki damlanın sahip olduğu yarıçapı ifade etmektedir.

$$b = R_1 = R_2 \quad (3.11)$$

$\frac{(\rho_2 - \rho_1)r_mB^2}{\gamma_{SG}}$ ifadesi ise sıvı-gaz ikili sistemin sahip olduğu yoğunluk farkı yani β dır.

Şekil 3.8'de katı yüzey üzerindeki sıvı damlanın koordinat sistemi gösterilmiştir. Burada g yerçekimi ivmesini, x ve z sıvı damla yüzeyi üzerindeki herhangi bir noktayı ifade eder.



Şekil 3.8. Katı yüzey üzerine düşen sıvı damlanın koordinat sistemi [24].

Bu denklemler dahilinde katı altlığın yüzeyi ile sıvı damlanın ara yüzeyi arasında bir eğimi yani temas açısı hesaplanabilir. Sessile damla yöntemi sıvı ve gaz fazları arasındaki etkileşimden kaynaklanan yüzey gerilimi γ_{SG} ve temas açısı θ değerini hesaplamamıza kolaylık sağlar. Eşitlik 3.10'da integral işlemi yapılırsa tam sonuca ulaşılabilir. Bu sonucun en keskin çözümleri Bashforth ve Adams'ın yaptığı çalışmalarda bulmuş olduğu hesaplamaların çizelgeleri kullanılmaktadır. Bu durumda yüzey gerilimi γ Eşitlik 3.12'de verilen bağıntı ile hesaplanabilir [25].

$$\gamma = \frac{gr_mb^2}{\beta} \quad (3.12)$$

Bashforth ve Adams'ın çizelgelerinde belirtilen x_1 , x_2 ve θ koordinatları yardımıyla b ve β belirlenebilir. Genellikle $\theta = 90^\circ$ olduğu durumda tercih edilen θ değeri ile x ve z koordinatlarının ölçüm değerleri bulunur.

Aynı şekilde sıvı damlası katı altlığın yüzeyi ile temas ettiği andaki sıvı yüzeyinin üzerinden bir teğet çizilerek temas açısı Eşitlik 3.13 kullanılarak hesaplanabilir.

$$\tan \theta = \frac{2ha}{a^2-h^2} \quad (3.13)$$

Sıvı damlasının yüzeyinden teğet çizme yöntemi dışında küresel şekildeki damlanın formülü Eşitlik 3.14 kullanılarak temas açısı hesaplanabilir.

$$\cos \theta = 1 - \frac{3\pi h^2}{3\theta - \pi h^3} \quad (3.14)$$

Bu eşitliklerde kullanılan h değeri damlanın maksimum yüksekliğini, a değeri ise katı altlık üzerinde temas eden küresel damlanın çevre uzunluğunun yarıçapını ifade eder. Damlanın hacmi büyük ise damlanın yüzeyine teğet çizilen eğim değeri ihmal edilerek Eşitlik 3.15 kullanılarak temas açısı ölçümü hesaplanabilir.

$$\cos \theta = \frac{\rho_2 g h}{2\gamma_{SG}} \quad (3.15)$$

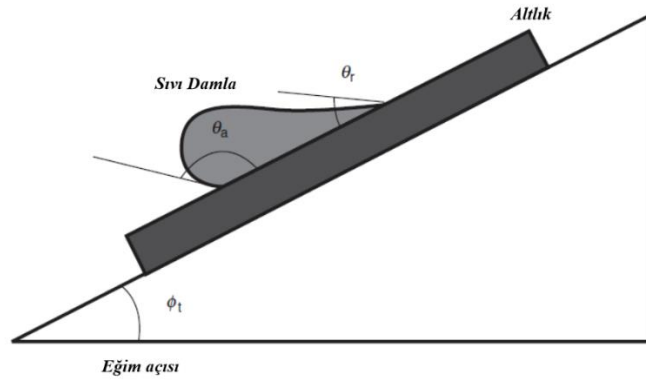
Sessile damla yöntemi kullanılarak ergimiş sıvı-katı ara yüzey fazının hesaplanması diğer yöntemlere göre daha güvenilirdir. Katı-sıvı ara yüzey fazları için kullanılan materyalin küçük bir parçasının kullanılması, sıvı damlanın kapalı bir ortamda damlatılarak damla ile temas edilmemesi ve bu damlama esnasında dijital kamera kullanılarak sadece görüntü yardımıyla ölçümlerin yapılması, kullanılan numunenin tekrar ısıtılması veya işlem yapılmaya ihtiyaç duyulmaması bu metodun seçilmesinin avantajları arasındadır [25].

3.2. İLERLEME VE GERİLEME TEMAS AÇILARI

Bir sıvının katı yüzey ile temas etmesi sonucunda oluşan temas açısı dengeli bir durum için geçerlidir. Yani küresel bir şekli tamamlayacak biçimde katı yüzeyin üzerine damlayan sıvının sağ ve sol eğimlerinin dengeli olması gerekir. Eğer bu durum söz konusu değil ise yani sağ ve sol taraftaki sıvı damlanın hacimleri farklı ise temas açısı belirlenirken başka bir yol izlenir. Bu açılar katı altlığın düz bir zemin üzerinde

olmaması veya altlık üzerindeki yüzeyin her yerinin farklı pürüzlülük değerine sahip olmasından kaynaklı olabilir. Şekil 3.9’ da ilerleyen ve gerileyen temas açıları gösterilmiştir ve bu temas açıları ilerleyen θ_a ve gerileyen θ_r temas açısı olmak üzere iki şekilde ifade edilir. Yüzey pürüzlülüğü arttıkça ilerleyen ve gerileyen temas açıları arasındaki fark büyük olur. Bu koşullar altında denge temas açısı Eşitlik 3.16’da ifade edilmiştir.

$$\cos \theta_e = (\cos \theta_a + \cos \theta_r)/2 \quad (3.16)$$



Şekil 3.9. İlerleyen ve gerileyen temas açıları [23].

Reaktif sistemlerde temas işlemi esnasında katı yüzey üzerindeki sıvı damlacık buharlaşırsa temas açısı θ_a dan θ_r ye geriler. Gerileyen temas açısında sıvı damla denge alanından daha geniş bir yüzey alanında katı altlık malzeme ile temasa geçer. Bu esnada katı madde temas esnasında sıvı madde ile tepkimeye girer ve tepkimeye girmiş olan maddenin temas açısı ölçülebilir.

Reaktif olmayan sistemler gözlemlendiğinde sıvının katı yüzeyi ıslatmadığı durumlar gözlemlenmekte ve temas açısı katı-sıvı, sıvı-gaz, katı-gaz üç ara yüzey fazının dengesine bağımlı olmaktadır. Böyle sistemlerde temas açısı neredeyse çok çabuk bir şekilde dengeye gelerek sıvının yayılması daha yavaş bir şekilde olmaktadır [24].

3.3. YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜ VE TEMAS AÇISI ARASINDAKİ İLİŞKİ

İdeal bir kat maddenin yüzeyi atomik olarak düz ve kimyasal olarak homojen bir yapıya sahiptir. Ancak gerçek hayatta böyle bir ideal yüzeye sahip materyal bulmak mümkün değildir. Çünkü tüm gerçek katı maddelerin yüzeyleri, yüzey pürüzlülüğüne sahip olup belirli bir dereceye kadar üzerlerinde yabancı madde varlığına bağlı olarak kimyasal alanda heterojendir. Gerçek ara yüzey alanının plan alanına oranı olarak adlandırılan yüzey pürüzlülüğü Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM), Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) gibi çeşitli spektroskopik metotlarla ve katı altlık madde üzerindeki sıvı damlalarının ilerleme ve gerileme temas açısı ölçülerek belirlenebilir.

Katı madde tamamen veya tek bir kristal yapıya sahip olsa bile üzerinde birden fazla farklı yüzey olabilir. Metalik, kovalent ve iyonik kristal tek bir dev kristal olarak kabul edilir. Bir katı kristal yapısının atomları bulunduğu yerlere sabitlenmiştir. Ara yüzey oluştuğunda buldukları yerlere yerleşip burada kalırlar ve bu durumda katı maddenin yüzeyinde aynı özelliklerde olan iki atomun ya da molekülün bulunmamasına sebep olabilir. Kristalde meydana gelen kusurlar kristalin sahip olduğu yoğunluğu ve ısı kapasitesini çok az bir şekilde etkiler fakat mekanik mukavemeti ve elektrik iletkenliğini ciddi derecede değiştirir. Metal maddenin yüzeyi üzerinde yüzey atomlarının konum ve bağlantı çeşitleri açısından birçok olası türü vardır. Metal dışındaki malzemeler için atomdan atoma kadar çeşitlilik gösteren ara yüzey yapısı yükseklikler ve boşlukların oluşması ile daha da büyük olması gerekir [24].

Islanabilirlik bir katı altlığın herhangi bir sıvı damla ile kaplanabilmesi olayıdır. Bu sıvı madde herhangi bir şarta gerek kalmadan altlık malzemeye yayılabilir. Sıvı orijinal sıvıyı yerinden oynatarak katı madde yüzeyinde hareket edebilir. Fakat sıvı-sıvı ve katı-sıvı ara yüz etkileşimleri arasında temas açısı dengeye geldiğinde hareketi ve yayılması durur. Bu durum sıvı damla ile katı altlık malzeme yüzeyinde ıslanmanın büyüklüğünü gösterir.

Dolayısıyla ıslanabilirlik katı materyalin yüzeyine tutunan sıvı damlasının temas açısı ölçülerek hesaplanabilir. Yüzey lekelerinin etkisi ya da diğer materyallerin emilimi ihmal edildiğinde katı maddenin yüzeyinin ıslanabilme özelliği yüzeyin kimyasal yapısı ile yüzey pürüzlülüğünden ileri gelen sebeplerden dolayı yüzey enerjisine bağlıdır.

Katı ile sıvı yüzeyler arasındaki temas açısının dengeli bir temas açısı haline gelmesi için kullanılacak ifade Eşitlik 3.17’de verilmiştir.

$$\cos \theta = \frac{\gamma_{KG} - \gamma_{KS}}{\gamma_{SG}} \quad (3.17)$$

Bir sıvının sahip olduğu yüzey alanı sıvının en önemli karakteristiklerinden biridir ve sıvının düzlemindeki geometrik alan ile belirlenebilir. Bir katı maddenin yüzeyi pürüzlü ise görülen ara yüz alanı düz yüzeyin ara yüz alanından r katı kadar gerçek ara yüzey alanına sahiptir [25].

3.4. YERÇEKİMİNİN TEMAS AÇISI ÜZERİNDEKİ ETKİSİ

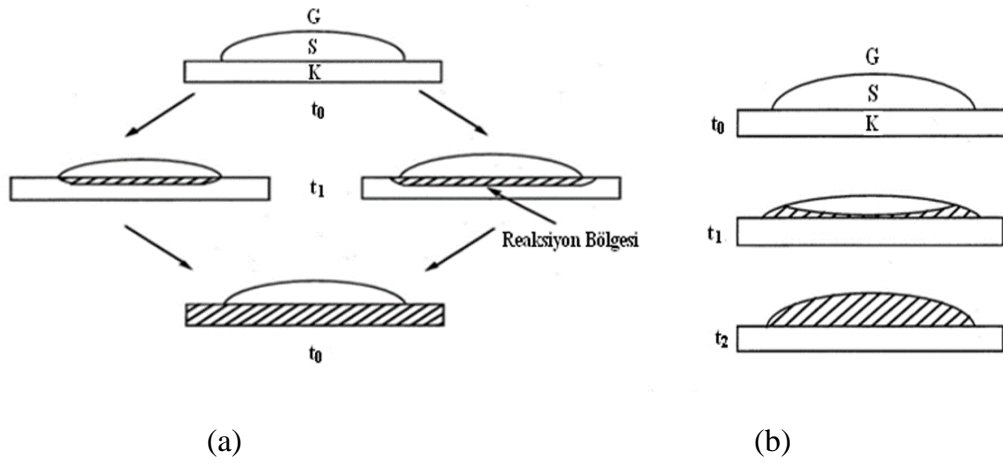
Dünya üzerinde ölçüm yapılan her nesnenin yerçekimi ivmesinden etkilendiği kabul edilir. Temas açısı ölçümü de bunlar arasındadır. Yerçekimi ivmesinden kaynaklanan bu etkinin minimize edilmesi için sıvı damlanın katı altlık ile teması esnasında sağlayacak neredeyse sıfır yerçekimine sahip vakumlanmış bir ortamda serbest düşme hareketini yapmasını veya küçük sıvı damlası kullanılarak yapılması sağlanmalıdır. Sıvı damlanın altlık yüzeyine yavaş bir şekilde düşmesi şartıyla temas açısı ölçümlerinde ortaya çıkan geniş açı değerlerinin nedeni yerçekiminin damla üzerindeki etkisinin artmasından kaynaklı olabilir. Ancak, geniş damla oluşması halinde sıvı damlanın katı altlık üzerindeki eğimi sıfır kabul edildiğinde temas açısı değerinin dünyanın yerçekimi ivmesinden etkilenmediği kabul görmektedir [24].

3.5. ISLATMANIN KİMYASAL REAKSİYONLAR İLE ARASINDAKİ İLİŞKİSİ

Sıvı alaşım damlası ve katı yüzey arasında kimyasal reaksiyonların oluşup oluşmaması önemli bir kavramdır. Kimyasal reaksiyonlara bağlı olarak teorik bilgiler değerlendirildiğinde dört çeşit kavramdan bahsedilebilir;

- Sadece katı madde, sıvı maddenin bütün bileşenleri ile ya da bir parçası ile ıslanmaktadır.
- Sadece sıvı madde, katı maddenin bütün bileşenleri ile ya da bir parçası ile ıslanmaktadır.
- Her bir faz diyagramı diğer faz diyagramları ile uyumlu olarak sarılır.
- Ara yüzeyde bir bileşim şekillenir.

Islatma esnasında $t = t_0$ zaman diliminde katı madde ve sıvı madde arasında hiçbir kimyasal reaksiyonun oluşmadığı bir denge vardır. Sıvı maddenin ara yüz serbest enerjisi ve yüzey serbest enerjisiyle reaksiyon ilerlerken reaksiyonun serbest enerjisinden kaynaklı $t = t_0$ zaman diliminde sırasıyla $\Delta\gamma_{KS}$ ya da $\Delta\gamma_{SG}$ olarak değişecektir. Reaksiyon alanı şartları ile belirlenen sıvı ile ilişkili iki çeşit ıslatma vardır ve Şekil 3.10' da detaylı olarak verilmiştir.



Şekil 3.10. a) İlk katı maddenin, sıvının bütün birleşenleri ile ya da bir parçası ile sarılması b) ilk sıvı maddenin, katının bütün bileşenleri ile ya da bir parçası ile ıslanması [24].

3.6. ADSORPSİYON

3.6.1. Adsorpsiyon Olayı

Moleküllerin temas halinde olduğu yüzeylerin çekme kuvvetlerine bağlı olarak bu yüzey ile birleşmesi olayı adsorpsiyon olarak adlandırılır. Biyolojik olarak parçalanma işlemine dayanıklı maddelerin giderilmesi ve biyokimyasal süreçlerle arıtımı neredeyse hiç gerçekleşmeyen kirletici parametrelerin arıtma işleminde alternatif bir süreç olarak önemli ölçüde değer kazanmıştır. Adsorpsiyon işlemi partiküllerin şekil değiştirmesine ve parçalanmasına gerek kalmadan kirleticilerin faz değişimini gerektirir. Bu işlem, bir çözeltide bulunan maddenin adsorbent tarafından seçici olarak adsorpsiyonu olarak adlandırılan sıvı faz adsorpsiyonu organik maddeler, ağır metal gibi kirletici maddelerin giderilmesi için çokça tercih edilen bir metottür [26].

3.6.2. İyonik Adsorpsiyon

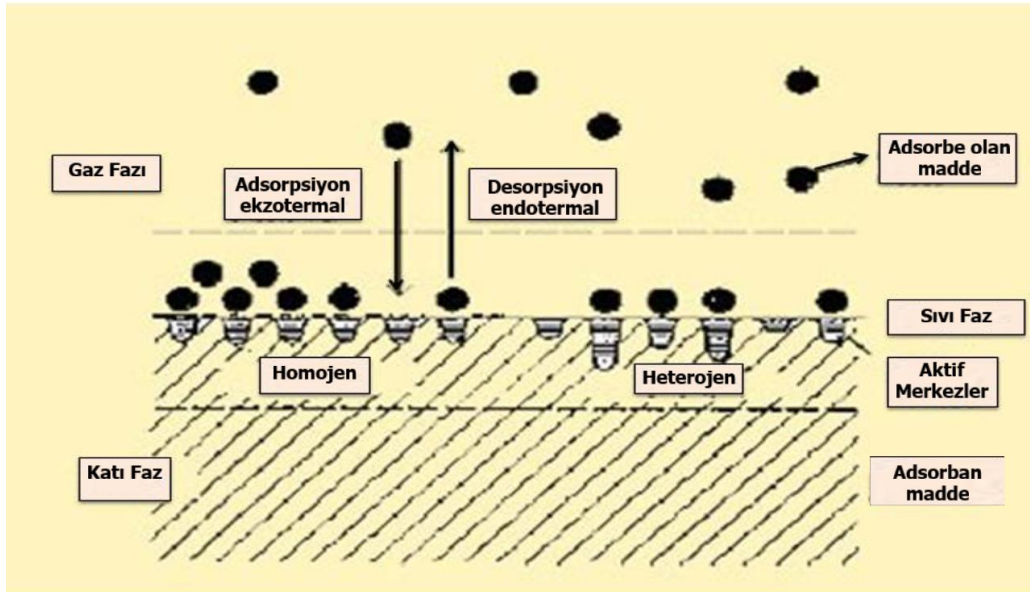
İyonik özelliklere sahip adsorbantların elektrostatik çekim kuvvetleri yardımıyla katı maddenin yüzeyinin yüklü kısımlarına tutunması olayıdır. İyonik adsorpsiyonda önemli olan adsorplayan madde ile adsorplanan maddenin moleküler büyüklük ve iyonik güçleridir. Eğer iyonlar eşdeğer yüklere sahip ise yüzey alanı daha küçük olan yüzeyde tutunarak iyonik adsorpsiyon olayı gerçekleşir [26].

3.6.3. Kimyasal Adsorpsiyon

Adsorplanan madde ile adsorbent arasındaki kimyasal etkileşimin oluşmasıyla kimyasal adsorpsiyon olayı gerçekleşir. Kimyasal adsorpsiyon düşük gaz basınçlarında ve çoğunlukla tersinmez bir tepkime olarak genellikle en çok katı-sıvı ve katı-gaz sistemlerinde gerçekleşir. Kimyasal etkileşimlerdeki reaksiyon ısısı, açığa çıkan ısı miktarından daha küçüktür. Kimyasal adsorpsiyon olayındaki adsorplanmış katı, sıvı ve gaz maddenin adsorplanmış molekülü yüzeyden ayırmak için yüksek enerjiye ve çok yüksek bir sıcaklığa gereksinim duyulduğundan dolayı bu molekülün yüzeyden ayrılması çok zor bir işlemdir [26].

3.6.4. Fiziksel Adsorpsiyon

Adsorbent maddenin yüzeyine, adsorplanan moleküller Van der Waals çekim kuvveti yardımıyla veya moleküller arası çekim kuvvetlerinin etkisi ile birbirlerine bağlanırlar. Adsorpsiyon olayı polar ve apolar yüzeylerde meydana gelebilir. Kimyasal adsorpsiyon işlemindeki moleküller arasında meydana gelen çekim kuvveti ile kıyaslandığında fiziksel adsorpsiyon işleminde daha zayıf bir etkileşim olur. Kimyasal reaksiyonlardaki etkileşimler genellikle fiziksel etkileşimlere göre daha kuvvetlidir. Fiziksel ve kimyasal adsorpsiyon olayları katı-katı yüzeyler, sıvı-sıvı yüzeyler sıvı-gaz yüzeyler, katı-sıvı yüzeyler ve katı-gaz yüzeyler olmak üzere beş farklı ara yüzeyden oluşabilir. Bunların arasında en dikkat çekenler katı-gaz ve katı-sıvı ara yüzeyleridir. Fiziksel adsorpsiyon olayı ile gerçekleşen bir katı ara yüzeyine tutunan gaz molekülü için gaz molekülünün fiziksel kuvveti kimyasal bağ kuvvetinden küçük ve yerçekimi kuvvetinden oldukça büyüktür. Fiziksel ve kimyasal adsorpsiyonu birbirinden ayıran en önemli fark molekülün yüzey üzerinden ayrılması olayıdır. Şekil 3.11’ de fiziksel adsorpsiyona uğramış moleküller gösterilmiştir. Molekülün yüzeyden ayrılma işlemi başka bir molekülün yerine geçmesi ile gerçekleşir ve bu yüzden ara yüzeyden ayrılma işlemi kolay bir şekilde gerçekleşir. Fiziksel adsorpsiyon polar ve apolar yüzeylerde gerçekleşebilir [26].



Şekil 3.11. Fiziksel adsorpsiyona uğramış moleküller [26].

3.6.4.1 Polar Yüzeylerde Gerçekleşen Fiziksel Adsorpsiyon Olayı

Taneciğin farklı iki uçtan biri pozitif diğeri negatif olduğu durumda sahip olduğu elektronların atom etrafındaki dizilişi asimetrik olur ve bu tür moleküller polar molekül olarak adlandırılır. Polar olan sıvı veya gaz adsorbant madde ile ara yüzeyi polar olan katı adsorbent madde arasında meydana gelen çekim kuvveti, pozitif ve negatif elektrik yükleri arasında oluşan elektriksel çekim kuvvetine bağlıdır. Sıvının adsorplanan miktarı hidrojen iyonları ve hidroksil iyonlar gibi bazı iyonların ara yüzeyde adsorplanması ile değişebilir [26].

3.6.4.2. Apolar Yüzeylerde Gerçekleşen Adsorpsiyon Olayı

Polar moleküllerinin aksine taneciğin sahip olduğu elektronların atom etrafındaki dağılımlarına bakıldığında simetrik bir yapıya sahip olduğu görülür. Bu yapıdaki moleküller apolar molekül olarak isimlendirilir ve kutupsuz bir yapıya sahiptir. Taneciğin sahip olduğu elektrik yüklerinin farkının olmamasından kaynaklı olarak apolar maddeler arasında gerçekleşen çekim kuvvetinin açıklanması zordur. Ancak, molekülün her bir parçasının belirli periyotlarla negatif ve pozitif yük olarak değişmesinden kaynaklı olarak fiziksel adsorpsiyon olayının apolar yüzeylerde gerçekleşmesi mümkündür [26].

Polar ve apolar yüzeylerde gerçekleşen adsorpsiyon işleminde en iyi verim, aynı türden oluşan adsorbant-adsorbent ikili sistemlerde gözlenir.

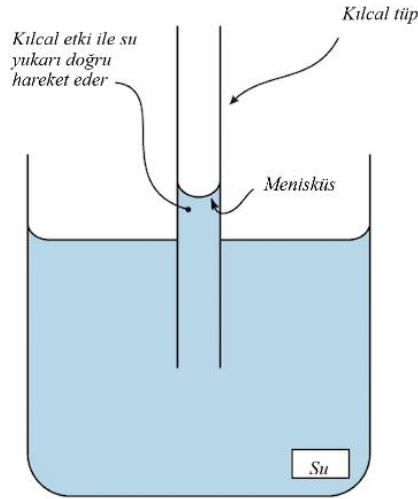
3.7. ADEZYON VE KOHEZYON KUVVETLERİ

3.7.1. Adezyon Kuvveti

Adezyon kelime anlamı olarak yapışma anlamına gelmektedir. İki farklı maddenin belirli bir süre birbiri ile temas etmesi olayı adezyon, bu olaydaki oluşan kuvvete de adezyon kuvveti adı verilir. Özel adezyon alt tabaka ile altlık üzerine yapışan sıvı madde arasındaki moleküler etkileşim yolu ile sağlanır. Moleküller arası kuvvetler özel bir yapışmaya neden olur. Bu yapışkanlık kimyasal yapışma, yayıcı yapışma ve

dağılabilir yapışma olarak üç farklı çeşide ayrılabilir. Güçlü kimyasal bağlar ile zayıf moleküller arası etkileşimlerin ayrımına dikkat edilmelidir. Moleküller arası ve kimyasal adezyon kuvvetlerine ek olarak mikro-mekanik adezyon da genel adezyon (yapışma) olgusu arasına girer. Bu gibi durumlarda yapışkan malzeme pürüzlü yüzey üzerine etkin bir şekilde yapışabilir ve genel yapışma işlemini arttırabilir [27].

Yüzeydeki su molekülleri su-hava ara yüzeyi için komşularıyla hidrojen bağları oluşturur. Aynı zamanda su molekülleri havaya maruz kaldıklarından dolayı birbirlerine bağlanacak daha az komşu su moleküllerine bağlı olacaklar ve moleküllerin sahip olduğu komşularla daha güçlü bağ oluşturacaklardır. Bir kabın içerisine yerleştirilen ince kılcal cam tüpler içerisindeki suyun yukarı doğru tırmanması kılcal hareket olarak adlandırılır (Şekil 3.12). Yerçekimi kuvvetine karşı yapılan bu kılcallık hareketi suyun sahip olduğu adezyon ve kohezyon kuvvetine bağlı olarak değişir. Silindir veya tüp içerisinde bulunan sıvının oluşturduğu kavisli yüzey menisküs olarak adlandırılır [28].

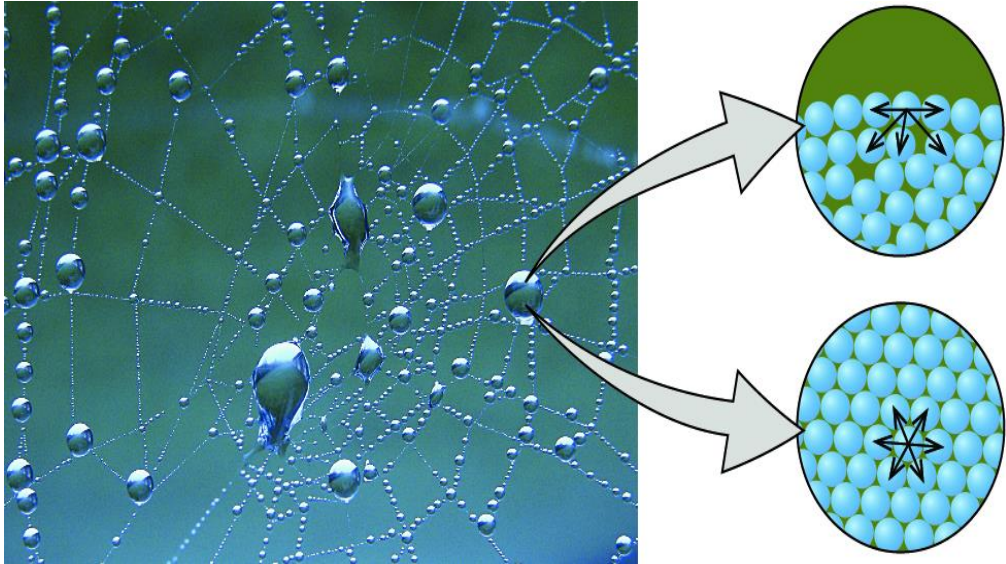


Şekil 3.12. Kılcallık hareketi [28].

3.7.2. Kohezyon Kuvveti

Bir bağlama maddesinin veya yapıştırıcının yapışkan mukavemeti bu materyalin kimyasal bileşimine bakılmaksızın bazı moleküler kuvvetlerin yardımı ile belirlenebilir. Bu kuvvetler; yapışkan materyalin içerisindeki kimyasal bağlar, polimerlerin bir reçine malzemesi içerisinde çapraz bağlanmasından kaynaklı kimyasal bağlar, yapışkan moleküller (tanecikler) arasındaki moleküler etkileşim ve yapışkan malzemenin içerisinde bulunan moleküller arasındaki mekanik bağlar ve etkileşimler olarak sıralanabilir [28].

Bir bardaktaki suyun taşmadan önceki durumunda su, camın kenarında kubbe şekline benzer bir şekil oluşturuyor. Oluşan bu şekil, su moleküllerinin birbirine bağlı özelliklerine veya moleküllerin birbirlerine karşı tutunma eğilimlerine bağlı olarak oluşur. Moleküllerin aynı türdeki diğer moleküllerin çekmesi olayı kohezyon olarak adlandırılır. Kohezyon kuvvetlerine verilebilecek en iyi örnek suyun yapısıdır ve Şekil 3.13' de verilmiştir. Su molekülleri birbirleriyle, aralarında hidrojen bağları oluşturma kabiliyeti sayesinde güçlü bir kohezif kuvvete sahiptir [28].



Şekil 3.13. Kohezyon kuvveti [28].

3.8. LİTERATÜR İNCELEMESİ

Jennie S. Hwang ve arkadaşları çalışmalarında, performans ve maliyet arasında iyi bir denge elde etmek ve düşük ergime sıcaklığı gereksinimini karşılamak amacıyla bu elementlerin her biri için bileşiklerin ağırlıkça $\text{In} \leq \% 6$, ağırlıkça $\text{Ga} \leq \% 0,5$ ve ağırlıkça $\text{Cu} \leq \% 1$ olduğunu belirtmişlerdir [30].

Sonawane, P. D. ve Raja, V. K. B. çalışmalarında, kurşunsuz lehimdeki gelişmelerin bir incelemesini yapmışlardır. Ayrıca lehim alaşımındaki nanoparçacık ilaveleri de tartışılmıştır. Sn esaslı lehim alaşımları için, mekanik özelliklerin ve ıslanabilirliğin bir endişe kaynağı olduğu ve alaşım elementleri ile güçlendirilmesi gerektiği vurgulanmıştır. Dalga lehimleme uygulamaları için Sn-Zn lehim alaşımlarının genellikle iyi bir seçim olmadığı belirtilmiştir. TiO_2 ilavesinin, lehim alaşımının istenen özelliklerini geliştirmek için daha iyi bir yol olduğu ifade edilmiştir [31].

Jeong-Won Yoon, ve arkadaşları çalışmalarında, Sn-0,7Cu lehimin erime sıcaklığını incelemiş ve lehim içindeki Cu elementinin varlığının, ara yüzey intermetalik bileşik (IMC) katmanının büyümesini ve Ni (P) katmanının tüketimini bastırarak, lehim bağlantısının üstün ara-yüzey kararlılığı ile sonuçlandığı ifade edilmiştir. 200 °C'de, arayüzey IMC'lerinin kalınlığı $\text{Sn} - 3,5\text{Ag} - 0,7\text{Cu} > \text{Sn} - 3,5\text{Ag} > \text{Sn} - 0,7\text{Cu}$ şeklindedir. Sn – 0,7Cu lehimin daha yüksek erime sıcaklığına sahip olması ve lehim içinde Cu elementinin varlığı, arayüzey IMC katmanının büyümesini ve Ni (P) katmanının tüketimini bastırarak, lehim bağlantısının üstün arayüzey kararlılığının meydana geldiği belirtilmiştir [32].

J.G. Maveety ve arkadaşları çalışmalarında, Saf Sn' nin mikroyapısını ve kayma mukavemeti özellikleri ile Sn-0,7Cu' nun ötektik bileşimi incelemişlerdir. Sn-Cu ikili alaşımının ötektik bileşimi ağırlıkça % 0,7 Sn ve 227 °C ötektik sıcaklığa sahip olduğunu ifade etmişlerdir [33].

Xianfen Li ve arkadaşları çalışmalarında Sıvı yapı geçişinin Sn – 0,7Cu alaşımının katılaşma mikroyapısı ve ıslanabilirliği üzerindeki etkisini araştırmışlardır. TI-LLST' den sonra düzensiz eriyik için, γ_{SL} ve γ_{LF} ' nin yüzey enerjilerinin, daha yüksek

atomların aktivitesine bağılı olarak azaldığı; böylece denge temas açısının da azalarak Cu altlık üzerindeki yayılma alanı artarak, Sn-0,7Cu lehim alaşımının ıslanabilirlik özelliğini iyileştirdiği belirtilmiştir [34].

Kyoo-Sik Bae ve arkadaşları çalışmalarında Sn – 0,7Cu / Cu lehim bağlantılarının mikroyapısı ve yapışma mukavemetini incelemişlerdir. Asiküler η (Cu_6Sn_5) fazının, lehim içinde ve lehim / Cu ara yüzeyinde, çoğunlukla ara yüzeye normal yönde olduğu gözlemlenmiştir. SAC305 alaşımı ile kıyaslandığında Sn-0,7Cu lehim alaşımı benzer temas özelliklerini gösterdiği, ancak daha düşük mikro sertlik ve eklem mukavemetine sahip olduğunu ifade edilmiştir [35].

T.Y. Lee ve arkadaşları çalışmalarında Sn-Pb, Sn-3,5Ag, Sn-3,8Ag-0,7Cu ve Sn-0,7Cu alaşımlarında IMC oluşumunun morfolojisi ve kinetiği incelenmiş ve bunlarla karşılaştırılmıştır. IMC kalınlığının zamana ve sıcaklığa bağlılığından dolayı katı hal yaşlanmasındaki IMC büyüme oranı, temas tepkimelerinden 4 kat daha yavaş olduğu belirtilmiştir [36].

A. L. Teoh ve arkadaşları çalışmalarında Kurşunsuz lehimlerin, özellikle Sn-0,7Cu alaşımının, çevreye ve sağlığa zararlı olan kurşun içeren lehim alaşımlarının kullanımının kısıtlanması nedeniyle gelişmekte olduğunu belirtmişlerdir. Sonuç, Sn-40Pb' nin iki çekirdeklenme fazına sahip olduğunu, Sn-0,7Cu' nun ise katılaşma sırasında yalnızca bir çekirdek fazına sahip olduğunu göstermiştir [37].

Xiaowu Hu ve arkadaşları çalışmalarında, kurşunsuz lehimlerin geliştirilmesi, kurşunun yüksek toksitesi ile ilgili sağlık ve çevresel kaygılar nedeniyle malzeme araştırmacıları için önemli hale gelmiştir. Ötektik Sn-0,7Cu lehim, üstün özelliklerinden dolayı yüzey montaj teknolojisi (SMT) veya dalga lehimleme için en popüler lehimlerden biri olarak kabul edilir. Düşük maliyetli, Cu altlığın çözünmesini engelleyen ve özellikle ötektik bileşimin erime noktası, Sn-Pb lehim alaşımına (183°C) kıyasla nispeten yüksektir (227°C). Bi' nin eklenmesinin, lehimin erime sıcaklığı ve lehimlenebilirliğini daha da iyileştirmenin yanı sıra lehim bağlantılarının mekanik özelliklerini geliştirir. Sn-0,7Cu (SC) ötektik lehim alaşımları hazırlanmış ve yeni tip fiber takviyeli ötektik kompozitlerin üretildiği yönlü katılaşmaya tabi tutulmuştur.

Yönlü katılmış (DS) Bi içeren ötektik SC kurşunsuz lehim alaşımlarının mikro yapıları ve gerilme özellikleri diferansiyel taramalı kalorimetri (DSC), taramalı elektron mikroskobu (SEM), enerji dağıtıcı kullanılarak incelenmiştir. Bi ilavesinin hem erime sıcaklığını hem de SC lehim alaşımının aşırı soğutulmasını etkili bir şekilde azaltabileceğini göstermiştir [38].

M. Zhao ve arkadaşları çalışmalarında, elektronik endüstrisinde kurşunsuz lehimlerin geliştirilmesiyle birlikte Sn-Cu kurşunsuz lehim alaşımının, mükemmel kapsamlı performansı ve düşük maliyeti nedeniyle büyük ilgi gördüğü belirtilmiştir. Çalışmada Sn-Cu kurşunsuz lehim alaşımlarındaki son gelişmelerin araştırıldığı, mikroyapı ve arayüzey yapıları, lehim alaşımı / altlık bağlantı bölgesinin iç yapısı analiz edilmiş ve arayüzey IMC'nin oluşum-büyüme mekanizmasını tanımlayan model ve teoriler tanıtılmıştır [39].

A. B. El-Bediwi, ve arkadaşları çalışmalarında, çalışmanın amacı olarak ötektik Sn-0,7Cu ikili lehim alaşımının lehimleme özelliklerinin geliştirilmesi olduğunu belirtmişlerdir. Geleneksel Sn-Pb lehimlerinin alternatiflerinden biri olarak kabul edilen bu lehim alaşımının ergime sıcaklığının 227 °C olduğu ifade edilmiştir. Islatma davranışı, ergime sıcaklığı, elektriksel direnç, elastik modül ve Sn-0,7 alaşımın iç sürtünmesi araştırılmıştır. Elektronik endüstrisinde Sn-Pb lehim alaşımı çok önemli bir materyaldir ancak Pb toksiktir ve çevre ve insan üzerinde olumsuz etkileri vardır. Zararlı olması nedeniyle Pb'nin etkileri, Sn-Pb lehim alaşımlarının kullanımından kaçınılmasının gerekliliği ve yeni Pb içermeyen lehim alaşımlarının elektronik endüstrisinde kullanılmasının önemi belirtilmiştir. Yeni kurşunsuz lehim alaşımlarının ıslatılabilirlik, düşük erime sıcaklığı, korozyon direnci, üstün elektriksel iletkenlik ve uygun mekanik özelliklerinin oldukça iyi olmasının gerekliliği vurgulanmıştır [40].

Mario F. ve arkadaşları çalışmalarında, Sn-3,5Ag, Sn-3,5Ag-4,8Bi, Sn-3,8Ag-0,7Cu ve Sn-0,7Cu (wt.%) olmak üzere dört kurşunsuz lehimin temas açılarını farklı sıcaklıklarda ve Cu altlık üzerinde sessile damla yöntemini kullanarak ölçülmüşlerdir. Sn-3,5Ag-4,8Bi alaşımı bizmut (Bi) ilavesiyle geliştirilmiş ıslatılabilirliği gösteren en düşük temas açılarını sağlamıştır. Tüm lehim alaşımları için, RMA akısı kullanılarak daha düşük temas açılarının gözlemlendiği belirtilmektedir. Lehim / Cu ara yüzeyinde

oluşan intermetalikler, lehime bitişik Cu_6Sn_5 ve bakır altlığa bitişik Cu_3Sn olarak tanımlanmıştır [41].

M. Arif ve arkadaşları çalışmalarında, 99,3Sn-0,7Cu kurşunsuz lehim, 99,3Sn-0,7Cu / Si_3N_4 kurşunsuz nanokompozit lehim ve 96,3Sn-3,0Ag-0,5Cu kurşunsuz lehim alaşımlarının toz metalurjisi yoluyla başarıyla üretildiğini belirtmişlerdir. Islatabilirlik sonuçlarının, lehim matrisine takviye ilavesiyle bir gelişme gösterdiği ifade edilmiş, 99,3Sn-0,7Cu / Si_3N_4 nanokompozit lehimin ıslanabilirliği, 96,3Sn-3,0Ag-0,5Cu kurşunsuz lehimden biraz daha düşük sonuç verdiği gösterilmiştir. 99,3Sn-0,7Cu / Si_3N_4 nanokompozit lehimin ıslanabilirliği daha düşük olmasına rağmen, bu yeni nanokompozit lehimin ıslanabilirliği, lehimleme uygulaması için hala kabul edilebilir değerde olduğu belirtilmiştir. Genel olarak, 99,3Sn-0,7Cu / Si_3N_4 nanokompozit lehimin mekanik özellikleri, takviye yüzdesinin eklenmesiyle bir gelişme göstermiş, 96,3Sn-3,0Ag-0,5Cu kurşunsuz lehim ile karşılaştırıldığında, ağırlıkça % 0,5 takviye içeren 99,3Sn-0,7Cu / Si_3N_4 nanokompozit lehim, üstün mekanik özelliklere sahip olduğu ifade edilmiştir [42].

M. Salleh ve arkadaşları çalışmalarında, bu yüksek performanslı seramik partiküllerin güçlendirilmesi, kurşunsuz Sn-0,7Cu lehimin lehimlenebilirliğini artırmak için etkili bir yaklaşım olduğunu belirtmişlerdir. Yeni kompozit lehim alaşımının lehimlenebilirlik performansları, ara yüzey IMC katman kalınlığı ve farklı Si_3N_4 oranları için oluşturulan IMC fazları dahil olmak üzere Cu altlık üzerindeki temas açalarına göre belirleneceği ve analiz edileceği ifade edilmiştir. İntermetaliklerin katman kalınlığındaki minimum azalma ve intermetalik katmanını şekillendiren farklı şekilli tarakların oluşumu, Cu altlık üzerinde lehimlenebilirlik performanslarının arttığını göstermiştir [43].

J. Liang ve arkadaşları çalışmalarında, sistematik olarak katı-sıvı ara yüzey reaksiyonlarının metalürjisini, üç kurşunsuz lehim için intermetalik büyüme kinetiği; Sn – Ag ötektik (% 96,5 Sn – % 3,5 Ag), Sn – Cu ötektik (% 99,3 Sn – % 0,7 Cu) ve Sn – Ag – Cu ötektik (Sn – 3,8Ag– 0,7Cu, SAC 387) ve üç metalik altlık ile; Cu, Ni ve Alaşım 42 (% 42 Ni -% 52 Fe), 10 saniyeden 16 saate kadar olan reaksiyon süresi için 225 °C ile 280 °C arasında değişen sıcaklıklarda araştırmışlardır [44].

BÖLÜM 4

DENEYSEL YÖNTEM

4.1. DENEY DÜZENEĞİ

Islatma özelliklerini incelemek için deney esnasında kullanılan düzenek Şekil 4.1’de gösterilmiştir.



Şekil 4.1. Deney setinin parçaları ve düzeneğin kurulmuş hali.

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

Çizelge 4. 1. Deney düzeneğini oluşturan parçalar.

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

4.2. DENEYİN YAPILIŞI

Deneysel çalışmalara geçmeden önce düzeneği oluşturan bütün parçaların temizlenerek hazır hale getirilmesi yapılan çalışmanın sağlığı açısından oldukça önemlidir. Çünkü lehimleme esnasında deney setinin her bir parçasından kaynaklanabilecek oksit oluşumu deneyi olumsuz yönde etkileyebilir.

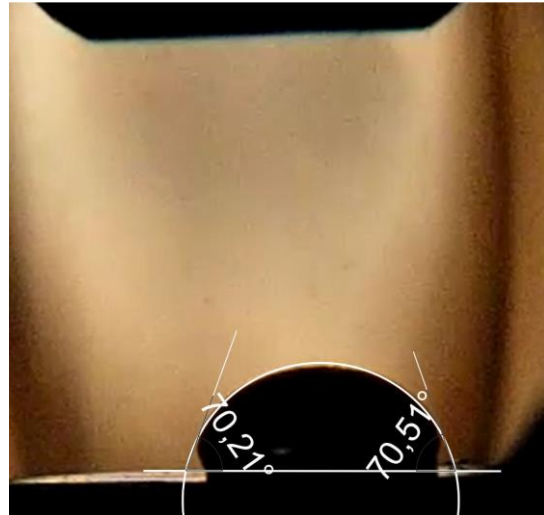
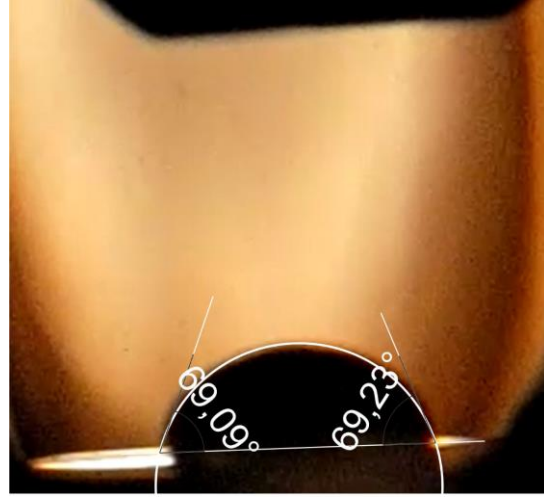
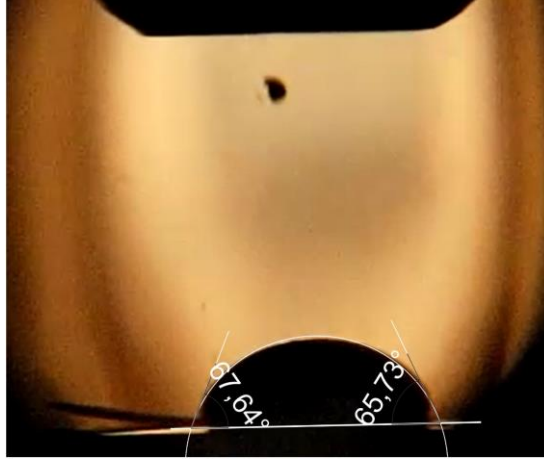
Sn-0,7Cu alaşımından her bir deney için yaklaşık 1,4g kütleyle sahip parçacıklar kesildi. Lehim alaşımının ergitilerek damlaması için bir ucu kapalı ve yaklaşık 1mm çapında bir deliğe sahip olan seramik tüp içerisine yerleştirildi. Ergiyen metal lehim alaşımının damlaması için baskı yapmak sureti ile çelik çubuk üzerine monte edilmiş çelik uç seramik tüpün içerisinde malzemeye temas etmeyecek şekilde bırakıldı. Bakalit ile kaplı Cu altlık kıl testere ile kesilerek çıkartıldı ve lehimin damlatılacağı yüzey alümina malzemesi yardımıyla oksitlerden temizlendi.

Cu altlık temizlendikten sonra Şekil 4.1’de gösterilen deney setinin içerisinde grafit tabanı üzerine yerleştirildi. Lehim alaşımı konulan seramik tüp Cu altlık üzerinde yaklaşık 1cm aralıklı olacak şekilde deney düzeneğinde kuartz camın içerisine konuldu. Bu düzenek hazırlanırken damlanın Cu altlık üzerine düşeceği yer fırının

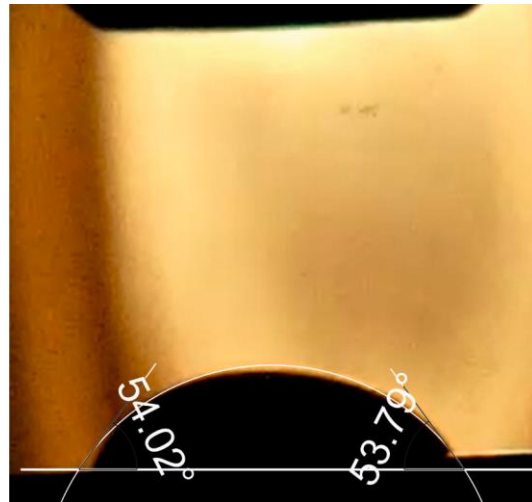
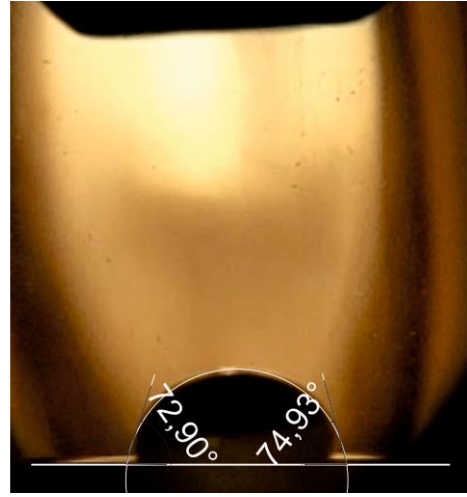
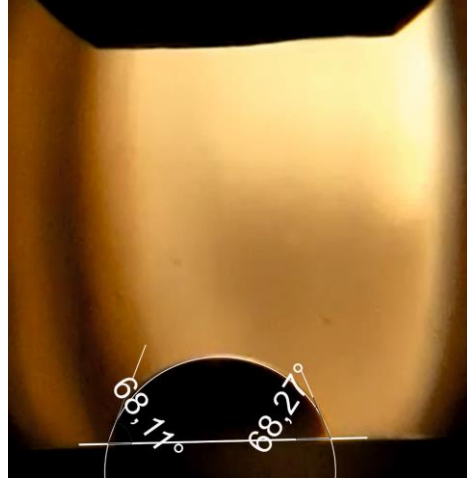
içerisinde ortalanarak bırakıldı. Kuartz camın altında ve üstünde yüksek saflıkta argon gazının dolaşabilmesi için gerekli aparatlar yardımıyla argon tüpü ile bağlantısı sağlandı. 300 fps değerinde çekim yapabilen bir dijital kamera yardımıyla damla görüntüsünü almak için kamera en uygun yere yerleştirildi. Böylece deney başlamaya hazır hale getirildi.

Gerekli kontroller sağlanarak düzenek kurulduktan sonra yüksek saflıktaki argon gazı ilk önce alt uçtan 10 dk boyunca daha sonra da üst uçtan 20 dk boyunca dolaşması sağlandı. 30 dk'lık bu süre dolduktan sonra fırın istenilen sıcaklık (250, 280 ve 310 °C) değerine ayarlanır ve lehimin ergimesi beklendi. Fırının sağ ve sol iki bölmesi olduğundan dolayı sağ ve sol termo-çiftlerinin ayarlanan sıcaklık değerini gösterdiği denge sıcaklığının eşitlenmesi için 30 dk kadar beklendi. Deneyin başlamışından 60 dk sonra lehim alaşımı ergimiş bir şekilde damlamaya hazır hale geldi ve ucu step motoruna bağlı olan çelik demir step motoru sayesinde belirli bir frekansta dönmesi sağlandı. Bu sırada dijital kamera ile video kaydı alındı. Lehim alaşımı sıvı bir şekilde Cu altlık üzerine damlatıldığı andan itibaren 10 dk'lık bir video kaydı yapıldı. Tüm bu işlemler tamamlandıktan sonra deney düzeneği kapatılarak işlem sonlandırıldı.

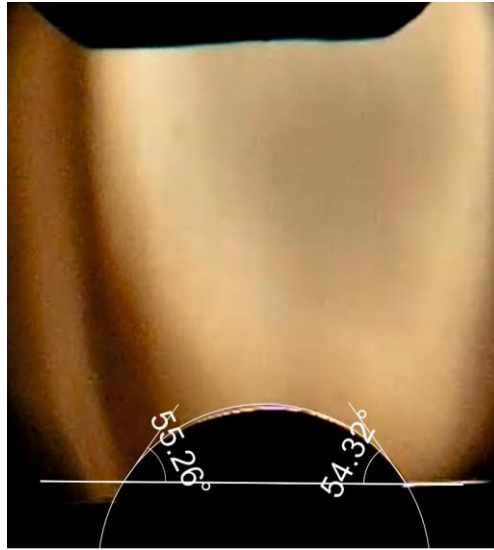
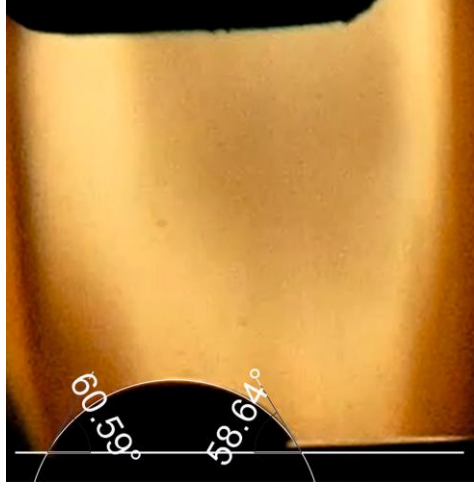
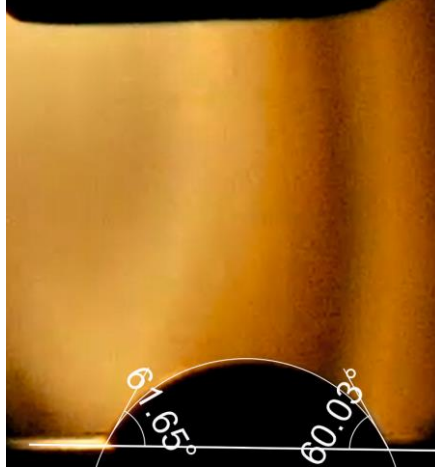
Video kaydındaki 5, 10, 15, 30, 60, 90, 120, 150 ve 300. saniyelerdeki ekran görüntüleri alınarak kaydedildi. Bilgisayarda "Corel Draw" çizim programı kullanılarak lehim alaşımının Cu altlık üzerindeki temas açısı ölçüldü ve kaydedildi.



Şekil 4.2. Sn-0,7Cu lehim alaşımının 250 °C' de temas açısı.



Şekil 4.3. Sn-0,7Cu lehim alaşımının 280 °C' de temas açısı.



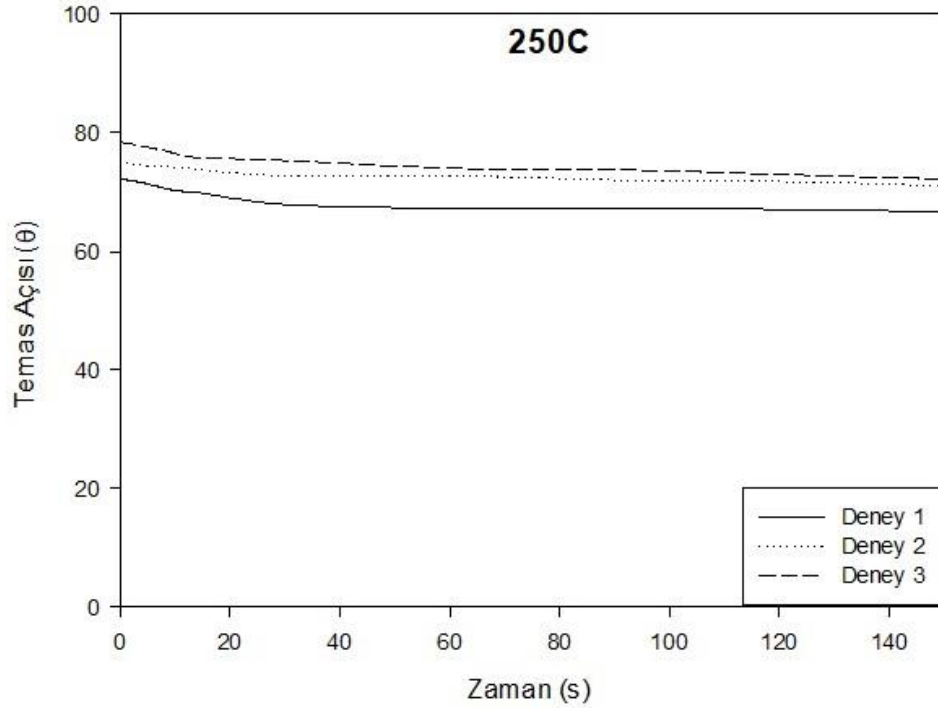
Şekil 4.4. Sn-0,7Cu lehim alaşımının 310 °C' de temas açısı.

BÖLÜM 5

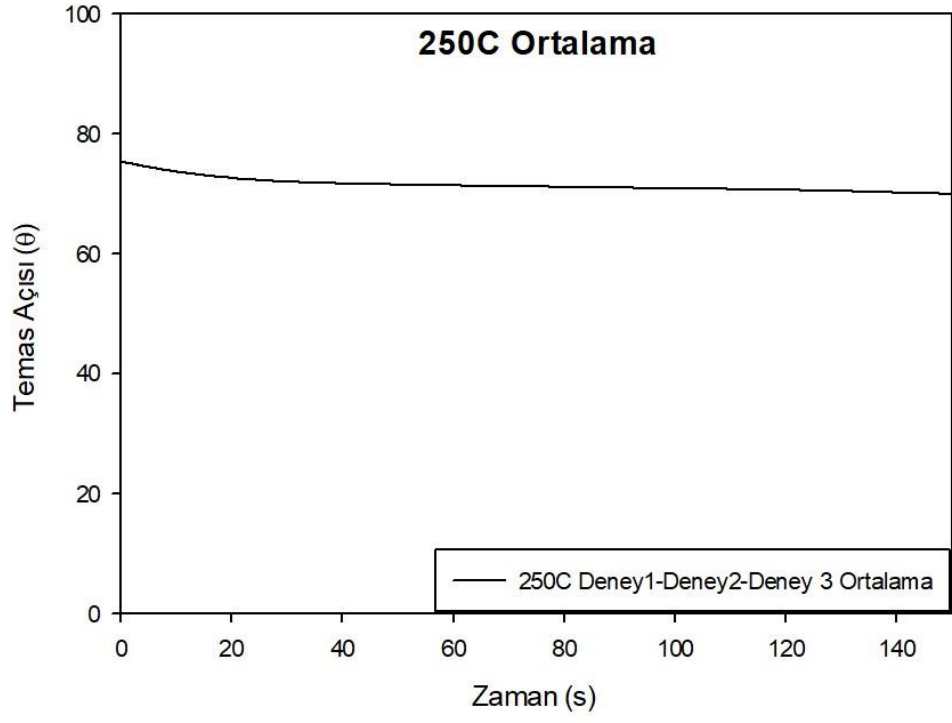
ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

5.1. TEMAS AÇISI ÖLÇÜMLERİ

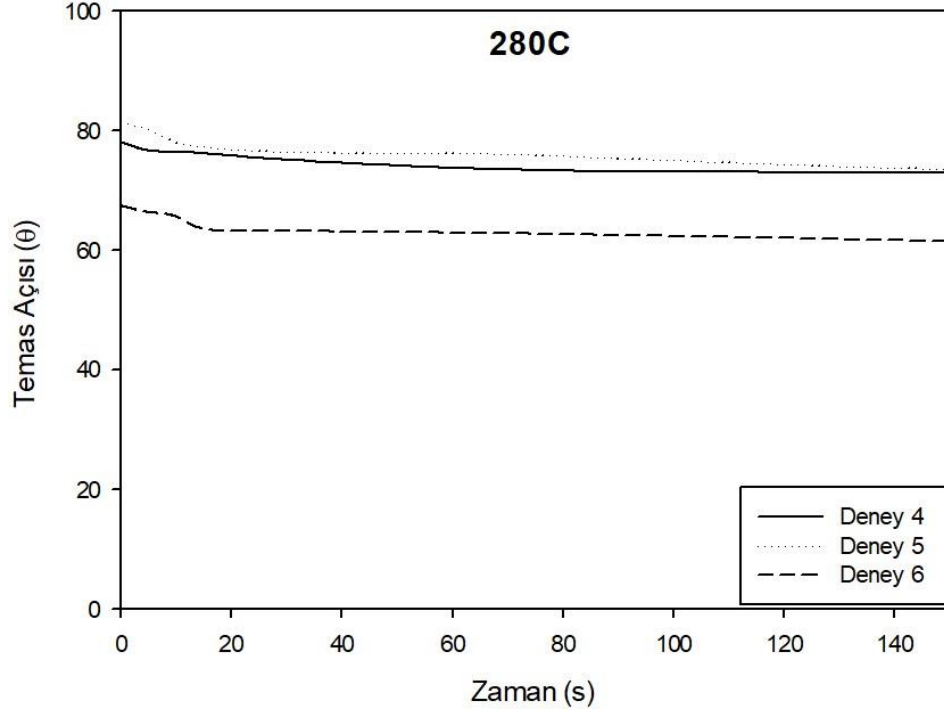
Sn-0,7Cu kurşunsuz lehim alaşımlarının 250, 280 ve 310 °C’de zamana bağlı temas açısı ölçümlerinin değerleri bilgisayarda “Sigma Plot 12” programı yardımıyla çizilen grafikler Şekil 5.1-5.7’da gösterildiği gibidir.



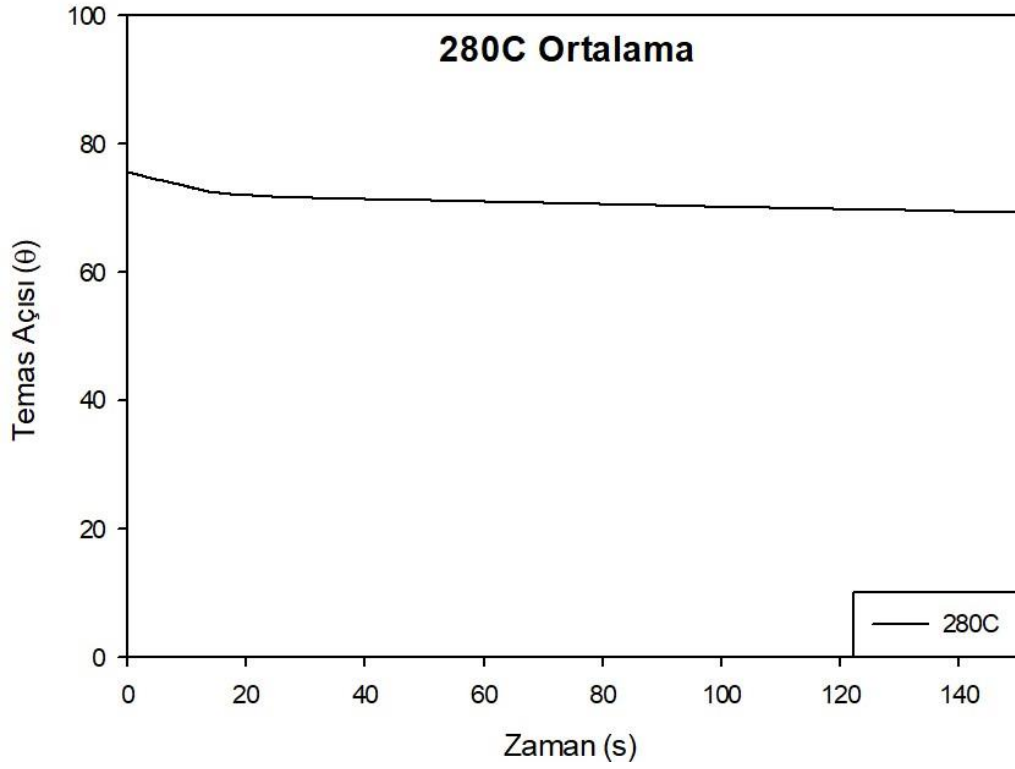
Şekil 5.1. Sn-0,7Cu kurşunsuz lehim alaşımının 250 °C sıcaklıkta zamana bağlı temas açısı değerleri.



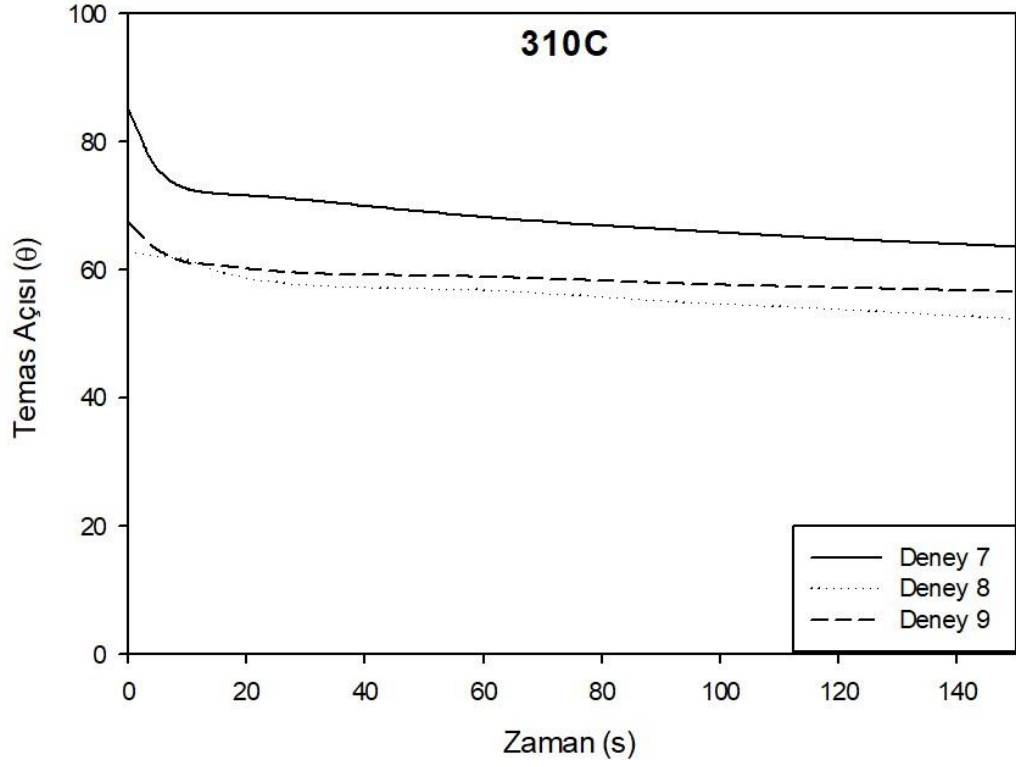
Şekil 5.2. Sn-0,7Cu kurşunsuz lehim alaşımının 250 °C sıcaklıkta Deney1-Deney2-Deney3 değerlerinin zamana bağlı temas açısı değerleri.



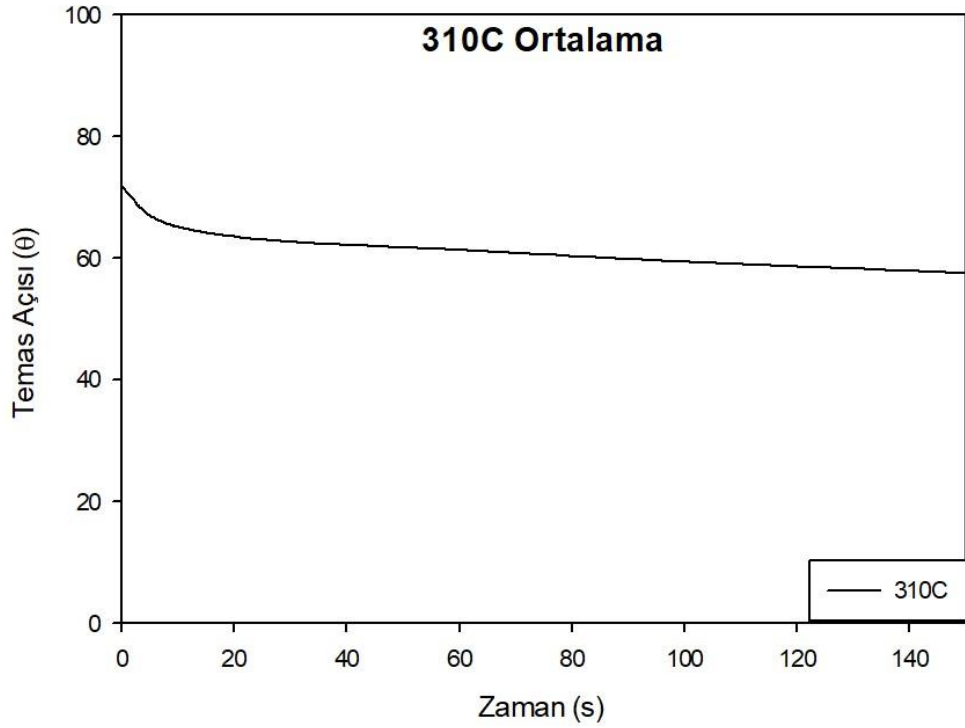
Şekil 5.3. Sn-0,7Cu kurşunsuz lehim alaşımının 280 °C sıcaklıkta zamana bağlı temas açı değerleri.



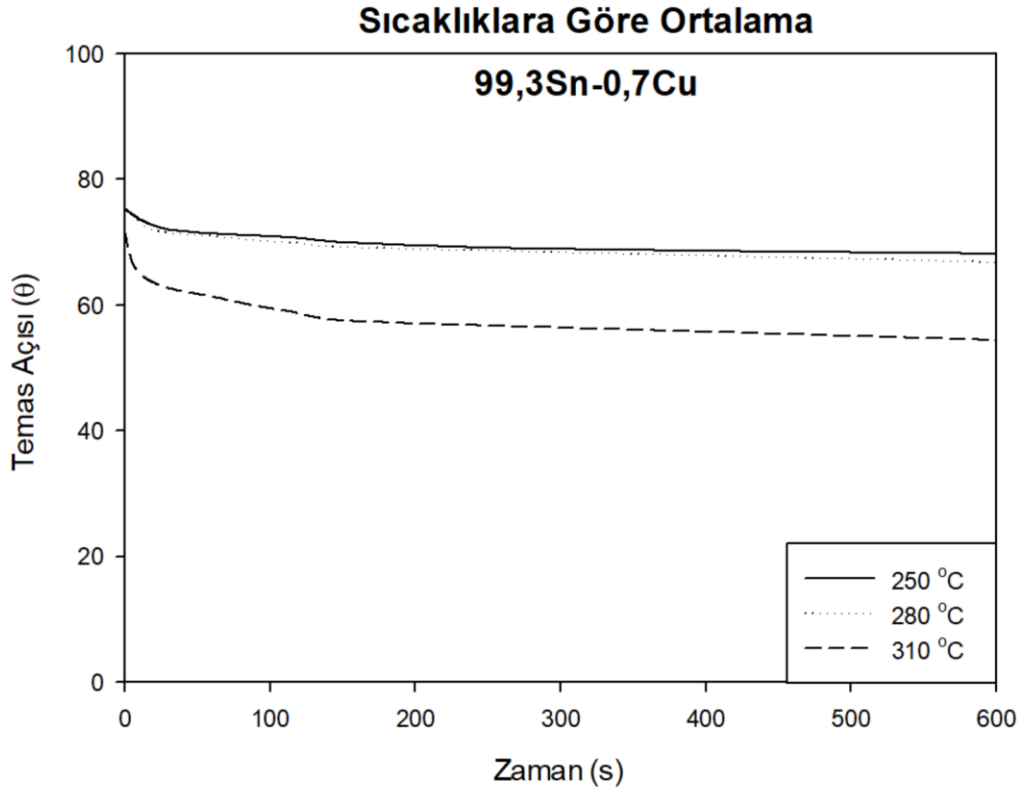
Şekil 5.4. Sn-0,7Cu kurşunsuz lehim alaşımının 280 °C sıcaklıkta Deneý1-Deneý2-Deneý3 deęerlerinin zamana baęlı temas açı deęerleri.



Şekil 5.5. Sn-0,7Cu kurşunsuz lehim alaşımının 310 °C sıcaklıkta zamana bağlı temas açısı değerleri.



Şekil 5.6. Sn-0,7Cu kurşunsuz lehim alaşımının 310 °C sıcaklıkta Dene1-Dene2-Dene3 değerlerinin zamana bağlı temas açısı değerleri.



Şekil 5.7. Sn-0,7Cu kurşunsuz lehim alaşımının 250, 280 ve 310 °C sıcaklıkta zamana bağlı temas açısı değerleri.

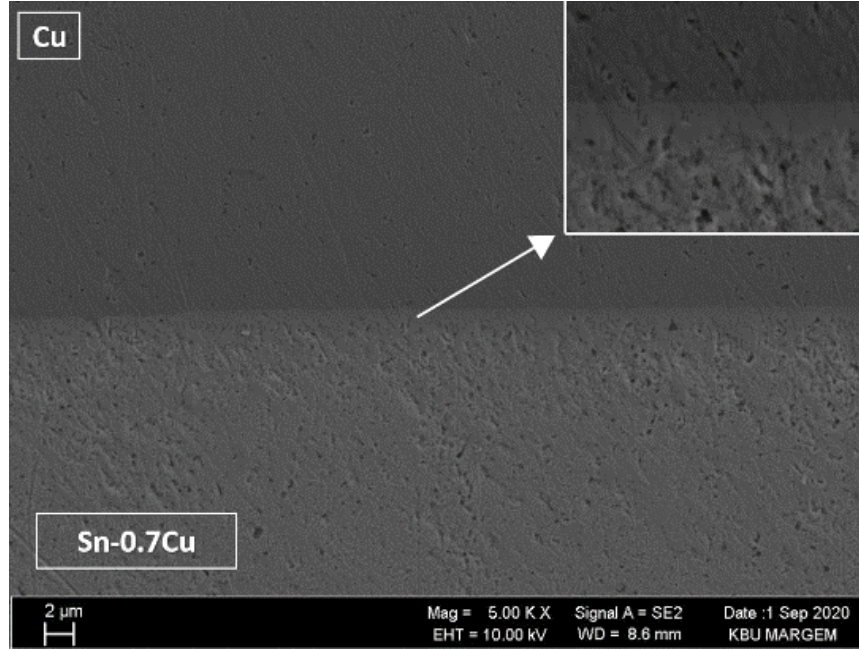
Şekil 5.1-5.7’de temas açısı değişim grafikleri incelendiğinde açısı değerlerinin zamana göre eksponansiyel olarak azaldığı, 60. saniyeden itibaren dengeye geldiği gözlemlenmektedir.

Ayrıca Sn-0,7Cu ikili kurşunsuz lehim alaşımı için elde edilen temas açısı ölçümleri Çizelge 5.1’ de verilmiştir.

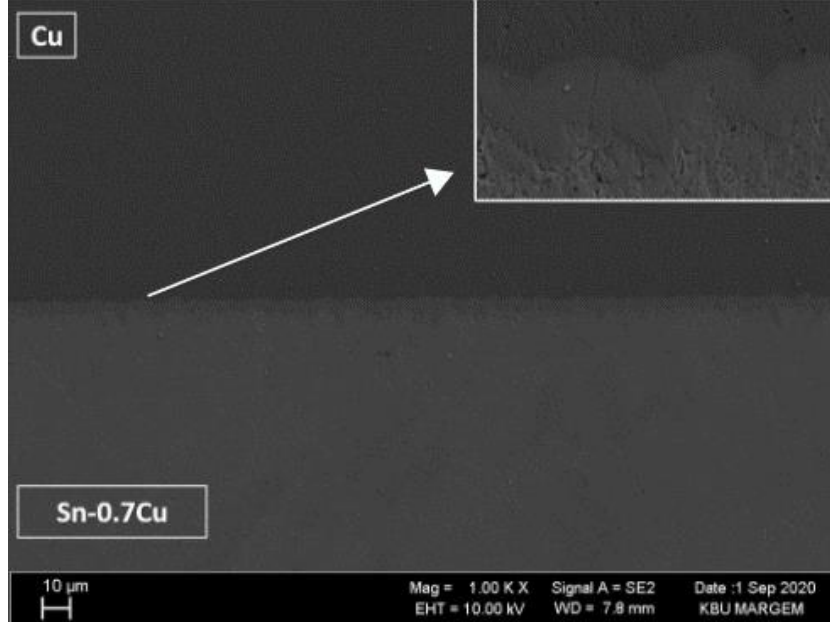
Çizelge 5.1. Sn-0,7Cu temas açısı ölçümleri.

Temas Açısı Ölçümleri			
Zaman (s)	250 °C	280 °C	310 °C
0	75,32	75,60	71,82
5	74,45	74,38	66,99
10	73,64	73,34	65,07
15	73,10	72,35	64,14
30	72,00	71,58	62,66
60	71,38	70,99	61,34
90	71,01	70,37	59,83
120	70,00	69,82	58,64
150	69,98	69,28	57,54

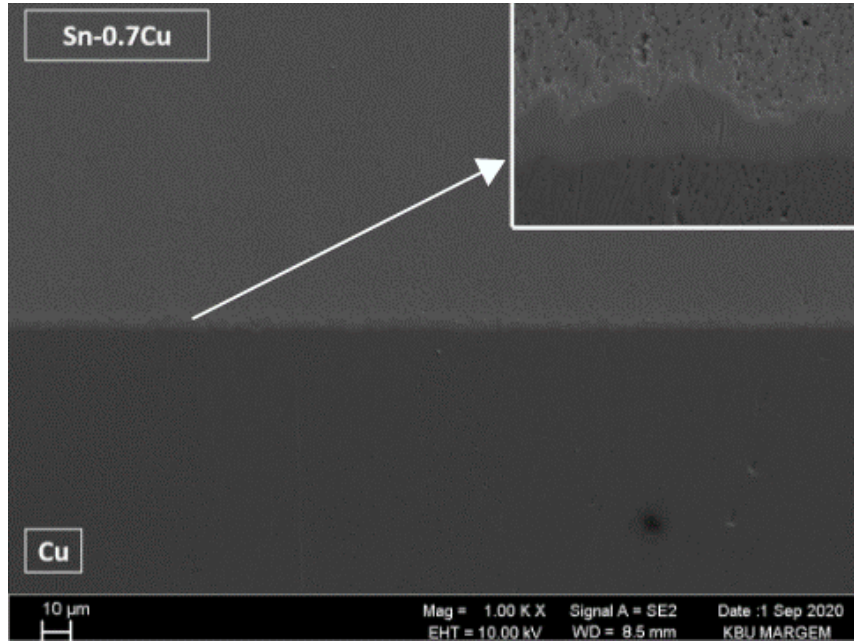
5.2. TARAMALI ELEKTRON MİKROSKOBU (SEM) GÖRÜNTÜLERİ VE KİMYASAL ANALİZ (EDX) SONUÇLARI



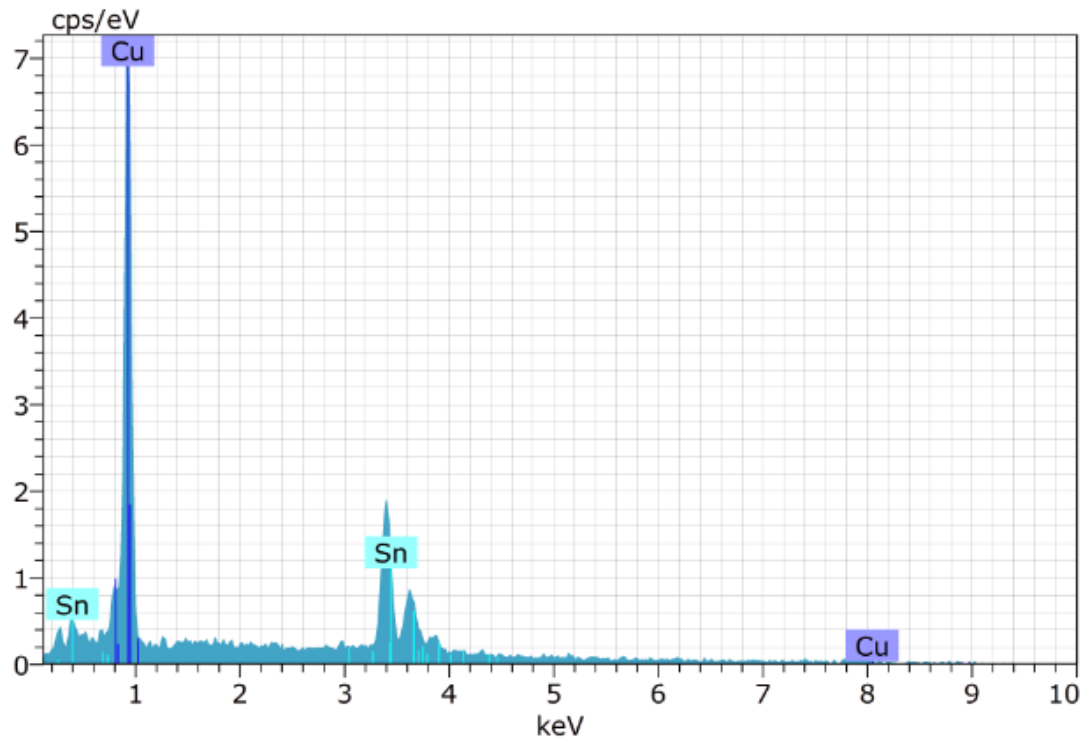
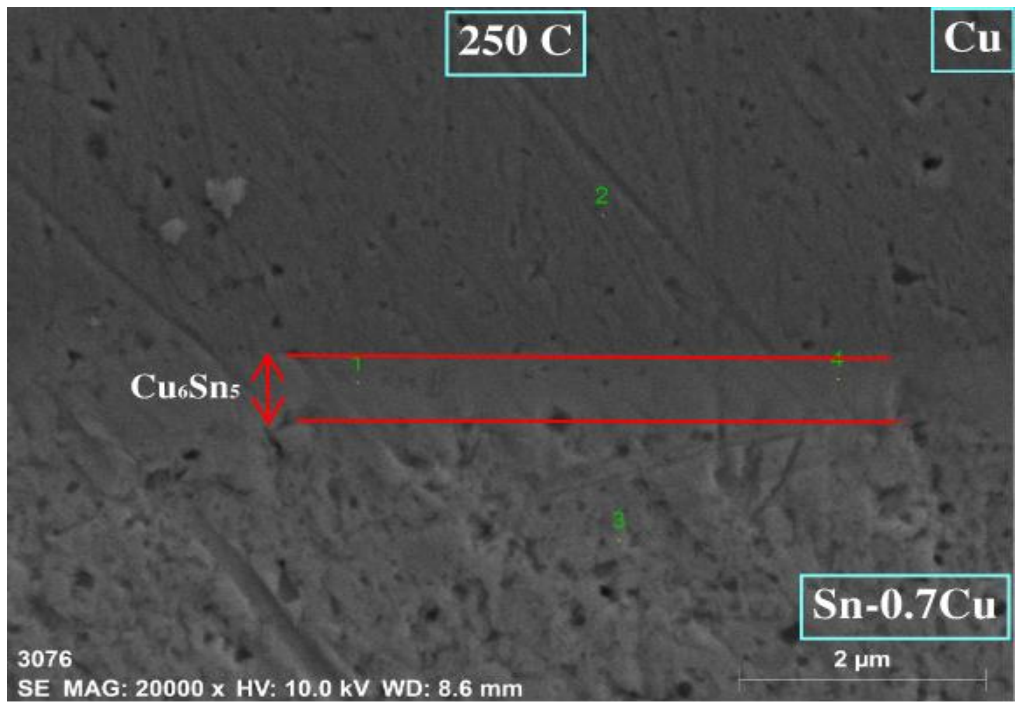
Şekil 5.8. Sn-0,7Cu kurşunsuz lehim alaşımının 250 °C deki SEM görüntüsü.

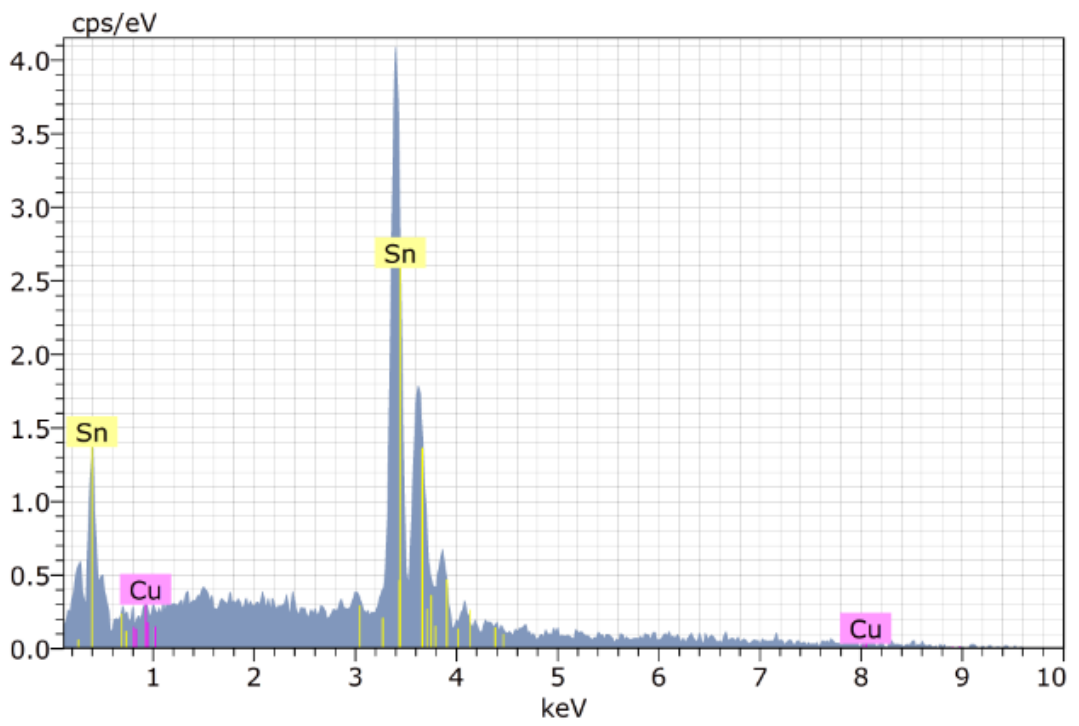
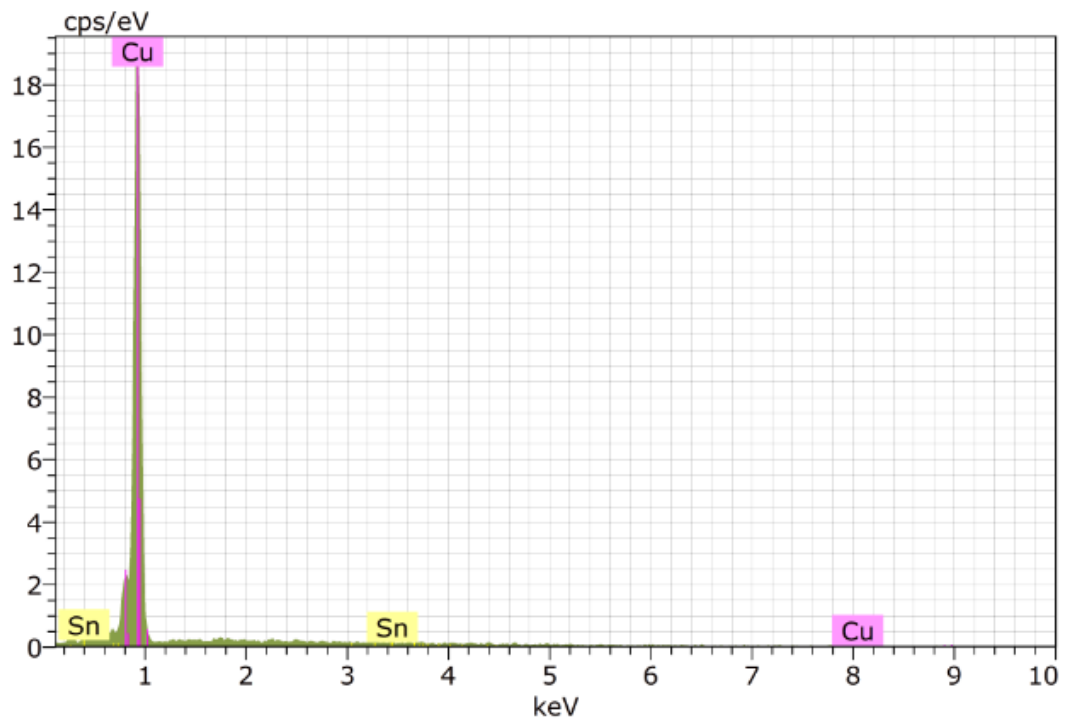


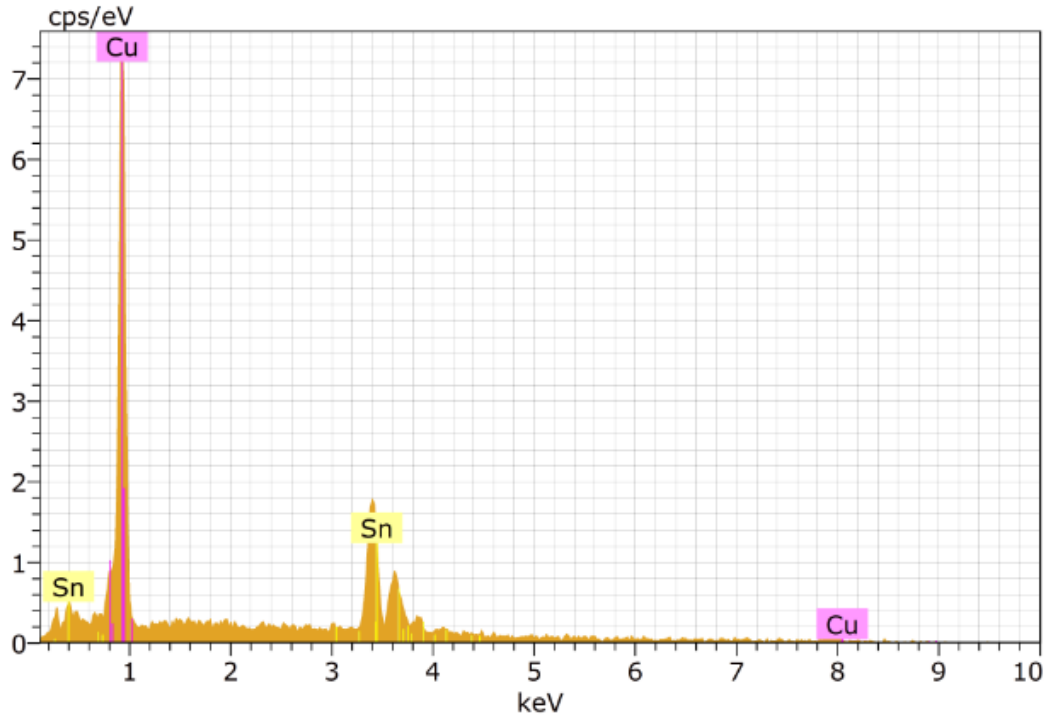
Şekil 5.9. Sn-0,7Cu kurşunsuz lehim alaşımının 280 °C deki SEM görüntüsü.



Şekil 5.10. Sn-0,7Cu kurşunsuz lehim alaşımının 310 °C deki SEM görüntüsü.





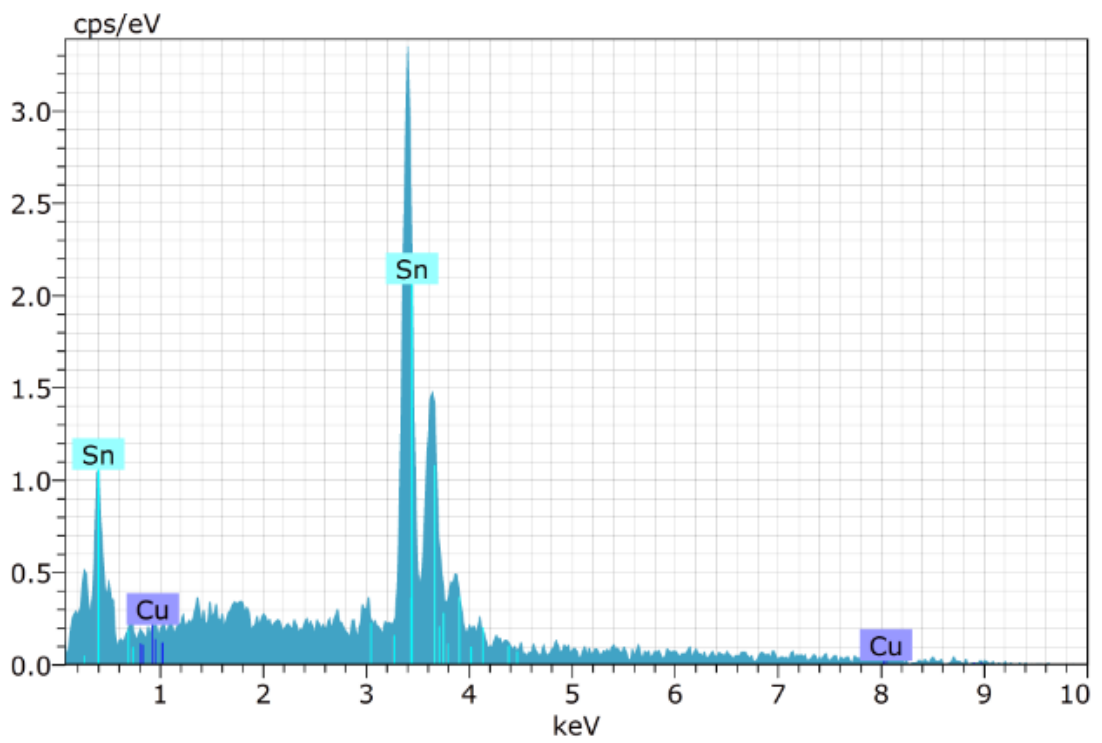


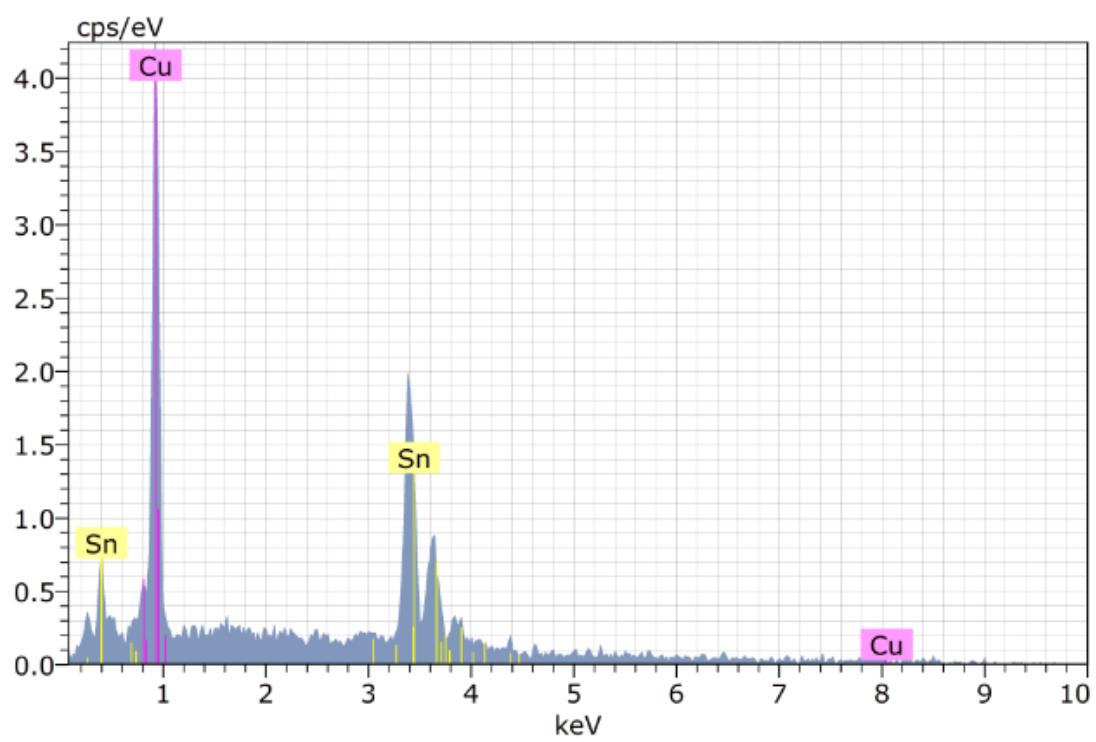
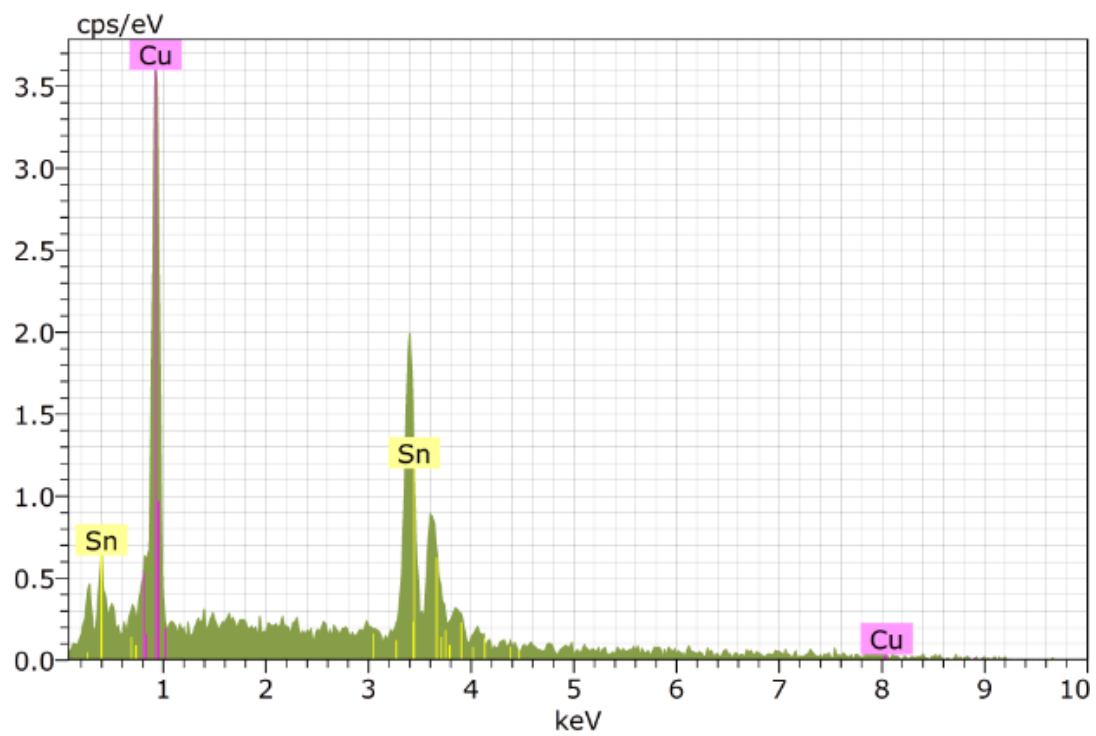
Mass percent (%)

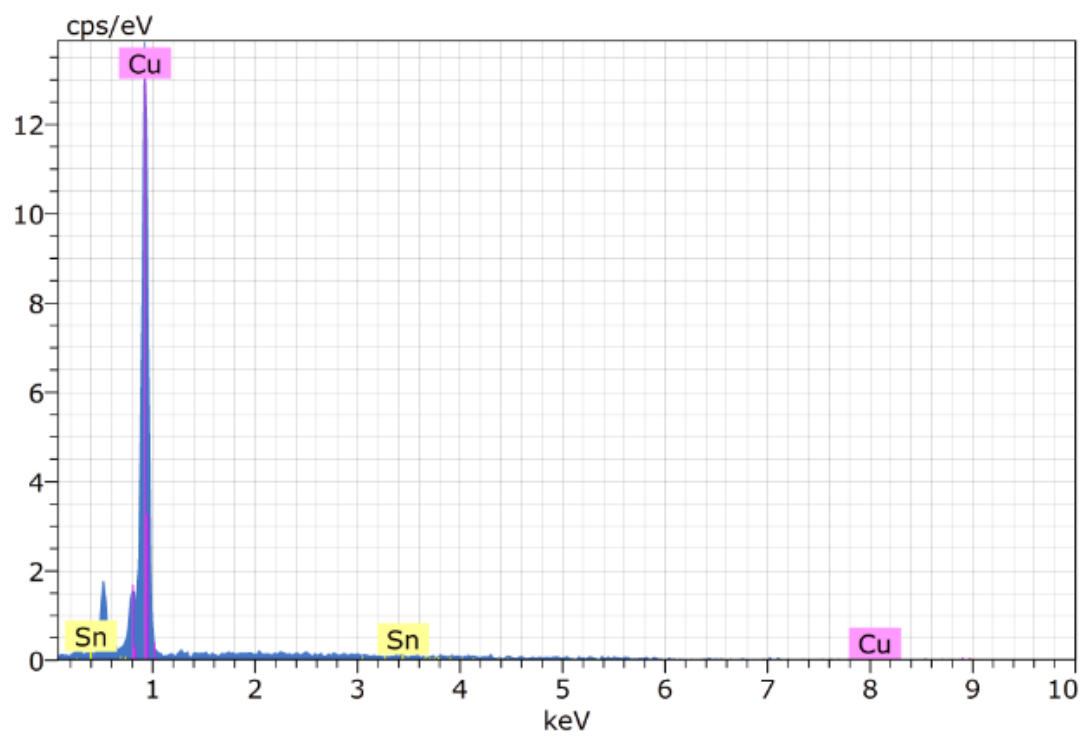
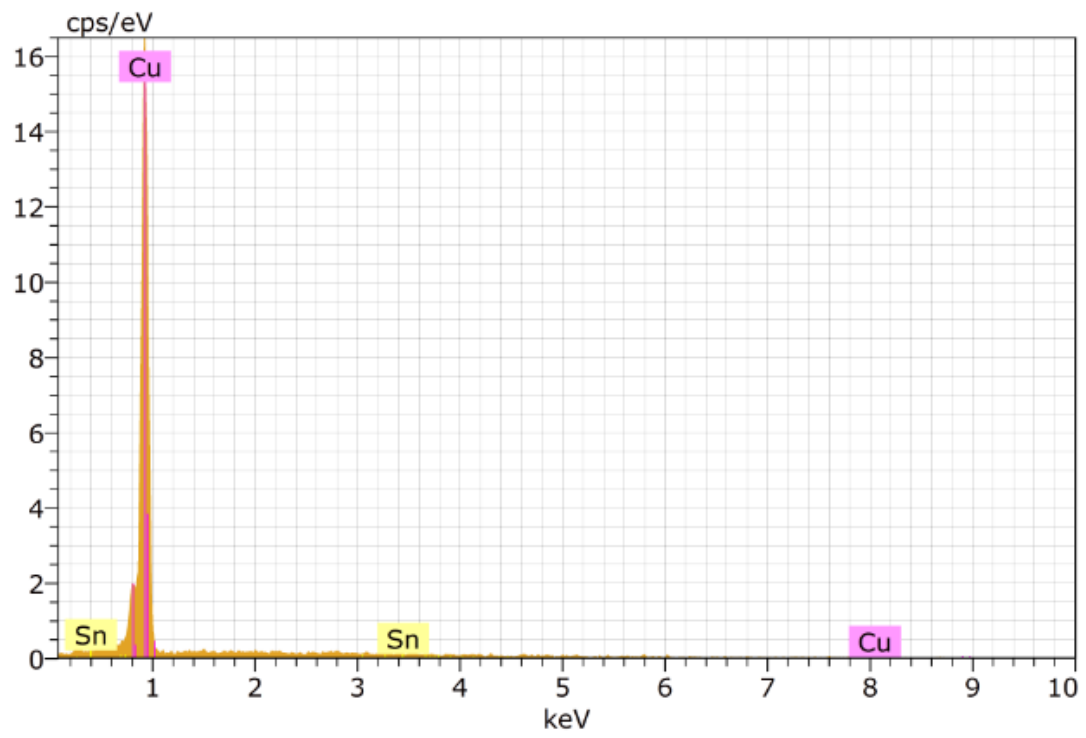
Spectrum	Cu	Sn
1	73.88	26.12
2	99.87	0.13
3	0.73	99.27
4	74.18	25.82

Mean value:	62.16	37.84
Sigma:	42.73	42.73
Sigma mean:	21.37	21.37

Şekil 5.11. Sn-0,7Cu kurşunsuz lehim alaşımının 250 °C deki SEM-EDX görüntüsü.





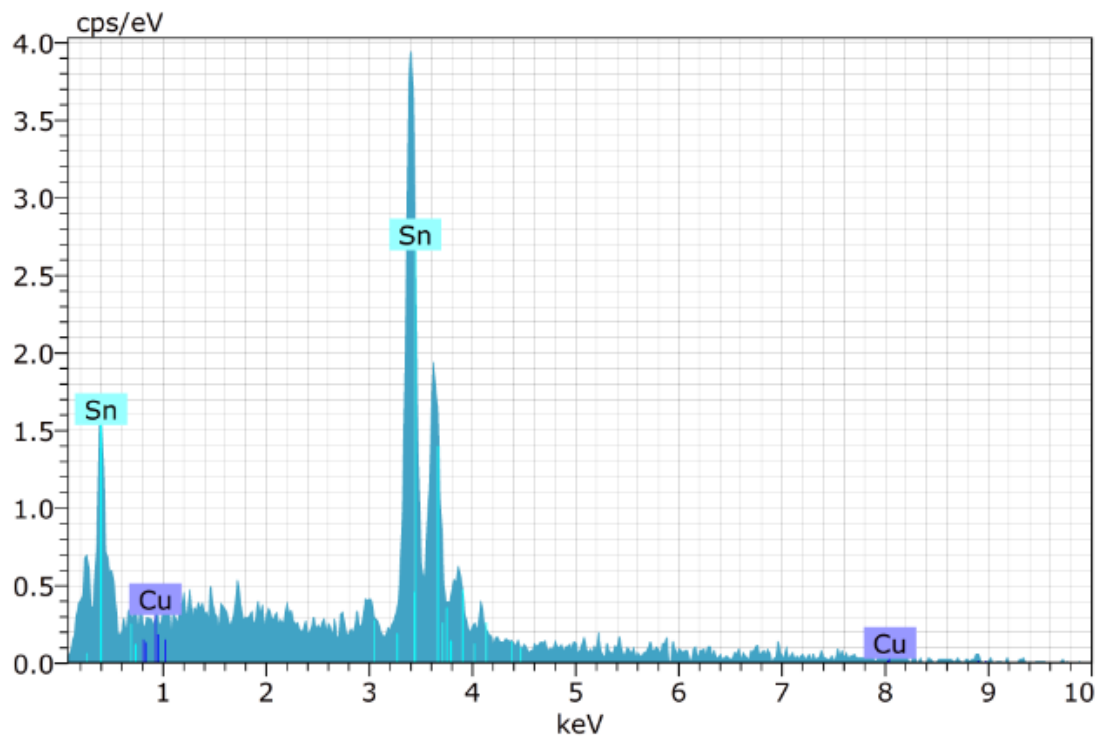
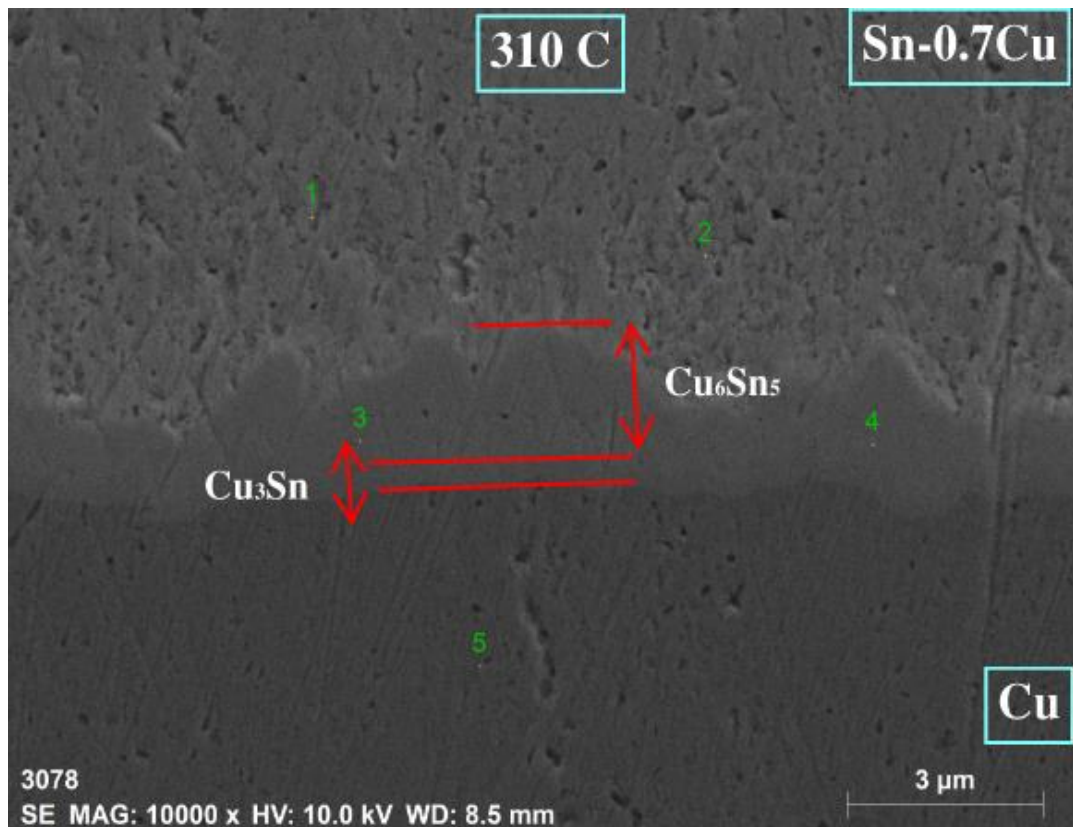


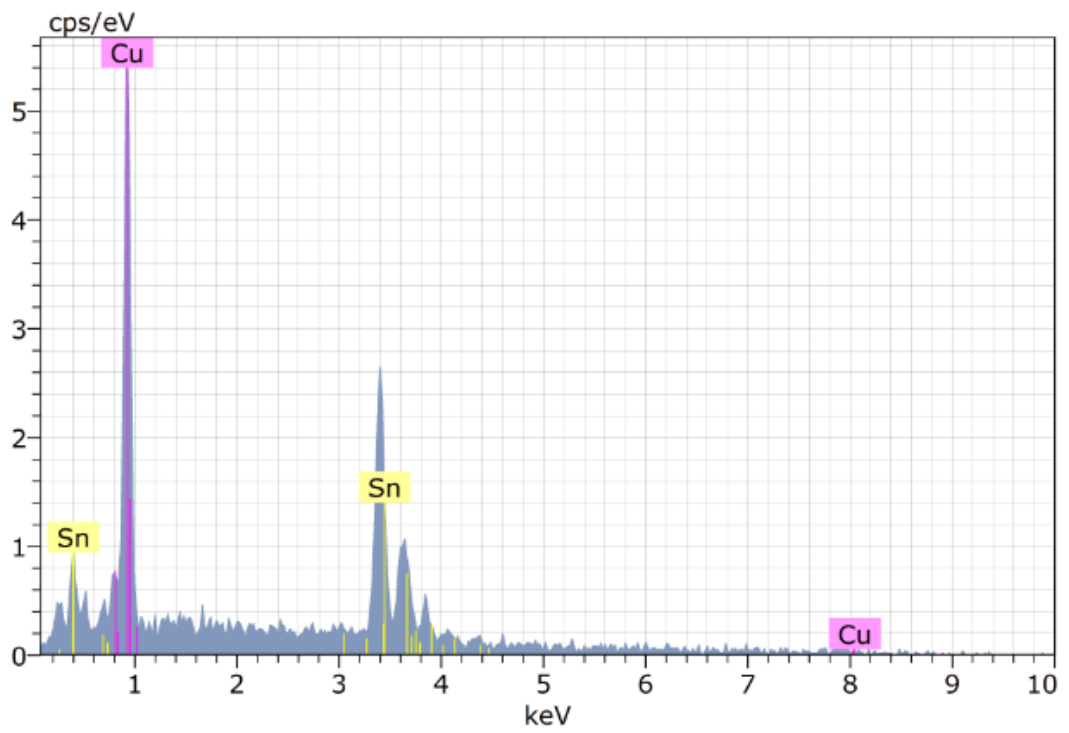
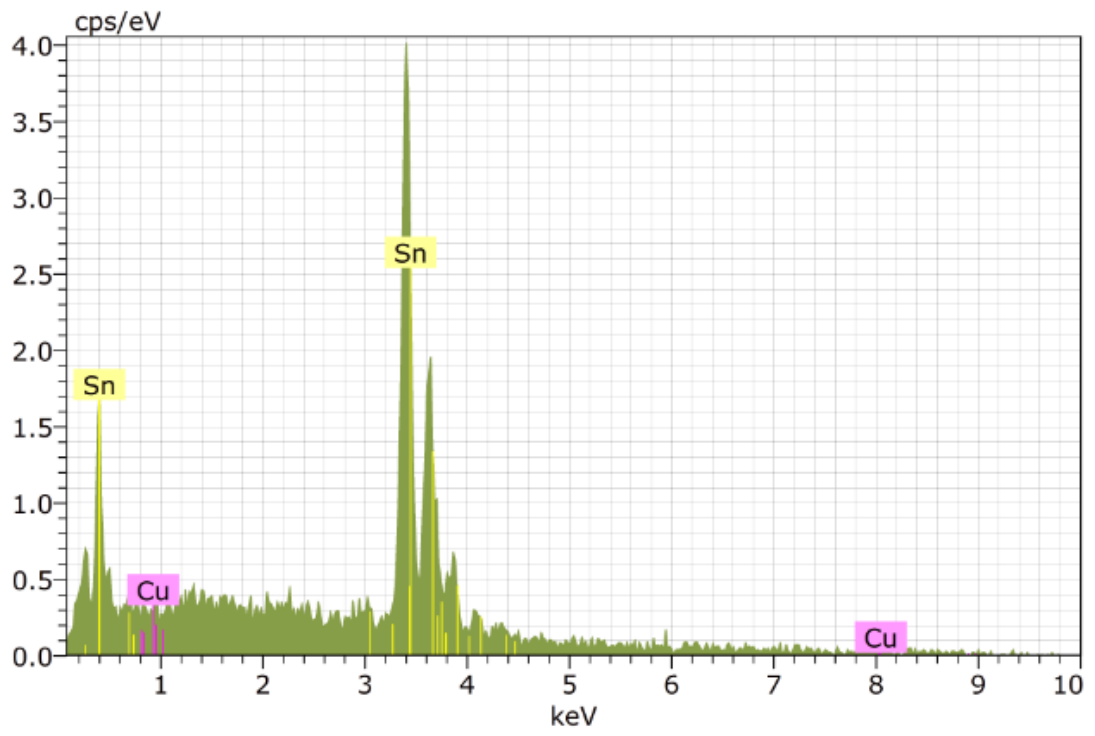
Mass percent (%)

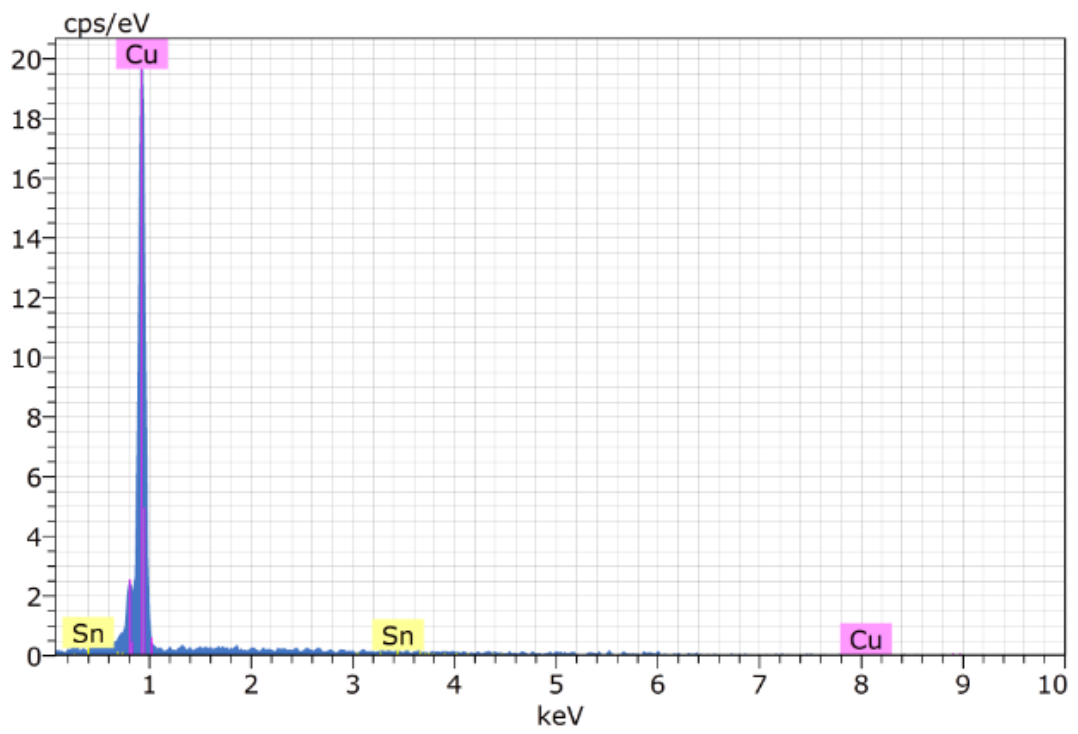
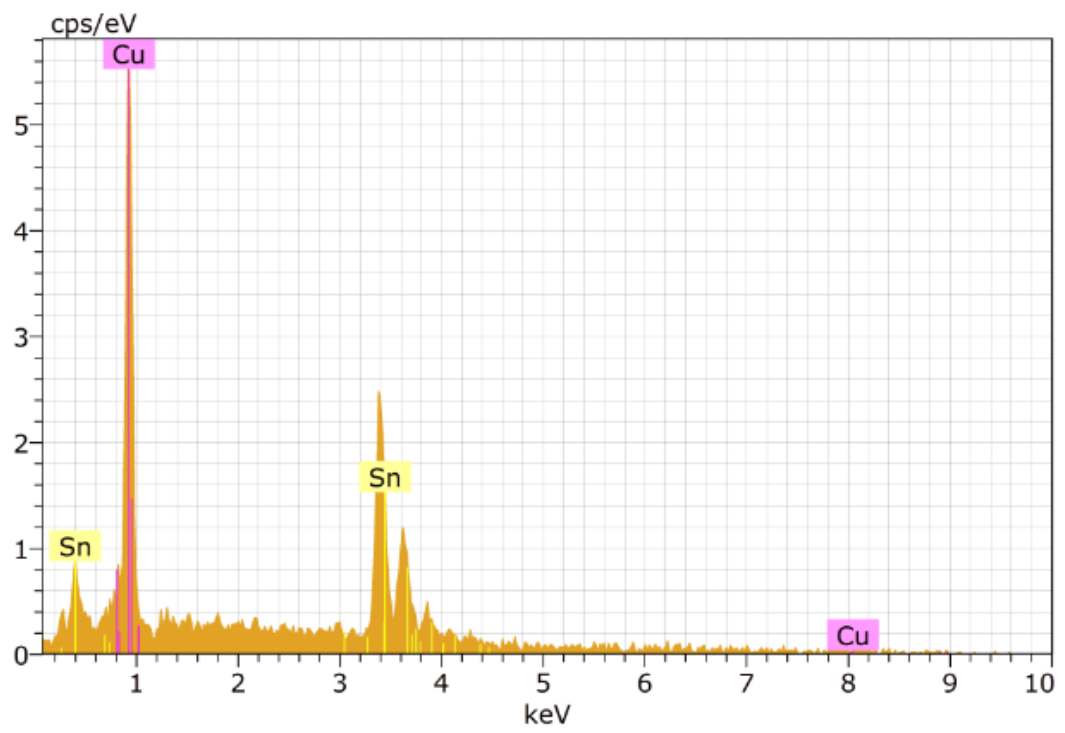
Spectrum	Cu	Sn
1	1.13	98.87
2	60.32	39.68
3	61.34	38.66
4	100.00	0.00
5	99.78	0.22

Mean value: 64.51 35.49
Sigma: 40.46 40.46
Sigma mean: 18.09 18.09

Şekil 5.12. Sn-0,7Cu kurşunsuz lehim alaşımının 280 °C deki SEM-EDX görüntüsü.





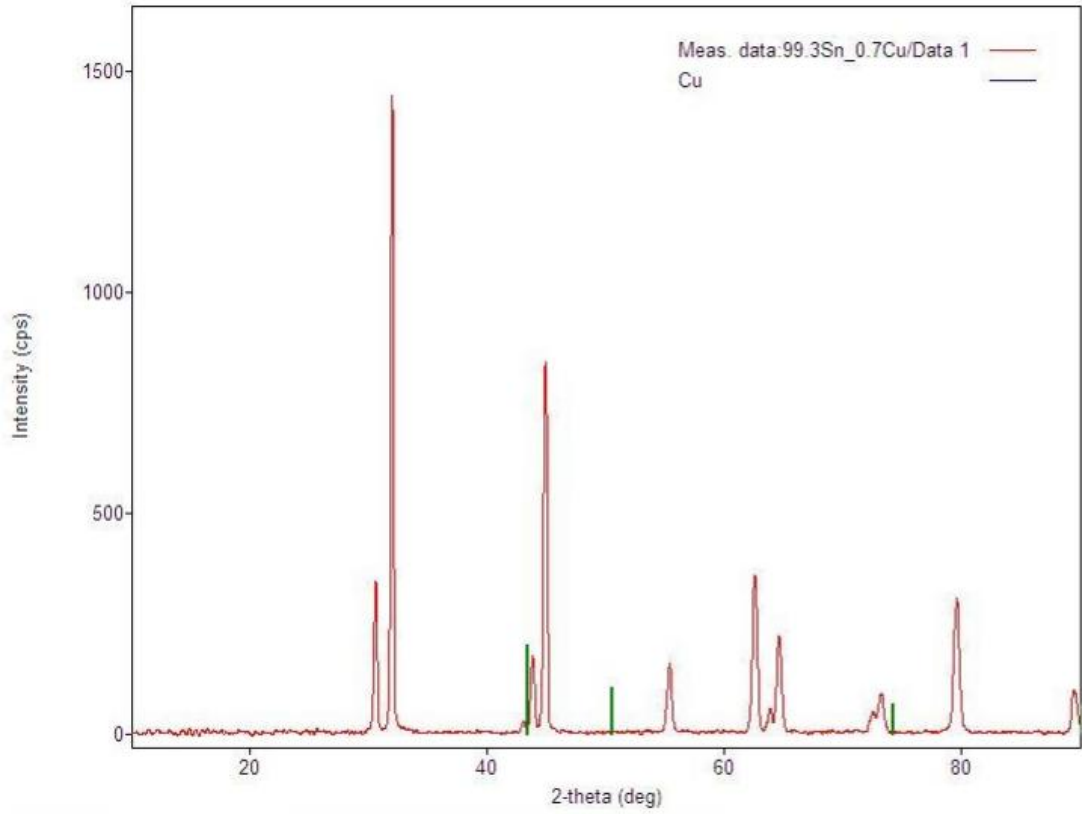


Mass percent (%)		
Spectrum	Cu	Sn
1	2.01	97.99
2	2.99	97.01
3	63.40	36.60
4	63.99	36.01
5	99.90	0.10

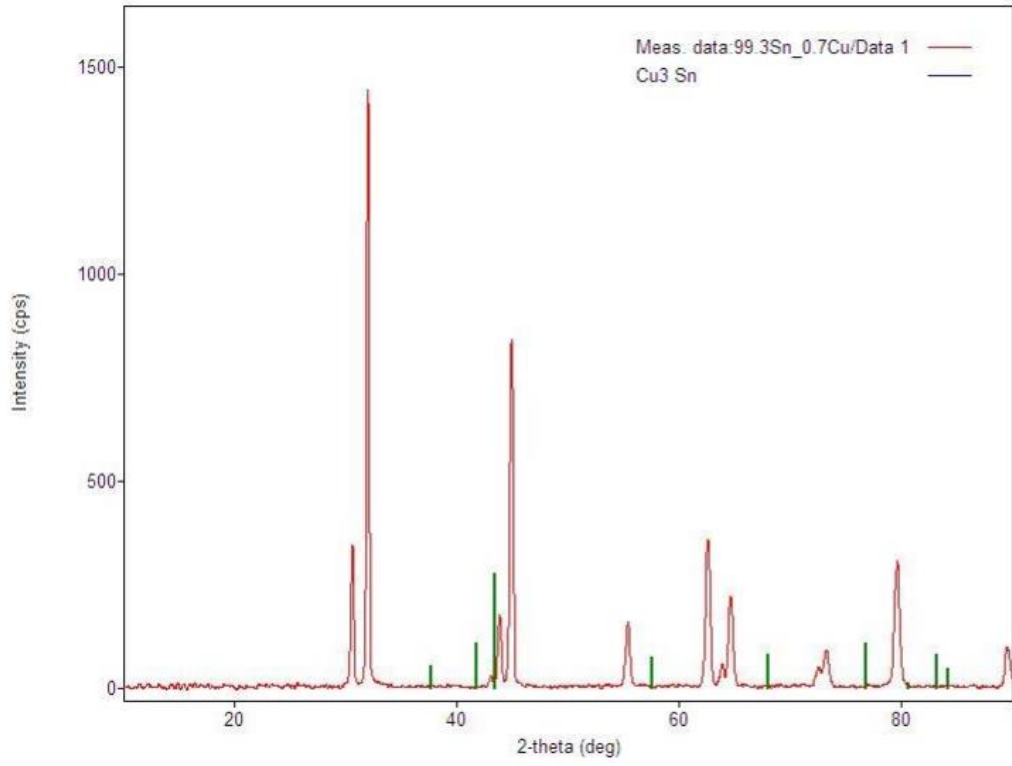
Mean value:	46.46	53.54
Sigma:	42.76	42.76
Sigma mean:	19.12	19.12

Şekil 5.13. Sn-0,7Cu kurşunsuz lehim alaşımının 310 °C deki SEM-EDX görüntüsü.

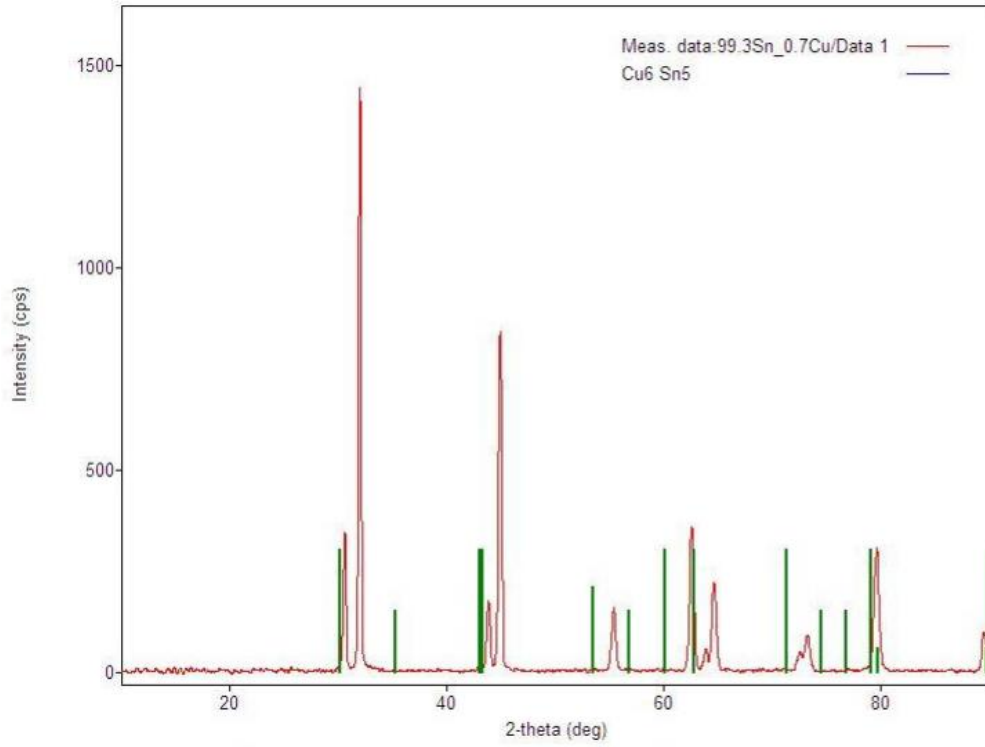
5.3. XRD ANALİZ VE SONUÇLARI



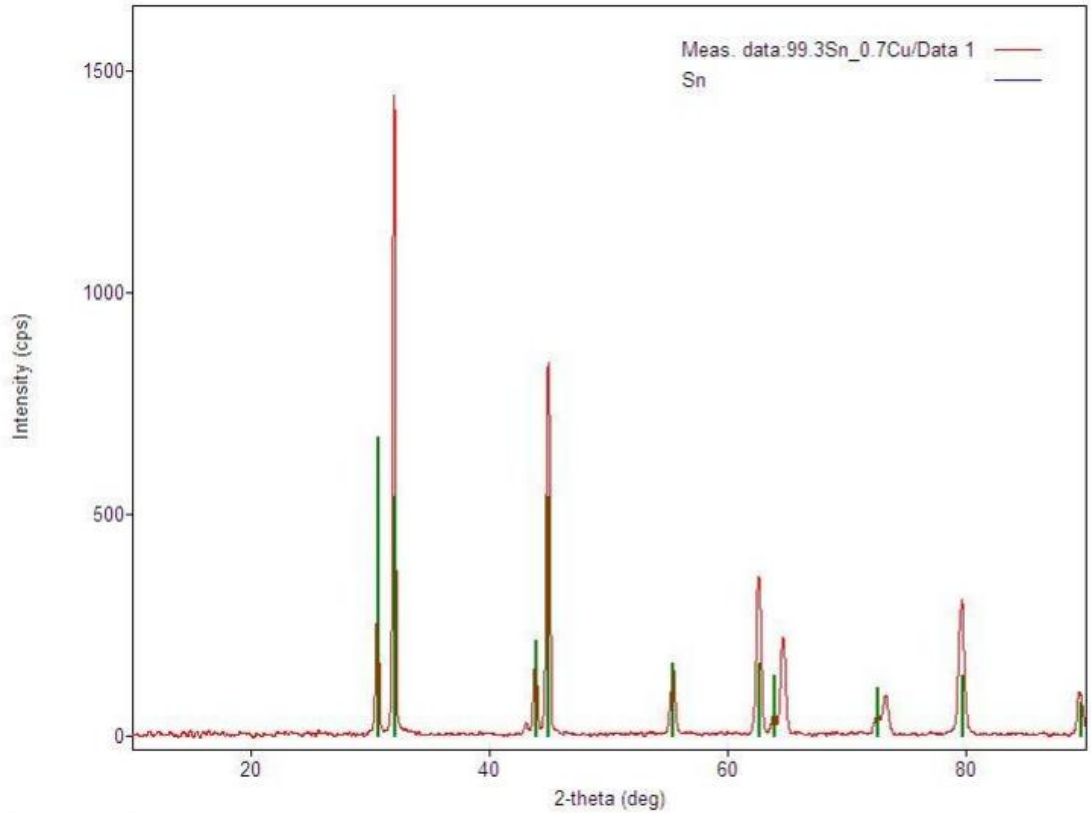
Şekil 5.14. Sn-0,7Cu kurşunsuz lehim alaşımının Cu için XRD analizi.



Şekil 5.15. Sn-0,7Cu kurşunsuz lehim alaşımının Cu_3Sn için XRD analizi.



Şekil 5.16. Sn-0,7Cu kurşunsuz lehim alaşımının Cu_6Sn_5 için XRD analizi.



Şekil 5.17. Sn-0,7Cu kurşunsuz lehim alaşımının Sn için XRD analizi.

BÖLÜM 6

SONUÇLAR

- Sn-0,7Cu kurşunsuz lehim alaşımının sıcaklığa bağlı temas açısı değişim grafikleri incelendiğinde açı değerlerinin zamana göre eksponansiyel olarak azaldığı, 60. saniyeden itibaren dengeye geldiği gözlemlenmiştir.
- En düşük temas açısının 310 °C’de 57,54 ° olarak elde edilmiştir.
- Taramalı elektron mikroskopu (SEM), EDX ve XRD analizleri sonucunda mikro yapıda ikincil intermetalik fazların oluştuğu gözlenmiş ve bu fazların Cu₆Sn₅ ve Cu₃Sn oldukları anlaşılmıştır.
- İlk olarak Cu₆Sn₅ fazının saçaklı yapıda oluştuğu, Cu₃Sn fazının ise daha sonra Cu₆Sn₅ ile Cu altlık arasında ince tabaka şeklinde meydana geldiği görülmektedir.
- Bununla birlikte Cu₃Sn fazının Cu₆Sn₅ fazına göre çok daha ince olduğu ve oluşumunun daha uzun sürdüğü yapılan analizlerden ve literatür araştırmalarından anlaşılmıştır.

KAYNAKLAR

1. Oguz, S., “Sn-(3-x)Ag-0,5Cu-xBi Dörtlü Kurşunsuz Lehim Alaşımalarının Islatma Özelliklerinin Cu Altık Üzerinde İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, **Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Karabük (2018).
2. Kim, S. W., Lee, J., Jeon, B.-M., Jung, E., Lee, S. H., Kang, K. H., and Lim, K. T., "Thermophysical Properties of Sn–Ag–Cu Based Pb-Free Solders", **International Journal Of Thermophysics**, 30 (4): 1234–1241 (2009).
3. Moser, Z., Fima, P., Bukat, K., Sitek, J., Pstrus, J., Gasior, W., Koscielski, M. and Gancarz, T., “Investigation of the effect of indium addition on wettability of Sn-Ag-Cu- solders”, **Soldering and Surface Mount Technology**, 23: 22-29 (2011).
4. Zhang, L., Xue, S., Gao, Li., Sheng, Z., Ye, H., Xiao, Z., Chen, Y. and Yu, S.,”Development of sn-Zn lead-free solders bearing alloying elements”, **Journal of Materials Science: Materials in Electronics**, 21 (1): 1-15 (2010).
5. Takemoto, T. and Miyazaki, M., “Effect of excess temperature above liquids of lead-free solders on wetting time in a wetting balance test”, **Materials Transactions**, 42 (5): 745-750 (2001).
6. Zhao, J., Mutoh, Y., Miyashita, Y. and Mannan, S. L., “Fatigue crack-growth behavior of Sn-Ag-Cu and Sn-Ag-Cu-Bi lead-free solders”, **Journal of Electronic Materials**, 31 (8):879-886 (2002).
7. Kim, J. W. and Jung, S. B., “Experimental and finite element analysis of the shear speed effects on the Sn-Ag- and Sn-Ag-Cu BGA solder joints”, **Material Science and Engineering**, A 371: 267-276 (2004).
8. Edward, K. ve Edward, L. (1993). *ASM Handbook; Welding, Brazing and Soldering*. 2357-2449, 952-991, ASM Handbook International, USA, **6**, ISBN 0-87170-377-7.
9. Abut, H., “SAC305 ve SAC405 Kurşunsuz Lehim Alaşımalarının Islatma Özelliklerinin Cu (Bakır) Altık Üzerinde İncelenmesi”, **Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Karabük (2018).
10. Bath, J., “Lead Free Soldering”, **Lead-Free Soldering Standarts**, Springer, 271-284 (2007).
11. Lee, N. C., “Reflow Soldering Processes and Troubleshooting”, **Newnes, Boston**, (2001).

12. Humpston, G. and Jacobson, D. M., “Principles of Soldering”, *Materials Park*, ASM International, OH, USA, (2004).
13. Deubzer, O. ve Zangl, S., “Adaptation to Scientific and Technical Progress Under Directive 2002/95/EC”, *Adaptation to Scientific and Technical (ELV Directive) Final Report*, Germany. (2012).
14. Basaran, C. ve Chandaroy, R., “Using finite element analysis for simulation of reliability tests on solder joints in microelectronic packaging”, *Comput. Struct.*, 74, 2, 215–231. (2000).
15. Yoon, J. W., Ko, M. K., Noh, B. I. and Jung, S. B., “Joint reliability evaluation of thermo-compression bonded FPCB/RPCB joints under high temperature storage test”, *Microelectron. Reliab.*, 53, 12, 2036–2042 (2013).
16. Arslan, O., “Bakır sektör profili”, *İstanbul Ticaret Odası*, Kobi ar-ge şubesi, İstanbul, 1-2 (2006).
17. Ünlü, B. S., Köksal, N. S., Atik, E., “Bakır esaslı bronz ve pirinç yatakların tribolojik özelliklerinin karşılaştırılması”, *DEÜ Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 5(2): 103-108 (2003).
18. Uzun, H., “Sert lehimleme prensipleri”, *Değişim Yayınları*, İstanbul, 18:21, 236-237 (2002).
19. İnternet : Devlet Planlama Teşkilatı “Sekizinci Beş Yıllık Kalkınma Planı”<http://ekutup.dpt.gov.tr/madencil/metalmad/oik638.pdf> (2001).
20. Metals Handbook, “Properties and selection non ferrous alloys and pure metals”, *American Society for Metals*, USA, 2: 239-248 (1978).
21. Bağcı, M., İmrek, H., “CuZn10 ve CuSn10 bakır alaşımların erozif aşınması”, *Uluslararası İleri Teknolojileri Sempozyumu*, Karabük, 1-3 (2009).
22. Koçak, H., “Bakır alaşımları el kitabı”, *Sağlam Metal*, İstanbul, 1-32 (2006).
23. Erbil, H. Y., "Surface Chemistry of Solid and Liquid Interfaces", *Blackwell Pub*, Oxford, UK, Malden, MA, 352 (2006).
24. Bozmaoğlu, A., “SACX300, SACX305 ve SACX0307 Üçlü Kurşunsuz Lehim Alaşımlarının Cu (Bakır) Altlık Üzerinde İslatma Özelliklerinin İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Karabük, 5-16 (2015).
25. Erer, A. M., “İkili Kurşunsuz Lehim Alaşımı (Sn-Ag) Sistemlerinin Cu Altlık Üzerindeki İslatma Özelliklerinin İncelenmesi”, Doktora Tezi, *Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Zonguldak, 1-20 (2011).

26. Türkyılmaz, H., “Kurşun İyonlarının Kesikli Adsorpsiyon Prosesi İle Gideriminin Cevap Yüzey Yöntemiyle Optimizasyonu”, Yüksek Lisans Tezi, *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Isparta, 5-11 (2011).
27. Fraunhofer, A. V., “Adhesion and Cohesion”, *International Journal of Dentistry*, 2012, 951324, 1-8 (2012).
28. İnternet : “Cohesion and adhesion of water”, <https://www.khanacademy.org/science/biology/water-acids-andbases/cohesion-and-adhesion/a/cohesion-and-adhesion-in-water> (2018).
30. Hwang, J. S., Guo, Z. And Koenigsmann, H., “A high-performance lead-free solder the effects of In on 99.3Sn/0.7Cu”, *Soldering and Surface Mount Technology*, 13:(2), 7-13 (2001).
31. Sonawane, P. D. and Raja, V. K. B., “Advances in lead-free solders”, *International Journal of Mechanical Engineering and Technology (IJMET)*, 10:(2), 520-526 (2019).
32. Yoon, J. W., Noh, B. I. and Jung S. B., “Comparison of Interfacial Stability of Pb-Free Solders (Sn–3.5Ag, Sn–3.5Ag–0.7Cu, and Sn–0.7Cu) on ENIG-Plated Cu During Aging”, *IEEE Transactions On Components And Packaging Technologies*, 33:(1), 60-70 (2010).
33. Maveety, J. G., Liu, P., Vijayen, J., Hua, F. and Sanchez E.A., “Effect of Cooling Rate on Microstructure and Shear Strength of Pure Sn, Sn-0.7Cu, Sn-3.5Ag, and Sn-37Pb Solders”, *Journal of Electronic Materials*, 33:(11), 1355-1362 (2004).
34. Li, X., Zhang, F., Lv, X., Zhao, Z. and Yang, D., “Effect of liquid–liquid structure transition on solidification and wettability of Sn–0.7Cu solder”, *Journal of Alloys and Compounds*, 505, 472-475 (2010).
35. Bae, K. S. and Kim, S. J., “Microstructure and adhesion properties of Sn–0.7Cu/Cu solder joints”, *Journal of Materials*, 17:(4), 743-746 (2002).
36. Lee, T. Y., Choi, W. J. and Tu, K. N., “Morphology, kinetics, and thermodynamics of solid-state aging of eutectic SnPb and Pb-free solders (Sn–3.5Ag, Sn–3.8Ag–0.7Cu and Sn–0.7Cu) on Cu”, *Journal of Materials*, 17:(2), 291-301 (2002).
37. Teoh, A. L., Mohd Salleh, M. A. A., Nazri, S. F., Halin, D. S. C. and Foo, K. L., “Solidification Behaviour of Sn-40Pb Lead Solder and Sn-0.7Cu Lead-free Solder”, *Material Science and Engineering*, 864, 1-5 (2020).
38. Hu, X., Li, Y., Liu, Y. and Min, Z., “Developments of high strength Bi-containing Sn0.7Cu lead-free solder alloys prepared by directional solidification”, *Journal of Alloys and Compounds*, 625, 241-250 (2015).

39. Zhao, M., Zhang, L., Liu, Z. Q., Xiong, M. Y. and Sun, L., “Structure and properties of Sn-Cu lead-free solders in electronics packaging”, *Science and Technology of Advanced Materials*, 20:(1), 421-444 (2019).
40. El-Bedivi, A. B., El-Shafei, A. and Kamal, M., “Influence of Adding Bi\ or Bi-In on Structure and Required Properties of tin-Copper Lead Free Solder Alloy”, *International Journal of Engineering and Technology IJET-IJENS*, 14:(06), 61-68 (2014).
41. Arenas, M. F. and Acoff, V. L., “Contact Angle Measurements of Sn-Ag and Sn-Cu Lead-Free Solders on Copper Substrates”, *Journal of Electronic Materials*, 33:(12), 1452-1458 (2004).
42. Mohd Salleh, M. A. A., Hazizi, M. H. Z., Ahmad, Z. A., Hussin, K. And Ahmad, K. R., “Wettability, Electrical and Mechanical Properties of 99.3Sn-0.7Cu/Si3N4 Novel Lead-free Nanocomposite Solder”, *Advanced Materials Research*, 277, 106-111 (2011).
43. Mohd Salleh, M. A. A., Al Bakri, A. M. M., Kamarudin, H., Bnhussain, M., Hazizi, M. H. Z. and Somidin, F. “Solderability of Sn-0.7Cu/Si3N4 lead-free composite solder on Cu-substrate”, *Physics Procedia*, 22, 299-304 (2011).
44. Liang, J., Dariavach, N., Callahan, P. and Shangguan D., “Metallurgy and Kinetics of Liquid–Solid Interfacial Reaction during Lead-Free Soldering”, *Materials Transactions*, 47:(2), 317-325 (2006).

ÖZGEÇMİŞ

Awam Bakr, İlk ve orta öğrenimimi Musul'da, lise öğrenimimi ise Telkef' te tamamladı. 2010 yılında Musul Üniversitesi Eğitim Fakültesi Fen Bilimleri Bölümü Fizik Şubesinde üniversite eğitime başladı ve 2014 yılında iyi bir derece ile mezun oldu. 2015-2016 ve 2016-2017 eğitim öğretim yılları arasında Telkef' te bir lisede akşam kısmî zamanlı öğretmenlik yaptı. 2018 yılında Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalı'nda yüksek lisans eğitime başladı.