

**Al2024 ALAŞIMI İÇİN YARI-KATI METAL DÖKÜM İŞLEM  
PARAMETRELERİNİN BELİRLENMESİ VE MEKANİK  
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

**Hasan TANEROĞLU**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
METAL EĞİTİMİ**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ŞUBAT 2012  
ANKARA**

Hasan TANEROĞLU tarafından hazırlanan AI2024 ALAŞIMI İÇİN YARI-KATI METAL DÖKÜM İŞLEM PARAMETRELERİNİN BELİRLENMESİ VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ adlı bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Yrd. Doç. Dr. Neşet AKAR .....  
Tez Danışmanı, Metal Eğitimi Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile Metal Eğitimi Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Kadir KOCATEPE .....  
(Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, Gazi Üniversitesi)

Yrd. Doç. Dr. Neşet AKAR .....  
(Metal Eğitimi, Gazi Üniversitesi)

Yrd. Doç. Dr. Yunus KAYIR .....  
(Makina Eğitimi, Gazi Üniversitesi)

Tarih 06/02/2012

Bu tez ile G.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Bilal TOKLU .....  
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

## **TEZ BİLDİRİMİ**

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Hasan TANEROĞLU

**Al2024 ALAŞIMI İÇİN YARI-KATI METAL DÖKÜM İŞLEM  
PARAMETRELERİNİN BELİRLENMESİ VE MEKANİK  
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ  
(Yüksek Lisans Tezi)**

**Hasan TANEROĞLU**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
Şubat 2012**

**ÖZET**

Bu çalışmada, bir dövme alaşım olan AA2024 alaşımı yarı-katı metal şekillendirme tekniklerinden tikso-döküm yöntemiyle şekillendirilmiştir. Tikso-dökümde gerininin neden olduğu sıvı aktivasyonu (SIMA) işlemi ile üretilen biyetler kullanılmıştır. Yarı-katı bölgede, farklı sıvı oranlarına karşılık gelen sıcaklıklarda (608 °C, 616 °C ve 619 °C) ve 2,37 m/s piston hızında mikroyapı ve mekanik özelliklerin değişimi araştırılmıştır.

SIMA yöntemi ile biyet üretiminde yarı-katı sıcaklığa bağlı olarak artan soğuk deformasyon oranı ile tane boyutunun azaldığı ve şekil faktörünün arttığı belirlenmiştir. Tikso-dökümle şekillendirmede düşük sıvı oranlarına karşılık gelen sıcaklıkta (608°C) yarı-katı haldeki biyetin kalıp boşluğunu tam olarak doldurmadığı tespit edilmiştir. Yüksek sıvı oranlarında yarı-katı haldeki biyet (%60- %65) kalıp boşluğun tam olarak doldurulabilmiştir. Tikso-dökümle şekillendirilen numunelerin mekanik özellikleri ekstrüze+T6 koşullarındaki numunelerin mekanik özelliklerinden %50 daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Tikso-dökümle üretilen ve T6 yaşlandırma ısıl işlemi uygulanmış numunelerin mekanik özellikleri ekstrüze haldeki numunelere yakın olduğu belirlenmiştir.

**Bilim Kodu** : 710.3.011  
**Anahtar Kelimeler** : Yarı-katı şekillendirme, Al2O3 alaşımı,  
Tiksotropik yapı, SIMA, T6 ısıl işlemi.  
**Sayfa Adedi** : 91  
**Tez Yöneticisi** : Yrd. Doç. Dr. Neşet AKAR

**DETERMINATION OF PROCESS PARAMETERS OF SEMI-SOLID  
METAL CASTING AND INVESTIGATION OF MECHANICAL  
PROPERTIES FOR AI2024 ALLOY  
(M.Sc. Thesis)**

**Hasan TANEROĞLU**

**GAZI UNIVERSITY  
INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY  
February 2012**

**ABSTRACT**

**In this study, a wrought AA2024 aluminum alloy was shaped with thixo-casting technique which is one of the semi-solid metal forming processes. Billets produced by strain induced melt activation (SIMA) process were used in thixo-casting. In the semi-solid region, microstructural and mechanical property variations depending on the temperatures that corresponded to different liquid fractions (608 °C, 616 °C, and 619 °C), and 2.37 m/s ram speed have been investigated.**

**In the billet production by SIMA process, with increasing cold deformation rate, the shape factor increases while the grain size decreases depending on temperatures. In the forming by thixocasting, at the temperature (608 °C) that corresponded to low liquid fraction the die cavity has not been fully filled by the semi-solid billet. The die cavity has been fully filled by semi-solid billet at high liquid fraction (60% and 65%). The mechanical properties of specimens which produced by thixocasting were found to be 50% lower than extruded + T6 condition specimen. The mechanical properties of the specimens which**

**produced by thixocasting + T6 condition are almost same as specimens in extruded conditions.**

**Science Code : 710.3.011**  
**Key Words : Semi-solid forming, Al2024 alloy, Thixotropic structure, SIMA, T6 heat treatment.**  
**Page Number : 91**  
**Adviser : Assist. Prof. Dr. Neşet AKAR**

## TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren tez danışmanım Yrd. Doç. Dr. Neşet AKAR' a, Yrd. Doç. Dr. Volkan KILIÇLI'ya, Metal Eğitimi Bölümünde çalışan akademik ve idari personele teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Bu çalışmaya 2003K 120470-27 nolu proje kapsamında maddi destek sağlayan DPT'ye ve Gazi Üniversitesi bilimsel araştırma projesi birimine teşekkür ederim.

Gerek iş hayatımda gerekse tez çalışmalarım boyunca bana sonsuz destek veren şirket müdirem F.Leman ÖZGÜLER'e ve dostum Mustafa KALAY'a teşekkürler.

Çalışmalarımda her zaman yanımda olan ve yardımlarını esirgemeyen eşim Senem TANEROĞLU'na teşekkür ederim.

## İÇİNDEKİLER

	<b>Sayfa</b>
ÖZET .....	iv
ABSTRACT .....	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER .....	ix
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	xii
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xiii
RESİMLERİN LİSTESİ.....	.xvi
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xix
1. GİRİŞ.....	1
2. YARI-KATI METAL ŞEKİLLENDİRME İÇİN ÖN MALZEME ÜRETİM YÖNTEMLERİ .....	4
2.1. Sıvı Halden Ön Malzeme Üretim Yöntemleri .....	4
2.1.1. Mekanik karıştırma yöntemi .....	4
2.1.2. İki farklı sıvı karıştırma yöntemi .....	5
2.1.3. Elektromanyetik karıştırma yöntemi .....	6
2.1.4. Yeni MİT yöntemi .....	7
2.1.5. Eğimli soğutma plakasına döküm yöntemi .....	8
2.1.6. Sprey döküm yöntemi.....	9
2.1.7. Döndürmeli entalpi dengeleme yöntemi .....	11
2.1.8. İçten soğutma yöntemi .....	12
2.1.9. Tane inceltme yöntemi .....	12
2.1.10. Düşük sıcaklıktan döküm yöntemi.....	13

**Sayfa**

2.2. Katı Halden Ön Malzeme Üretim Yöntemleri .....	14
2.2.1. Gerinimin neden olduğu sıvı aktivasyonu (SIMA) .....	14
2.2.2. Yeniden kristalleşme ve kısmi döküm yöntemi (RAP) .....	17
3. YARI-KATI ŞEKİLLENDİRME İŞLEMİ .....	19
3.1. Yarı-Katı Şekillendirme Yöntemi .....	19
3.2. Tikso Şekillendirme Yöntemi.....	19
3.2.1. Tikso-döküm işlemi.....	20
3.2.2. Tikso-dövme işlemi.....	23
3.2.3. Tikso-Ekstrüzyon.....	23
3.2.4. Tikso-Kalıplama.....	24
3.3. Reo - Şekillendirme Yöntemi .....	26
3.3.1. Reo-Döküm .....	26
3.3.2. Reo-Kalıplama.....	26
3.3.3. Yeni reo-döküm yöntemi .....	27
3.4. Yarı-Katı Şekillendirme Yönteminin Avantajları .....	29
3.5. Yarı-Katı Şekillendirme Yönteminde Karşılaşılan Zorluklar ve Dezavantajları .....	32
4. Al-Cu ALAŞIMLARI ÜZERİNE YAPILMIŞ ÖN MALZEME ÜRETİM ÇALIŞMALARININ DEĞERLENDİRİLMESİ .....	34
5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR .....	40
5.1. Malzeme .....	40
5.2. AA2024 Alaşımının Ergime ve Katılaşma Sıcaklıklarının tespiti.....	40
5.3. Soğuk Deformasyon İşlemi.....	42

	<b>Sayfa</b>
5.4. Yarı-Katı Metal Şekillendirme Ünitesi .....	44
5.5. Yarı-Katı Şekillendirme İçin Mikroyapının Belirlenmesi.....	46
5.6. Yarı-Katı Metal Şekillendirme Deneyi .....	48
5.7. Metalografik Çalışmalar .....	51
5.8. T6 Isıl İşlem .....	53
5.9. Çekme Testler .....	54
6. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR .....	56
6.1. Yarı-Katı Sıcaklığında % Sıvı Oranının Tespit Edilmesi.....	56
6.2. SIMA İşlemi Sonrası Ön Malzemelerin Mikroyapıları.....	57
6.3. Tikso-Dökümle Üretilen Numunelerin Dış Görünümleri ve Kalıp Doldurma Karakteristiklerinin İncelenmesi .....	67
6.4. Tikso-Dökümle Üretilen Numunelerin Mikroyapı İncelenmesi.....	69
6.5. Tikso-döküm Öncesi ve Sonrası Mikroyapı Değişimleri.....	76
6.6. Çekme Test Sonuçları .....	78
7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	82
7.1. Sonuçlar.....	82
7.2. Öneriler.....	83
KAYNAKLAR .....	84
ÖZGEÇMİŞ.....	91

**ÇİZELGELERİN LİSTESİ**

<b>Çizelge</b>	<b>Sayfa</b>
Çizelge 5.1. AA2024 alaşımının kimyasal kompozisyonu (Ağırlıkça %). .....	40
Çizelge 5.2. Numunelere uygulanan parametreler.....	49
Çizelge 5.3. Tikso-döküm şekillendirilmede numunelere verilen kodlamalar. ....	51
Çizelge 6.1. Soğuk deformasyon oranı ile tane boyutu ve şekil faktörü değişimi.....	62
Çizelge 6.2. Tikso-Dökümle üretilen numunelerin çekme test sonuçları (ortalama değerler). ....	79

## ŞEKİLLERİN LİSTESİ

<b>Şekil</b>	<b>Sayfa</b>
Şekil 2.1. Sürekli mekanik karıştırma düzeneği .....	4
Şekil 2.2. Çift karıştırma milli mekanik karıştırma düzeneği. ....	5
Şekil 2.3. İki farklı sıvı karıştırma işleminin zaman-sıcaklık grafiğinde şematik gösterimi .....	6
Şekil 2.4. İki farklı sıvı karıştırma işleminin şematik gösterimi. ....	7
Şekil 2.5. Elektromanyetik karıştırma ünitesi. ....	7
Şekil 2.6. a) Yeni MIT yönteminin aşamalarının şematik olarak gösterimi ve b) alaşım sıcaklığının değişimi. ....	8
Şekil 2.7. Eğimli soğutma plakasına döküm; a) ergitme ve b) plakaya döküm .....	9
Şekil 2.8. Sprey şekillendirmenin şematik gösterimi. ....	10
Şekil 2.9. Şematik Osprey Prosesi .....	11
Şekil 2.10. Döndürmeli entalpi dengeleme yönteminin şematik gösterimi .....	12
Şekil 2.11. İçten soğutma işleminin şematik gösterimi.....	13
Şekil 2.12. SIMA işleminin zaman-sıcaklık diyagramında gösterimi. ....	15
Şekil 2.13. RAP işleminin zaman-sıcaklık diyagramında şematik olarak gösterimi. ....	17
Şekil 3.1. Yarı-katı metal şekillendirme yöntemlerinin sınıflandırılması .....	19
Şekil 3.2. Yarı-katı metal şekillendirme yöntemlerinin üretim aşamaları .....	20
Şekil 3.3. Tikso-şekillendirme yöntemlerinin şematik olarak gösterimi .....	21
Şekil 3.4. Sheffield Üniversitesinde geliştirilen tikso-şekillendirme presinin şematik olarak gösterimi.....	21
Şekil 3.5. Tikso yarı-katı şekillendirme tekniğinin şematik gösterimi.....	22

<b>Şekil</b>	<b>Sayfa</b>
Şekil 3.6. Yarı-katı şekillendirme ve döküm yöntemlerinin şematik gösterimi .....	24
Şekil 3.7. Tikso-ekstrüzyon şematik olarak gösterimi .....	24
Şekil 3.8. Tikso-kalıplama presin şematik olarak gösterimi.....	25
Şekil 3.9. Rheo döküm yönteminin şematik gösterimi .....	27
Şekil 3.10. Reo-kalıplama ünitesinin şematik olarak gösterimi .....	28
Şekil 3.11. Yeni reo-döküm yönteminin aşamalarının şematik olarak gösterimi .....	29
Şekil 4.1. Alüminyum Bakır alaşımı faz denge diyagramı. ....	34
Şekil 4.2. Isıtma süresi-fırın sıcaklığı eğrisi.....	38
Şekil 5.1. AA2024 alaşımının DSC eğrisi.....	41
Şekil 5.2. AA2024 alaşımının soğuma eğrisi .....	41
Şekil 5.3. Mikroyapı numunelerinin hazırlanmasında kullanılan düzeneğin şematik görünümü .....	48
Şekil 5.4. Yarı-katı şekillendirme düzeneğin şematik görünümü.....	49
Şekil 5.5. Yarı-Katı şekillendirme için tasarlanmış parça .....	50
Şekil 5.6. İndüksiyon Bobini ile 608 °C, 616 °C ve 619 °C'ye ısıtma zaman-sıcaklık grafiği .....	50
Şekil 5.7. Ön malzeme olarak kullanılan numunelerin metalografik incelenmesi; a) numune, b) numunenin boydan boya kesilmiş hali ve c) incelenen bölgeler .....	52
Şekil 5.8. Tikso-dökümle üretilmiş numunelere uygulanan T6 yaşlandırma ısıtma işleminin sıcaklık-zaman grafiği .....	54
Şekil 5.9. Çekme çubuğunun ASTM E 8M standardına göre ölçüsü .....	55
Şekil 6.1. AA2024 alaşımının DTA ısıtma eğrisinden elde edilen sıcaklık-sıvı oranı .....	56
Şekil 6.2. Yarı-katı sıcaklığa bağlı olarak tane boyutunun değişimi .....	63

<b>Şekil</b>		<b>Sayfa</b>
Şekil 6.3.	Soğuk deformasyon oranına bağlı olarak tane boyutu değişimi.....	63
Şekil 6.4.	Soğuk deformasyon oranına bağlı olarak şekil faktörünün değişimi.....	64
Şekil 6.5.	Yarı-katı sıcaklığa bağlı olarak şekil faktörünün değişimi.....	65
Şekil 6.6.	Tikso-dökümle şekillendirme sonrası mekanik özelliklerin değişimi.....	80
Şekil 6.7.	Tikso-dökümle şekillendirme ve T6 ısıtma işlemi sonrası mekanik özelliklerin değişimi.....	81
Şekil 6.8.	Ekstrüze, tikso-döküm öncesi ve sonrası çekme dayanım grafikleri .....	81

## RESİMLERİN LİSTESİ

<b>Resim</b>		<b>Sayfa</b>
Resim 2.1.	SIMA yöntemi ile üretilmiş AA2024 alaşımının mikroyapısı .....	16
Resim 3.1.	(a) Tikso dövme cihazı, (b) Tikso dövme ile elde edilmiş parçalar .....	23
Resim 3.2.	Yarı-katı sıcaklıktaki Alüminyum alaşımı.....	30
Resim 3.3.	Yarı-katı şekillendirme ile üretilmiş bazı Al parçalar; a) otomobil fren sistemlerinde kullanılan parçalar ve b) elektrik bağlantı parçaları.....	31
Resim 5.1.	Dijital sıcaklık göstergeli veri toplayıcısı.....	42
Resim 5.2.	250 ton kapasiteli hidrolik pres.....	43
Resim 5.3.	a) %30 deformasyon öncesi, b) %30 deformasyon sonrası, c) %20 deformasyon öncesi, d) %20 deformasyon sonrası numunelerin görünümü.....	43
Resim 5.4.	a) Soğuk deformasyondan sonra işlenmiş numune, b) Isıl çiftin yerleştirildiği deliği açılmış numune .....	43
Resim 5.5.	Yarı-katı şekillendirme ünitesinin görünümü .....	44
Resim 5.6.	İndüksiyon ünitesi jeneratörü .....	45
Resim 5.7.	Numune düşürme mekanizması (Numune bobin içerisindedir) .....	45
Resim 5.8.	Kalıp ısıtıcısı (şartlandırıcı); a)ön panel, b)kalıp şartlandırıcı yağ giriş çıkış hortumları, c)kalıba yağ giriş hortumları, d)kalıptan yağ çıkış hortumları .....	46
Resim 5.9.	Numunenin ve ısıl çiftin indüksiyon bobini içerisindeki görünümü.....	47
Resim 5.10.	Suda soğutulan numunelerin görünümü .....	47
Resim 5.11.	Leica DFC 320 dijital kamera bağlantılı Leica DM 4000M marka optik mikroskop .....	52

<b>Resim</b>	<b>Sayfa</b>
Resim 5.12. Mikroyapı inceleme bölgelerin görünümü. a) suda soğutulmuş numune, b) Tikso-dökümle üretilen numune .....	53
Resim 5.13. Instron 3369 model 50kN çekme ve basma kapasitesine sahip üniversal test cihazı .....	54
Resim 5.14. a) Yarı-katı şekillendirilmiş numune, b) numune boyuna kesilmiş hali, c) enine kesilerek 4'e ayrılmış görünümü, d) işlenmiş çekme çubuk görünümü.....	55
Resim 6.1 Ekstrüze haldeki AA2024 alaşımının mikroyapı resmi .....	58
Resim 6.2. %20 ve %30 soğuk deformasyon oranları uygulanmış AA2024 alaşımının 608 °C'den hızla suda soğutma işlemi sonucu oluşan mikroyapı değişimi .....	59
Resim 6.3. %20 ve %30 soğuk deformasyon oranları uygulanmış AA2024 alaşımının 616 °C'den hızla suda soğutma işlemi sonucu mikroyapı değişimi.....	60
Resim 6.4. %20 ve %30 soğuk deformasyon oranları uygulanmış AA2024 alaşımının 619 °C'den hızla suda soğutma işlemi sonucu mikroyapı değişimi.....	61
Resim 6.5. % 30 deformasyonda 608 °C'de kenar tanelerin görünüm 500x büyütme .....	65
Resim 6.6. % 30 deformasyonda 608 °C'de kenar tanelerin görünüm 1000x büyütme .....	66
Resim 6.7. Farklı deformasyon uygulanmış numunelerin Farklı sıcaklıklarda soğutma sonrası görüntüsü.....	67
Resim 6.8. %20 soğuk deformasyon uygulanmış numunelerini görünümü. ....	68
Resim 6.9 %30 soğuk deformasyon uygulanmış numunelerini görünümü.....	68
Resim 6.10 %20 ve %30 soğuk deformasyon uygulanmış AA2024 alaşımının 608°C'den tikso-dökümle üretilen numunelerin mikroyapı değişimi .....	70

<b>Resim</b>	<b>Sayfa</b>
Resim 6.11 %20 ve %30 soğuk deformasyon uygulanmış AA2024 alaşımının 616°C'den tikso-dökümle üretilen numunelerin mikroyapı değişimi .....	71
Resim 6.12 %20 ve %30 soğuk deformasyon uygulanmış AA2024 alaşımının 619°C'den tikso-dökümle üretilen numunelerin mikroyapı değişimi .....	72
Resim 6.13 %30 soğuk deformasyon uygulanmış ön malzemenin 619 °C'de tikso-dökümle şekillendirilmiş görüntüsü. ....	73
Resim 6.14 Tikso-dökümle şekillendirilmiş %20 soğuk deformasyon uygulanmış ön malzemenin a) 616 °C'de sıvı segregasyonu b) 608 °C'de çekme gözenekleri görüntüleri.....	74
Resim 6.15 %20 soğuk deforme edilmiş numunenin 619 °C'de tikso-dökümle şekillendirilmiş görüntüsü. ....	75
Resim 6.16 %30 deforme edilmiş 619 °C'de tikso-dökümle şekillendirilmiş numunelerin a) dentritik katılaşması, b) intermetalik bileşiklerinin mikroyapı görünümüleri.....	75
Resim 6.17 %20 soğuk deforme edilmiş numunelerin tikso-şekillendirme öncesi ve sonrası mikroyapı görüntüleri.....	77
Resim 6.18 %30 soğuk deforme edilmiş numunelerin tikso-şekillendirme öncesi ve sonrası mikroyapı görüntüleri.....	78

## SİMGELER VE KISALTMALAR

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

### Simgeler

### Açıklama

**s**

Saniye

**T<sub>L</sub>**

Likidüs sıcaklığı

**f<sub>L</sub>**

Sıvı oranı

**T6**

Alüminyum alaşımları için yapay  
yaşlandırma ısı işlemi

### Kısaltmalar

### Açıklama

**DTA**

Differential thermal analysis

**ESP**

Eğimli soğutma plakası

**EDS**

Enerji dağılımlı X ışınları spektrometresi

**MIT**

Massachusetts Institute of Technology

**RAP**

Recrystallisation and partial melting

**SIMA**

Strain induced melt activation

**SRD**

Sürekli reo döküm

**YKŞ**

Yarı-katı şekillendirme

**YKMŞ**

Yarı-katı metal şekillendirme

## 1.GİRİŞ

Yarı-katı şekillendirme karmaşık şekilli parçaların daha az sayıda işleme ve daha düşük maliyetlerle üretilmeleri için cazip bir yöntemdir [Bozkurt ve ark. 2005]. Yarı-katı halde işleme prosesleri döküm, dövme ve toz metalürjisi tekniklerinin avantajlarını bir araya getiren bir teknik olarak da tanımlanabilir [Saklakoğlu, 2004].

Döküm ve dövme metotlarının bir arada kullanıldığı yarı-katı şekillendirmede tiksotropik özelliğe sahip yarı-katı haldeki alaşımların üretilecek parçanın son şekline yakın bir üretimi elde etmek için kalıba enjeksiyon yapılmasıdır [Atkinson ve ark., 2002].

Bu işlemin uygulanabilmesi için alaşımın dentritik kollardan bağımsız ve küresel bir mikroyapıya sahip olması gerekmektedir. [Önsel ve ark. 2005]. Eşeksenli küresel tane yapısına sahip alaşımlar tiksotropik özellik gösterirler. Diğer bir ifade ile yarı-katı halde dentritik mikroyapılı alaşımlara göre daha yüksek akışkanlık özelliğine sahiptirler [Saklakoğlu, 2004].

Klasik döküm yöntemleri birçok potansiyel döküm hataları ile karşı karşıyadır. Bu problemler sıcak yırtılma, çekme boşlukları, segregasyon ve kalıbın doldurulması sırasında meydana gelen türbülans nedeniyle gaz absorbesidir [Aktar, 2004].

Yarı-katı şekillendirme işlemlerinin en önemli adımlarından birisi küresel tane yapısının elde edilmesidir. Küresel tane yapısı sıvı alaşımın mekanik, manyetik ve ultrasonik karıştırma ile kontrollü soğuma şartlarında gerçekleştirilebildiği gibi, alaşım katı halde iken plastik deformasyonu takip eden yeniden kristalleşme ile de gerçekleştirilebilir [Jiang ve Li., 2005]. Deformasyon ve yeniden kristalleşme metodu olarak bilinen SIMA (Strain Induced Melt Activated) prosesi 1980'li yılların ortalarında geliştirilmiş katı halde yarı mamul üretimi için kullanılan bir yöntemdir [Wang ve ark., 2008].

SIMA prosesi deforme edilen alaşımın katı-sıvı sıcaklık aralığına ısıtılarak küresel mikroyapıya dönüştürülmesi prensibine dayanır [Önsel ve ark., 2005]. Bu yöntemde döküm sonrası malzeme yüksek oranlarda deformasyona tabi tutularak dentritik yapı kırılır ve ince uzun taneli deforme olmuş yapı elde edilir. Soğuk deformasyonun ardından yarı-katı sıcaklığına kadar yapılan ısıtma işlemi sırasında yeniden kristalleşme gerçekteşir. Daha sonra sıcaklığın solidüsü geçmesiyle birlikte tane sınırlarında bulunan ötektik fazlar ergiyerek sıvı fazı oluştururlar [Wang ve ark., 2008].

Yarı-katı malzeme şekillendirme işleminde gerekli olan düşük gerilimler altında şeklini korumakla birlikte mükemmel akıcılık özelliği göstererek kalıbı sıvı gibi preslenebilmektedir [Aktar, 2004]. Diğer bir ifade ile yarı-katı malzeme serbest halde taşımaya izin verecek kadar şeklini koruyabilecek yüksek viskoziteye sahip katı maddeler gibi davranırken presleme sırasında oldukça düşük bir viskozite sergiler ve akışkan gibi davranır [Tzimas ve Zavaliangos, 2000, Önsel, 2005]. Yarı-katı döküm, homojen mikroyapının daha az porozite içermesinden dolayı mükemmel mekanik özellikler gibi birçok avantaj sağlamaktadır [Aktar, 2004].

Yarı-katı metal şekillendirme işleminin başarılı olması için alaşımın dentritik kollardan yoksun küresel, eş eksenli ve ince taneli bir mikroyapıya sahip olması gerekmektedir [Kirkwood, 1994, Önsel ve ark., 2005]. Böyle bir yapı “tikotropik” olarak tanımlanmaktadır.

Günümüzde demir dışı alaşımların döküm yöntemi ile şekillendirilmesinde en çok basınçlı döküm yöntemi kullanılır. Bu yöntem ekonomik olmaklar birlikte çeşitli boyutlarda ve karmaşık geometrik şekilline sahip dökümlerin üretilmesinde çok başarılıdır. Ancak, basınçlı döküm yönteminde sıvı metalin türbülansından kaynaklanan gaz boşlukların yoğun bir şekilde teşekkül eder. İlave olarak sıvı-katı faz dönüşümü sırasında dentritik yapıdan dolayı çekme boşlukları meydana gelir. Yarı-katı şekillendirme işleminde yarı-katı malzeme küresel yapıya sahiptir ve kalıbı laminar akış şeklinde doldurur. Bu sebeple

yarı-katı şekillendirme yöntemi gaz ve çekme boşluklarını önemli ölçüde elimine ederek geleneksel döküm yöntemlerine göre daha yüksek mekanik özellik sergiler [Saklakoğlu ve ark., 2009].

Dövme yöntemi ile özellikle uçak, uzay ve otomobil endüstrisinde yaygın olarak kullanılan alüminyum alaşımlarında istenen özellikte ürün elde edilebilmektedir. Ancak dövme ile nihai ürün elde etmek mümkün değildir ve yarı-katı şekil verme işlemleriyle elde edilen kesitler ve dar toleransların kontrolü dövme ile sağlanamaz [Saklakoğlu ve ark., 2009].

Yarı-katı metal şekillendirme proseslerinde yarı-katı halde şekil verme gerçekleştirdiği için kalıp ömrünün artması, talaş kaldırma gibi işlemlere minimum düzeyde gereksinim duyulması ve yarı-katı haldeki malzemenin ergiyik malzemeye göre daha az gaz çözünürlüğüne sahip olması dolayısıyla daha az mikroporozite içermesi gibi avantajlar dikkat çekmektedir. [Saklakoğlu, 2004].

Yarı-katı metal şekillendirmesinde birçok tiksotropik ön malzeme üretim yöntemleri kullanılmaktadır. Bu yöntemlerden en çok kullanılan ve pratik olan yöntem SIMA (Strain Induced Melt Activation) yöntemidir. Termomekanik bir yöntem olan SIMA yöntemi tiksotropik yapı üretim yöntemlerinden katı metalden üretilen tek yöntemdir. Bu yöntem ilk olarak Young ve arkadaşları tarafından 1983 yılında geliştirilmiştir. Daha sonra Kirkwood maksimum gerinim sertleşmesini sağlamak için bu prosesteki soğuk deformasyonu yeniden kristalleşme sıcaklığının altındaki bir sıcaklıkta sıcak deformasyonla değiştirerek modifiye etmiştir [Kirkwood 1994]. Üretim parametreleri çok iyi Al alaşımları bilinen yeni üretim tekniklerinin ve yeni alaşımların geliştirilmesi ile birlikte birçok kullanım alanı bulmaktadır [Aktar, 2004].

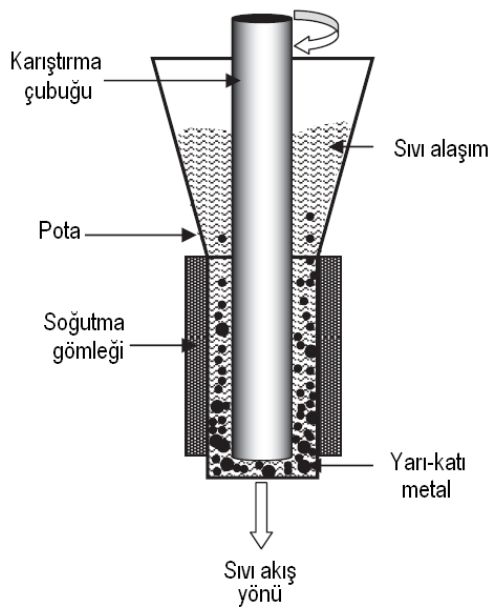
Bu çalışmada AA2024 alaşımın tiksotro-döküm yöntemi ile şekillendirilmesinde işlem parametrelerinin mikroyapı ve mekanik özellikler üzerine etkisi amaçlanmıştır.

## 2. YARI-KATI METAL ŞEKİLLENDİRME İÇİN ÖN MALZEME ÜRETİM YÖNTEMLERİ

### 2.1. Sıvı Halden Ön Malzeme Üretim Yöntemleri

#### 2.1.1. Mekanik karıştırma yöntemi

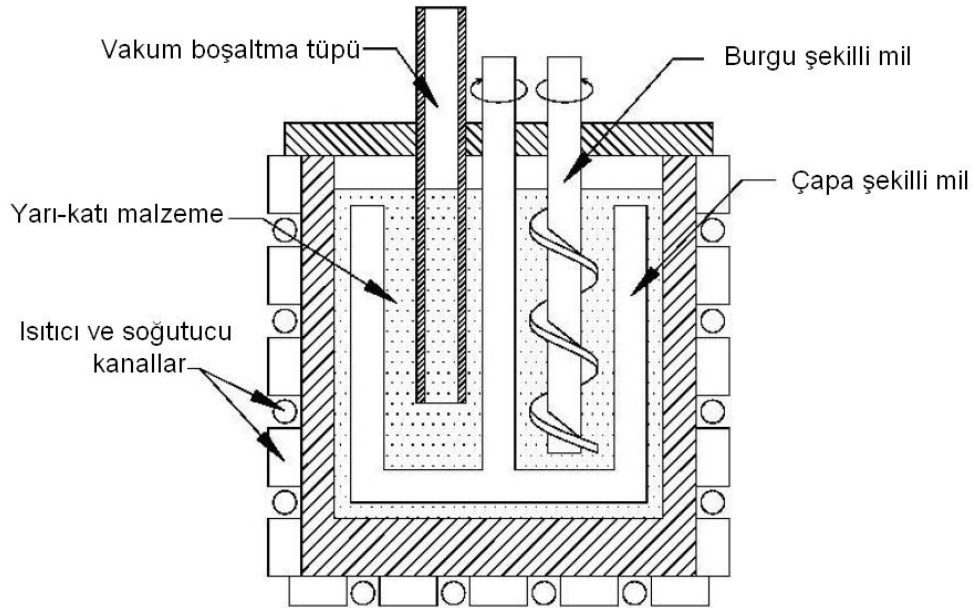
Mekanik karıştırma yöntemi yarı-katı metal şekillendirme yönteminin başlangıcıdır [Spencer ve ark., 1972]. Başlangıçta basit karıştırma düzenekleri ile küresel yapı elde edilmeye çalışılmış daha sonra Şekil 2.1 ve Şekil 2.2'deki gibi sürekli döküm üniteleri geliştirilmiştir [Mutlu, 2010].



Şekil 2.1. Sürekli mekanik karıştırma düzeneği [Czerwinski, 2007].

Sıvıyı karıştırma genellikle matkap, çark veya çoklu çarkların merkezde dönen mil üzerine monte edilmesiyle sağlanır [Fan, 2002, Figueredo, 2001, Özer, 2010]. Mekanik karıştırmada dentritik katılaşmanın oluşumunu engellemek için kontrol altında tutulması gereken iki önemli değişken vardır. Birincisi karıştırma çubuğunun çevresinde yüksek kayma hızı oluşturmak için çubuğun en az 1000 dev/dak hızla dönmesi gerekir. İkincisi kaymayı sürdürebilmek için çubuk ve soğutma gömleği arasındaki boşluğun minimum

mesafesi korunmalıdır. Kritik boşluk mesafenin altında karıştırma çubuğu ve soğutma gömleğinde oldukça yüksek oranda aşınma ve erozyon meydana gelir. Hızlı ısı akışını ve sıvı karıştırmasını kontrol edebilmek için değişik şekil ve boyutta karıştırma çubukları ve farklı hızlar kullanılır [Czerwinski, 2007].



Şekil 2.2. Çift karıştırma millerli mekanik karıştırma düzeneği [Kirkwood ve ark., 2009].

### 2.1.2. İki farklı sıvı karıştırma yöntemi

Bu yöntemde iki farklı alaşım sıvı halde birbirine karıştırılır. Birbirine karıştırılan alaşımlar her iki alaşımında katılma sıcaklığının altında bir sıcaklıkta yeni bir ötektik kompozisyon oluşturur. Şekil 2.3'te iki farklı sıvının karıştırma işleminin zaman-sıcaklık grafiği şematik olarak gösterilmiştir [Figueredo, 2001].

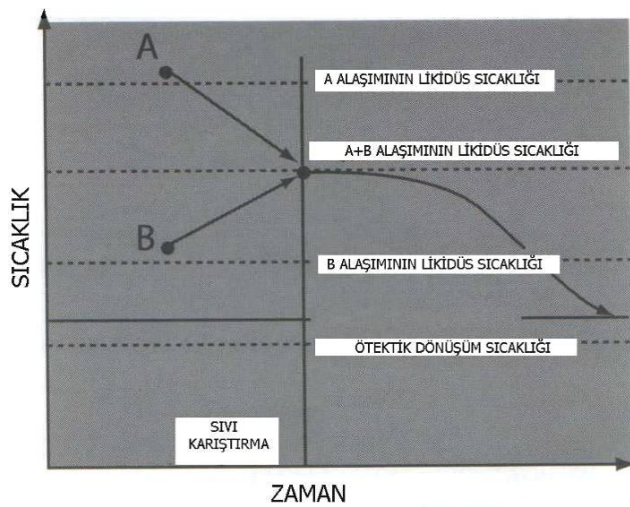
Karıştırılacak alaşımlar ergime sıcaklıklarının hemen üzerinde tutulurlar ve döküm işlemi de iki farklı şekilde gerçekleştirilebilir. Birincisi ısı olarak izole edilmiş pota içerisinde doğrudan döküm, ikincisi izole edilmiş pota içerisine yerleştirilmiş sabit bir karıştırma kanalı boyunca döküm ile gerçekleştirilir. Bu

işlem alaşımlardan birinin ergime sıcaklığının altında diğerinin üstünde yeni bir alaşım oluşmasına sebep olur [Figueredo, 2001].

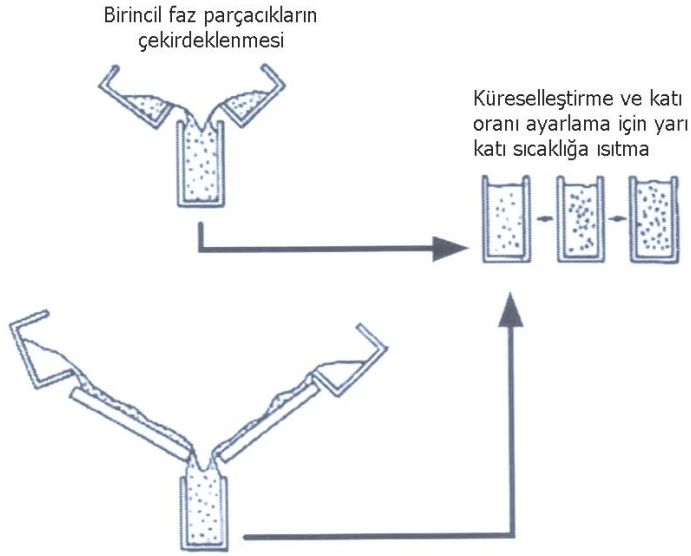
Şekil 2.4'te iki farklı sıvı karıştırma işlemi şematik olarak gösterilmiştir. Bu yöntemde iki sıvının karışımı ile elde edilen ergiyin hızlı soğumasını engellemek ve belli bir katı oranı elde etmek için izole edilmiş bir pota içerisinde tutulur. Bu sayede dentritik olmayan küresel katı faz içeren ön malzeme elde edilir [Figueredo, 2001].

### 2.1.3. Elektromanyetik karıştırma yöntemi

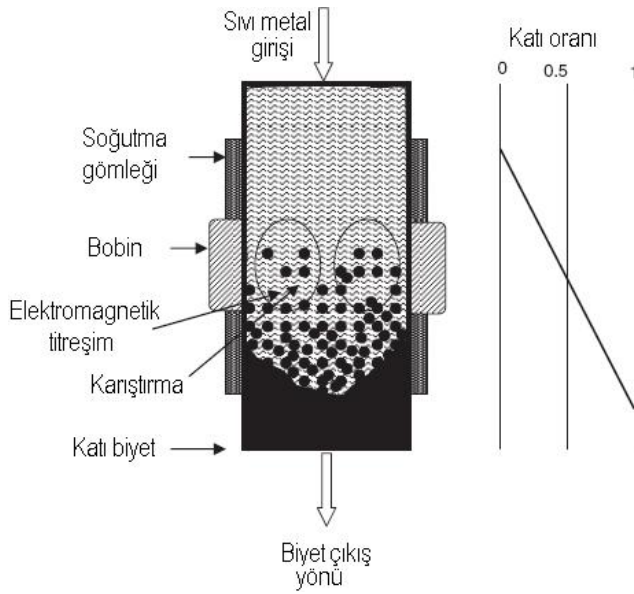
Elektromanyetik karıştırma yöntemi mekanik karıştırmadaki problemleri gidermek için geliştirilmiş bir yöntemdir [Fan, 2002, Figueredo, 2001]. Şekil 2.5'te görüldüğü gibi elektromanyetik karıştırma kontrollü soğutma altında sıvı metal katılaştırırken elektromanyetik yöntemlerle sıvıyı titreşim hareketi ile karıştırmayı içerir. Bu yöntemde karıştırma sırasında bozulan dentritler sıvı içerisinde dağılmış katı küresel şekle dönüşürler. Sıvı metale doğru veya alternatif akım ile elektromanyetik alanla titreşim ve dönme hareketi verilebilir [Mutlu, 2010, Hirt ve Kopp, 2009].



Şekil 2.3. İki farklı sıvı karıştırma işleminin zaman-sıcaklık grafiğinde şematik gösterimi [Figueredo, 2001].



Şekil 2.4. İki farklı sıvı karıştırma işleminin şematik gösterimi [Figueredo, 2001].



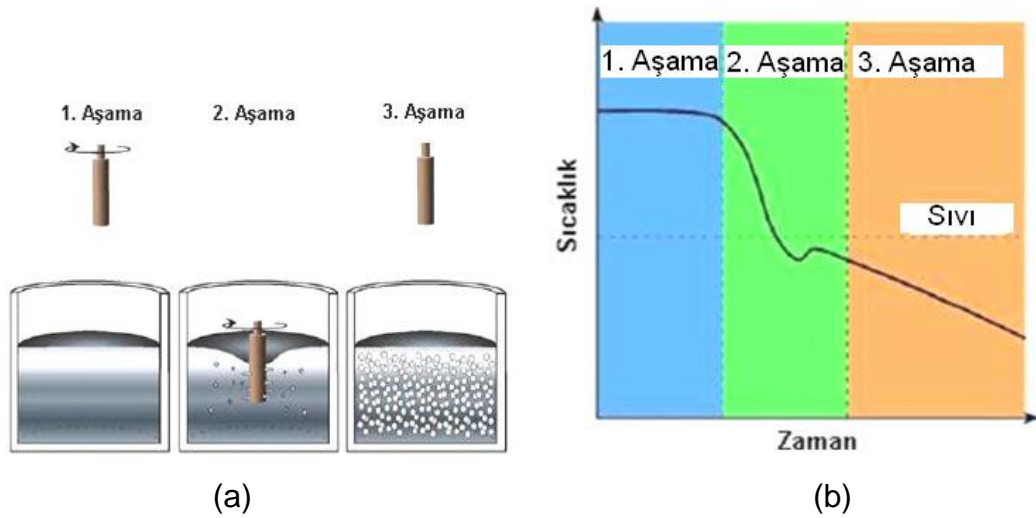
Şekil 2.5. Elektromanyetik karıştırma ünitesi [Czerwinski, 2007].

#### 2.1.4. Yeni MİT yöntemi

Bu yöntemle ince taneli küresel katı faza sıvı hapsolmemiş ve tamamen küresel yapıya ön malzemeler üretilmektedir. Yöntem çok basit olduğundan

reo-şekillendirme ve tiksotrofik şekillendirmede kullanılmaktadır [Martinez ve Flemings, 2005].

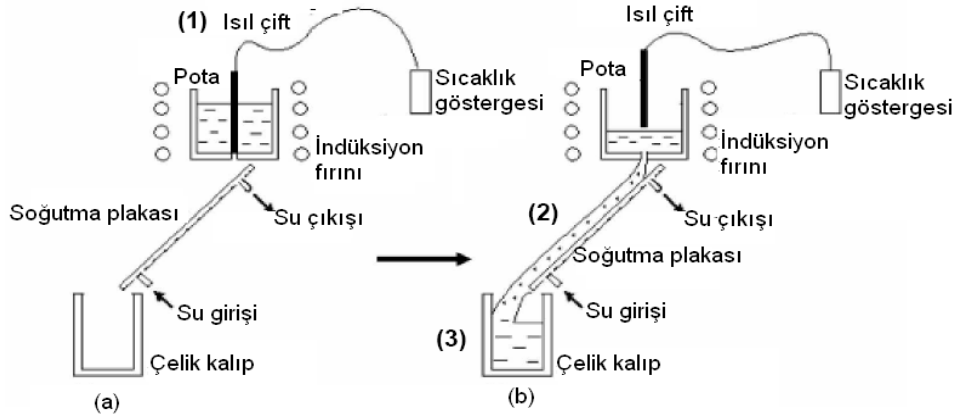
Sıvı sıcaklığının altında bekletilen metal karıştırıcıya bağlı karıştırma soğutmaya katkı sağlamaktadır. Karıştırma işlemi başlayınca ergiyin sıcaklığı çok az düşer. Sıvı sıcaklığı istenen sıcaklığa düşünce karıştırıcı geri çekilir. Bu işlem sıvı da çok miktarda çekirdeklenmeyi sağlar. Şekil 2.6'da Yeni MIT yönteminin aşamaları ve alaşım sıcaklığının değişimi şematik olarak gösterilmiştir [Martinez ve Flemings, 2005].



Şekil 2.6. a) Yeni MIT yönteminin aşamalarının şematik olarak gösterimi ve b) alaşım sıcaklığının değişimi [Martinez ve Flemings, 2005].

### 2.1.5. Eğimli soğutma plakasına döküm yöntemi

Eğimli soğutma plakasına döküm yöntemi tiksotropik malzeme üretim yöntemlerinden biridir. Yöntem çok az teçhizat ve düşük işletme maliyeti ile kurulabilir [Haga ve Suzuki, 2001]. Yöntem oldukça basit olup Şekil 2.7'de gösterildiği gibi yüksek döküm sıcaklığından sürekli soğutulan eğimli bir plaka üzerinden metal kalıba dökümünden oluşmaktadır [Liu ve ark., 2003, Birol, 2008].



Şekil 2.7. Eğimli soğutma plakasına döküm; a) ergitme ve b) plakaya döküm [Liu ve ark., 2003].

YKM şekillendirme için ön malzeme üretim yöntemleri arasında eğimli soğutma plakasına döküm yöntemi pratik ve ekonomik olması yönünden cazip bir yöntemdir [Bozkurt ve ark., 2005].

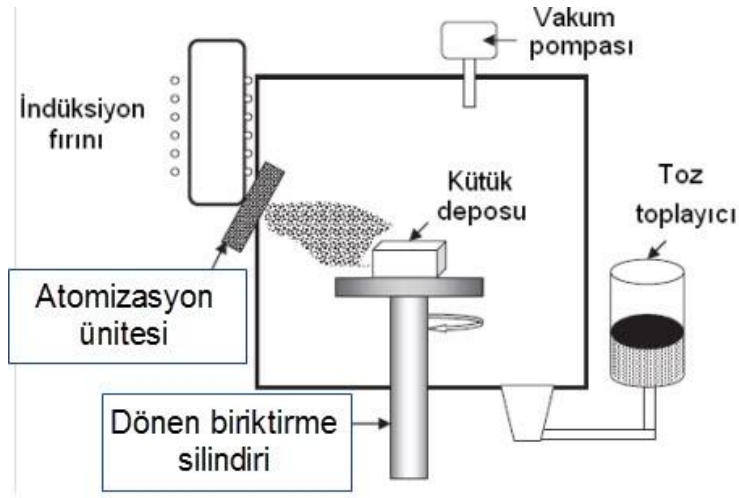
Bu yöntemde döküm sıcaklığı, eğimli soğuma plakasının uzunluğu, eğimli soğuma plakasının eğimi, eğimli soğuma plakasının malzemesi ve döküm yapılan kalıbın malzemesi gibi çeşitli parametreler son mikroyapı üzerinde etkilidir [Taghavi ve Ghassemi, 2009].

### 2.1.6. Sprey döküm yöntemi

Hızlı katılaşma yoluyla direk olarak ergiyikten alaşım ve kompozit malzemelerin üretildiği prosese spray şekil verme, spray döküm veya spray biriktirme yöntemi denir (Şekil 2.8) [Salamcı, 2004].

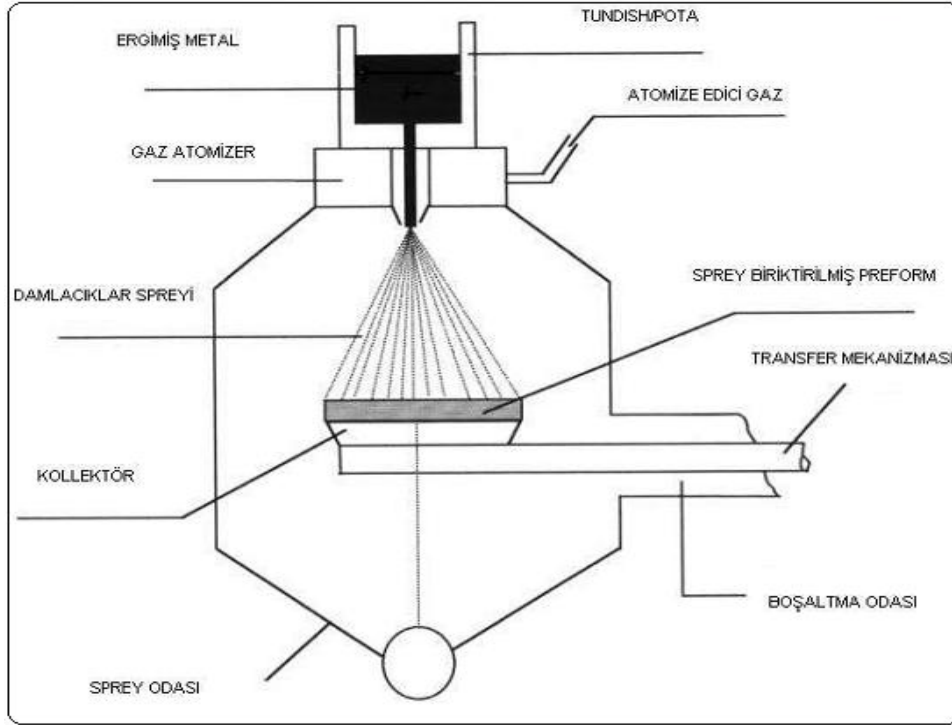
Sprey döküm prosesinde dört ana ünite mevcuttur.

- 1- Ergitme ve dağıtma ünitesi
- 2- Gaz atomizasyon cihazı
- 3- Atomize edici gaz kaynağı için dağıtma ve kontrol sistemi
- 4- Depozit ünitesi [Salamcı, 2004].



Şekil 2.8. Sprey şekillendirmenin şematik gösterimi [Czerwinski, 2007].

Bu yöntemde alaşım sprey hücresinin en üstünde bulunan pota içerisinde indüksiyonda ergitilir. Ergiyen alaşım potanın altında bulunan refrakter püskürtücünün içine geçer. Burada 0.6-1MPa basınçta azot veya argon gazı tarafından atomize edilerek üretilen damlacıklar püskürtülmek suretiyle bir kollektor üzerinde toplanır. Atomize edici gaz püskürtülme esnasında damlacıklardan önemli oranda ısıyı uzaklaştırarak soğumasına yardımcı olur. Soğutulan damlacıklar toplayıcı üzerine gelerek burada birikir ve yoğun bir depozit oluşturur. Kollektor üzerinde katılaşarak üretilen depozite daha sonra ekstrüzyon, dövme ve haddeleme ile şekillendirilir. Sprey biriktirme yönteminin ergiyikten direk olarak tek bir operasyonla net şekillendirilmiş ürün elde etme imkanı ve metalurjik ve mekanik özelliklerde önemli ölçüde iyileşmenin sağlanması olarak iki önemli avantajı vardır (Şekil 2.9) [Salamcı, 2004].



Şekil 2.9. Şematik Osprey Prosesi [Salamcı, 2004].

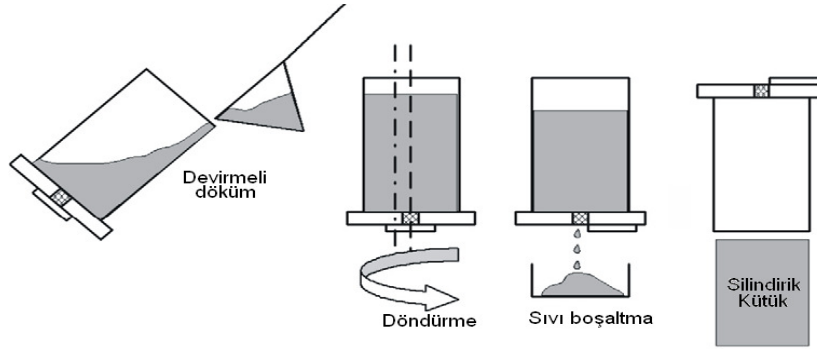
### 2.1.7. Döndürmeli entalpi dengeleme yöntemi

Döndürmeli entalpi dengeleme yöntemi sıvı metalin bir kalıp veya pota içinde döndürülerek yarı-katı duruma kontrollü bir şekilde getirilmesini içerir [Nafisi ve ark., 2006].

Döndürmeli entalpi dengeleme yöntemi yüksek döküm sıcaklığına ısıtılmış sıvı metalik silindirik bir kalıba döküldükten sonra sıvı metal %30-45 oranında katı içeren sıcaklığa soğutulur. Soğuma esnasında kalıp belirli bir hızda (200 rpm) döndürülür. Döndürme işlemimin zamanı kalıp boyutlarına ve sıvı metalin miktarına bağlı olup 30-60 sn arasında olduğu rapor edilmiştir [Doutre ve ark., 2004].

Bu döndürme hareketiyle metal kalıbın duvarlarında oluşmaya başlayan ilk  $\alpha$  katı fazının metal kalıp içerisinde dağılımı sağlanır. Daha sonra döndürme

işlemi durdurulup 5-10sn kısa bir ara verilerek fazla sıvının kalıp dibinden boşalması sağlanır [Nafisi ve ark., 2006].



Şekil 2.10. Döndürmeli entalpi dengeleme yönteminin sematik gösterimi. [Nafisi ve ark., 2006].

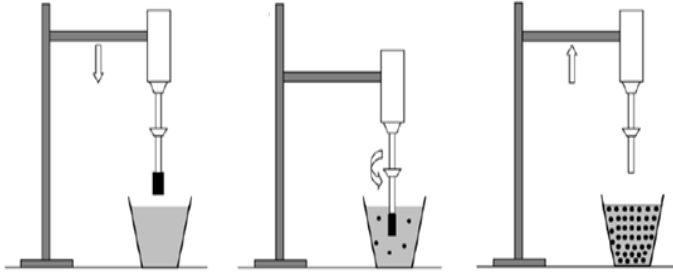
### 2.1.8. İçten soğutma yöntemi

İçten soğutma yöntemi sıvı ile aynı kimyasal kompozisyona sahip katı metal parçacığını ergime sıcaklığının hemen altında sıvı metal içerisine daldırma ve karıştırma esasına dayanır [Biol, 2009].

Şekil 2.11'de yöntem şematik olarak gösterilmiştir. İçten soğutma işleminde sıvı içinde döndürülen katı parçacık sayesinde çekirdeklenmenin bütün sıvıda aynı anda oluşumu sağlanmaktadır. Karıştırma işlemi yapısal alt soğumayı ve bütün yönlerde aynı hızda büyümeyi sağlamaktadır. Bu sayede küreselleşmiş  $\alpha$ -Al fazı oluşur [Biol, 2009].

### 2.1.9. Tane inceltme yöntemi

Tane inceltme yöntemi Al alaşımlarının sürekli dökümünde de kullanılmaktadır. Tane inceltici heterojen çekirdeklenmeyi meydana getirmek üzere belirlenen oranlarda sıvı metale dökümden önce ilave edilir [Kirkwood, 1994, Atkinson, 2005, Özer, 2010].



Şekil 2.11. İçten soğutma işleminin şematik gösterimi [Biol, 2009].

Tane inceltici olarak genelde titanyum ve bor kullanılır. Tane inceltici olarak kabul edilen Ti ve B elementleri belirli oranlarda Alüminyuma ilave edildiğinde hızlı bir şekilde ve önemli derecede tane inceltme etkisi göstermektedir [Karayazı, 2009].

Tane incelticiler heterojen çekirdeklenmeyi arttırmakla birlikte dentritik yapı oluşumunu engeller. Sonuçta ince ve eşksenel rozet şekilli yapılar elde edilir. Tane inceltme işlemi ile elde edilen yapı tekrar ısıtma işlemi ile tikso şekillendirmeye uygun hale getirilebilir [Czerwinski, 2007]. Tane inceltme tek başına ön malzeme üretiminde kullanılmaz. Tane inceltme ile beraber mekanik karıştırma ve elektromanyetik karıştırma gibi ön malzeme üretim yöntemleri kullanılır [Doğruyol, 2006].

#### 2.1.10. Düşük sıcaklıktan döküm yöntemi

Düşük sıcaklıktan döküm yöntemi ergime sıcaklığının hemen üzerinde bir sıcaklıkta alaşımı ergitme ve dökme işlemidir. Bu sıcaklıkta dökülen sıvı katılırken sıcaklık çok düşük olduğu için sütunsal büyüme engellenir ve sadece eşksenli taneler oluşur[Czerwinski, 2007, Figueredo, 2001].

Döküm sıcaklığının düşmesi eşksenli taneleri inceltmektedir. Bu yöntemde elde edilen ön malzemelerin tane boyutu yaklaşık 100  $\mu\text{m}$ 'dir. Yeniden ısıtma

işleminde mikro yapı küreselleşir ve hızla tikso şekillendirme uygulanır [Fan, 2002].

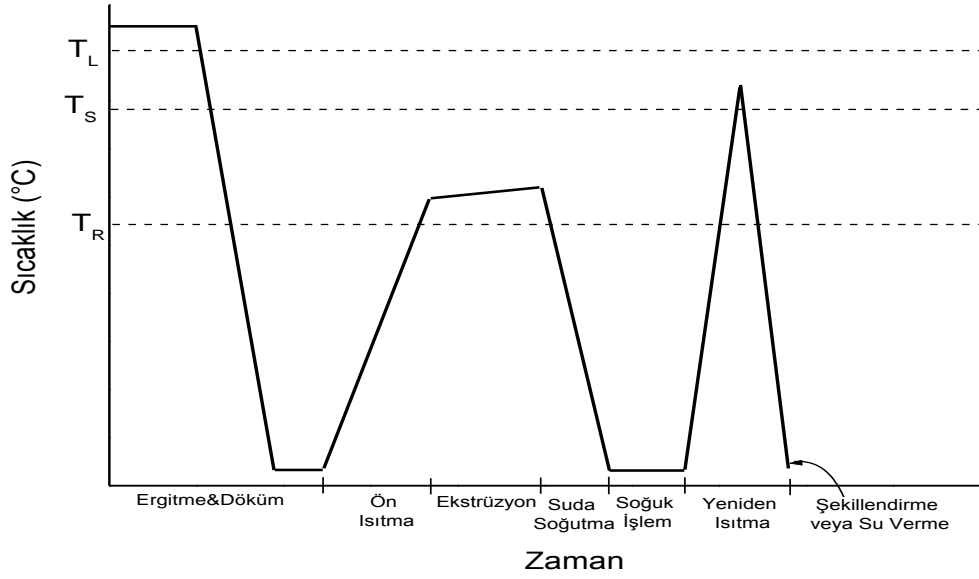
## **2.2. Katı Halden Ön Malzeme Üretim Yöntemleri**

### **2.2.1. Gerinimin neden olduğu sıvı aktivasyonu (SIMA)**

SIMA (Strain Induced Melt Activation) yöntemi ergitme ve döküm sonrası, yeniden kristalleşme sıcaklığının üzerinde ekstrüzyon, haddeleme vb. sıcak şekillendirme işleminden sonra sırasıyla soğuk deformasyon ve sonrasında yeniden ısıtma aşamalarını içerir (Şekil 2.12) [Young ve ark., 1983].

Ergitme ve dökümle üretilen numuneler, yaklaşık 30 dakika ön ısıtma işlemiyle yeniden kristalleşme sıcaklığının üzerine ısıtılır. Bu sıcaklıkta ekstrüze edildikten sonra hızla su verilerek soğutulur ve böylece yönlendirilmiş tane yapısına sahip numuneler üretilmiş olur. Ekstrüze edilmiş numuneler oda sıcaklığında soğuk deformasyona tabi tutularak uygun iç gerilme seviyelerine sahip numuneler elde edilir. Bu numuneler solidüs sıcaklığının üzerine yaklaşık 100 saniyede ısıtılarak yarı-katı şekillendirmeye hazır hale gelir [Young ve ark., 1983].

SIMA yönteminde soğuk deformasyon sonucunda kütükte kalıntı gerinme depolanır ve yeniden ısıtma işleminde depolanmış kalıntı gerinme sayesinde küresel mikroyapı elde edilir. Soğuk deformasyondan dolayı yeniden kristalleşme meydana gelir ve yeni, küçük eşeksensel taneler oluşur. Yarı-katı sıcaklıkta üçgen tane sınırlarında düşük ergime sıcaklığına sahip ötektik erir. Bu sıvı yüksek enerjili tane sınırlarına nüfuz eder. Bundan dolayı sıvı tarafından kuşatılan katı faz küresel bir şekil alır ve tikso-şekillendirme için gerekli olan tiksotropik özelliğe sahip mikroyapı elde edilir. [Mutlu, 2010].



Şekil 2.12. SIMA işleminin zaman-sıcaklık diyagramında gösterimi [Young ve ark., 1983].

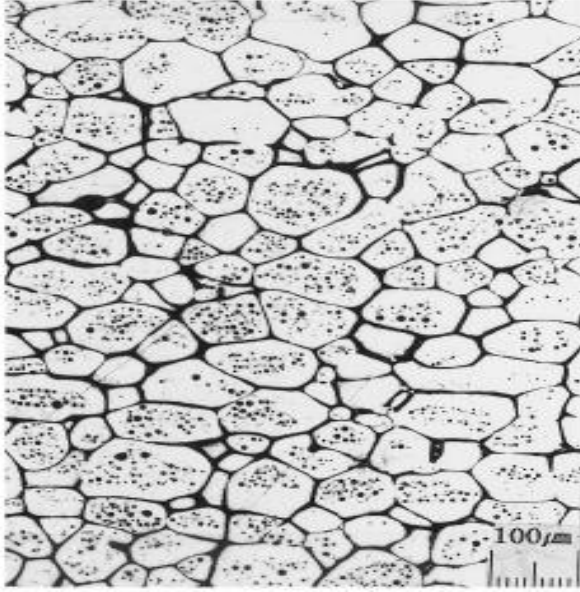
SIMA yöntemi, diğer yöntemlere göre (manyetik karıştırma vb.) çok daha iyi küreselleşmiş mikroyapı üretir ve bu da dövme alaşımlar için iyi akış özellikleri sağlar. [Sirong ve ark., 2006]. Resim 2.1.de SIMA işlemi ile üretilmiş AA2024 alüminyum alaşımının mikroyapısı görülmektedir.

SIMA yönteminde alaşım kompozisyonu, başlangıç döküm yapısı, soğuk veya sıcak deformasyon oranı, yarı-katı sıcaklığa ısıtma hızı, yarı-katı sıcaklık ve bu sıcaklıkta bekleme zamanı tane boyut ve şeklini etkileyen önemli parametrelerdir [Koop, 1999].

SIMA yönteminde malzemenin yeniden ısıtılma işlemi kritik bir işlem aşamasıdır. Yeniden ısıtmanın amacı sadece uygun sıvı oranını elde etmek değil aynı zamanda ince tane boyutuna sahip küresel yapılı katı faz dönüşümünü sağlamaktır [Zoqui ve ark., 2002].

Yeniden ısıtma sıvı-katı bölgede belirlenen bir sıcaklığa ısıtmayı ve bazen de belirlenen sıcaklıkta izotermal bekletmeyi içerir. Bu yeniden ısıtma işlemi uygun sıvı oranı elde etmek ve katı fazın dendritik yapıdan küresel yapıya

dönüşümünün sağlanması amacıyla yapılır. Fakat uzun bekletme zamanı tane kabalaşması ile sonuçlanır. Tane kabalaşması yarı-katı ön malzemenin tiksotropik özelliklerinin ve yarı-katı şekillendirilmiş parçanın mekanik özelliklerinin azalmasına neden olur [Jung, 2000].



Resim 2.1. SIMA yöntemi ile üretilmiş AA2024 alaşımının mikroyapısı [Choi ve Park, 1998].

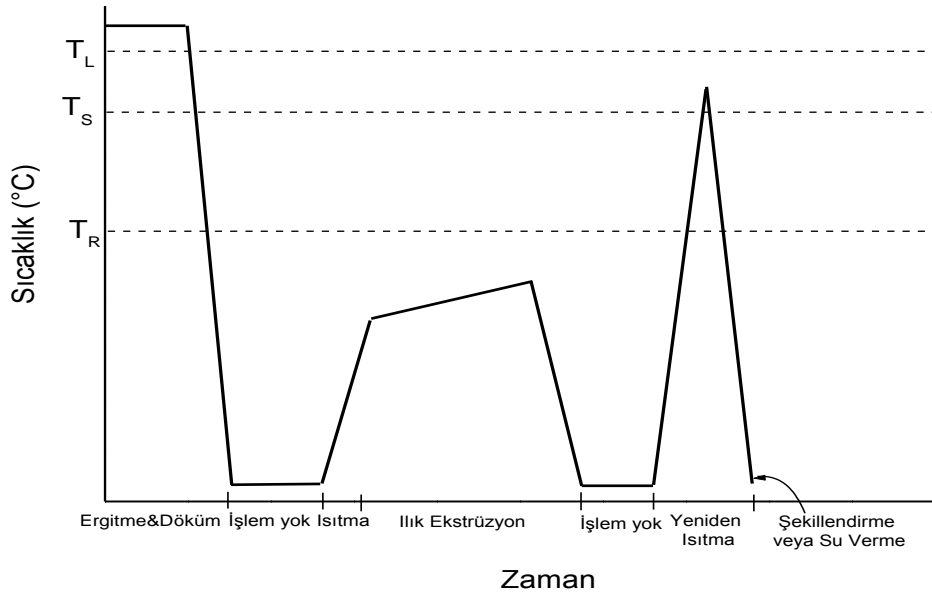
SIMA yöntemiyle Al alaşımı dövme ya da ekstrüze etmek suretiyle soğuk olarak deforme edildikten sonra yarı-katı bölgeye ısıtıldığında yeniden kristalleşme meydana gelir. Ekstrüzyonla veya soğuk şekil verme yöntemlerinden biriyle üretilmiş ve/veya deformasyon uygulanmış malzemede uygulanan deformasyon miktarına bağlı olarak dislokasyon yoğunluğu artar. Dislokasyon yoğunluğu yarı-katı hale ısıtma işlemi sırasında birincil  $\alpha$ -fazının küresel hale dönüşmesinin ana sebebidir. Dislokasyon yoğunluğu ne kadar artarsa, yeniden kristalleşecek taneler için o kadar fazla çekirdek merkezi olacak, dolayısıyla tane yapısı o kadar ince olacaktır [Dışpınar ve Türkeli, 2006].

SIMA yöntemi, diğer yöntemlere göre (manyetik karıştırma vb.) daha ekonomik olup çok daha iyi küreselleşmiş mikroyapı üretir ve bu da iyi akış

özellikleri sağlar. SIMA yöntemi yarı-katı parça üretiminde ticari olarak kullanılmaya başlanmıştır. [Türkeli, 1993, Kirkwood, 1994, Türkeli ve Akbaş, 1996, Nafisi ve Ghomashchi, 2005].

### 2.2.2. Yeniden kristalleşme ve kısmi ergitme yöntemi (RAP)

RAP (Recrystallization and Partial Melting) yöntemi, SIMA yöntemine alternatif olarak Kirkwood ve arkadaşları tarafından geliştirilmiştir [Kirkwood ve ark., 1992]. RAP yöntemi, SIMA yöntemine benzemekte olup, SIMA yönteminde yeniden kristalleşme sıcaklığının üzerinde sıcak deformasyon uygulanırken, RAP yönteminde dökümden sonra yeniden kristalleşme sıcaklığının altında ılık veya soğuk deformasyon uygulanmaktadır [Atkinson ve Liu, 2008, Atkinson ve ark., 2008]. İki yöntem arasındaki en büyük fark, SIMA yönteminde yeniden kristalleşme sıcaklığının üzerinde gerçekleştirilen sıcak deformasyonu takiben uygulanan soğuk işlemin (soğuk deformasyonun) RAP yönteminde olmamasıdır (Şekil 2.13).



Şekil 2.13. RAP işleminin zaman-sıcaklık diyagramında şematik olarak gösterimi [Kirkwood ve ark., 1992].

RAP yönteminde, malzemenin yeniden kristalleşme sıcaklığının altındaki bir sıcaklıkta deformasyona tabi tutulması (Şekil 2.13) ve takiben yarı-katı sıcaklığa ısıtma işlemi ile ilk önce yüksek açılı yeniden kristalleşmiş taneler oluşmakta ve yarı-katı sıcaklıkta oluşan sıvı faz, yeniden kristalleşmiş tane sınırlarına nüfuz ederek bu sıcaklıkta tanelerin küreselleşmesini sağlamaktadır [Kirkwood ve ark., 1992, Kirkwood, 1994, Atkinson ve Liu, 2008, Atkinson ve ark., 2008].

RAP (Recrystallisation and Partial Melting) yöntemi ekonomikliği ve küçük çaplı ön malzeme üretiminde dikkati çekmektedir [Atkinson ve Liu, 2008]. Döküm sonrası malzeme yeniden kristalleşme sıcaklığının altında yüksek oranda deformasyona maruz bırakılır. Böylece dendritik yapı kırılır ve ince uzun taneli deforme olmuş yapı elde edilir. Soğuk deformasyonu takiben malzeme yarı-katı sıcaklığa ısıtılmasıyla yeniden kristalleşmesi ve dolayısıyla ince ve dendritik olmayan yapının oluşumu sağlanır. SIMA yöntemindeki mekanizmaya benzer olarak bu oluşan tanelerin sınırları sıcaklığın artmasıyla birlikte mikrosegregasyondan dolayı yapıda var olan düşük ergime sıcaklığına sahip faz veya bölgelerin ergimesiyle oluşan sıvı faz tarafından ıslatılır [Doutre ve ark., 2004].

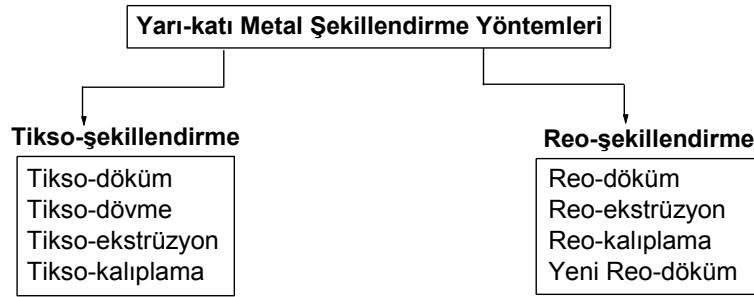
Bu yöntemin en büyük dezavantajı büyük çaplı numunelerin kesit boyunca homojen olarak deforme edilememesi ve bundan dolayı da tamamen homojen küresel mikroyapı üretilmemesidir [Atkinson ve Liu, 2008, Atkinson ve ark., 2008].

Literatürde yapılan YKMŞ çalışmalarında, özellikle dövme Al alaşımlarında dendritik olmayan mikroyapıya sahip ön malzeme hazırlığında üç yöntemin en çok kullanılan yöntemler olduğu belirlenmiştir.

### 3. YARI-KATI ŞEKİLLENDİRME İŞLEMİ

#### 3.1. Yarı-Katı Şekillendirme Yöntemi

Yarı-katı metal şekillendirme yöntemleri Şekil 3.1’de gösterildiği gibi tikso-şekillendirme ve reo-şekillendirme olarak iki grupta sınıflandırılabilir [Atkinson, 2005, Kirkwood, 1994, Fan, 2002]. Reo ve tikso-şekillendirme yöntemleri kendi içlerinde kullanılan şekillendirme yöntemine göre sınıflandırılmaktadır.



Şekil 3.1. Yarı-katı metal şekillendirme yöntemlerinin sınıflandırılması [Kılıçlı, 2010].

Şekil 3.2’te bu yöntemlerin üretim aşamalarının akış seması gösterilmiştir.

#### 3.2. Tikso Şekillendirme Yöntemi

Tikso şekillendirme ile parça üretimi Şekil 3.3’de görüldüğü gibi üç aşamadan oluşmaktadır. Bu aşamalar tane inceltme, elektromanyetik karıştırma, termomekanik işlem gibi yöntemlerle küresel mikroyapılı ön malzemenin üretilmesi daha sonra bu malzemenin yarı-katı sıcaklığın ısıtılması ve bazen bu sıcaklıkta bekletilmesi ve son aşamada da yarı-katı hale gelmiş malzemenin dövme, döküm ve haddeleme gibi yöntemlerle şekillendirilmesi aşamalarından oluşmaktadır [Kopp ve ark., 1999].

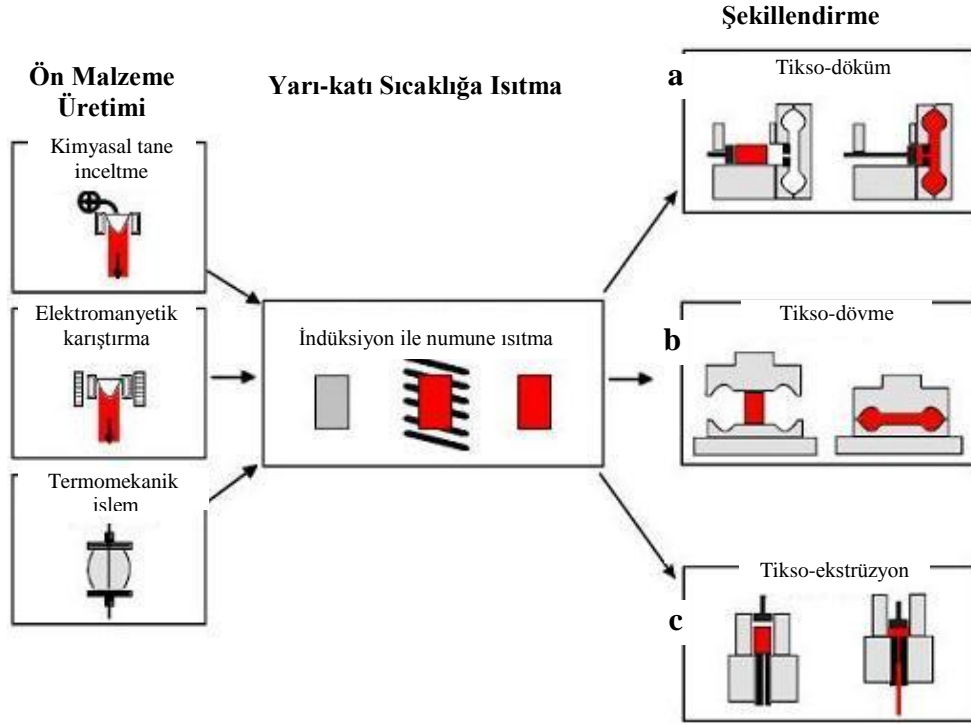


Şekil 3.2. Yarı-katı metal şekillendirme yöntemlerinin üretim aşamaları [Czerwinski, 2007, Mutlu, 2010].

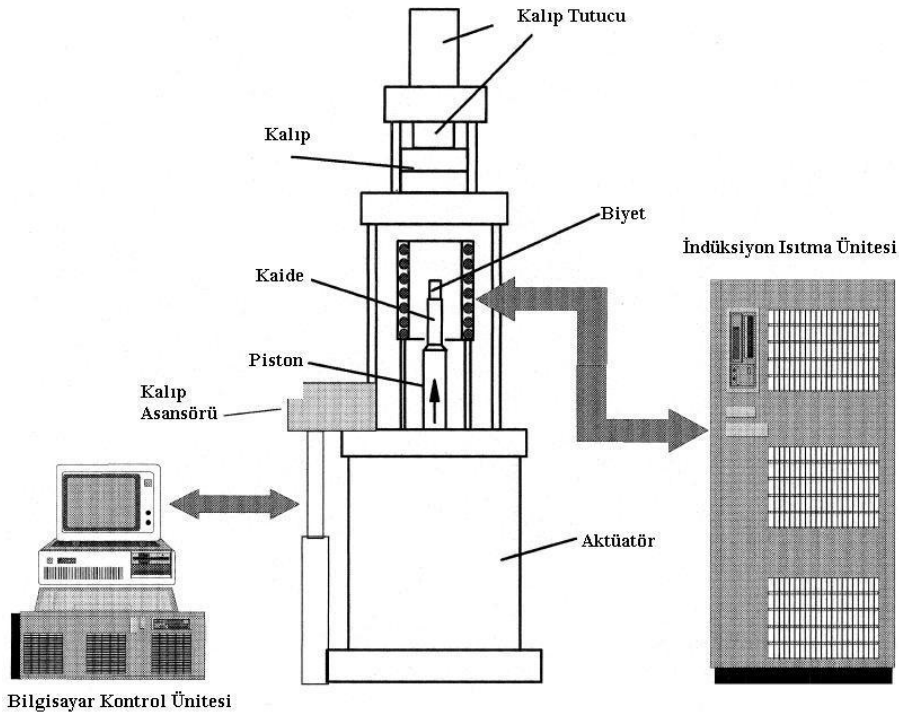
### 3.2.1. Tikso-döküm işlemi

Bu yöntemde dentritik olmayan önceden hazırlanmış numune tekrar yarı-katı bölgeye ısıtıldıktan sonra uygun bir bekleme süresi sonrası basınçlı dökümde olduğu gibi piston aracılığıyla kalıba enjekte etmek suretiyle şekillendirilir [Atkinson, 2005, Kirkwood, 1994, Fan, 2002].

Katı-sıvı karışımının doğrudan basınçlı döküm makinesiyle beslenmesine Reo-Döküm, önce kalıplama dökülerek şekillendirilmesi ve sonra katı-sıvı sıcaklığına tekrar ısıtılarak dökülmesine tikso-döküm adı verilir [Çavuşoğlu, 1992].



Şekil 3.3. Tikso-şekillendirme yöntemlerinin şematik olarak gösterimi.[Hirt ve ark., 1994, Kopp ve ark., 1999].



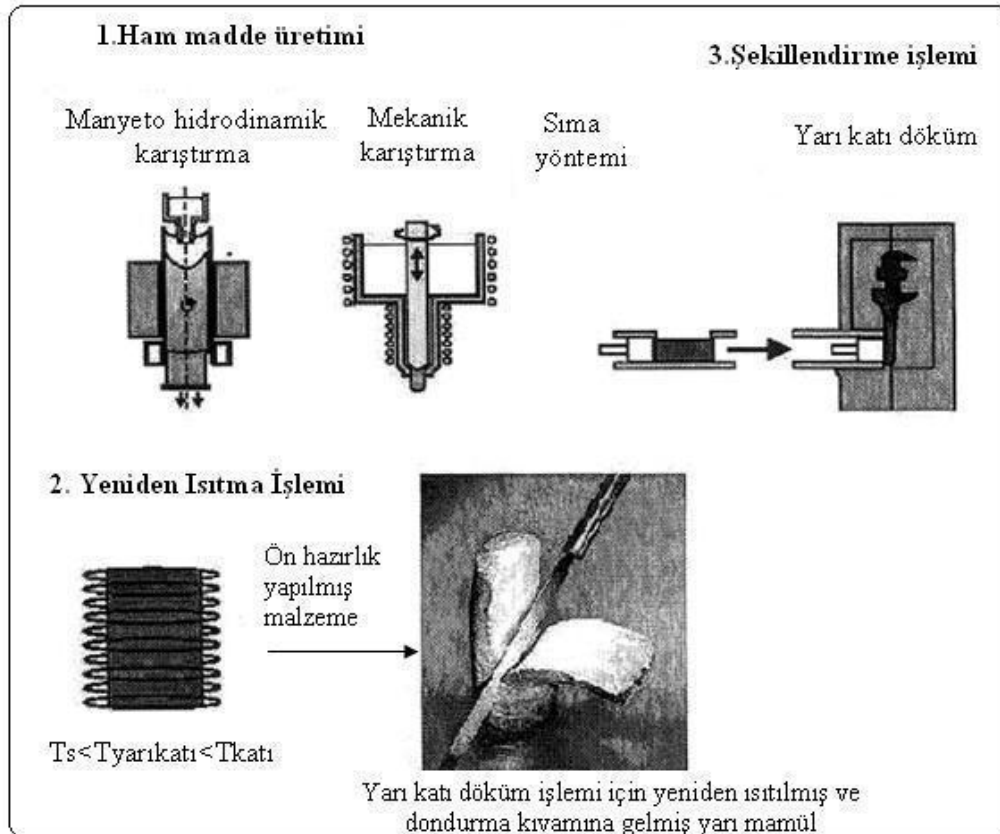
Şekil 3.4. Sheffield Üniversitesinde geliştirilen tikso-şekillendirme presinin şematik olarak gösterimi [Kapranos ve ark., 2000].

Tikso-döküm yöntemi aşağıda verilen dezavantajlara sahiptir.

- Yüksek hammadde fiyatı
- Yarı ısıtma sırasında yarı mamul kaybı
- Tahribatsız muayenenin maliyeti
- Hurdasının tekrar kullanılmasının zorluğu [Seo ve ark., 2005, Özer, 2010].

Tikso-döküm yönteminde üç temel işlem mevcuttur.

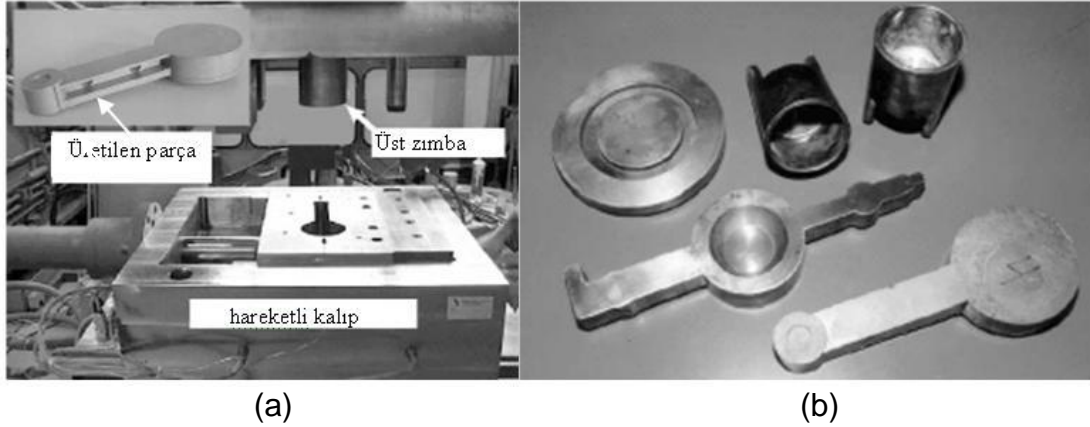
- Ön malzeme üretimi
- Ön malzemeyi yarı katı bölgesine tekrar ısıtma
- Şekillendirme [Yang, 2004, Özer, 2010].



Şekil 3.5. Tikso yarı-katı şekillendirme tekniğinin şematik gösterimi [Wu, 2004, Modigell ve Koke., 1999 ].

### 3.2.2. Tikso-dövme işlemi

Tikso-dövme klasik dövmeye benzerlik gösterir. Yarı-katı sıcaklığa ısıtılan kütük kalıp ile pres arasına konulur ve preslenir. Yarı-katı dövme için gerekli sıvı oranı %50'nin altında olmaktadır [Kopp ve ark., 2001]. Kütük kalıbın şeklini alır. Tiksotropik yapıya sahip kütük kalıbı tamamen doldurur. Aşağıdaki Resim 3.1'de tikso-dövme cihazı ve elde edilen parçalara örnekler görülmektedir. Şekil 3.6'da ise tikso-dövmenin şematik gösterimi verilmektedir.

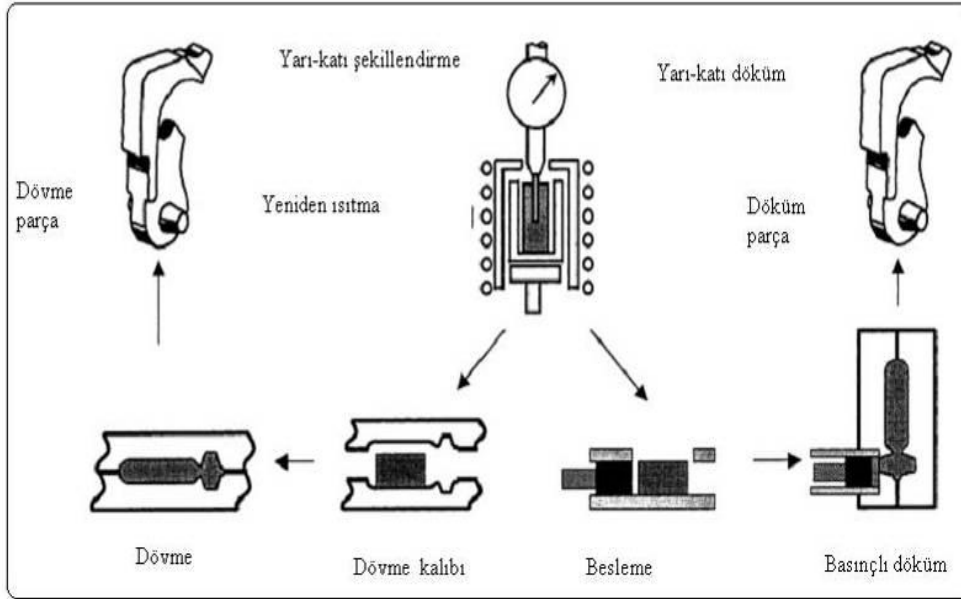


Resim 3.1. (a) Tikso dövme cihazı, (b) Tikso dövme ile elde edilmiş parçalar [Fan, 2002].

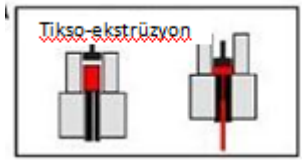
### 3.2.3. Tikso-Ekstrüzyon

Tikso-ekstrüzyon işleminin şematik olarak gösterimi Şekil 3.7'de gösterilmiştir. Tikso-ekstrüzyon yeniden yarı-katı bölgeye ısıtılmış dendritik olmayan malzemenin ekstrüze edilmesi ile gerçekleştirilmektedir.

Tikso-ekstrüzyon işlemi en çok soğuk olarak şekillendirilmesi güç olan dövme Al alaşımlarına uygulanmakta olup bu yöntemle üretilen çubuklarda dendritik veya rozet yapıya hiç rastlanmamaktadır [Kim ve ark., 2007].



Şekil 3.6. Yarı-katı şekillendirme ve döküm yöntemlerinin şematik gösterimi [Fan, 2002].



Şekil 3.7. Tikso-ekstrüzyon şematik olarak gösterimi.[Hirt ve ark., 1994, Kopp ve ark., 1999].

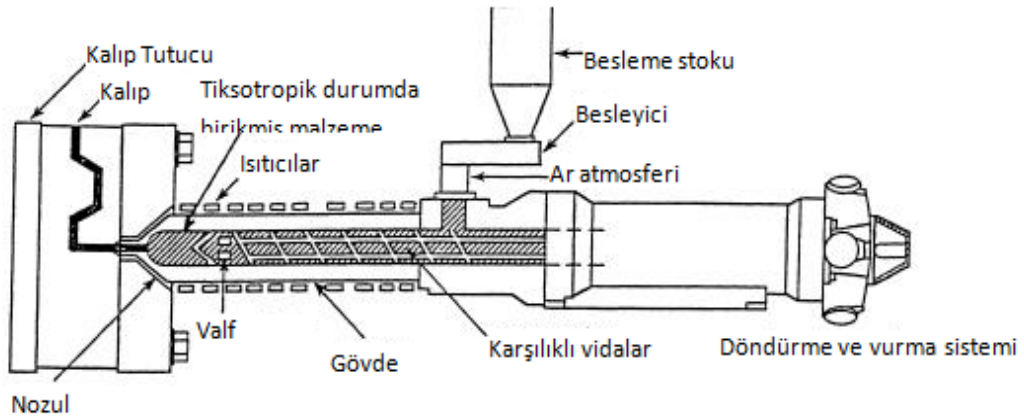
### 3.2.4. Tikso-Kalıplama

Tikso kalıplama işlemi, alüminyum, magnezyum gibi hafif metallerin farklı takviye elemanlarıyla kompozit malzeme üretilmesinde kullanılan bir yöntemdir. Tikso kalıplama metodu kullanılarak son şekilde veya son şekle yakın üretim yapılabilmektedir. Bu işlemde, bir kalıp içerisine (genellikle grafit) yarı-katı metalin düşük presleme yükleriyle, yarı-katı durumdaki metal parçaların şekillendirilmesi yapılmaktadır. Bu durumda alaşımın mikroyapısı, bir sıvı matris içinde katı metal veya seramik küreleri içermektedir. Metal, sıvı ötektikle çevrili katı kürelerden oluştuğundan dolayı tiksotropik davranış gösterir. Genellikle, alaşım yarı-katı halde şeklini muhafaza edebilir

durumdadır ve bu şekli katı faz dentritlerinin kenetlenmesi sayesinde muhafaza etmektedir [Sukimoto, 1986].

Tikso kalıplama, belirli alaşımların tiksotropik özellikleriyle, yarı-katı hale ısıtıldıklarında yararlanılan bir metal şekillendirme işlemidir. Klasik döküm teknolojisiyle birlikte, plastik enjeksiyon kalıbının şekil yapma kabiliyetini birleştirerek daha karmaşık geometri ve yüksek yoğunluklu parçalar elde edilir [Aktar, 2004].

Yeni bir üretim yöntemi olan tikso-kalıplamada plastik enjeksiyon presi şeklinde bir pres kullanılmaktadır (Şekil 3.8). Besleme stoku olarak 2-5 mm boyutlarında metal talaşları kullanılır. Besleme stoku kalıba karşılıklı vidaların dönmesi ile gönderilir. Alaşım kalıba ulaşana kadar ısıtıcılar sayesinde yarı-katı bölgeye gelmiş olur ve karışarak geldiği için dendritik olmayan bir yapıya sahip olur. Bütün bu işlemler kapalı bir ortamda argon atmosferinde gerçekleştiği için Mg alaşımları oksitlenmeden korunmuş olur [Fan, 2002].



Şekil 3.8. Tikso-kalıplama presinin şematik olarak gösterimi [Fan, 2002].

Tikso kalıplama ile üretilen malzemenin dayanımı klasik döküm yöntemiyle üretilen malzemenin dayanımından daha fazladır. Bunun nedeni ise, tikso kalıplama yöntemiyle üretilen malzemenin küresel mikroyapıya sahip olmasıdır. Klasik yöntemle katılmış dendritik mikroyapılı malzemede

taneler; malzemeye uygulanacak mekanik kuvveti malzemenin iç yapısında biriktirip, deformeye yol açacaktır. Bunun sebebi de keskin, sivri köşelerin yapıda fazla olmasından kaynaklanmaktadır. Buna karşın tikso kalıplama yöntemiyle üretilmiş küresel tanelere sahip malzeme, sözü edilen tanelerin küresel olmasından dolayı uygulanan kuvveti tutma ve absorbe etme özelliğine sahiptir. Bu da çekme dayanımı, basma dayanımı, darbe dayanımı, sürünme dayanımı gibi mekanik özelliklerin daha iyi olmasını sağlamaktadır. [Aktar, 2004].

### **3.3. Reo-Şekillendirme Yöntemi**

#### **3.3.1. Reo-Döküm**

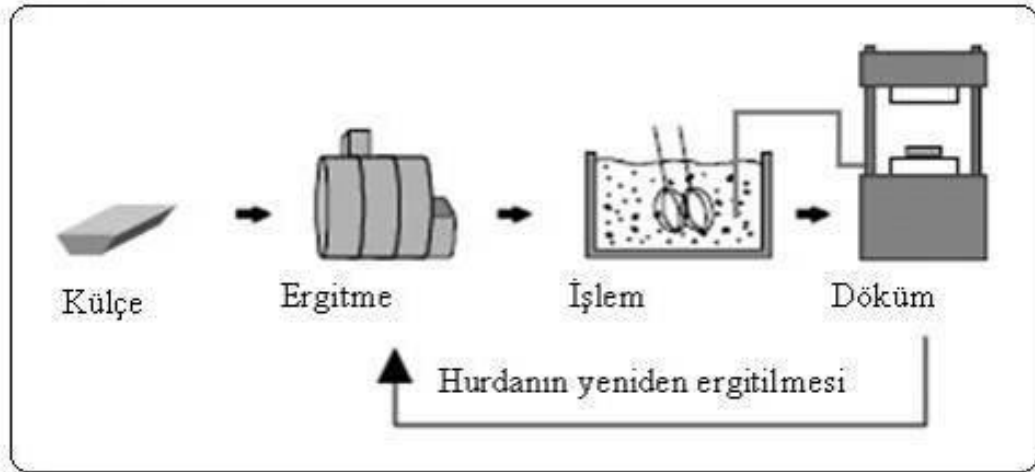
Katılaşma esnasında sıvı haldeki metal karıştırılarak dendritik olmayan yapı elde etme işlemi reo-döküm olarak tanımlanmaktadır. [Atkinson 2002, Kılıçlı 2010]. Bu yöntemle göre; sıvı metalin katılaşması esnasında kullanılan mekanik karıştırma, elektromanyetik (manyeto hidrodinamik) karıştırma vb. yöntemlerle küresel mikro yapıya sahip yarı-katı mamül üretilir. Üretilen küresel mikroyapıya sahip yarı-katı haldeki malzeme pres döküm makinesinde preslenerek şekillendirme işlemi yapılır, Şekil 3.9. Rheo-döküm özellikle son yıllarda gelişmiştir. Bu gelişim küçük laboratuvarlar da başlamıştır. Bu yöntemler ile üretilen malzemelerin tane boyutu 100-400 µm arasındadır.

#### **3.3.2. Reo-Kalıplama**

Tikso-kalıplamaya benzeyen bu yöntemle besleme stoku olarak sıvı metal şarj edilir. [Fan, 2002]. Reo-kalıplama, reo-döküm ile enjeksiyon kalıplamanın kombine edildiği net-şekli veren bir yarı-katı şekillendirme yöntemidir [Kılıçlı, 2010].

Reo-kalıplama yöntemi daha çok Mg alaşımlarının şekillendirilmesinde kullanılmakta olup bu yöntemin ince ötektik karışım içerisine homojen bir

şekilde dağılmış ince tane boyutlu katı parçacıklar üretilebildiği bildirilmiştir [Fan, 2005]. Reo-kalıplama ünitesi, bir sıvı metal besleyici, çift vidalı ekstrüderi, itici silindir ve merkezi kontrol ünitesinden oluşmaktadır. [Figueredo, 2001]. Son yıllarda Al alaşımlarının şekillendirilmesinde reo-kalıplama yöntemi başarıyla kullanılmaktadır. Bu yöntem döküm Al alaşımlarına uygulanabildiği gibi dövme Al alaşımlarının şekillendirilmesinde de kullanılmakta olup bu yöntemle ince taneli, metallar arası bileşiklerin homojen olarak dağılımının sağlanması ve gözenek miktarı % 0,5'ten daha az yapılar elde edilmesi mümkün olmaktadır [Fan, 2005].



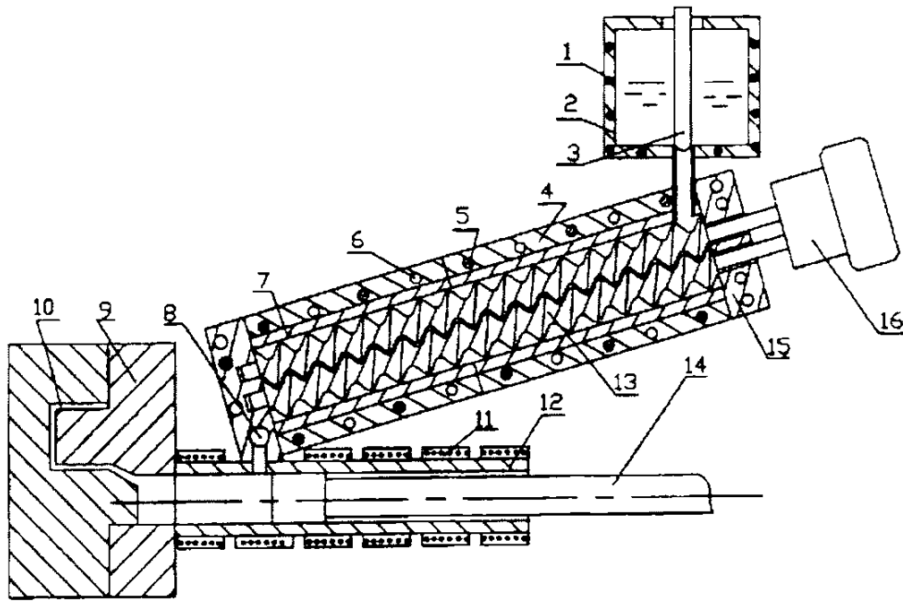
Şekil 3.9. Rheo döküm yönteminin şematik gösterimi [Basner, 2001, Akt Özer, 2010].

### 3.3.3. Yeni reo-döküm yöntemi

Yeni reo-döküm yöntemiyle üretilen alüminyum ve magnezyum alaşımı ön malzemeler Avrupa ve ABD'de ticari olarak satılmaktadır. Yöntem şu aşamalardan oluşmaktadır [Figueredo, 2001, Kılıçlı, 2010];

- 1) Sıvı haldeki alaşımın soğutucu kalıp veya tabakayla teması ve kalıp ile temas halinde iken birincil  $\alpha$ -Al fazının ergiyikte oluşması,

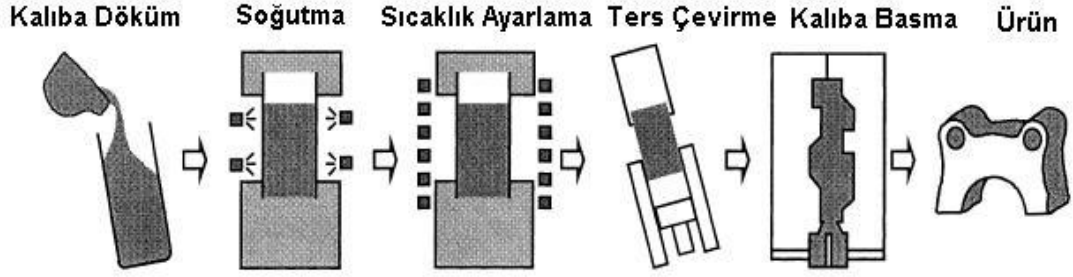
- 2) Yalıtılmış potalarda veya soğutulmuş plakalarda çok miktarda çekirdek içeren metal oluşturulması,
- 3) Kontrollü soğuma ile tam küresel ön malzeme oluşumu ve ilave soğutma ile biçimlendirme için gerekli katı miktarının ayarlanması,
- 4) Yalıtılmış pota ters çevrilerek yarı-katı haldeki numunenin yüzeyi oksitlenmeden korunur ve kalıba basılarak şekillendirme işlemi gerçekleştirilir.



1- Isıtıcı elemanlar, 2- Pota, 3-Durdurma çubuğu, 4-Gövde, 5- Isıtıcı elemanlar, 6- Soğutma kanalları, 7- Gövde astarı, 8- Transfer valfi, 9- Kalıp, 10- Kalıp boşluğu, 11- Isıtıcı elemanlar, 12- Vurma kolu, 13- Döner çift vida, 14- Piston, 15- Kapak, 16- Döndürme sistemi.

Şekil 3.10. Reo-kalıplama ünitesinin şematik olarak gösterimi [Ji ve ark., 2001 Akt.].

Şekil 3.11'de görüldüğü üzere döküm işlemi likidüs sıcaklığının hemen üzerindeki sıcaklıklarda uygulanır. Bu ön malzeme üretim işleminde yalıtılmış potalarla tek vuruşluk ön malzemeler üretilebilmektedir. Bu sebeple ön malzemenin karakteristiği potadan potaya veya basmadan basmaya değişebilir [Figueredo, 2001].



Şekil 3.11. Yeni reo-döküm yönteminin aşamalarının şematik olarak gösterimi [Adachi ve ark., 1996].

### 3.4. Yarı-Katı Şekillendirme Yönteminin Avantajları

Yarı-katı işlem; son şekle yakınlık, ince cidarlı şekillendirme imkanı, mükemmel yüzey kalitesi, düşük işlem sıcaklığı ve iyi kaynak edilebilme özelliği gibi bazı avantajlara sahiptir. %100 sıvı işlem ile karşılaştırıldığında, yarı-katı metal işleminde, metal akışının vizkozitesi yüksek ve laminar olduğu için gaz boşluğu az olmaktadır (Resim 3.2). Katılaşma esnasında, çekme az olduğu için çekme boşlukları ve sıcak yırtılma eğilimi de düşük olmaktadır [Kirkwood, 1996].

Ön malzeme mikroyapısının şekillendirme ve diğer aşamalar esnasında korunmasından dolayı YKMŞ ile üretilmiş parçalarda son mikroyapı kontrolü mükemmeldir. Şekillendirme esnasında katı/sıvı miktarı kontrolü ve ön malzeme üretiminde gerekli parametre değişiklikleri yapılarak istenilen viskozite değerleri elde edilebilir [Figueredo, 2001].

Bu yöntem özellikle hassas döküm ve basınçlı döküme alternatif bir yöntemdir. Ayrıca mekanik özellikler dövme ve düşük basınçlı gibi diğer döküm işlemleriyle boy ölçüşecek kadardır [Kirkwood, 1994].

Yarı-katı haldeki metal kalıbı doldururken düzlemsel akışın korunabilmesi belki de YKMŞ işlemlerinin en önemli karakteristiğidir. YKMŞ işlemlerinde türbülanssız akış gaz hapsolmesini en aza indirerek mikro ve makro yapı

ölçeğindeki gözenekleri azaltır ve böylece üretilen parçaların mekanik özellikleri iyileştirilmiş olur [Flemings ve ark., 1976].



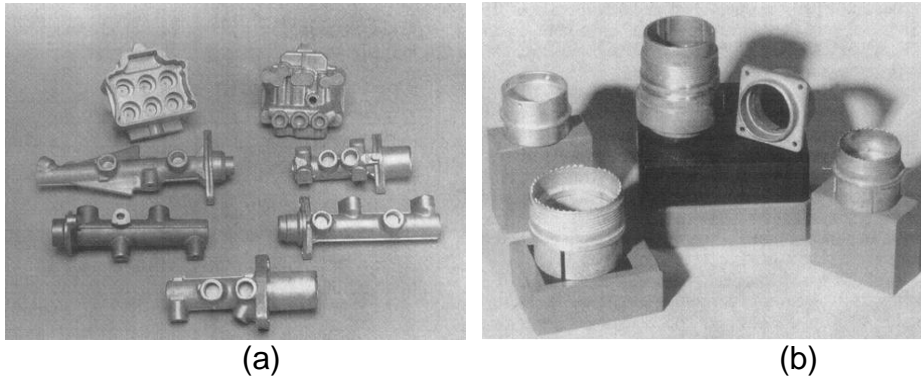
Resim 3.2. Yarı-katı sıcaklıktaki Alüminyum alaşımı.

Reo-döküm (rheo-casting) işlemi; özel kütle ihtiyacını ortadan kaldırarak ergimiş metalden son şekle yakın ürün elde etme yöntemidir. Bu özelliği ile tikso-döküme göre enerji ve maliyetten tasarruf gibi avantajları vardır. Reo-döküm yönteminde; düşük süper ısıda, kalıp yüzeyinde kristal çekirdekler oluşur. Ergimiş metalin süper ısı düşük olduğundan kristal çekirdekler erimez ve ilk oluşan kristaller içine doğru büyüyebilirler [Çavuşoğlu, 1992]. Reo-döküm yönteminde, %50' den daha az oranda katı ile çalışıldığı için ilk oluşan kristal ebatı küçülmekte ve küresel hale dönüşmektedir [Aktar, 2004].

YKMSŞ yöntemlerinin en önemli avantajlarından biri de son şekline yakın parça üretimidir [Kapranos ve ark., 2000]. YKMSŞ ile üretilen parçalarda tamamen sıvı halde yapılan dökümlere göre çok düşük katılma çekmesinden dolayı son şekline yakın parça üretimi yapılabilen ve bu parçalarda döküm hataları en aza indirildiğinden mekanik özellikleri oldukça iyileşmektedir. Bu sebepten döküm parçaların boyutları küçültülebilmekte ve bunun sonucunda daha hafif parçaların üretimi mümkün olmaktadır [Kenney ve ark., 1988]. Ayrıca işlem düşük sıcaklıklarda yapıldığı için katılma süresi azalmakta kalıp ömrü ve üretim kapasitesi artmaktadır. Yarı-katı haldeki

metalik malzemeler kısmi olarak katı oldukları için katılaştırma sırasında çekme miktarı azalmakta ve daha hassas ölçülerde parça üretimi gerçekleştirilmektedir (Resim 3.3). Çevresel olarak düşünüldüğünde YKMSŞ yöntemlerinde geleneksel döküm yöntemlerine göre daha temiz ve daha az enerjiye ihtiyaç duyulmaktadır [Figueredo, 2001].

Mikroyapılarının üniform olması, üretilen parçanın mekanik özelliklerinin iyi olmasını sağlar. Üretim kalitesi daha yüksek olur. Bundan dolayı alaşım kalıba kısmen katılaşmış durumda girdiğinden daha az çekme porozitesi oluşur ve mevcut olan porozite üniform dağılım gösterir. Kısmen katılaşmış alaşım, tamamen sıvı olandan daha viskoz olduğu için kalıp boşluğuna girerken daha az saçılma oluşturur ki bu da üretilen malzeme içerisinde kalan havanın azalmasına neden olur. Dolayısıyla gaz boşluğu sorunu çok azalır [Sukimoto, 1986].



Resim 3.3. Yarı-katı şekillendirme ile üretilmiş bazı Al parçalar; a) otomobil fren sistemlerinde kullanılan parçalar ve b) elektrik bağlantı parçaları [Flemings, 1991, Kılıçlı, 2010].

Özellikle ergime derecesi düşük olan Al ve Mg alaşımlarının yarı-katı şekillendirme yöntemleri ile üretilmesi aşağıda verilen avantajlara sahiptir [Türkeli, 1991, Türkeli, 1995, Kirkwood, 1994, Fan, 2002, Atkinson, 2005];

1. YKMSŞ yöntemlerinde tamamen katı durumdaki diğer şekillendirme yöntemlerine (dövme, haddeleme, ekstrüzyon, vb.) göre daha düşük

kuvvet ve geleneksel döküm yöntemlerine göre daha az enerji kullanılmaktadır

2. YKMŞ yöntemleri, metal kalıba döküm (kokil döküm), basınçlı döküm, ve sıkıştırma dökümlerde meydana gelen gözenek, katılaşma çekme boşlukları, sıcak yırtılma ve segregasyon gibi döküm hatalarını en aza indirmektedir.
3. Bu teknoloji ile dendritik olmayan yapı üretilebilmektedir.
4. YKMŞ yöntemlerinde parça başına üretim hızı ve diğer döküm yöntemlerinden daha hızlıdır.
5. YKMŞ yöntemlerinde net şekle yakın şekillendirme sağlandığından talaşlı işleme esnasındaki malzeme kaybı azdır.
6. Mikro boşluklar neredeyse tamamen elimine edilebilmektedir.
7. Makro ve mikro yapıdaki bu gelişmeler özellikle mekanik özellikleri önemli ölçüde iyileştirmektedir.
8. YKMŞ yöntemlerinde kalıp kullanma süresi diğer döküm tekniklerine (basınçlı döküm, sıkıştırma döküm, vb.) göre daha uzun ve ekonomiktir.

### **3.5. Yarı-Katı Şekillendirme Yönteminde Karşılaşılan Zorluklar ve Dezavantajları**

Yüksek ergime dereceli alaşımların, özellikle bakır alaşımları, çelik ve süper alaşımların tikso şekillendirilebilmelerinde prensip olarak herhangi bir problem yoktur. Belki, problem olarak ucuz hammadde olmaması ve bu alaşımların dentritik olmayan yapı elde etmek için elektromanyetik karıştırılması, malzeme üretimi için sürekli külçelerin kolay üretilmemesi gibi önemli nedenlerden dolayı sanayi sektörü bu konu üzerinde yaptığı araştırmalardan vazgeçebilir. [Aktar, 2004].

Tikso şekillendirmedeki ilk aşama yarı-katı sıcaklık aralığında uygun mikroyapı ile silindirik kütle şeklindeki alaşımın ısıtılmasıdır ve üniform bir kısmı ergime sağlamak için merkezden yüzeye, çapa ve boya bağlı

olmasıdır. İndüksiyonla ısıtma, bu amaç için hemen hemen genel bir gerekliliktir. Çünkü ısı yüzeyin altındaki bölgede bulunmaktadır, bu kısmen kontrol edilebilir. Yüzeyde yüksek ısı tehlikesi söz konusudur. Ayrıca güç girişi hassas ve kontrol edilebilir olmalıdır. [Aktar, 2004].

Besleme stoğu nispeten pahalıdır ve arz-talep miktarı düşüktür [Sukimoto, 1986]. Tikso-dökümde mutlaka mikroyapısı küremsi şekle sahip dendritik olmayan ön malzeme (besleme stoku veya silindirik kütük) hazırlığı gereklidir. Ön malzeme hazırlığı ise ekstra maliyet gerektirmektedir [Türkeli, 1991, Türkeli, 1995, Kirkwood, 1994, Fan, 2002, Atkinson, 2005].

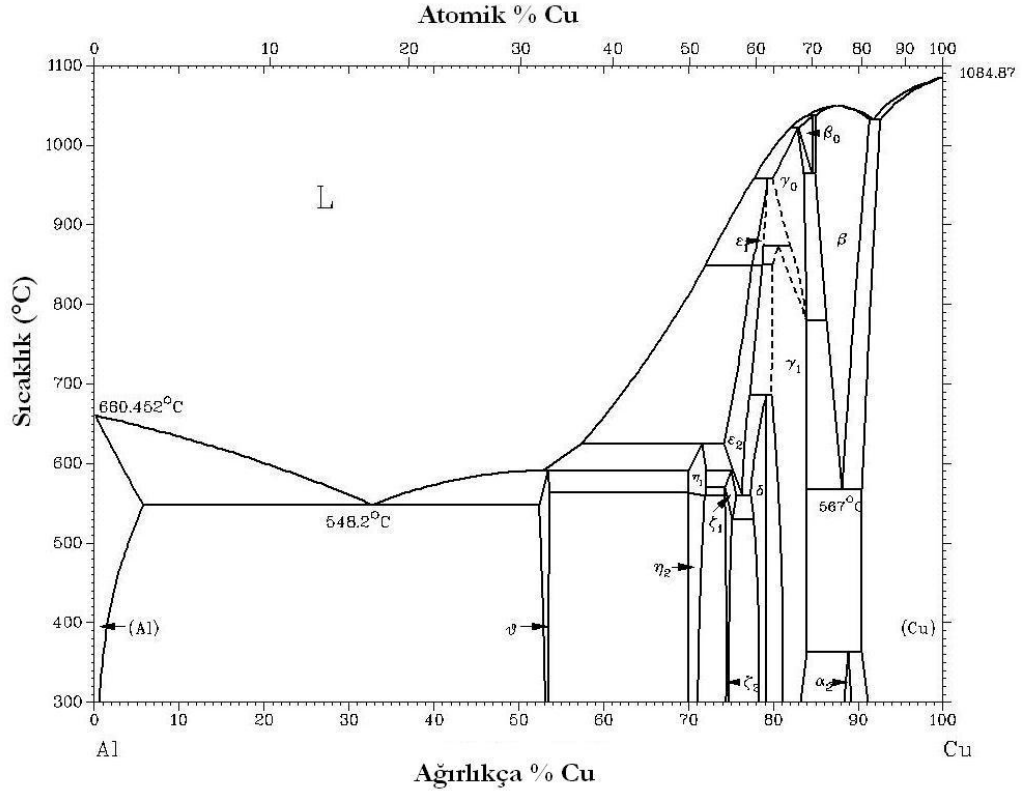
YKMŞ yöntemleri sıvı-katı bölgede kısmi ergitme ile yapıldığı için bu bölgede çok sıkı sıcaklık kontrolü gerekmektedir [Türkeli, 1991, Türkeli, 1995, Kirkwood, 1994, Fan, 2002, Atkinson, 2005].

Tikso kalıplama teçhizatı klasik işlemlerden daha fazladır [Sukimoto, 1986]. Kalıp geliştirme süreleri ve kalıp üretim maliyetleri oldukça yüksektir [Türkeli, 1991, Türkeli, 1995, Kirkwood, 1994, Fan, 2002, Atkinson, 2005].

Ayrıca her yeni uygulamayı yerine getirmek, mevcut bir işlem bilgisini gerektirir [Sukimoto, 1986]. YKMŞ işlemlerinde daha yüksek seviyede eğitilmiş ve tecrübeli personele ihtiyaç duyulmaktadır [Türkeli, 1991, Türkeli, 1995, Atkinson, 2005].

#### 4. Al-Cu ALAŞIMLARI ÜZERİNE YAPILMIŞ ÖN MALZEME ÜRETİM ÇALIŞMALARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Şekil 4.1'de verilen Alüminyum Bakır alaşımı faz denge diyagramı ve bu alaşımla ilgili yapılan çalışmaların değerlendirilmesi yapılmıştır.



Şekil 4.1. Alüminyum Bakır alaşımının faz denge diyagramı.

AA2024 alaşımının tiksotropik yapı üretimi ile ilgili ilk çalışma 1983'de K.P. Young ve arkadaşları [Young ve ark., 1983] tarafından yapılmıştır. Bu çalışma SIMA yönteminin patentidir. Bu çalışmada dövme ve döküm alaşımlarında SIMA yöntemi ile tiksotropik yapı üretimi patent altına alınmıştır. Ekstrüze halden yeniden ısıtılan alaşımın yapısında tam küreselleşme sağlanamamıştır. Ekstrüze malzeme soğuk deforme edildikten sonra yeniden ısıtma işleminden sonra daha ince ve küresel mikroyapı elde edilmiştir [Mutlu, 2010].

Choi ve Park [Choi ve Park, 1998]- AA2024 alaşımını %15, %20, %25, %40 ve %60 olaralarda soğuk deforme etmiş ve daha sonra %80 katı oranını veren sıcaklığa ısıtarak tane boyutu ve etkili soğuk deformasyon arasındaki ilişkiyi incelemişlerdir. Araştırmacılar etkili deformasyon miktarı ile ortalama tane boyutunun azaldığını belirlemişlerdir [Mutlu, 2010].

Jung ve Kang [Jung ve Kang, 2000] sıcak ekstrüze edilmiş Al2024 alaşımında yarı-katı sıcaklığın ve bu sıcaklıkta beklemenin mikroyapıya etkisini araştırmışlardır. Araştırmacılar yarı-katı sıcaklığa ısıtma işlemini kademeli olarak geręekleřtirmiřlerdir. Alaşımı belirlenen yarı-katı sıcaklıkta 1 dak, 3 dak, 5 dak ve 8 dak bekletmişlerdir. Araştırmacılar %50 ve %60 katı oranlarını veren sıcaklıklarda elde ettikleri mikroyapıların sadece sıvı hacim oranının farklı olduğunu bildirmişlerdir. Küreselleşme oranı ve tane boyutu arasında önemli bir fark olmadığını görmüşlerdir [Mutlu, 2010].

Jung ve Kang [Jung ve Kang, 2000] Al2024 alaşımının %60 katı oran sıcaklığında değişik bekleme sürelerinde incelemeler yapmışlardır. Jung ve Kang'a göre yarı-katı sıcaklıkta uzun bekleme süresi tane irileşmesine neden olmaktadır. En ideal bekletme süresinin 1 dak olduğunu bildirmişlerdir [Mutlu, 2010].

Tzimas ve Zavaliangos [Tzimas ve Zavaliangos, 2000] sprej döküm ve SIMA yöntemi ile Al2014 alaşımının mikroyapısının yarı-katı sıcaklıktaki küreselleşme mekanizmasını incelemişlerdir. Yarı-katı sıcaklıta bekleme sırasında sprej döküm yöntemi ile elde edilmiş ön malzemeler SIMA yöntemi ile elde edilen ön malzemelerden daha yavaş tane irileşmesi sergilediğini bildirmişlerdir. Al2014 alaşımında Fe/Mn'ce zengin intermetalik fazlar yeniden oluşan tane sınırlarına göç ederek tane irileşmesini engellediği bildirilmiştir. Sprej döküm yöntemi ile elde edilen ön malzemelelerde çok fazla oranda gaz boşluğu meydana geldiği ve bunun da sprej döküm aşamasında hidrojen gazının çözünmesinden kaynakladığını bildirmişlerdir [Mutlu, 2010].

Zoqui [Zoqui, 2003] çalışmasında düşük döküm sıcaklığından dökülmüş Al 2014 alaşımına %20 ve % 40 ılık deformasyon uygulamış ve daha sonra % 40 katı oranını veren sıcaklıkta 5 dak bekletmiştir. Araştırmacıya göre küresel ve ince mikroyapı elde edilmesinde deformasyon miktarı ilk döküm tane yapısından çok daha fazla etkilidir. Araştırmacı ılık deformasyon miktarı arttıkça daha homojen ve ince taneli yapılar üretilebileceğini bildirmiştir [Mutlu, 2010].

Jiang ve arkadaşları [Jiang ve ark., 2003] Al-4Cu-Mg alaşımında sıcak ve soğuk deformasyon miktarının ve yarı-katı sıcaklıkta bekleme süresinin tane boyutu üzerine etkilerini araştırmışlardır. Araştırmacılar artan deformasyon miktarı ile küresel mikroyapı elde etmek için bekleme sıcaklık ve süresinin azaldığını tespit etmişlerdir. Artan deformasyon oranı, artan yarı katı sıcaklık ve artan bekleme süresi ile katı fazın küreselliğin arttığını tespit etmişlerdir [Mutlu, 2010].

Saklakoğlu 2004 yılında AA5013 alüminyum alaşımını SIMA prosesiyle yarı-katı aralığına getirmek için en uygun ısıl işlem sıcaklık ve süreleri araştırmıştır. Mikroyapılar göz önüne alındığında 650 C'de 30 dakikalık ısıl işlemde tane sınırlarının tamamen sıvı fazla kuşatıldığı küresel yapılara ulaşmıştır. Ancak artan sıcaklık tane kabalaşması ve beraberinde sertlikte düşüğe de neden olduğunu belirtmiştir. Tane kabalaşmasını önlemek hem uygun ısıl işlem sıcaklık ve süresinin tespitiyle, hem de uygulanan deformasyon miktarının artırılmasıyla mümkün olacağını söylemiştir. Daha fazla ön deformasyon uygulanmış alaşımda yeniden kristalleşme sırasında daha fazla çekirdeklenme oluşacağından, daha ince taneli mikroyapı ortaya çıkacağını belirtmiştir. Porozitelerden ve dolayısıyla ortam koşullarından kaynaklanabilecek problemlerden kaçınmak, ısıl işlemin kontrollü atmosferde ya da vakum altında yapılmasıyla mümkün olabileceğini söylemiştir [Saklakoğlu, 2004].

Jiang ve Li [Jiang ve ark., 2005] Al-4Cu-Mg alaşımında SIMA yöntemi ile ön malzeme üretiminde diğer araştırmalarda olduğu gibi artan deformasyon miktarı ile daha küresel ve ince taneler elde edilebileceğini belirtmişlerdir. Yarı-katı sıcaklıkta bekleme süresinin artması ile yapıda var olan  $\theta$  fazı miktarının azaldığını ve boyutunun irileştiğini tespit etmişlerdir [Mutlu, 2010].

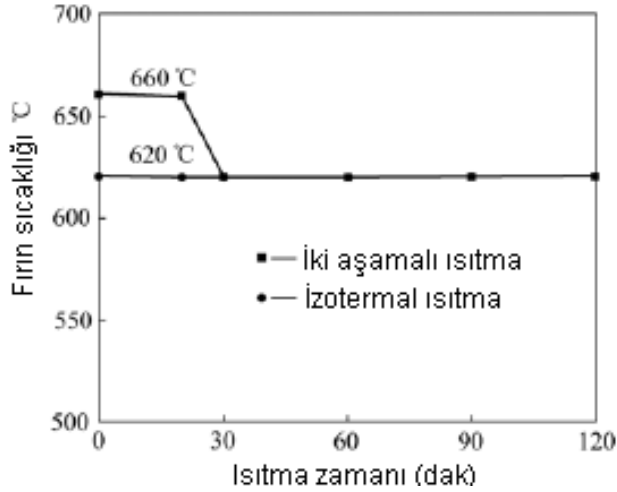
Önsel ve arkadaşları, 6082 alüminyum alaşımında deformasyon miktarının ve ısıl işlem parametrelerinin tane küreselleşmesine olan etkilerini - incelemiştir. Alüminyum alaşımlarında SIMA prosesiyle tiksotropik yapı elde edilmesi konulu araştırmaları sonucunda dar bir katılaşma aralığına sahip olduğu için tiksotropik yapıda elde edilmesi güç olan 6082 alaşımlı biyetler, ekstrüzyonla deformasyona uğratılmış ve daha sonra sıvı-katı aralığındaki sıcaklıklara ısıtılıp bu sıcaklıklarda bekletilerek, yarı-katı şekillendirme için uygun mikroyapılar elde edilmiştir. 100mm çapındaki biyetlerden gerek 27mm gerek 44mm çapa ekstrüde edilen parçalarda 640°C ve 645°C'de bekletme uygulamasının başarılı olacağı sonucuna varılmıştır [Önsel ve ark., 2005].

Jiang, Li [Jiang ve Li, 2006] ve Mi, Tang ve Li [Jiang ve ark., 2007] ile yaptığı diğer çalışmalarında Al-4Cu-Mg alaşımının mikroyapı oluşumu ve tane büyümesi aşamalarını tanımlayan matematiksel model sunmuştur.

Sirong ve arkadaşları [Sirong ve ark., 2006] Al2024 alaşımında soğuk deformasyon miktarının tane boyutuna etkisini araştırmışlardır. Araştırmacılar artan deformasyon miktarı ile tane boyutunun azaldığını belirlemişlerdir [Mutlu, 2010].

AA2024 alaşımlarının tiksotropik yapı üretimi ile ilgili diğer bilimsel çalışmalar ön malzeme üretimi ile ilgilidir [Wang ve ark., 2008 , Guo ve Yang, 2007]. Bu çalışmalardan Guo ve Wang [Guo ve Yang, 2007] Al2024 alaşımını düşük sıcaklıktan dönen eğimli soğutma plakasına döküm yöntemi ile küresel ve ince mikroyapıya sahip tiksotropik ön malzeme elde ettiğini bildirmiştir. Wang

ve arkadaşları [Wang ve ark., 2008] da Şekil 4.2'de zaman-sıcaklık grafiğinde görüldüğü gibi iki aşamalı ısıtma yöntemi adını verdikleri yöntem ile izotermal bekletmeden daha iyi tiksotropik özellikli yapı elde edildiğini iddia etmektedirler [Mutlu, 2010].



Şekil 4.2. Isıtma süresi-fırın sıcaklığı eğrisi [Wang ve ark., 2008].

AA2024 alaşımında yarı-katı şekillendirme için gerekli olan ön malzeme üretiminde SIMA yöntemi ile ön malzeme üretimi çalışmalarında 40 mm çapındaki AA2024 kütükte ekstrüze halden homojen küresel yapı elde edememiştir. Soğuk deformasyon ve takiben yarı-katı bölgeye yeniden ısıtma işlemi, her bir deformasyon oranı için AA2024 numunelerin kenar, orta ve merkez bölgelerinde yaklaşık olarak eşit tane boyutu üretmiştir. SIMA yöntemi ile tiksotropik yapı üretimi için yarı-katı sıcaklıkta izotermal bekletmeye gerek olmadığı tespit edilmiştir. Artan soğuk deformasyon oranı ile ortalama tane boyutu azalmaktadır. % 10 soğuk deforme edilmiş malzemede oldukça kaba ve düşük küreselleşme oranına sahip tane yapısı görülürken %20, % 30 ve %40 soğuk deformasyon oranlarında ise tiksotropik şekillendirme için uygun küçük ve küresel tane yapısı elde edilmiştir. Artan soğuk deformasyon oranı ile şekil faktörü artmıştır. Deneylerde yarı-katı sıcaklık aralığı az olduğu için şekil faktörü üzerine belirgin bir etkisi tespit edilememiştir [Mutlu, 2010].

Akar ve Mutlu 2010 yılında AA2024 alaşımında gerinimin neden olduğu sıvı aktivasyonu (strain induced melt activated-SIMA) yöntemi ile yarı-katı şekillendirme için gerekli tiksotropik mikroyapı üretimi araştırılmıştır. Bu amaçla ekstrüze halde AA2024 alaşımı değişik oranlarda soğuk deformasyona tabi tutulmuş ve takiben yarı-katı bölgeye ısıtılarak oda sıcaklığına sahip suda soğutulmuştur. Mikroyapı analizleri metalografik inceleme ve nicel ölçüm yöntemleri ile yapılmıştır. Deneysel sonuçlar, SIMA yöntemiyle AA2024 alaşımında, yarı katı şekillendirme için gerekli olan küresel şekilli tiksotropik mikroyapıların üretilebileceğini göstermiştir. Artan soğuk deformasyon oranı ile şekil faktörü artarken tane boyutu azalmıştır. SIMA yöntemi ile tiksotropik yapı üretimi için en az %20 soğuk deformasyonun gerekli olduğu belirlenmiş ve tiksotropik yapı dönüşümü için yarı-katı sıcaklıkta izotermal bekletmeye gerek olmadığı tespit edilmiştir [Akar ve Mutlu, 2010].

Akar 2011 yılında bir dövme alüminyum alaşımı olan AA2024 alaşımında gerinimin neden olduğu sıvı aktivasyonu (strain induced melt activated-SIMA) yöntemi ile yarı-katı şekillendirme için gerekli tiksotropik mikroyapı üretimi araştırılmıştır. Bu amaçla ekstrüze halde AA2024 alaşımı %20 oranında soğuk deformasyona tabi tutulmuş ve takiben %30, %40 ve %50 sıvı oranına karşılık gelen yarı-katı sıcaklıklara ısıtılarak oda sıcaklığına sahip suda soğutulmuştur. Mikroyapı analizleri metalografik inceleme ve nicel ölçüm yöntemleri ile yapılmıştır. Deneysel sonuçlar, SIMA yöntemiyle AA2024 alaşımında, yarı katı şekillendirme için gerekli olan küresel şekilli tiksotropik mikroyapıların üretilebileceğini göstermiştir. Artan yarı-katı sıcaklıkla tane boyutu artarken şekil faktöründe belirgin bir değişim gözlenmemiştir. SIMA yöntemi ile tiksotropik yapı üretimi için yarı-katı sıcaklıklarda izotermal bekletmeye gerek olmadığı tespit edilmiştir [Akar, 2011].

## 5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

### 5.1. Malzeme

Bu çalışmada Çizelge 5.1’de kimyasal kompozisyonu verilen ekstrüze halde temin edilmiş AA2024 (ETİAL-24) alaşımı kullanılmıştır. Ekstrüze özelliklerine sahip malzeme piyasadan temin edilmiştir.

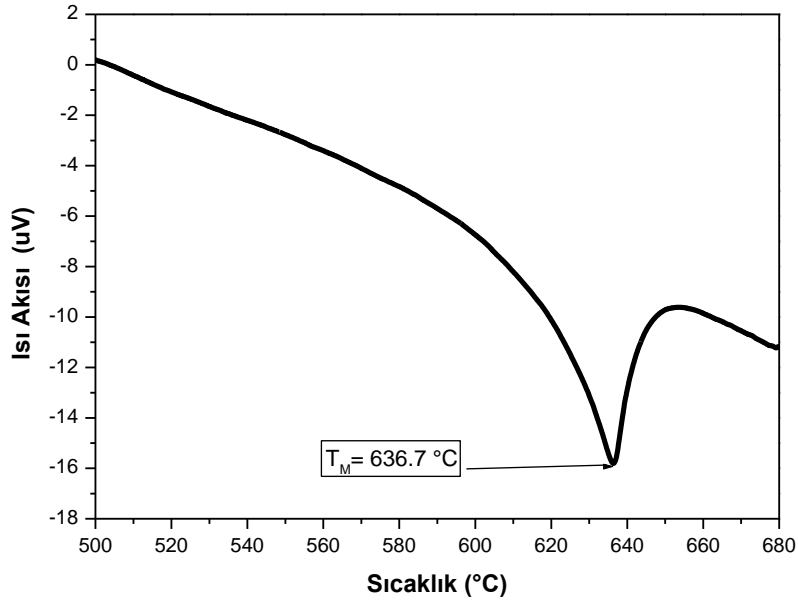
Çizelge 5.1. AA2024 alaşımının kimyasal kompozisyonu (Ağırlıkça %).

Cu	Mg	Mn	Fe	Zn	Si	Al
4.515	0.913	0.597	0.398	0.236	0.218	Kalan

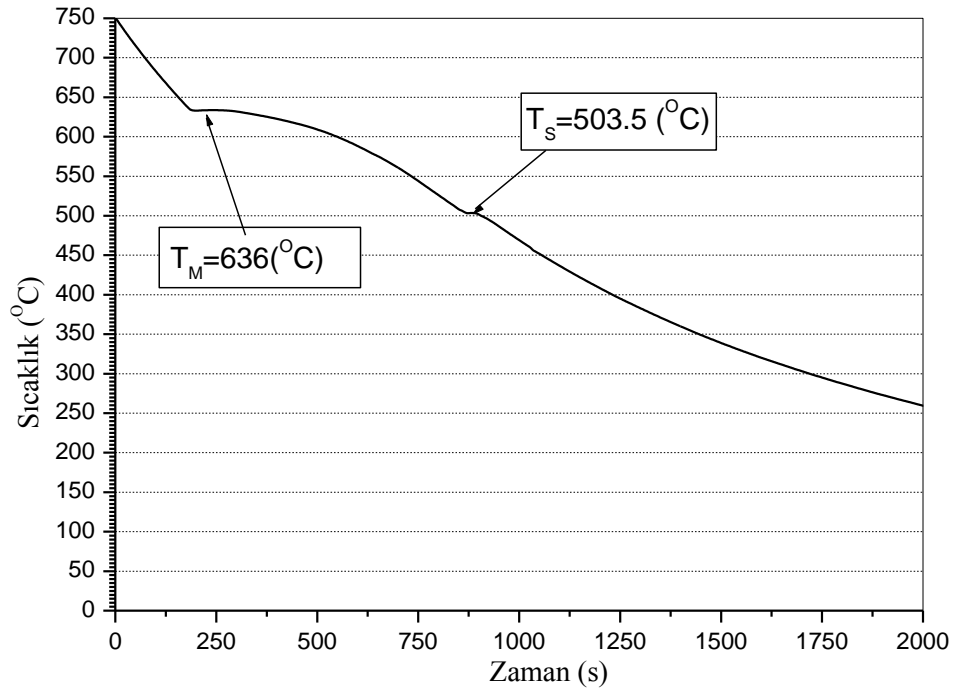
### 5.2. AA2024 Alaşımının Ergime ve Katılaşma Sıcaklıklarının Tespiti

AA2024 alaşımına ait DTA eğrisi Perkin-Elmer marka DTA cihazında elde edilmiştir. DTA eğrisi, asal gaz (Ar) atmosferinde 20 °C/dak ısıtma hızında oda sıcaklığından 750 °C sıcaklığa kadar ısıtılarak belirlenmiştir (Şekil 5.1).

AA2024 alaşımına ait soğuma eğrisi çıkarılmış ve soğuma eğrisinden alaşıma ait ergime ve katılaşma sıcaklıkları tespit edilmiştir (Şekil 5.2). Alaşımın soğuma eğrisi; 50 gr alüminyum alaşımı grafit pota içine yerleştirilmiş ve grafit pota içindeki alaşım indüksiyon bobininde 750 °C’ye kadar ısıtılmış, ergimiş metal potadan çıkartılmadan sıvı metal içine yerleştirilen K tipi 2 mm çapında mineral izoleli ısı çift Agilent marka 34970A model veri toplama sistemine bağlanmış (Resim 5.1), sıvı metal oda sıcaklığına kadar soğumaya bırakılmış ve metalin oda sıcaklığına soğuması sırasında ısı çiftten alınan sıcaklık verileri veri toplama sistemine 1 s zaman aralığında otomatik olarak kaydedilerek belirlenmiştir [Mutlu, 2010].



Şekil 5.1. AA 2024 alaşıminin DSC eğrisi [Mutlu, 2010].



Şekil 5.2. AA2024 alaşıminin soğuma eğrisi [Mutlu, 2010].



Resim 5.1. Dijital göstergeli veri toplama cihazı.

### 5.3. Soğuk Deformasyon İşlemi

Numunelere uygulanan deformasyon işlemi 250 ton kapasiteli hidrolik pres (Resim 5.2) ile 2 m/s ilerleme hızında ve oda sıcaklığında yapılmıştır. % deformasyon miktarı;

$$\% \varepsilon = [(l_0 - l) / l_0] \times 100 \quad (3.1)$$

eşitliği ile hesaplanmıştır. Bu formülde;  $l_0$  : Numunenin ilk boyu,  $l$ : Numunenin son boyu,  $\% \varepsilon$ : Numunenin yüzde deformasyon miktarı.

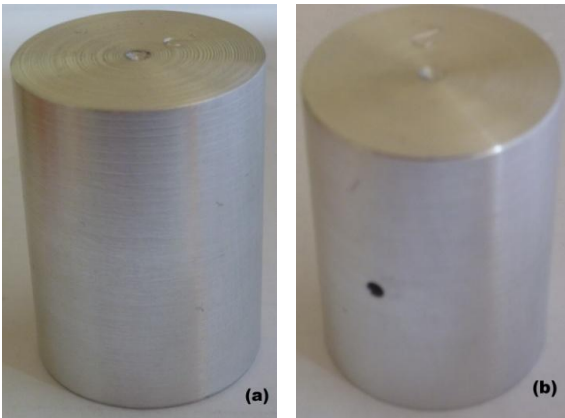
40 mm çapındaki ekstrüze AA2024 alaşımı 90 mm ve 103 mm boylarında kesilmiştir. Daha sonra kesilen biyetler hidrolik pres yardımı ile 72 mm boyuna düşürülmüştür. Sonuçta Eşitlik 3.1'e göre numunelere %20 ve %30 soğuk deformasyon uygulanmıştır (Resim 5.3). Soğuk deformasyon işlemini takiben yüzeyde oluşan kalıntı gerilimlerini ve yüzey pürüzlülüğünü gidermek için numuneler 40 mm çapına ve 55 mm boyuna işlenmiştir (Resim 5.4.a). Sıcaklık kontrolünü sağlamak için işlenmiş numunenin düşey konumda tam ortasından ve yüzeyden merkeze 3 mm çapında ısıl çiftlerin yerleştirileceği delikler açılmıştır (Resim 3.4b).



Resim 5.2. 250 ton kapasiteli hidrolik pres



Resim 5.3. a) %30 deformasyon öncesi, b) %30 deformasyon sonrası, c) %20 deformasyon öncesi, d) %20 deformasyon sonrası numunelerin görünümü.



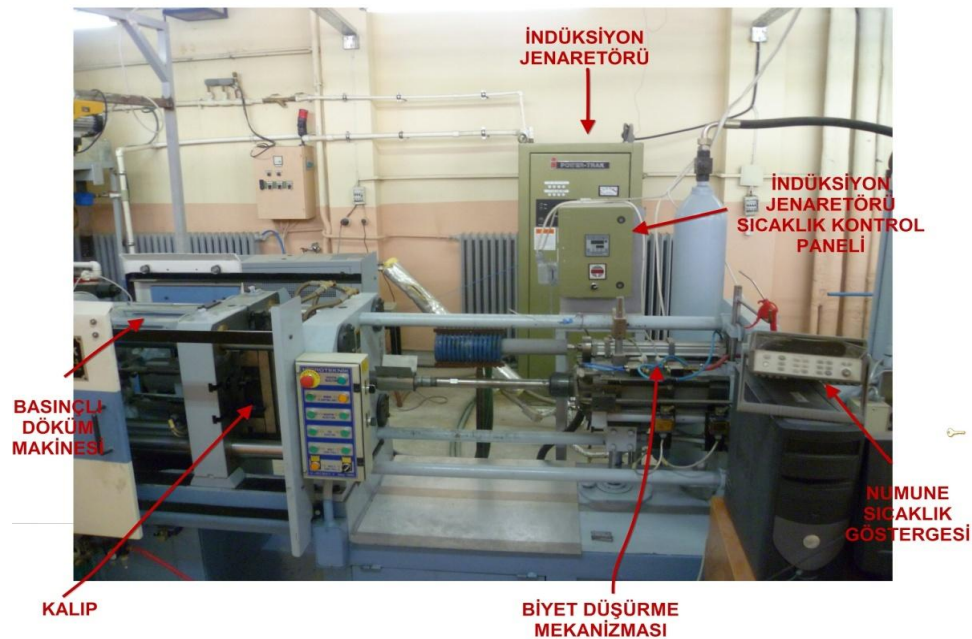
Resim 5.4. a) Soğuk deformasyondan sonra işlenmiş numune, b) Isıl çiftin yerleştirildiği deliği açılmış numune.

#### 5.4.Yarı-Katı Metal Şekillendirme Ünitesi

Yarı-katı metal şekillendirmek için SIMA yöntemindeki gibi numuneyi belirli bir sıcaklığa kadar ısıtıldıktan sonra şekil verilmiştir. Bu işlemler için Gazi Üniversitesi Teknik Eğitimi Fakültesi Metal Eğitimi Bölümünde bulunan yarı-katı şekillendirme ünitesi kullanılmıştır (Resim 5.5).

Bu ünite iki bölümden oluşmuştur. Birinci bölüm basınçlı döküm makinesi, ikinci bölüm indüksiyon ısıtma ünitesidir. Bunlara ilave olarak kalıp ısıtma ünitesi ve ısıtılan numuneyi düşürme mekanizması da bulunmaktadır.

Numuneyi iki fazlı bölgeye kadar ısıtma işlemi Inductotherm 35 kw ve 9.6 kHz orta frekanslı Power Vip Dual Track Modelli indüksiyon jeneratörü ile yapılmıştır (Resim 5.6). İndüksiyon ünitesi; indüksiyon jeneratörü, ergitme potası ve ısıtma bobininden oluşmaktadır. İndüksiyon ünitesi soğutmak için kapalı su devre ile soğutulmuştur.



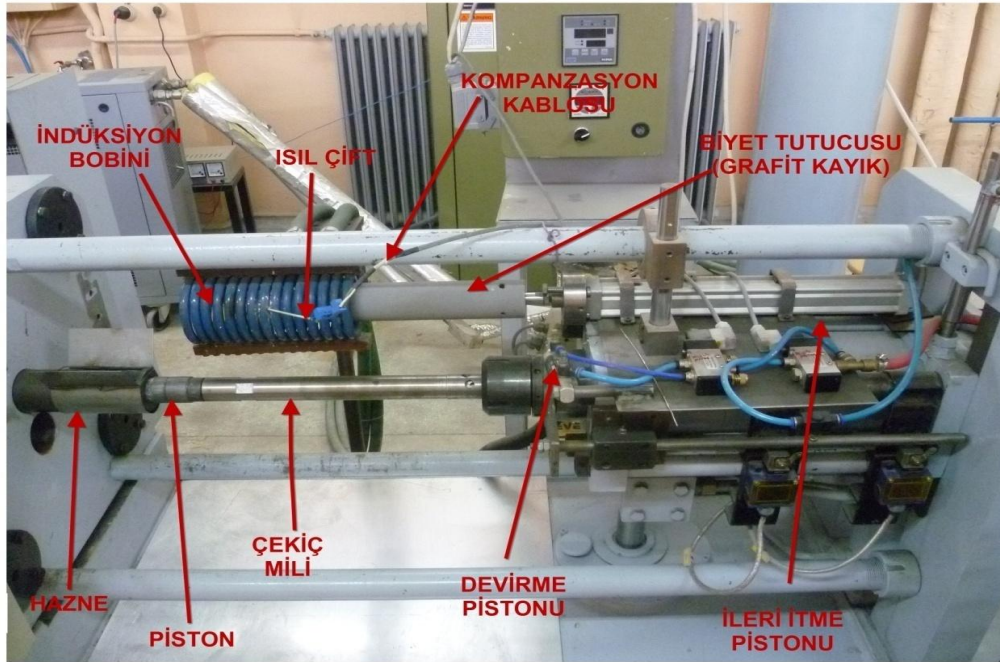
Resim 5.5. Yarı-katı şekillendirme ünitesinin görünümü.



Resim 5.6. İndüksiyon ünitesi jeneratörü.

150 ton mengene kapatma ve 20 ton enjeksiyon basma kuvvetine sahip basınçlı döküm makinesi yarı-katı şekillendirme için kullanılmıştır. Basma hızı 0,1-2,34 m/s arasında değişen hızlarda PLC ile kontrol edilmiştir.

Numune indüksiyon bobini içerisinde 6-6,5 dak. ısıtıldıktan sonra pres basma haznesine düşürmek pnomatik sistem yardımı ile dürülmüştür (Resim 5.7).



Resim 5.7. Numune düşürme mekanizması (Numune bobin içerisindedir).

Kalıbı ısıtmak için Tool-Temp marka TT288 model 8kw kalıp şartlandırıcı kullanılmıştır. Kalıp, 200°C sıcaklığa sahip yağ ile 150°C sıcaklığa homojen olarak ısıtılabilmiştir (Resim 5.8).



Resim 5.8. Kalıp ısıtıcısı (şartlandırıcı); a)ön panel, b)kalıp şartlandırıcı yağ giriş çıkış hortumları, c)kalıba yağ giriş hortumları, d)kalıptan yağ çıkış hortumları.

### 5.5.Yarı-Katı Şekillendirme için Mikroyapının Belirlenmesi

Yarı-katı şekillendirme için mikroyapı belirlenmesinde %20 ve %30 soğuk deformasyon uygulanan AA2024 alaşım numuneleri (Resim 5.4.b). İndüksiyon bobini içerisine yerleştirilerek (Resim 5.9). Yarı-katı sıcaklık (608 °C, 616 °C ve 619 °C) bölgesine kadar ısıtılmış ve bekleme yapmadan

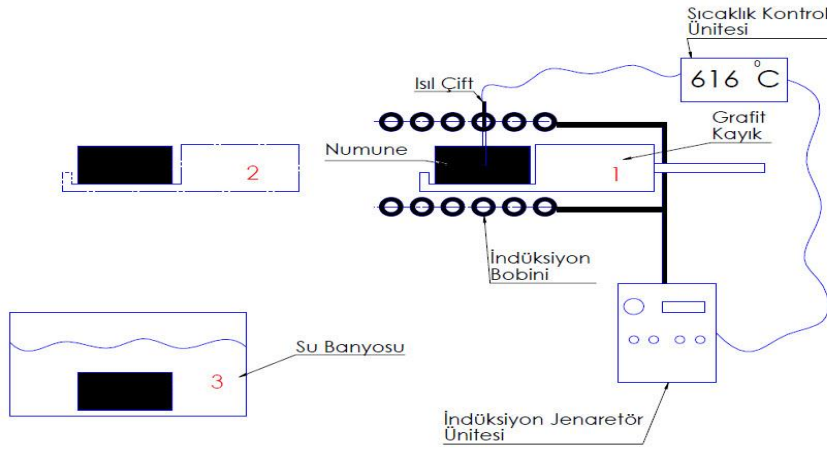
pnomatik piston yardımı ile indüksiyon bobini içerisinde oda sıcaklığındaki su banyosuna düşürülmüştür (Şekil 5.3). Suda soğutulmuş numunelerin görünümü Resim 5.10'da verilmiştir.



Resim 5.9. Numunenin ve ısı çiftinin indüksiyon bobini içerisindeki görünümü.



Resim 5.10. Suda soğutulmuş numunelerin görünümü.



Şekil 5.3. Mikroyapı numunelerinin hazırlanmasında kullanılan düzeneğin şematik görünümü.

### 5.6. Yarı-Katı Metal Şekillendirme Deneyi

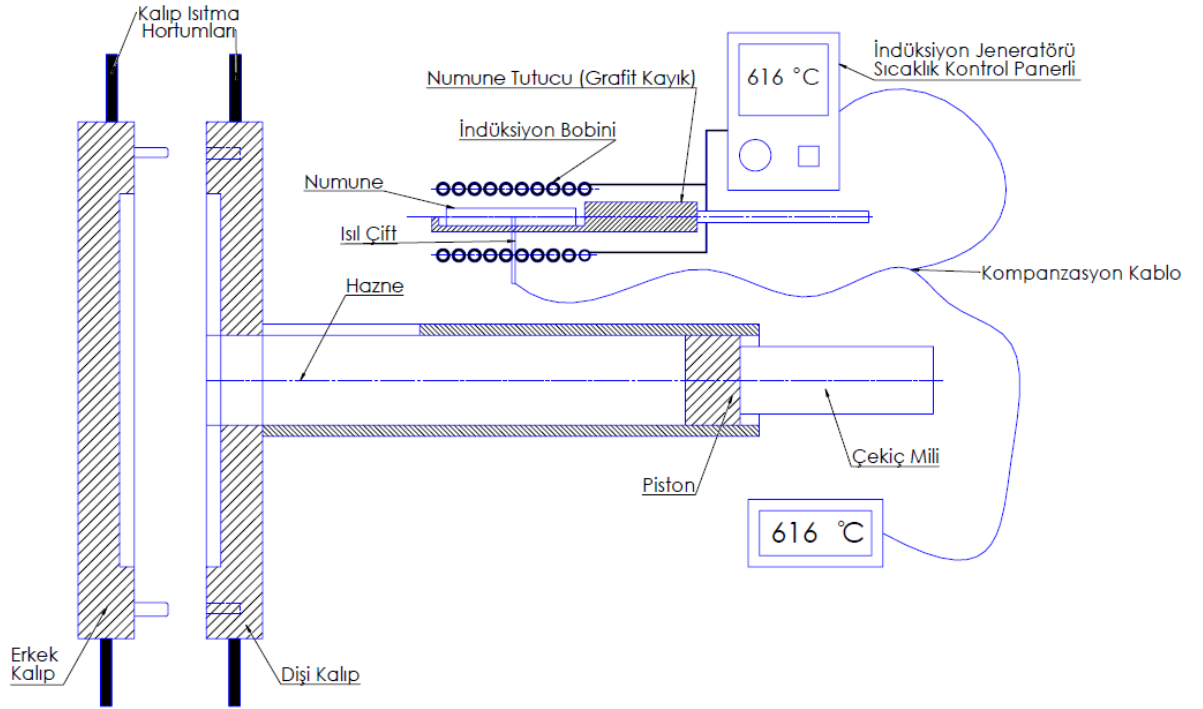
Yarı-katı metal şekillendirme ünitesinde yapılan deneylerde (Şekil 5.4). %20 ve %30 deformasyon uygulandıktan sonra 40 mm çap ve 55 mm uzunluk boyutlarına işlenmiş numuneler kullanılmıştır. Numuneler farklı sıcaklıklara kadar ısıtıldıktan sonra sabit hızda ve basınçta kalıba enjekte edilerek şekil verilmiştir (Şekil 5.5). Şekillendirme parametreleri Çizelge 5.2’de verilmiştir.

40 mm çap ve 55 mm boyundaki numune  $69 \text{ cm}^3$  hacime sahiptir. Şekil 5.5’de verilen  $64.3 \text{ cm}^3$  hacime sahip parçanın yarı-katı şekillendirme ile üretilmesi hedeflenmiştir. Numune bu şekli rahatlıkla oluşturabilecek hacime sahiptir.

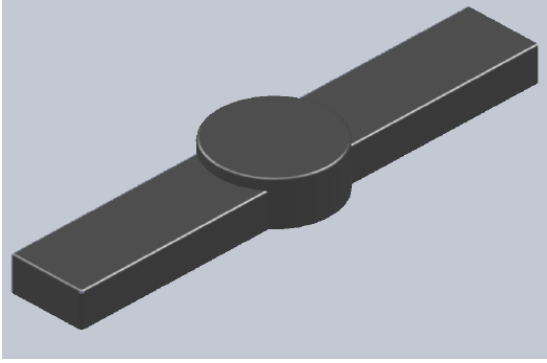
Deneyde sıcaklık kontrolü için dış çapı 3 mm olan seramik kılıflı K tipi (NiCr-Ni) ısı çifti kullanılmıştır. Isıl çift uç kısmı merkeze temas etmesi dikkate alınarak numune üzerinde açılan deliğe yerleştirilmiştir (Resim 5.9). Numunenin yarı-katı sıcaklığa ısıtma işleminde sıcaklık kontrolü dijital sıcaklık göstergesinden sürekli olarak takip edilmiştir (Resim 5.1).

Çizelge 5.2. Numunelere uygulanan parametreler.

Numune basma sıcaklıkları	608°C	616°C	619°C
% Sıvı oranları	%50	%60	%65
Yarı-katı sıcaklığa ısıtma süresi	6-6,5 dak		
Yarı-katı sıcaklıkta bekleme süresi	Bekletme yok.		
Kalıp sıcaklığı	150°C (sabit)		
Kalıp malzemesi	H13 sıcak iş takım çeliği		
Basma hızı	2,37 m/s		
Enjeksiyon kuvveti	20 ton		
Enjeksiyon basıncı	50 MPa		
Mengene çene kitleme gücü	150 ton		

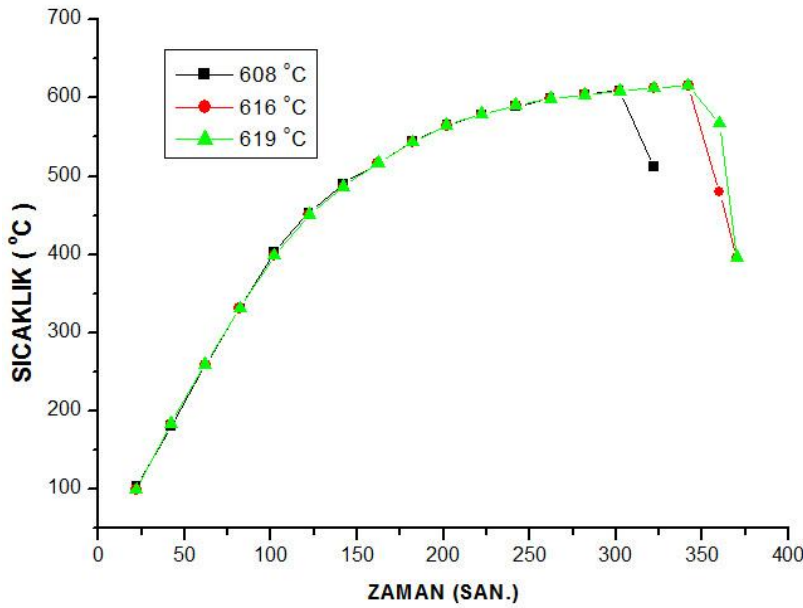


Şekil 5.4. Yarı-katı şekillendirme düzeneğinin şematik görünümü.



Şekil 5.5 Yarı-Katı şekillendirme için tasarlanmış parça.

Yarı-katı sıcaklığa ısıtılmış numunenin geometrik şeklinin bozulmaması ve aşırı derecede tane büyümesini önlemek için indüksiyon jeneratörünü 300 °C'ye kadar %30 güçte, 300°C'den sonra %20 güçte ısıtılmıştır (Şekil 5.6). Pres de şekillendirilen numune kalıp iticileri vasıtası ile kalıptan çıkartılarak oda sıcaklığına kadar havada soğumaya bırakılmıştır. Çizelge 5.2'de verilen numunelere uygulanan parametrelerde %20 ve %30 soğuk deformasyon edilen numuneler yarı-katı şekillendirildikten sonra kodlama sistemi Çizelge 5.3'de verilmiştir.



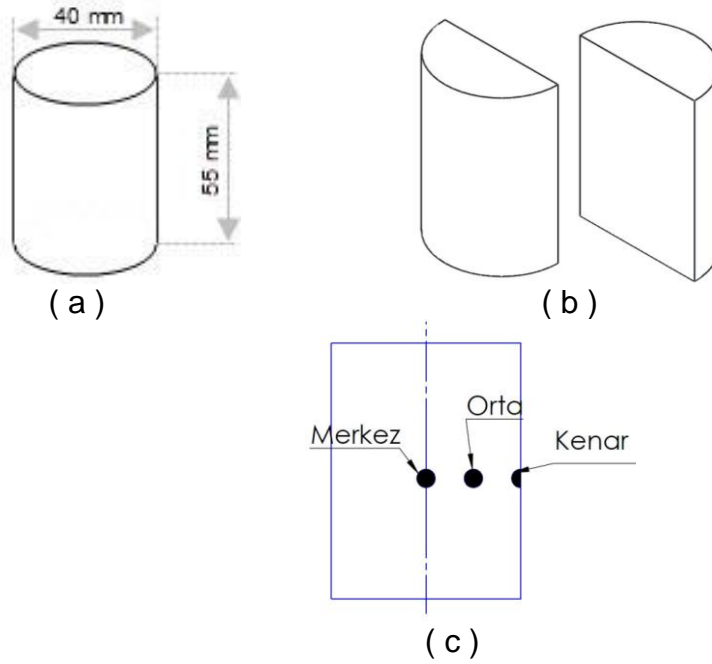
Şekil 5.6. İndüksiyon bobini ile 608 °C, 616 °C ve 619 °C'ye ısıtmada elde edilen zaman-sıcaklık grafiği.

### 5.7. Metalografik Çalışmalar

Metalografik mikroyapı inceleme çalışmaları optik mikroskop ile yapılmıştır. Numuneleri (Şekil 5.7 a) boyuna dikey olarak (Şekil 5.7 b) abrasif kesme cihazı ile kesilmiştir. Kesilen numuneler 240, 400, 600, 800 ve 1200 grit su zımparaları ile zımparalandıktan sonra 6 µm ve 3 µm elmas pasta süspansiyonları kullanılarak parlatılmıştır. Son parlatma 0,5 µm kolloidal silika ile yapılmıştır. Dağlayıcı olarak keller (190ml H<sub>2</sub>O + 5ml HNO<sub>3</sub> + 3ml HCl + 2ml HF) çözeltisi kullanılmıştır.

Çizelge 5.3. Tikso-döküm şekillendirmede numunelere verilen kodlamalar.

Yarı-katı (°C)	Sıcaklığı (°C)	Soğuk deformasyon	Piston hızı (m/s)	Numune kodu
608 °C (Sıvı Oranı :%50)	%20	2,37	608-20-1	
			608-20-2	
			608-20-3	
			608-20-4	
616 °C (Sıvı Oranı :%60)	%20	2,37	616-20-1	
			616-20-2	
			616-20-3	
			616-20-4	
619 °C (Sıvı Oranı: %65)	%20	2,37	619-20-1	
			619-20-2	
			619-20-3	
			619-20-4	
608 °C (Sıvı Oranı: %50)	%30	2,37	608-30-1	
			608-30-2	
			608-30-3	
			608-30-4	
616 °C (Sıvı Oranı: %60)	%30	2,37	616-30-1	
			616-30-2	
			616-30-3	
			616-30-4	
619 °C (Sıvı Oranı: %65)	%30	2,37	619-30-1	
			619-30-2	
			619-30-3	
			619-30-4	



Şekil 5.7. Ön malzeme olarak kullanılan numunelerin metalografik incelenmesi; a) numune, b) numunenin boydan boy kesilmiş hali ve c) incelenen bölgeler.

Mikroyapıların karakteristik incelenmesi kenar-orta ve merkez (Şekil 5.7.c) olmak üzere üç ayrı bölgeden yapılmıştır. Mikroyapıların görüntülenmesinde Leica DFC 320 dijital kamera bağlantılı Leica DM 4000M marka optik mikroskop (Resim 5.11) kullanılmıştır.



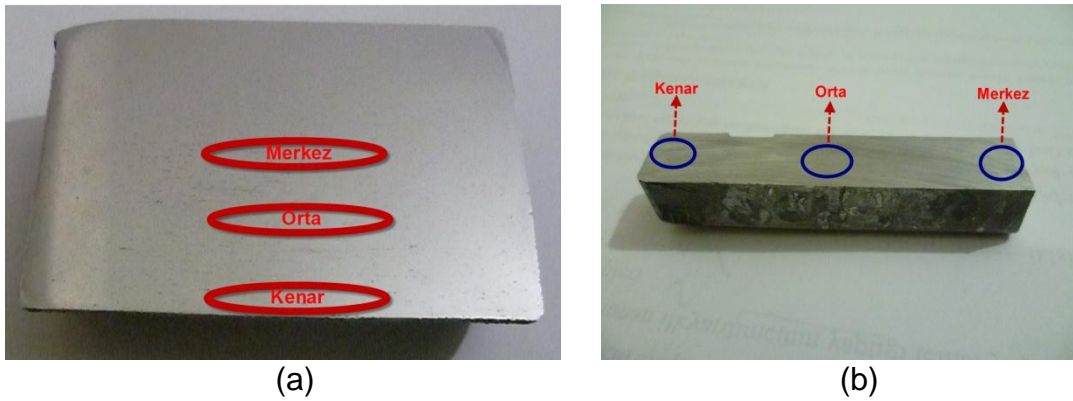
Resim 5.11. Leica DFC 320 dijital kamera bağlantılı Leica DM 4000M marka optik mikroskop.

Mikroyapılardaki tane boyutu ölçümlerinde Leica Q550 MW görüntü analiz yazılımı kullanılmış olup çizgisel kesişme yöntemi ile ölçümler gerçekleştirilmiştir. Mikroyapıdaki küresellik derecesinin değerlendirilmesi için Eşitlik 3.2'de verilen şekil faktörü formülü kullanılmıştır.

$$\text{Şekil faktörü} = (4\pi A)/P^3 \quad (3.2)$$

A: Ölçüm yapılan tanenin alanı, P: Tanenin çevre uzunluğu.

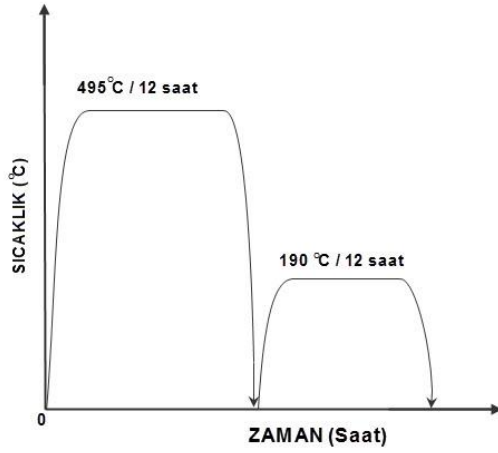
Şekil faktörü değerinin 1 olması tanenin tamamen küresel olduğunu gösterir. Yapılan ölçümler; Şekil 5.6 c ve Resim 3.12'de gösterilen kenar, orta ve merkez bölgelerinde  $9\text{mm}^2$ 'ye ( $3 \times 3\text{mm}$ ) karşılık gelen alanlarda incelemeler yapılmıştır.



Resim 5.12. Mikroyapı inceleme bölgelerinin görünümü. a) suda soğutulmuş numune, b) Tikso-dökümle üretilen numune.

### 5.8. T6- Isıl İşlemi

Tikso-döküm ile şekillendirilmiş numunelere daha iyi özellik kazandırmak için T6 yaşlandırma ısıl işlemi uygulanmıştır. T6 yaşlandırma ısıl işlemi numuneler  $495^{\circ}\text{C}$  sıcaklıkta 12 saat süre ile fırın ortamında bekletildikten sonra oda sıcaklığındaki suda soğutulmuştur. Suda soğuyan numune tekrar  $190^{\circ}\text{C}$  sıcaklıkta 12 saat süre ile fırın ortamında yaşlandırma ısıl işlemine tabi tutulmuştur. Uygulanan ısıl işlemin sıcaklık-zaman grafiği Şekil 3.8'de verilmiştir.



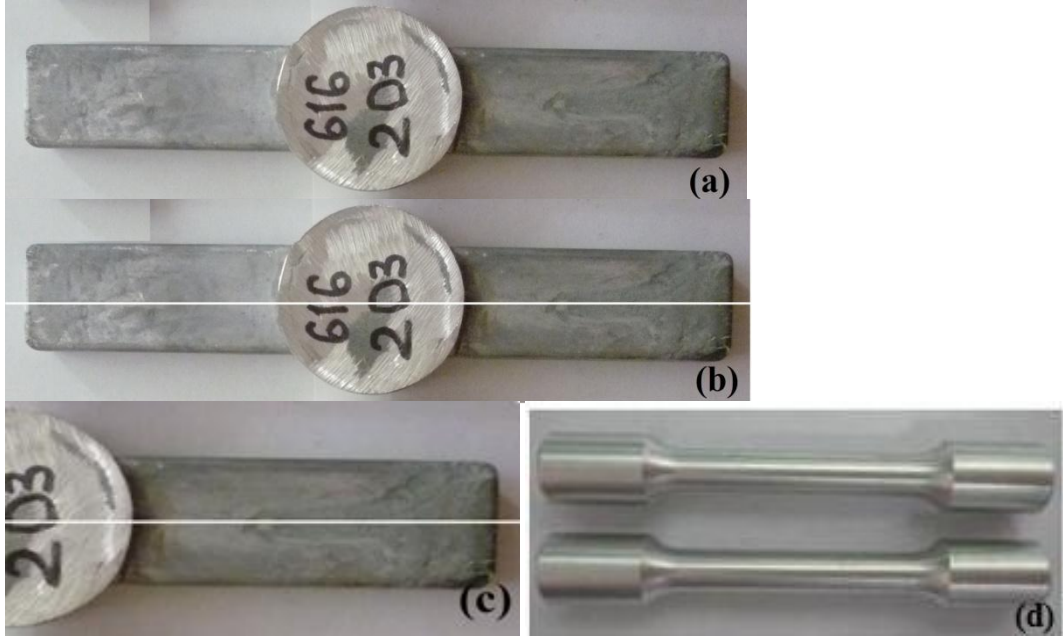
Şekil 5.8. Tikso-dökümle üretilmiş numunelere uygulanan T6 yaşlandırma ısı işleminin sıcaklık-zaman grafiği.

### 5.9. Çekme Testleri

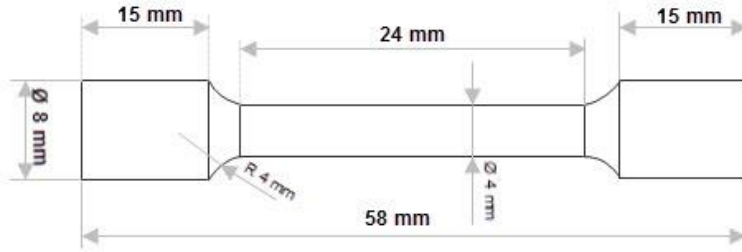
Yarı-katı şekillendirilmiş numunelerin mekanik özelliklerini belirlemek için çekme testi yapılmıştır. Çekme testleri Instron 3369 model 50 kN çekme ve basma kapasitesine sahip üniversal test cihazında oda sıcaklığında yapılmıştır (Resim 5.13). Çekme çubuğu numune hazırlanmasında yarı-katı şekillendirilmiş numuneler (Resim 5.14.a) önce boyuna kesilerek iki eşit parçaya ayrılmış (Resim 5.14.b) daha sonra birbir parça enine kesilerek toplam 4 eşit parçaya ayrılmıştır (Resim 5.14.c). Şekil 5.8'de verilen ölçülere göre çekme çubuğu şekline işlenmiştir (Resim 5.14 d).



Resim 5.13. Instron 3369 model 50kN çekme ve basma kapasitesine sahip üniversal test cihazı.



Resim 5.14. a) Yarı-katı şekillendirilmiş numune, b) numune boyuna kesilmiş hali, c) enine kesilerek 4'e ayrılmış görünümü, d) işlenmiş çekme çubuk görünümü.

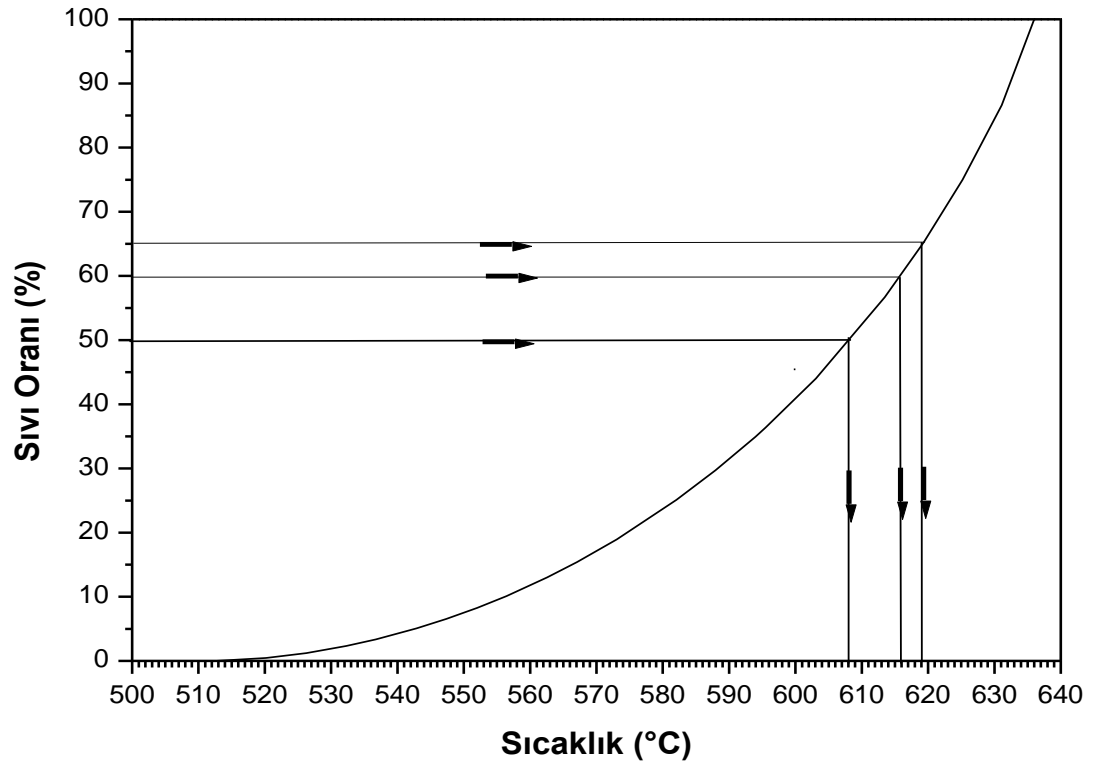


Şekil 5.9 Çekme çubuğunun ASTME 8M standardına göre ölçüsü.

## 6. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR

### 6.1. Yarı-Katı Sıcaklığında % Sıvı Oranının Tespit Edilmesi

Sıvı oranı tespit etmek için yarı-katı sıcaklık aralığında sıcaklık değerine karşılık gelen sıcaklık-sıvı oranı grafiği Şekil 6.1’de verilmiştir. Şekil 6.1’deki sıvı oranı-sıcaklık eğrisi yardımı ile %50, %60 ve %65 sıvı oranına karşılık gelen sıcaklık değerleri sırasıyla 608 °C, 616 °C ve 619 °C olarak belirlenmiştir.



Şekil 6.1. AA2024 alaşımının DTA ısıtma eğrisinden elde edilen sıcaklık-sıvı oranı

Sıvı oranını tespit edilmesinde DTA eğrisinden yararlanılarak “kısmi alan” yöntemi kullanılmıştır [Tzimans ve Zavaliangos, 2000]. Bu yöntemde DTA eğrisindeki pik sıcaklığa ( $T_L$ ) kadar olan alanın toplamı, toplam sıvı oranına karşılık geldiği kabul edilmiştir (Şekil 3.1). Buna göre istenilen bir sıcaklığa

( $T$ ) karşılık gelen sıvı oranı ( $f_L$ ), o sıcaklığın altında kalan alanın  $A(T_i)$ , toplam alana  $A(T)$  bölünmesiyle bulunmuştur (Eş.4.1). Buna göre,

$$f_L(T) = \frac{A(T_i)}{A(T)} \quad (6.1)$$

Eşitliği yardımı ile istenilen sıcaklığa ( $T$ ) ait sıvı oranı belirlenmiştir [Kılıçlı, 2010]. Eşitlik 6.1 yardımı ile DTA verilerinden alan hesabı kullanılarak elde edilen yarı-katı aralığındaki sıcaklıkların karşılık geldiği sıvı oranı eğrisi Şekil 6.1'de verilmiştir [Kılıçlı, 2010]

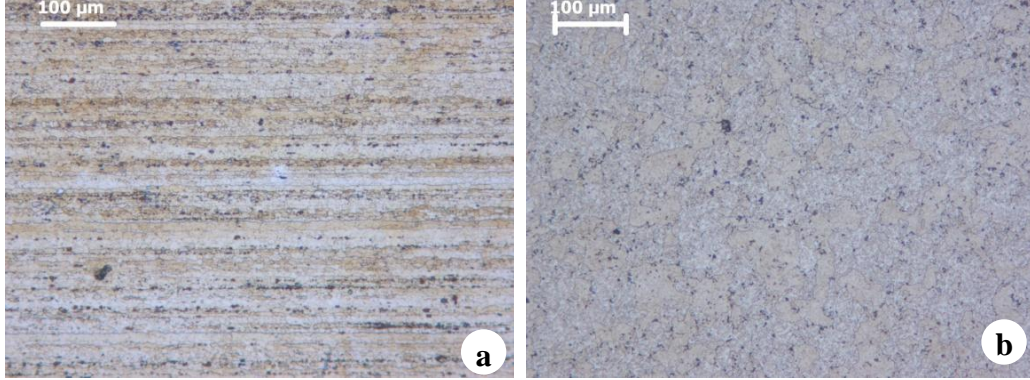
AA2024 alaşımı için Scheil eşitliğini kullanarak Wang ve arkadaşları %51.5 sıvı için 620°C [Wang ve ark., 2008], Siron ve arkadaşları %50 sıvı için 630°C [Siron ve ark., 2006] ve Jung ve Kang [Jung ve Kang, 2000] %50 için 620°C olarak bildirmişlerdir. Elde edilen %50 sıvı oranına karşılık gelen sıcaklık diğer araştırmacıların elde ettiği sonuçlar ile karşılaştırıldığında oldukça düşüktür. Scheil eşitliği ikili alaşımlar için sıvı-katı oranı hesaplaması için doğru sonuçlar verebilir, fakat AA2024 alaşımının kompozisyonunda Cu elementinden başka yüksek sayılabilecek oranda (%0.2'den fazla) Mg, Mn, Si ve Fe gibi alaşım elementleri de bulunmaktadır (Çizelge 5.1).

Alaşıma giren her element faz diyagramındaki faz oranlarını ve faz dönüşüm sıcaklıklarını değiştirdiğinden dolayı AA2024 alaşımı için Scheil eşitliği ile doğru katı-sıvı oranı tespiti oldukça zordur. Liu ve arkadaşları [Liu ve ark., 2005] Al2014 alaşımı için DSC eğrisi, Scheil eşitliği ve faz denge kuralı yardımıyla sıvı oranına karşılık gelen sıcaklıkları karşılaştırmışlar ve birbirinden oldukça farklı sonuçlar elde etmişlerdir.

## 6.2. SIMA İşlemi Sonrası Ön Malzemelerin Mikroyapıları

SIMA işleminden önceki yani ekstrüze haldeki AA2024 alaşımın mikroyapı Resmi 6.1 verilmiştir. Ekstrüze edilmiş halde malzemedeki tanelerin ekstrüze yönüne paralel, metallerarası bileşiklerin ekstrüze yönünde yönlendiği ve

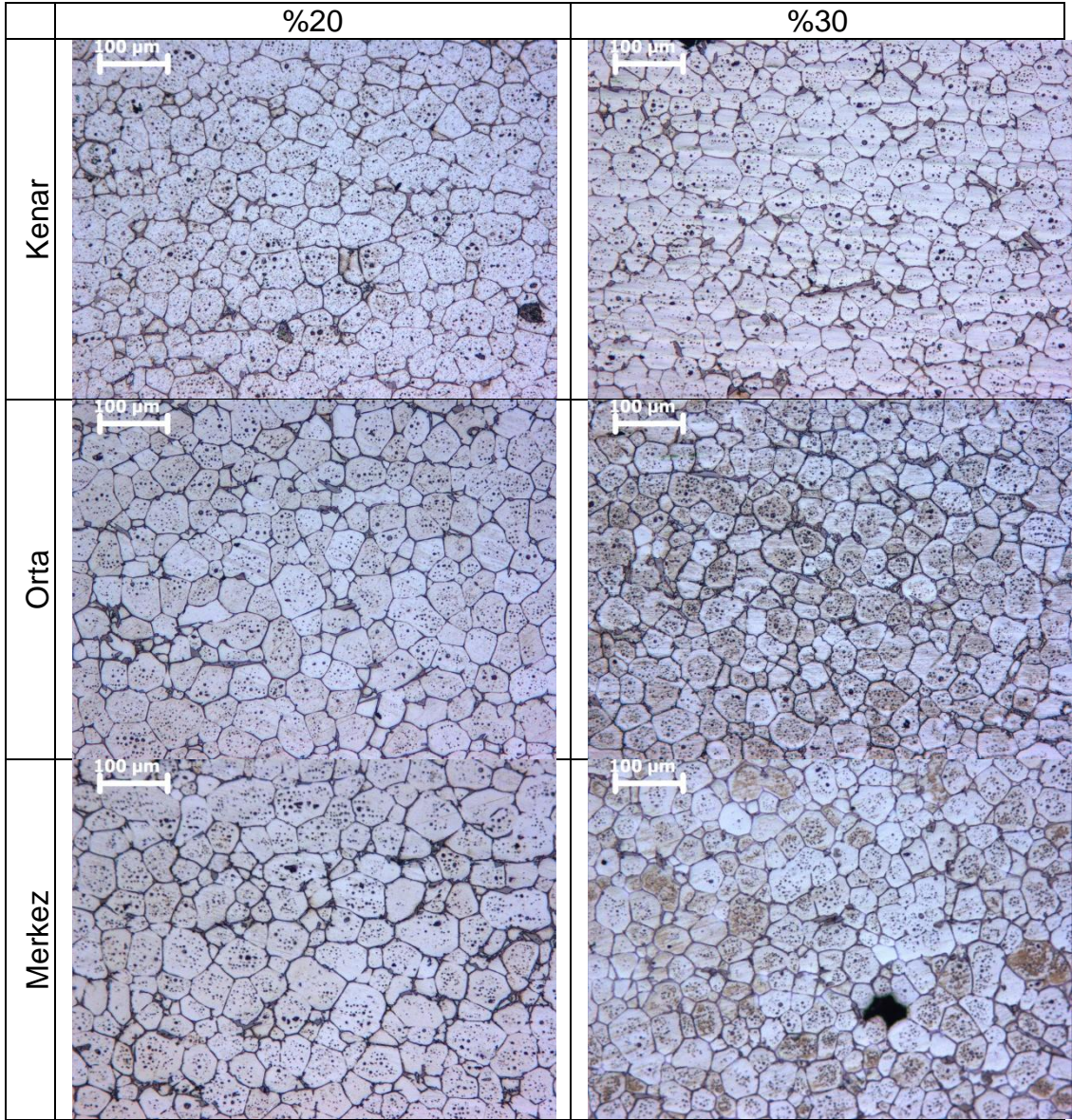
uzadığı gözlenmiştir (Resim 6.1.a). Ekstrüze yönüne dik konumda ise homojen olarak dağıldıkları tespit edilmiştir (Resim 6.1.b) [Mutlu, 2010].



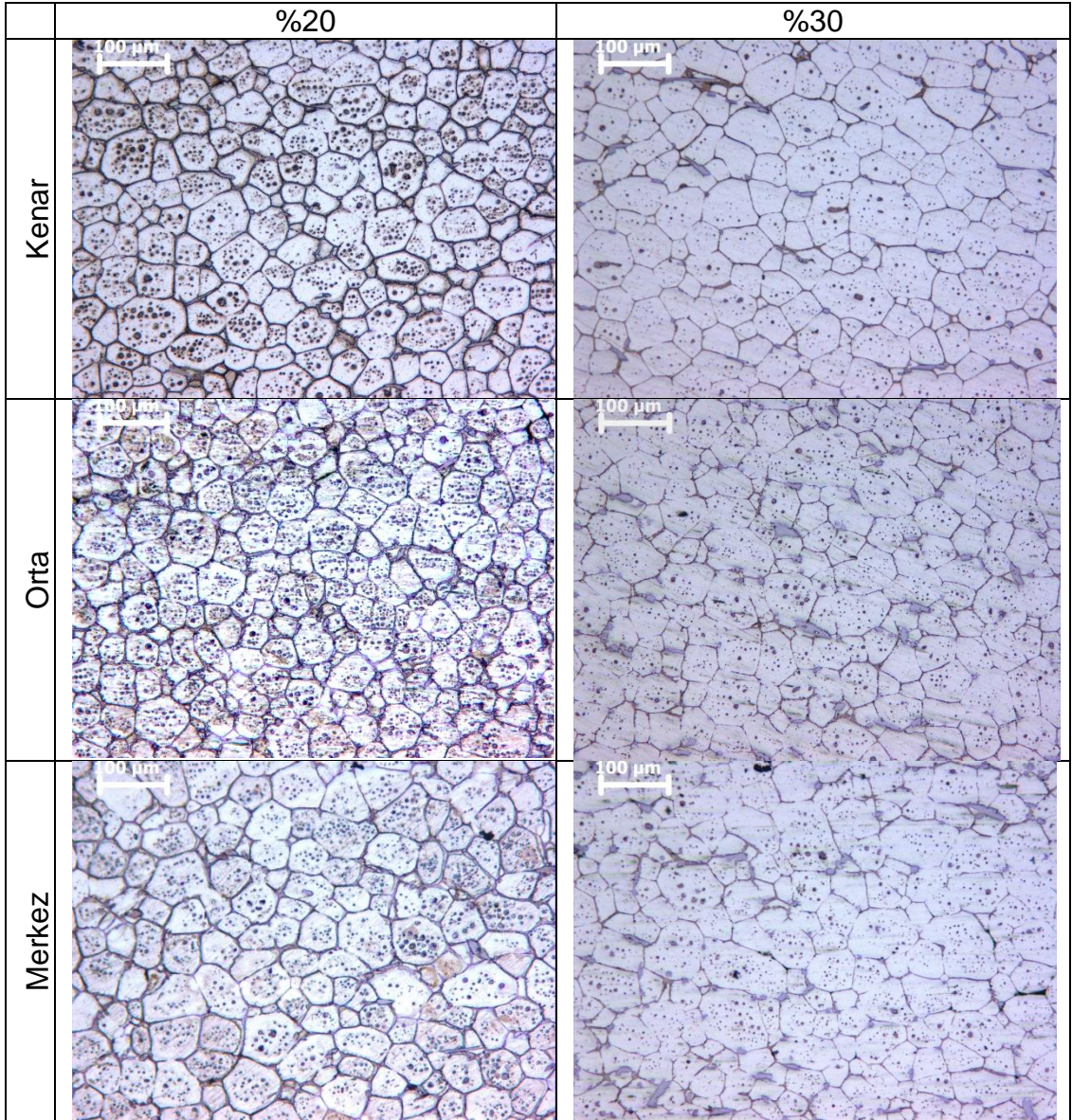
Resim 6.1 Ekstrüze haldeki AA2024 alaşımının mikroyapı resmi [Mutlu, 2010].

%20 ve %30 soğuk deformasyon uygulanmış numuneler sırasıyla 608 °C, 616 °C ve 619 °C'ye kadar ön ısıtma işlemini takiben yarı-katı sıcaklıktan hızla oda sıcaklığındaki suda soğutulmuştur. Suda soğutma sonrası mikroyapıdaki değişimler Resim 6.2, Resim 6.3 ve Resim 6.4'de verilmiştir.

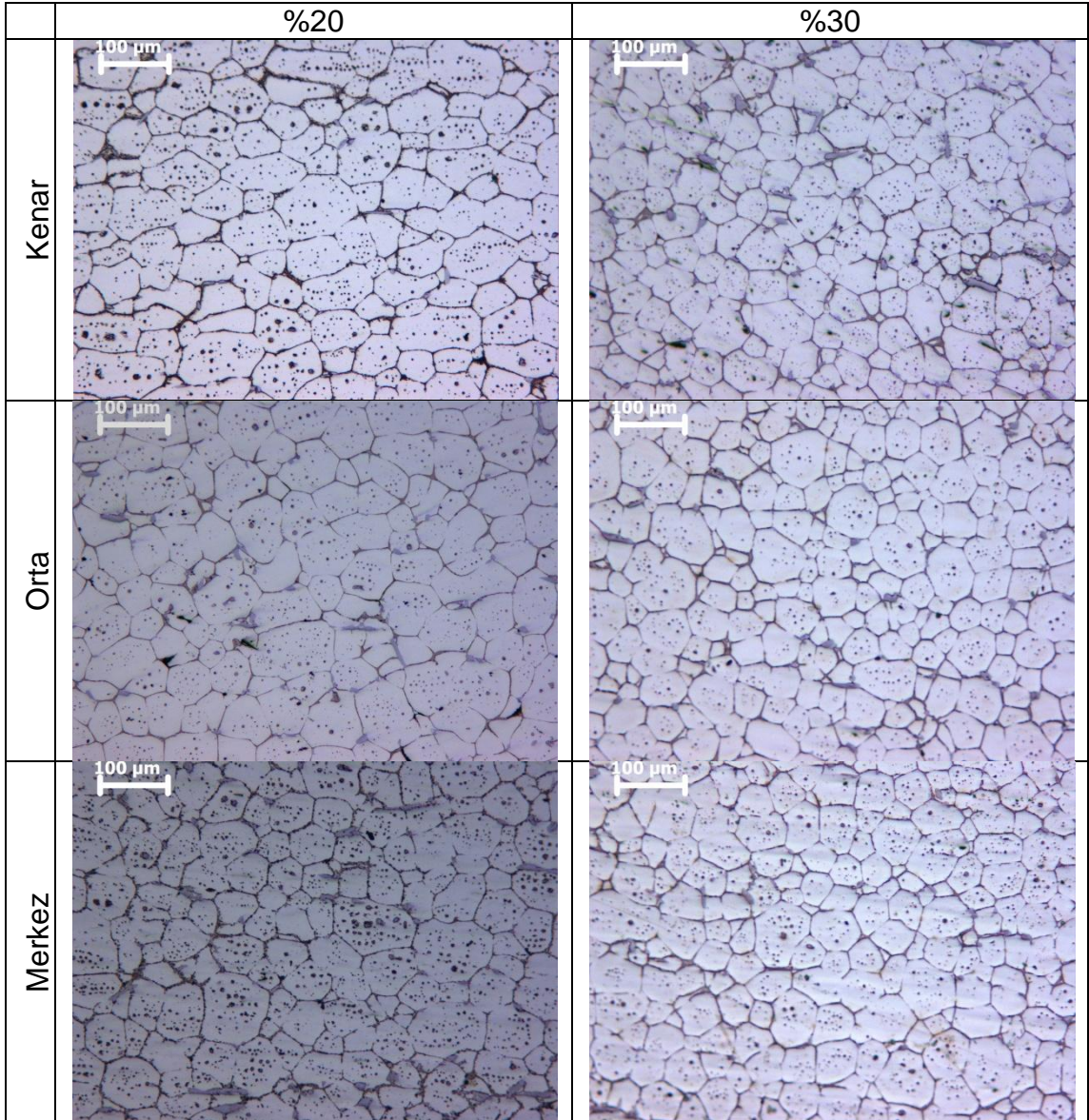
%20 ve %30 soğuk deformasyon oranı ile farklı sıcaklıklardan soğutulan numunelerin farklı bölgelerinden incelenen mikroyapıların tamamında yarı-katı şekillendirmeye uygun küremsi yapı olduğu tespit edilmiştir (Resim 6.2- Resim 6.4). Deneysel çalışmalarda numunelerin kenar, orta ve merkez bölgelerinden yapılan mikroyapı incelemelerinde numunenin her bölgesinde tane boyutlarının ve tane şekillerinin birbirlerine yakın olarak üretildiğini göstermiştir (Çizelge 6.1). Bu sonuçlar soğuk deformasyonun ve ısıtmanın homojen olduğunu göstermektedir. Literatürde araştırmasında benzer sonuçların elde edildiği gözlenmiştir [Mutlu, 2010, Akar, 2011].



Resim 6.2. %20 ve %30 soğuk deformasyon uygulanmış AA2024 alaşımının 608 °C'den hızla suda soğutma işlemi sonucu oluşan mikroyapı değişimi.



Resim 6.3. %20 ve %30 soğuk deformasyon uygulanmış AA2024 alaşımının 616 °C'den hızla suda soğutma işlemi sonucu mikroyapı değişimi.



Resim 6.4. %20 ve %30 soğuk deformasyon uygulanmış AA2024 alaşımının 619 °C'den hızla suda soğutma işlemi sonucu mikroyapı değişimi.

Şekil 6.2'de yarı-katı sıcaklığa bağlı olarak tane boyutunun değişimi gösterilmiştir. Şekilden görülebileceği üzere sıcaklığın artması ile tane boyutunun arttığı tespit edilmiştir . Sıcaklığın 608°C'den 619°C'ye çıkması ile her iki soğuk deformasyon oranında da yaklaşık olarak tane boyutu artışı 10 μm kadar olmuştur. Sıcaklık artışı ile beraber tane irileşmesi çok fazla olmadığı için mikroyapı resimlerinde belirgin bir fark görülmemektedir (Resim 6.2-Resim 6.4). Bu sonuçlar literatürle paralellik göstermektedir [Fan,2002,

Kılıçlı, 2010, Mutlu, 2010, Akar, 2011]. Bekletme zamanı katı oranının azalmasına yetecek kadar uzun olduğu zaman Ostwald (ripening) mekanizması da yapısal kabalaşmada etkili olmaya başlamaktadır [Fan, 2002, Zhang ve ark., 2009]. Fakat bu çalışmada yarı-katı sıcaklıkta bekletme yapılmadığı için Ostwald (ripening) mekanizması çok fazla etkili olmamıştır. Dolayısı ile yarı-katı sıcaklık artışıyla çok az miktarda tane büyümesi görülmüştür.

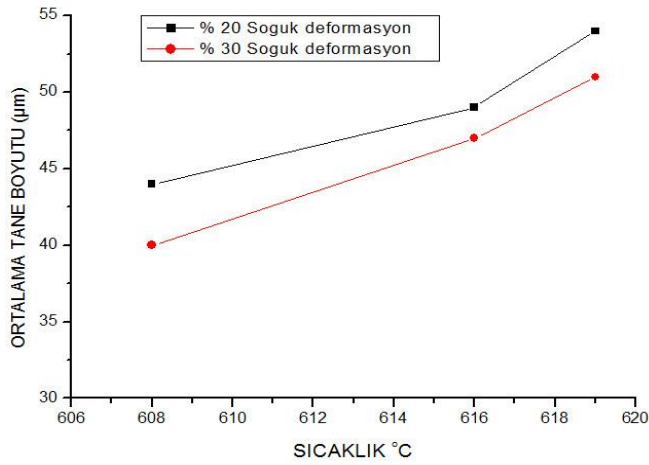
Çizelge 6.1. Soğuk deformasyon oranı ile tane boyutu ve şekil faktörü değişimi.

Deformasyon oranı (%)		% 20			% 30		
Sıcaklık (°C)		608 °C	616 °C	619 °C	608 °C	616 °C	619 °C
Tane Boyutu (µm)	Kenar	42,00	49,94	56,43	42,89	45,80	52,86
	Orta	44,54	43,97	53,77	40,00	47,49	50,21
	Merkez	45,20	51,97	51,37	38,26	47,03	49,82
	<b>Ortalama</b>	<b>43,91</b>	<b>48,63</b>	<b>53,86</b>	<b>40,38</b>	<b>46,77</b>	<b>50,96</b>
Şekil Faktörü	Kenar	0,730	0,738	0,712	0,742	0,742	0,761
	Orta	0,702	0,753	0,727	0,726	0,753	0,773
	Merkez	0,692	0,690	0,760	0,714	0,747	0,779
	<b>Ortalama</b>	<b>0,709</b>	<b>0,727</b>	<b>0,733</b>	<b>0,727</b>	<b>0,747</b>	<b>0,771</b>

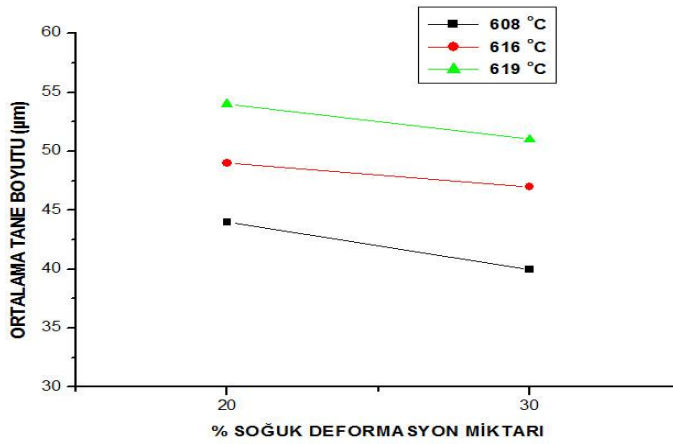
Tikso-şekillendirme için ortalama tane boyutunun 100 µm ve altında olması homojen akış ve yarı-katı durumda metalin kalıp boşluğunu doldurması için gereklidir [Jung ve Kang, 2000, Chayong ve ark., 2004, Atkinson, 2005, Kim ve Kang, 2000, Atkinson ve ark., 2008]. Bu çalışmada farklı yarı-katı sıcaklıklarda elde edilen tane boyutları 54 µm'dan daha küçük olduğundan üretilen ön malzemelerin tikso-şekillendirme için uygun olduğu söylenebilir.

Bütün yarı-katı sıcaklıklarda ortalama tane boyutu artan soğuk deformasyon oranı ile azalmıştır (Şekil 6.3). Aynı yarı-katı sıcaklıklarda numunelere uygulanan soğuk deformasyon oranı %20'den %30'a çıkartıldığında, ortalama tane boyutunun 2-4 µm arasında değiştiği görülmüştür (Çizelge

6.1). Deformasyon oranı arttıkça iç gerininin sebep olduğu ve malzemeye depolanan iç enerji de artar. Alaşıma yeniden ısıtma işlemi uygulandığında depolanan iç enerji serbest kalır ve dentritik mikroyapının parçalanmasını sağlar. Malzemenin içinde ne kadar çok kalıntı gerilme oluşursa o kadar çok enerji depolanır ve daha küçük tane boyutu elde edilir [Sirong ve ark., 2006]. Alaşım yarı-katı bölgeye ısıtıldığında deformasyonun neden olduğu boşluklar, serbest enerjii düşürmek için birleşir ve dislokasyonlar harekete geçerek çapraz kayma oluşur [Zhang ve ark., 2009, Akar, 2011].

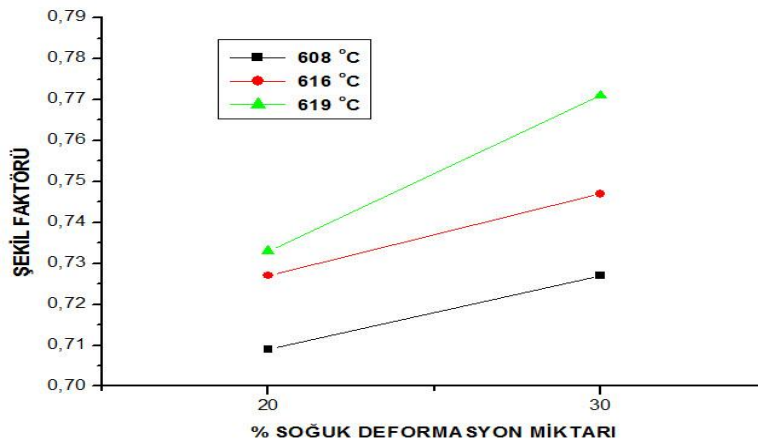


Şekil 6.2. Yarı-katı sıcaklığa bağlı olarak tane boyutunun değişimi.



Şekil 6.3. Soğuk deformasyon oranına bağlı olarak tane boyutu değişimi.

Yarı-katı sıcaklıkta bekleme yapılmadığı için küreselleşme için gerekli zaman olmamıştır. Tanelerin küreselleşmesi üzerine difüzyon ve sıcaklığın çok baskın bir etkisi tespit edilmemiştir. Fakat %20 ve %30 soğuk deformasyonun küreselleşme üzerine çok belirgin bir etkisi bulunmuştur (Şekil 6.4). Bunun nedeni ise malzeme içerisinde depolanan enerjiye atfedilmektedir [Mutlu, 2010, Akar, 2011].

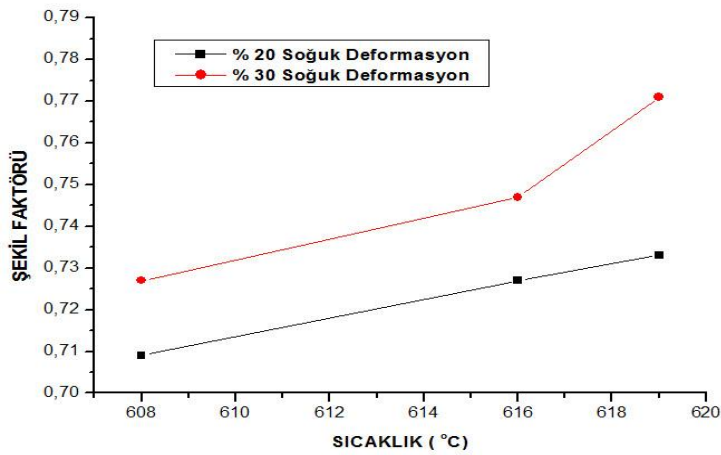


Şekil 6.4. Soğuk deformasyon oranına bağlı olarak şekil faktörünün değişimi.

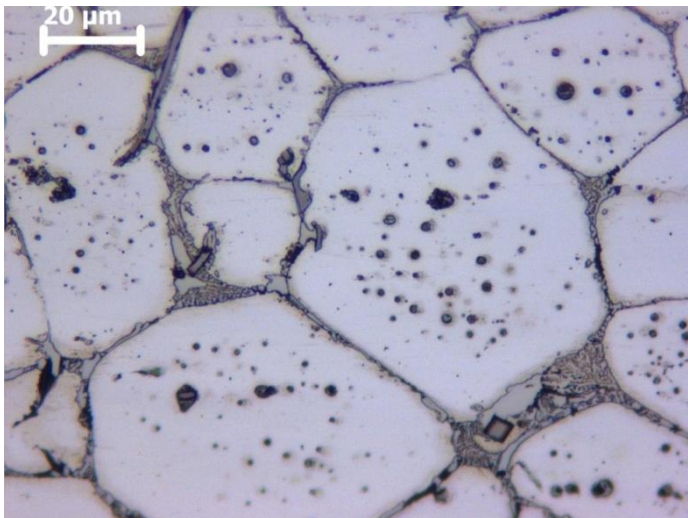
Şekil faktörünün, deformasyon oranının (Şekil 6.4) ve sıcaklığın (Şekil 6.5) artması ile arttığı tespit edilmiştir (Çizelge 6.1). Yarı-katı sıcaklıktan soğutulmuş numunelerde yeniden kristalleşme ile küçük ve eşeksenli taneler oluşmuştur. Sıvı faz oranının artması, şekil faktörü ve yarı-katı sıcaklık miktarının artması ile doğru orantılıdır. Tanelerin küreselleşmesinin nedeni yüksek miktarda sıvı fazdan kaynaklanmaktadır (Resim 6.5).

Yarı-katı sıcaklığa ısıtılan soğuk deforme edilmiş numunelerde ergimenin tane sınırlarında olduğu gözlemlenmiştir (Resim 6.5).Tane sınırlarında bulunan düşük ergime sıcaklığına sahip ötektik oluşumların ergime sıcaklığı, yarı-katı sıcaklıktan daha düşük olduğundan ötektik bölgelerde kısmi ergime başlar. Ergime, düşük ergime noktalarına sahip bölgelerde, yüksek enerjili ve tane sınırlarında görülmüştür (Resim 6.6). Tiksotropik yapı üretiminde kısmi ergime önemli bir rol oynamıştır. Tane sınırları arasındaki sıvılar, tanelerin

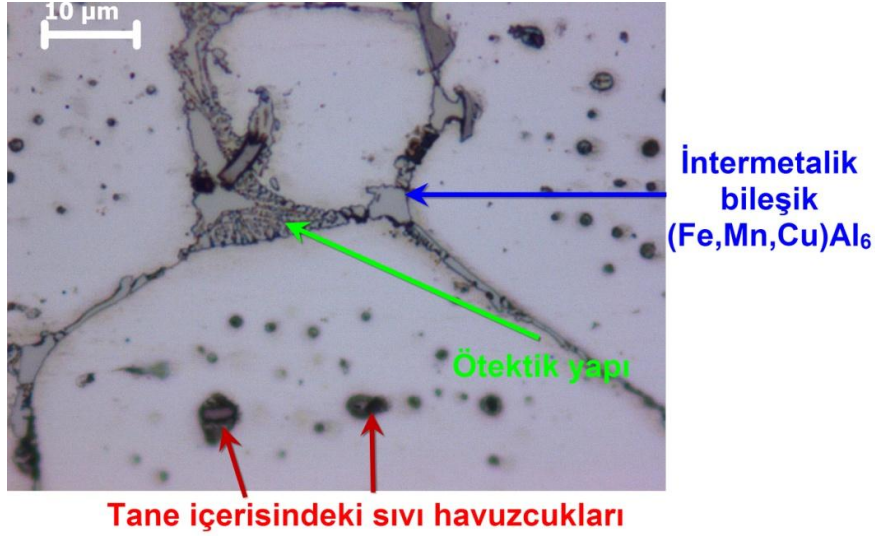
birleşmesiyle tanelerin içinde küçük sıvı havuzcuklarını oluşturmuştur. Bu sıvı havuzcuklar mikroyapıda siyah nokta olarak görülmektedir (Resim 6.5 ve Resim 6.6). Taneler arasındaki intermetalik bileşikler tanelerin büyümesine engel olmaktadır (Resim 6.5 ve Resim 6.6). Bu çalışmaya benzer şekilde Mutlu [Mutlu, 2010] bu intermetalik bileşikleri EDS çalışması ile (Fe,Mn,Cu)Al<sub>6</sub> olarak tespit etmiştir. Etrafında yoğun olarak intermetalik bileşiklerin teşekkül ettiği tanelerin diğer tanelere göre daha küçük olduğu gözlemlenmiştir (Resim 6.6).



Şekil 6.5. Yarı-katı sıcaklığa bağlı olarak şekil faktörünün değişimi.



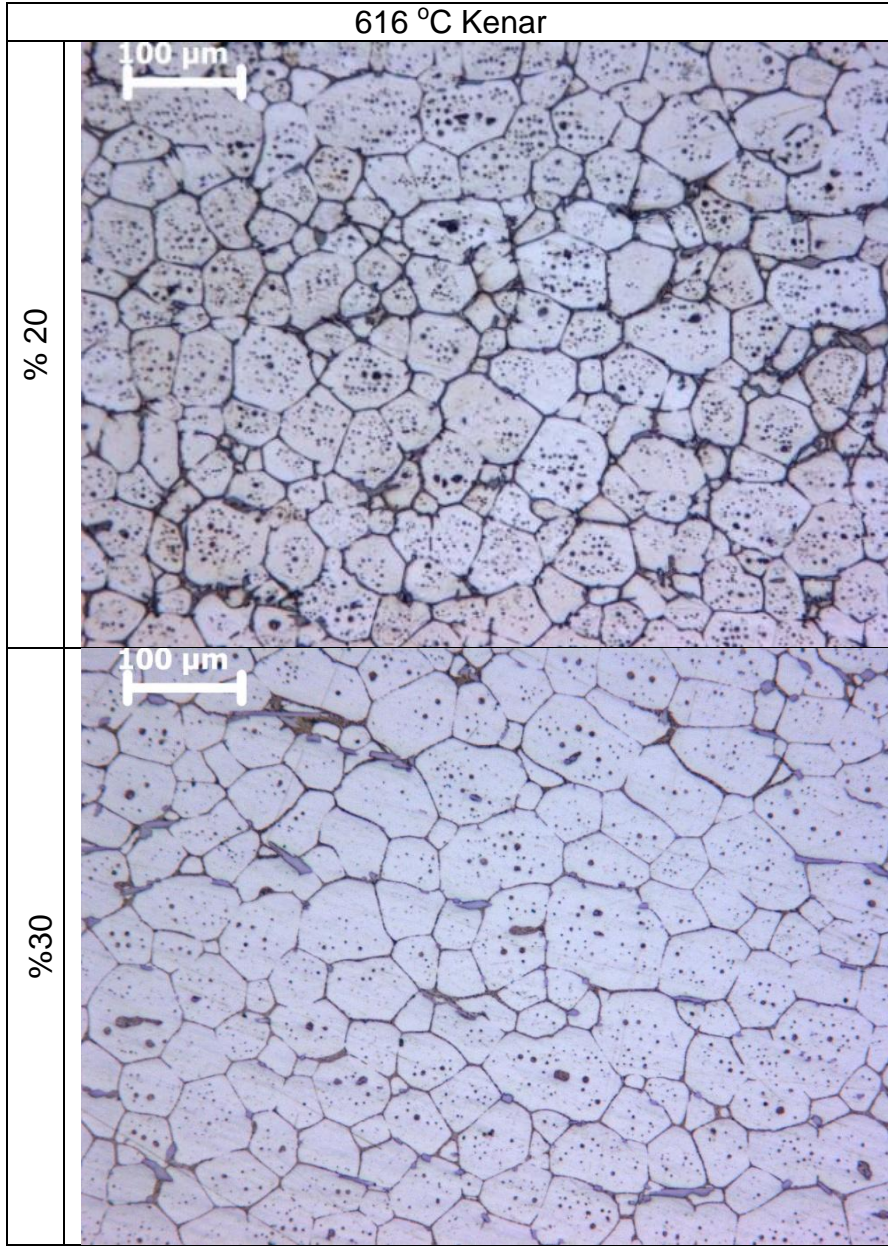
Resim 6.5. % 30 deformasyonda 608 °C'de kenar tanelerin görünüm 500x büyütme.



Resim 6.6. % 30 deformasyonda 608 °C’de kenar tanelerin görünüm 1000x büyütme.

Aynı yarı-katı sıcaklığa sahip %20 soğuk deforme edilmiş numune %30 soğuk deforme edilmiş numuneye göre fazla sıvı oranı üretmiştir. Tane içerisine hapsolmuş sıvı faz varlığı %20 deforme edilen numunelerde daha fazla görülmüştür (Resim 6.7).

Soğuk deformasyon miktarı ile malzeme içindeki gerilme miktarı doğru orantılı bir şekilde artmıştır. Kalıntı gerilme miktarına bağlı olarak sıcaklığın artmasıyla birlikte yeniden kristalleşme sonucu tane miktarı da değişmiştir. Büyük taneler küçük tanelere göre daha düşük enerjili ve kararlı bir arayüze sahiptir [Jiang ve ark., 2007]. Soğuk deformasyon oranı arttıkça ortalama tane boyutunda gözle görülür bir azalma gerçekleşmiştir. Ortalama tane boyutunun küçülmesi ile yeniden kristalleşen tane sayısı artmıştır (Şekil 6.2).



Resim 6.7. Farklı deformasyon uygulanmış numunelerin farklı sıcaklıklarda soğutma sonrası görüntüsü.

### 6.3. Tikso-dökümle Üretilen Numunelerin Dış Görünümleri ve Kalıp Doldurma Karakteristiklerinin İncelenmesi

Kalıp sıcaklığı 150 °C ve 150 ton kapasiteli yüksek basınçlı döküm makinesinde tikso-döküm yöntemiyle şekillendirilmiş numunelerin dış görünüşleri Resim 6.8'de ve Resim 6.9'da verilmiştir. 608 °C sıcaklıkta %50

sıvı oranı ile her iki deformasyon oranında da kalıp tam olarak doldurulamamıştır. %60 ve %65 sıvı oranına sahip 616°C ve 619°C sıcaklıklardaki numuneler kalıbı başarılı bir şekilde tam doldurmuştur.



Resim 6.8 %20 soğuk deformasyon uygulanmış numunelerini görünümü.

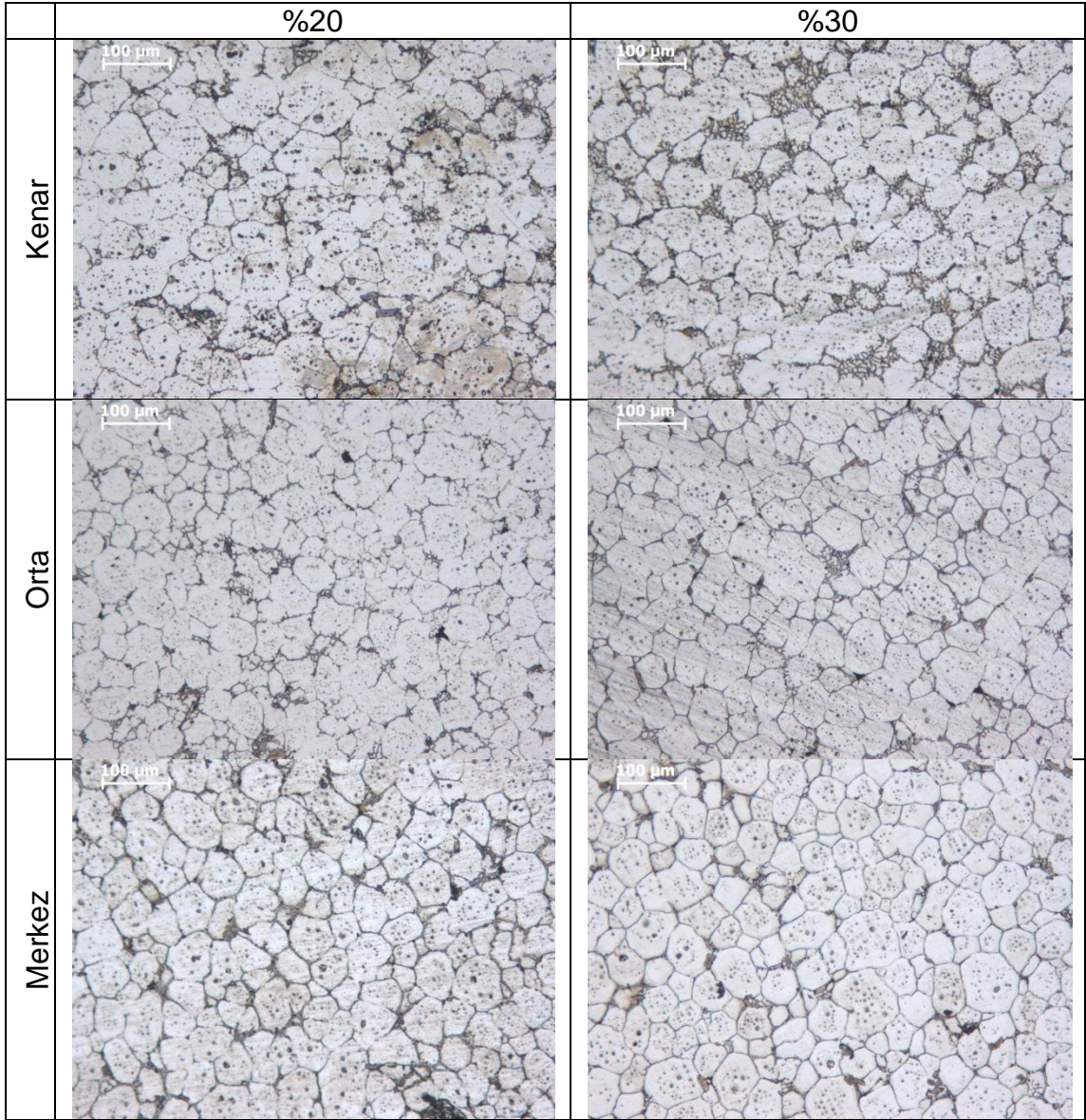
AA2024 alaşımı 608 °C sıcaklıkta % 50 sıvı oranı ile tikso-dökümle şekillendirilemediğinden mekanik özellikleri incelenememiştir. 616°C ve 619°C sıcaklıklarda (%60 ve %65 sıvı oranlarına sahip numuneler) tikso-dökümle rahatlıkla şekillendirilmiş ve bu dökümlerin mekanik özellikleri incelenmiştir.



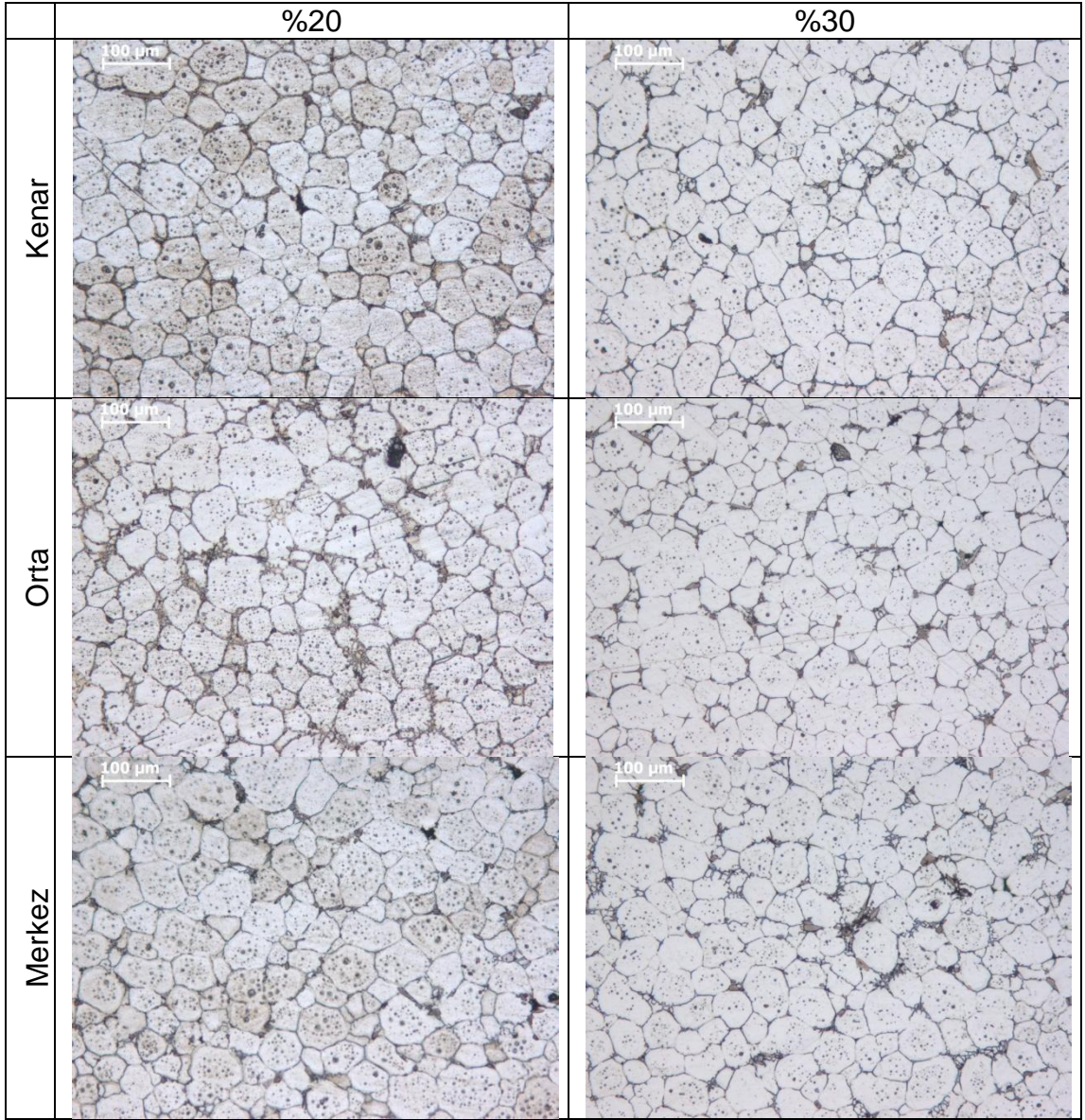
Resim 6.9 %30 soğuk deformasyon uygulanmış numunelerini görünümü.

#### **6.4. Tikso-dökümlle Üretilen Numunelerin Mikroyapı İncelemesi**

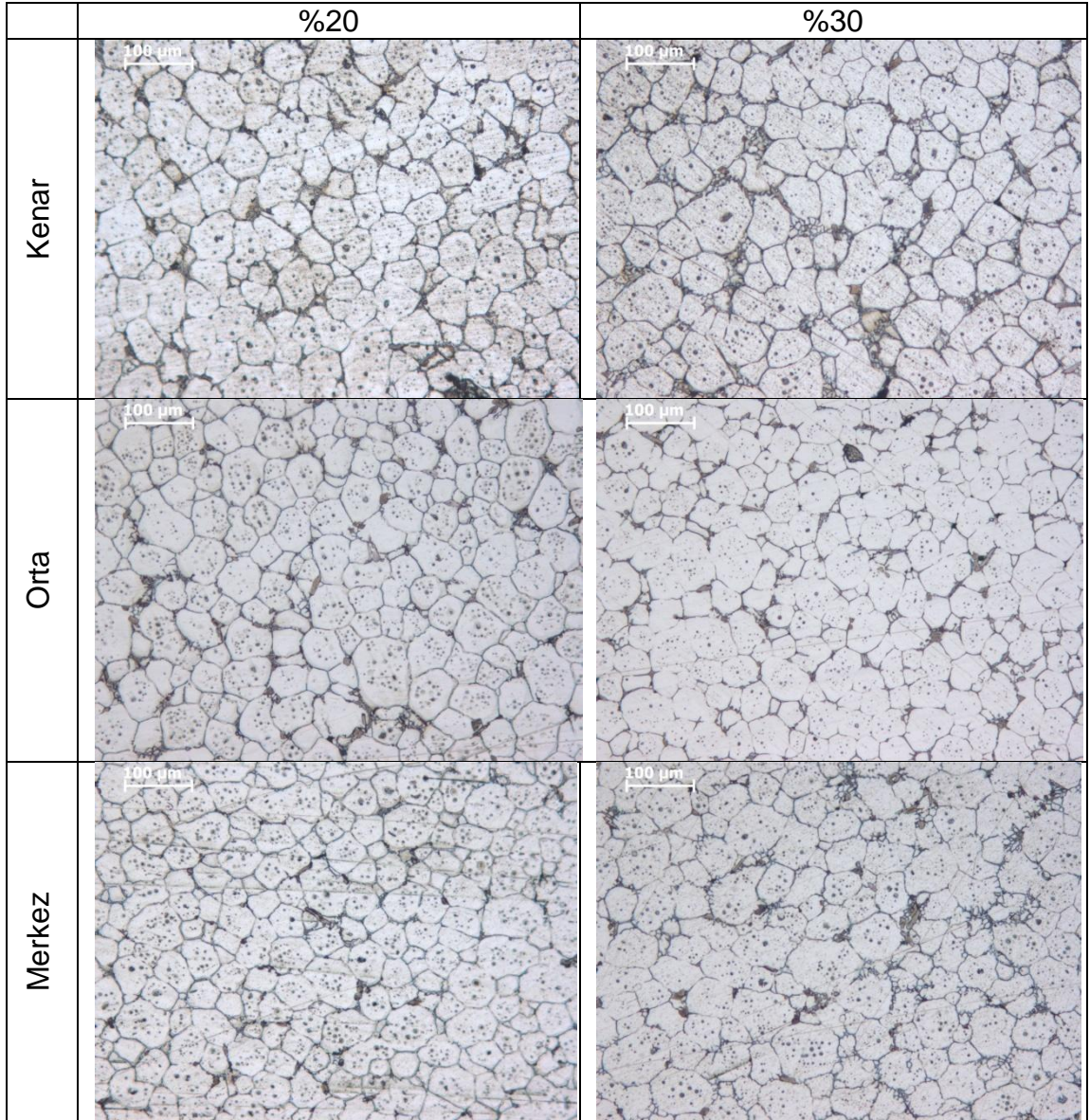
%20 ve % 30 soğuk deformasyon uygulanmış malzemelerden 608 °C, 616°C ve 619 °C yarı-katrı sıcaklıklarda, numuneler tikso-dökümlle şekillendirme sonrası mikroyapıları incelenmiştir (Resim 6.10, Resim 6.11 ve Resim 6.12 ). %20 ve %30 soğuk deformasyon uygulanmış ön malzemelerden 608 °C, 616°C ve 619 °C sıcaklıklarda tikso-dökümlle üretilen numunelerin mikroyapılarının birbirlerine benzer olduğu ve aralarında belirgin bir fark olmadığı tespit edilmiştir. Yapının tamamen yeniden kristalleşmiş, küresel, ince ve eşeksenli tanelerden oluştuğu tespit edilmiştir (Resim 6.10, Resim 6.11 ve Resim 6.12). %20 ve %30 soğuk deforme edilmiş alaşımda çok sayıda yeniden kristalleşme için yeterli çekirdeklenme potansiyeline ulaşıldığı ve bu şekilde küçük tanelerin yeniden kristalleşmiş taneler olduğu yorumlanmıştır.



Resim 6.10. %20 ve %30 soğuk deformasyon uygulanmış AA2024 alaşımının 608°C'den tıksa-dökümlle üretilen numunelerin mikroyapı değişimi.

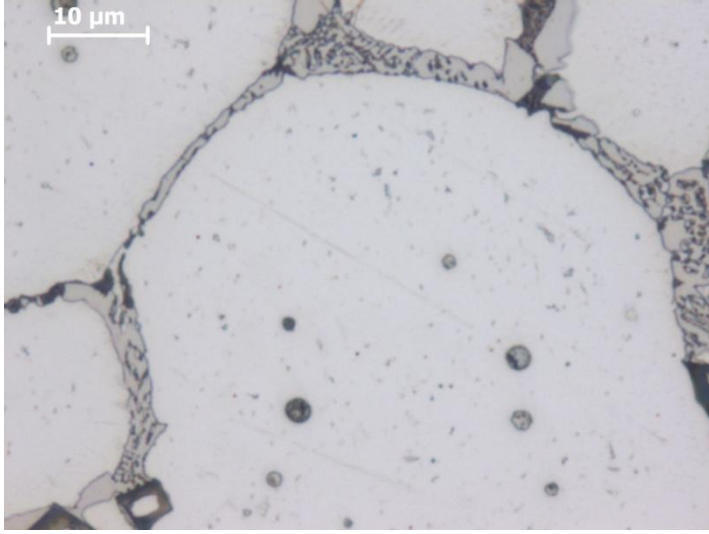


Resim 6.11. %20 ve %30 soğuk deformasyon uygulanmış AA2024 alaşımının 616°C'den tikso-dökümle üretilen numunelerin mikroyapı değişimi.



Resim 6.12. %20 ve %30 soğuk deformasyon uygulanmış AA2024 alaşımının 619°C'den tikso-dökümle üretilen numunelerin mikroyapı değişimi.

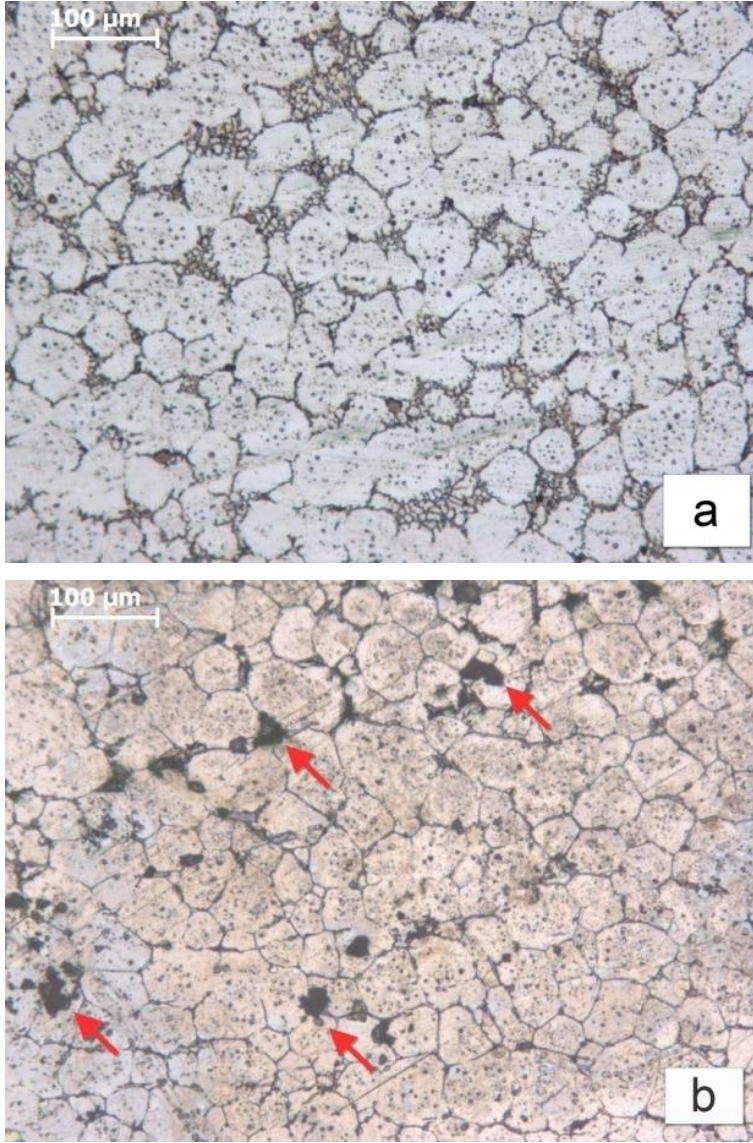
Farklı soğuk deformasyon (%20 ve %30) oranlarında deforme edilmiş biyetlerin tikso-döküm sonrası, küremsi katı fazın tamamen sıvı faz ile çevrelediği ve sıvı film tabakasıyla tamamen ıslatıldığı tespit edilmiştir (Resim 6.13).



Resim 6.13. %30 soğuk deformasyon uygulanmış ön malzemenin 619 °C'de tikso-dökümle şekillendirilmiş görüntüsü.

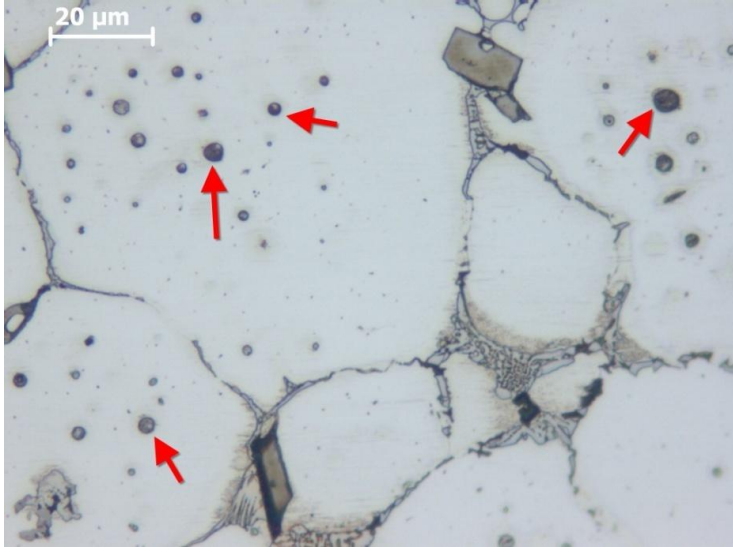
Tikso-döküm yöntemi ile üretilmiş dökümlerin kalıbın keskin köşelerindeki alanlarda sıvı segregasyon olduğu görülmüştür (Resim 6.14.a). Aynı zamanda kalıp duvarlarına yakın bölgelerde de sıvı segregasyonları tespit edilmiştir. Çekme gözeneklerinin, sıvı segregasyonun olduğu bölgelerde sıvı fazın katılması sonucunda meydana geldiği görülmüştür (Resim 6.14.b ). Sıvı segregasyonun oluşumu iyi bir kalıp tasarımı ile önlenabilir. Tikso-dökümdeki sıvı segregasyonu, optimum yolluk sistemi (yolluk kesit alanlarındaki değişikliği) tasarımı ve katı oranının artırılması ile önlenabilir [Kang ve Lee, 2008, Kılıçlı, 2010].

Yarı-katı sıcaklıktaki alaşımların çift fazlı yapıda olması, basıncın etkisiyle birbirinden ayrışmasına neden olmaktadır. Bu sıvı faz yarı-katı haldeki alaşımın viskozitesini düşürerek akışkanlığını artırmıştır. Kalıbın keskin köşelerinde fazla basınca maruz kalan numunelerde sıvı segregasyonların olduğu görülmüştür (Resim 6.14.a). Kalıptaki keskin köşelerde ve kalıp duvarlarına yakın bölgelerde sıvı segregasyonunun oluştuğunu diğer araştırmacılar da tespit etmişlerdir [Mat, 2001, Chayong ve ark., 2005, Kılıçlı, 2010]. Tikso-dökümde sıvı segregasyonun azaltılması optimum yolluk sistemi tasarımı ve katı oranının artırılması ile sağlanabilir [Kang ve Lee, 2008].



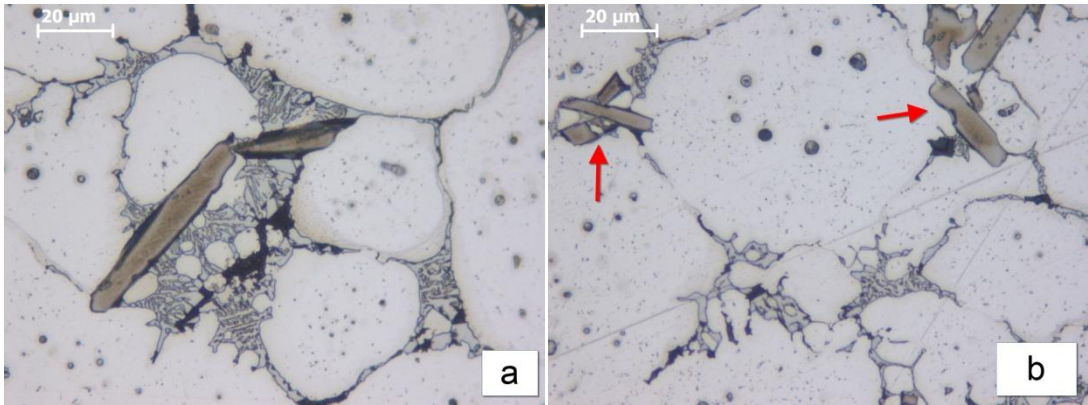
Resim 6.14. Tikso-dökümlle şekillendirilmiş %20 soğuk deformasyon uygulanmış ön malzemenin a) 616 °C'de sıvı segregasyonu b) 608 °C'de çekme gözenekleri görüntüleri.

Tikso döküm yöntemi ile şekillendirilmiş numunelerin incelenmesinde tane sınırları arasındaki sıvıların, tane sınırlarının hareketinden kaynaklanan tane birleşmesi tanelerin içinde küçük sıvı havuzcuklarını oluşturdukları gözlemlenmiştir (Resim 6.15). Diğer araştırmacılar da tikso dökümde sıvı havuzcuklarının oluştuğunu tespit etmişlerdir [Liu ve ark., 2004, Chayong ve ark., 2005]



Resim 6.15. %20 soğuk deforme edilmiş numunenin 619 °C'de tikso-dökümle şekillendirilmiş görüntüsü.

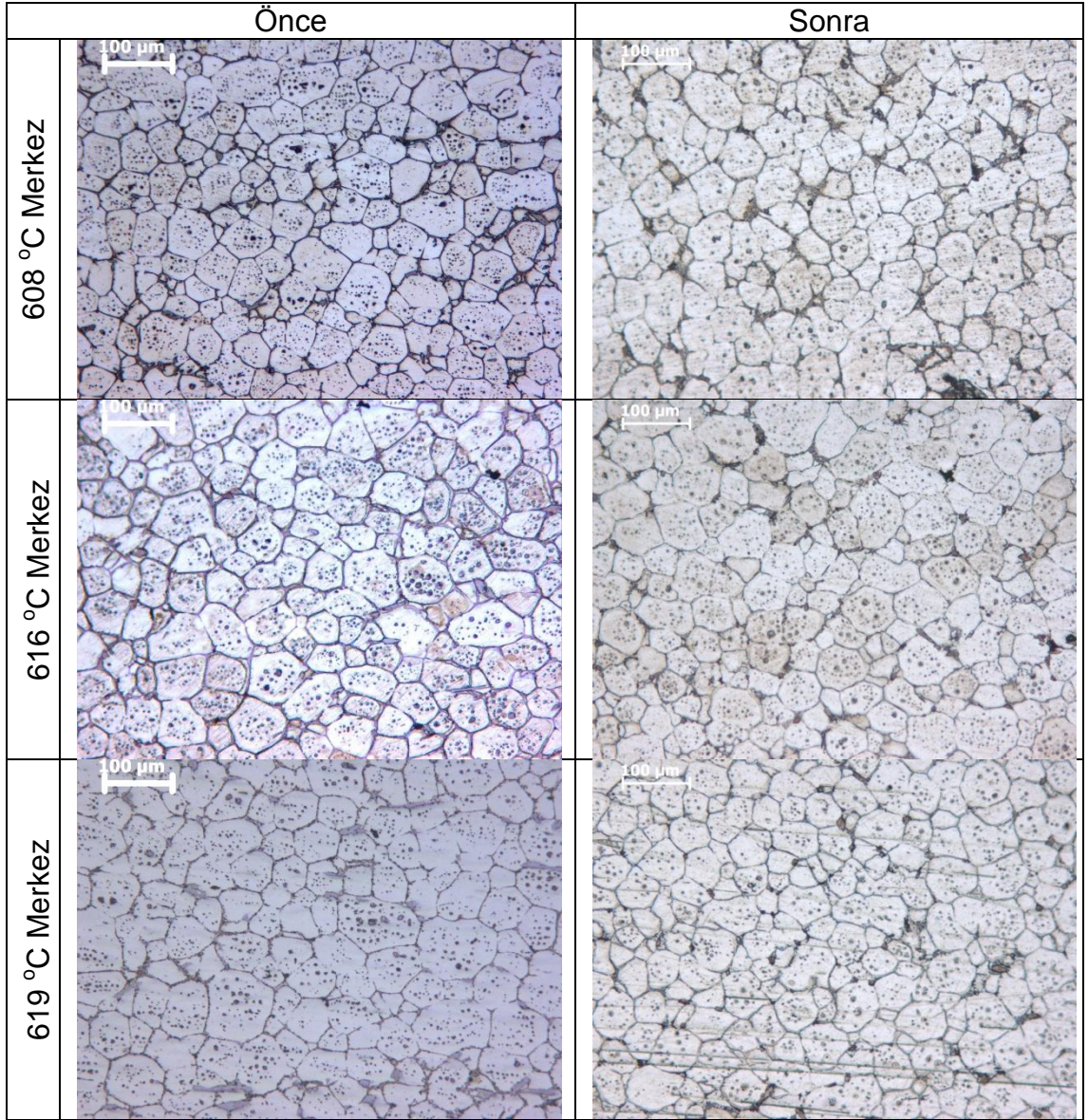
Tane sınırlarındaki sıvı havuzcuklarında ötektik katılaşmanın olduğu düşünülmektedir. Tane sınırlarında aynı zamanda intermetalik bileşiklerin olduğu görülmüştür (Resim 6.16 ). İntermetalik fazlar tane sınırlarına çökelerek tane büyümesini engellemiştir.



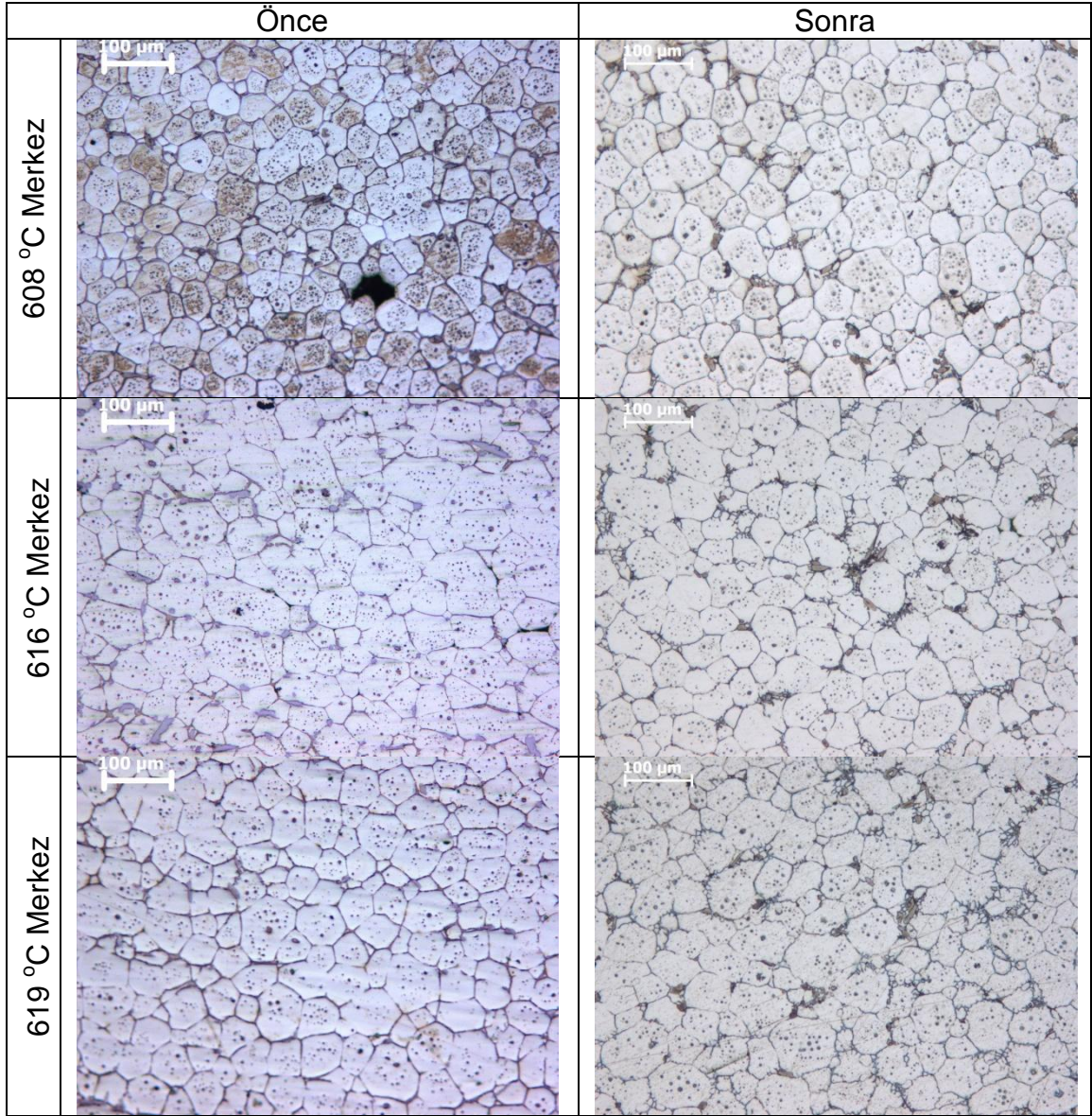
Resim 6.16. %30 deforme edilmiş 619 °C'de tikso-dökümle şekillendirilmiş numunelerin intermetalik bileşiklerinin mikroyapı görünümüleri.

### **6.5. Tikso-döküm Öncesi ve Sonrası Mikroyapı Değişimleri**

Tikso-döküm öncesinde ve sonrasında tane boyutlarında belirgin bir değişim olmamıştır. Taneler içerisine hapsolmuş sıvı havuzcuklarının tikso-döküm öncesinde küçük boyutlarda ve çok sayıda olduğu görülürken tikso-döküm sonrasında büyük boyutlarda ve az sayıda olduğu görülmüştür. Tikso-döküm öncesinde tane sınırlarında sıvı segregasyonları teşekkül etmemiştir. Ancak sonrasında meydana gelen sıvı segregasyonun yarı-katı sıcaklığın artması ile arttığı ve mikro gözeneklerin oluştuğu tespit edilmiştir (Resim 6.17 ve Resim 6.18 ).



Resim 6.17. %20 soğuk deforme edilmiş numunelerin tikso-şekillendirme öncesi ve sonrası mikroyapı görüntüleri.



Resim 6.18. %30 soğuk deforme edilmiş numunelerin tikso-şekillendirme öncesi ve sonrası mikroyapı görüntüleri.

### 6.6. Çekme Test Sonuçları

%20 ve %30 soğuk deforme edilmiş ön malzemelerin her birinin , %60 ve %65 sıvı oranları ( 616 °C ve 619 °C sıcaklıklarda ) ve 2,37 m/s piston hızında tikso şekillendirilmesi ile elde edilen numunelerin çekme testi sonuçları çizelge 6.2'de verilmiştir.

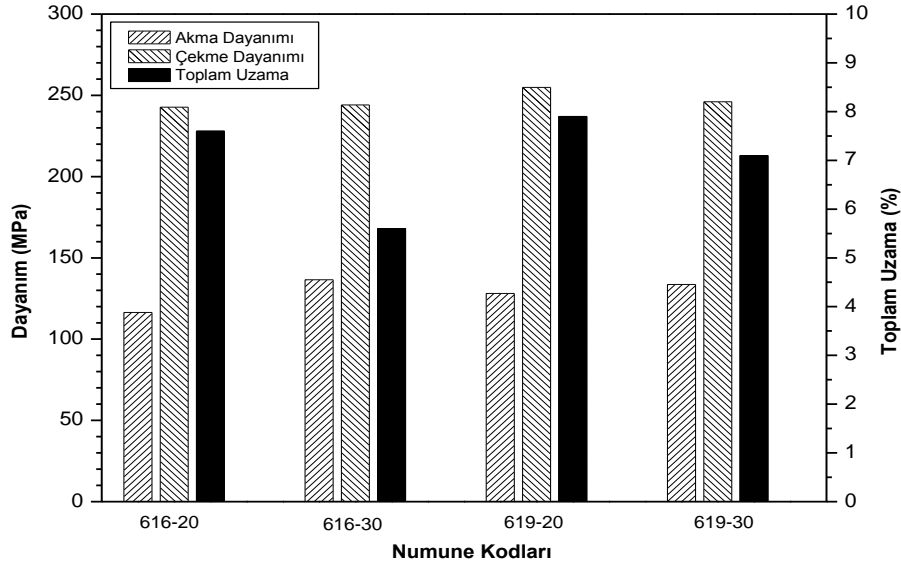
Tikso-döküm yöntemi ile şekillendirilmiş döküm grubu parçalarda en düşük akma ve çekme dayanımı 616-20 kodlu numunede meydana gelirken en düşük % uzama değeri 616-30 kodlu numunede gerçekleşmiştir. Ancak 616-30 kodlu numune 136 MPa değerinde en yüksek akma dayanımına sahiptir. En yüksek çekme dayanım ve % uzama, sırayla 254.9 MPa ve % 7.9 değerleri ile 619-20 kodlu numunede elde edilmiştir.

Çizelge 6.2. Tikso-Dökümle üretilen numunelerin çekme test sonuçları (ortalama değerler)

Numune Kodu	%0,2 Akma Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Toplam Uzama (%)
616-20	116,4	242,7	7,6
616-30	136,5	244,1	5,6
619-20	128,1	254,9	7,9
619-30	133,6	246,0	7,1
T6 ısıtma işlemi sonrası çekme test sonuçları			
616-20	139,1	305,2	8,7
616-30	159,3	284,4	6,5
619-20	163,0	288,1	7,4
619-30	156,3	313,9	9,7
Ekstrüze+T6 haldeki numunenin çekme test sonuçları			
Ekstrüze	198,7	445,6	15,0

Tikso-döküm yöntemi ile şekillendirilen numunelerin çekme test sonuçları dikkate alındığında 116-133 MPa arasında akma dayanımı ve 242-255 MPa arasında çekme dayanım değerlerinin birbirine çok yakın olduğu görülürken % 5.6- 7.9 arasında gerçekleşen % uzama değerlerinde belirgin farklılıklar mevcuttur.

Tikso-döküm yöntemi ile üretilen ve T6 yaşlandırma ısıtma işlemine tabi tutulan numunelerin çekme test verileri Çizelge 6.2'de verilmiştir. T6 yaşlandırma ısıtma işleminden sonra akma dayanımı, çekme dayanımı ve % uzama değerlerinde önemli derecede artış meydana gelmiştir.



Şekil 6.6. Tikso-dökümle şekillendirme sonrası mekanik özelliklerin değişimi

Tikso-döküm yöntemi ile üretilen ve T6 yapay yaşlandırma ısıl işleminin uygulanan numunelerin çekme test sonuçları incelendiğinde akma ve çekme dayanımlarının birbirine çok yakın olup yine çok belirgin bir fark gözlenmemiştir (Şekil 6.7). Tikso-döküm+T6 koşullarındaki numunelerin akma dayanımı 139-163 MPa, çekme dayanımı 284-313 MPa ve toplam uzama değeri %6.5-9.7 arasında değişmektedir. Ekstrüze+ T6 haldeki numunenin çekme özellikleri tikso-dökümle üretilen ve T6 yapay yaşlandırma ısıl işleminin uygulanan numunelerin çekme özelliklerinden daha yüksek sonuç vermiştir. Akma dayanımı yaklaşık 36 MPa, çekme dayanımı 130 MPa ve toplam uzama %5 daha düşük değerlerde elde edilmiştir. Bu çekme özellikleri sonucuna göre tikso-dökümle üretilmiş AA2024 alaşımı ekstrüze+T6 koşullarında mekanik şekillendirmeye alternatif şekillendirme yöntemi olarak kullanılabilir.

Tikso-dökümle üretilen numunelerin akma dayanımı ve çekme dayanımının ekstrüze+T6 koşullarına göre düşük çıkması mikroyapısal hatalara bağlanmıştır (Şekil 6.8). Döküm koşullarında mikroyapıdaki oluşan mikro-gözenek, mikro-çekme ve mikro-segregasyon gibi yapısal hataların sonucunda çekme özellikleri düşük çıkmıştır. Ancak bu gibi yapısal hataların



## 7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

### 7.1. Sonuçlar

Bu çalışmada SIMA yöntemiyle üretilen AA2024 alaşımına ait ön malzemeler tikso-döküm yöntemiyle şekillendirilmiştir. Şekillendirme işleminde biyetlere %20 ve %30 soğuk deformasyon uygulanmış ve daha sonra %50, %60 ve %65 sıvı oranına karşılık gelen sırasıyla 608°C, 616°C ve 619°C sıcaklıklarda ve 2,37 m/s piston hızında tikso-döküm yapılmıştır. Deneysel çalışmalarda elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

1. AA2024 (ETİAL-24) alaşımının SIMA yöntemiyle ön malzeme üretiminde, %20 ve %30 soğuk deformasyon ve takiben 616 °C ve 619 °C sıcaklıklarda yeniden ısıtma işlemleri numunenin tamamında homojen tiksotropik yapı üretilmiştir.
2. SIMA yöntemi ile ön malzeme üretiminde %20 ve %30 soğuk deformasyon ve 616 °C ve 619 °C sıcaklıklarda yeniden ısıtma işlemlerinde birbirine çok yakın değerlerde (40-54 µm) tane boyutu ve şekil faktörü ( 0,7-0,8) elde edilmiştir.
3. AA2024 alaşımının, SIMA yöntemi ile %20 ve %30 soğuk deformasyon uygulandıktan sonra %60 ve %65 sıvı oranlarına tekabül eden sıcaklıklarda ve 2,37 m/s piston hızında yarı-katı şekillendirilebilirliği tespit edilmiştir.
4. Tikso-döküm yöntemiyle üretilmiş numunelerde kalıbın keskin köşelerinde ve geniş bölgelerin sıvı segregasyonun meydana geldiği gözlemlenmiştir.
5. Yarı-katı şekillendirmede intermetalik bileşikler bazı tanelerin etrafını çevreleyerek tanelerin büyümesine engel olmuştur.

6. Tikso-dökümlle şekillendirilmiş numunelerin akma dayanımı 116-136 MPa, çekme dayanımı 242-255 MPa ve toplam uzama değeri %5.6-7.9 arasında değişmiştir.
7. Tikso-döküm+T6 koşullarındaki numunelerin akma dayanımı 139-163 MPa, çekme dayanımı 284-314 MPa ve toplam uzama değeri %6.5-9.7 arasında gerçekleşmiştir.
8. Tikso-dökümlle üretilen numunelerin T6 yaşlandırma ısıll işleminden sonra mekanik özelliklerinde artış olduğu tespit edilmiştir.

## **7.2. Öneriler**

1. Ekstrüze halden direk olarak tiksotropik yapı üretimi için en büyük çap araştırılabilir.
2. AA2024 alaşımında farklı soğuk deformasyon oranları uygulanarak üretilen numunelerin reolojik özellikleri reometre aracılığıyla karakterize edilebilir.
3. Kalıp sıcaklığı, yolluk geometrisi ve boyutlarının mekanik özellikler üzerine etkisi araştırılabilir.
4. Yolluk sisteminin sıvı segregasyonu üzerine etkisi daha detaylı bir şekilde araştırılabilir.

## KAYNAKLAR

Adachi, M., Sasaki, H. and Harada, Y., "Methods and apparatus for shaping semi-solid metals" UBE Industries, **European Patent**, Patent No: 0745694, (1996).

Akar, N., "AA2024 Alaşımında SIMA yöntemi ile tiksotropik yapı üretimi üzerine yeniden ısıtma sıcaklığının etkisi", **Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der.**, Ankara, 381-388, (2011)

Aktar, N., "Tikso Kalıplama Ünitesi Tasarımı Ve İmalatının Yapılarak Al-Si Alaşımlarının Üretilmesi", Yüksek Lisans Tezi , **Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Karabük, 7-11(2004).

Atkinson H.V. "Modelling the semisolid processing of metallic alloys", **Progress in Materials Science** ,50: 341–412(2005).

Atkinson, H.V. and Liu, D., "Microstructural coarsening of semi-solid aluminium alloys", **Materials Science and Engineering A**, 496 (1-2):439-446 (2008).

Atkinson, H.V., Burke K. and Vaneetveld G., "Recrystallization in the semi-solid state in 7075 aluminium alloy", **Materials Science and Engineering A**, 490 : 266-276 (2008).

Atkinson, H.V., Kapranos,P., Chayong, P.S., Liu, D., Kirkwood, D. And Camacho, A. M., "Alloy Development For Thixoforming", **Epsrc Project-Gr/M89096, Sheffield** ,1-7(2002).

Basner, T.G., "The effect of processing on the mechanical and fatigue properties of semi solid formed A357 Alüminium", **The University of Michigan**, USA, (2001) .

Birol, Y., "Cooling slope casting and thixoforming of hypereutectic A390 alloy", **Journal of Materials Processing Technology**, 207 (1-3): 200-203, (2008).

Birol Y., "Internal Cooling to produce aluminium alloy slurries for rheocasting", **Journal of Alloy and Compounds**, 480 (2): 365-368 (2009).

Birol Y., "Production of Al-7Si-0.3Mg slurry for rheocasting via internal cooling of the melt below liquidus temperature", **Metallic Materials**, 47 (9): 401-407 (2009).

Bozkurt, U., Birol, Y., Önsel, M., Çakır, O. ve Altıntaş, S., “Alüminyum alaşımlarında eğimli soğutma plakasında döküm yöntemiyle tiksotropik yapı elde edilmesi”, **12. Uluslararası Metalurji Malzeme Kongresi Bildiriler Kitabı**, İstanbul, Türkiye, 2036-2043 (2005).

Choi, J. C., Park, H. J. “Microstructural characteristics of aluminum 2024 by cold working in the SIMA process.” **Journal of Materials Processing Technology**, 82: 107–116 (1998).

Chayong, S., Atkinson, H.V. and Kapranos, P., “Multistep induction heating regimes for thixoforming 7075 aluminium alloy”, **Materials Science and Technology**, 20 (4): 490-496 (2004).

Chayong, S., Atkinson, H.V. and Kapranos, P., “Thixoforming 7075 aluminium alloys”, **Materials Science and Engineering A**, 390 (1-2): 3-12 (2005).

Czerwinski F. “Semisolid Processing—Origin of Magnesium Molding”, Magnesium Injection Molding, **Springer US**, USA, 81-145 (2007).

Çavuşoğlu, E., Döküm Teknolojisi I kitabı, **İ.T.Ü. Kütüphanesi**, Sayı: 1499, İstanbul (1992),

Dışpınar, D. ve Türkeli A., “SIMA ile üretilmiş yarı-katı 2024 ve 7075 alüminyum alaşımlarının çözeltiye alma ısıl işlemi”, **11. Uluslararası Malzeme Sempozyumu Bildiriler Kitabı**, Denizli, Türkiye, 792-798 (2006).

Doğruyol, E.” Comparison of mechanical properties of semi solid forming and hot forming of a356 aluminum alloy”, **Bogaziçi Univeristy Graduate Program in Mechanical Engineering**, İstanbul, 1-53 (2006).

Doutre, D, Hay, G., Wales, P. and Gabathuler, J.P. “SEED: A new process por semi solid forming”, **Canadian Metallurgical Quarterly**, 43 (2): 265-272, (2004).

Fan, Z., “Development of the rheo-diecasting process for magnesium alloys”, **Materials Science and Engineering A**, 413-414: 72-78 (2005).

Fan, Z., “Semisolid metal processing” **International Materials Reviews**, 47(2): 49-85 (2002).

Figueredo, A., “Science and technology of semi-solid metal processing” **North America Die Casting Association**, USA, 1-17, (2001).

Flemings, M., “Behavior of Metal Alloys in the semi solid state”, **Metall Trans. A**, 22A:957-981(1991).

Flemings, M., Riek, R. And Young K., "Rheocasting" *Mater sci. Eng.* 25:103-117(1976).

Flemings, M.C., "Behavior of metal alloys in the semisolid state", *Metallurgical Transactions A*, 22 (5): 957-981 (1991).

Guo, H., Yang, X., "Preparation of semi-solid slurry containing fine and globular particles for wrought aluminum alloy 2024" *Trans. Nonferrous Met. Soc. China* 17: 799-804 (2007).

Haga, T. and Suzuki, S., "Casting of aluminium alloy ingots for thixoforming using a cooling slope", *Journal of Materials Processing Technology*, 118 (1-3): 169-172 (2001).

Hirt, G., and Kopp, R., "Semi-solid Metal Processing" *WILEY-VCH Verlag GmbH & Co, Weinheim* (2009).

Hirt, G., Cremer, R., Winkelmann, A., Witulski, T. and Zillgen M., "Semi solid forming of aluminium alloys by direct forging and lateral extrusion", *Journal of Materials Processing Technology*, 45: 359-364 (1994).

Ji, S., Fan, Z., and Bevis, M.J., "Semi-solid processing of engineering alloys by a twin-screw rheomoulding process", *Materials Science and Engineering A*, 299 (1-2): 210-217 (2001).

Jiang, H., Lu, Y., Huang, W., Li, X., Li, M., "Microstructural evolution and mechanical properties of the semisolid Al-4Cu-Mg alloy", *Materials Characterization*, 51: 1- 10 (2003).

Jiang, H., Li, M., "Microscopic observation of cold-deformed Al-4Cu-Mg alloy samples after semi-solid heat treatments", *Materials Characterization*, 54: 451- 457 (2005).

Jiang, H. and Li, M., "Grain growth of Al-4Cu-Mg alloy during isothermal heat treatment", *Journal of University of Science and Technology Beijing*, 13(1): 67-72 (2006).

Jiang, H., Mi, Z., Tang, D., and Li, M., "Microstructure evolution of Al-4Cu-Mg alloy during semi-solid treatment", *Journal of University of Science and Technology Beijing*, 14(2): 151-156 (2007).

Jung, H.K. Kang C.G. "Reheating process of cast and wrought aluminum alloys for thixoforging and their globularization mechanism", *Journal of Materials Processing Technology*, 104: 244-253 (2000).

Kang, C.G. and Lee S.M., "Effect of solid fraction and pressure on microstructure and mechanical properties and reduction in liquid segregation in the thixo-die-casting process with Al-7 pct Si alloy", ***Metallurgical and Materials Transactions A***, 39: 1213-1224 (2008).

Kapranos, P., Ward P.J., Atkinson H.V. and Kirkwood D.H., "Near net shaping by semi-solid metal processing" ***Materials and Design***, 21 (4): 387-394 (2000).

Karayazı, A., "Etial 110 alaşımının dökümünde makro ve mikro porozite oluşumunun modellenmesi" Yüksek Lisans Tezi, ***Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü***, Sakarya, 12-15 (2009).

Kenney, M.P., Courtois, J.A., Evans, R.D., Farrow, G.M., Kyonka, C.P., Koch, A.A. and Young, K.P., ***Metal Handbook, 9edn***, Metals Park, OH, ASM International, 15: 327-338 (1998).

Kılıçlı, V., "Yarı-Kati Döküm Tekniği İle Üretilen Al-Zn Alaşımlarında Yapı-Özellik İlişkisinin İncelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, ***Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü***, Ankara, 9-45 (2010).

Kırtay, S., ve Türkeli, A., "Yarı-katı halde şekil verilmiş ETİAL-24 dövme alüminyum alaşımının yorulma ve yaşlanma davranışları" ***9. Uluslararası Metalurji ve Malzeme Kongresi Bildiriler Kitabı***, İstanbul, Türkiye, 1415-1420 (1997).

Kim, N.S. and Kang, C.G., "An investigation of flow characteristics considering the effect of viscosity variation in the thixoforming process", ***Journal of Materials Processing Technology***, 103: 237-246 (2000).

Kim, S.K., Yoon, Y.Y. and Jo, H.H., "Novel thixoextrusion process for Al wrought alloys", ***Journal of Materials Processing Technology***, 187-188: 354-357 (2007).

Kirkwood, D.H., "Semisolid processing of high melting point alloys", ***Proceedings of the 4th International conference on Semi-Solid processing of Alloys and Composites***, Sheffield, June, (1996).

Kirkwood, D.H., "Semisolid metal processing", ***International Materials Reviews***, 39(5):173-189 (1994).

Kirkwood, D.H., Sellars, C.M., and Boyed, L.G.E., "Thixotropic materials", ***United States Patent***, Patent No: 5133811, USA, (1992).

Kirkwood, D.H., Suery, M., Kapranos, P., Atkinson, H. V., Young, K.P, "Semi-Solid Processing of Alloys", ***Springer***, London, 117-128 (2009)

Kopp, R., Neudenberger, D. and Winning, G., "Different concepts of thixoforging and experiments for rheological data", **Journal of Materials Processing Technology**, 111 (1-3): 48-52 (2001).

Kopp, R., Winning G. and Möller T., "Thixoforging of aluminium alloys" **METEC**, Düsseldorf (1999).

Liu, D., Atkinson, H.V., Kapranos, P., Jiratticharoean, W. and Jones, H., "Microstructural evolution and tensile mechanical properties of thixoformed high performance aluminium alloys", **Materials Science and Engineering A**, 361 (1-2): 213-224 (2003).

Liu, D., Atkinson, H.V., Kapranos, P. and Jones, H., "Effect of heat treatment on properties of thixoformed high performance 2014 and 201 aluminium alloys", **Journal of Materials Science**, 39: 99-105 (2004).

Liu, D., Atkinson, H.V. and Jones, H., "Thermodynamic Prediction of Thixoformability in Alloys Based on the Al-Si-Cu and Al-Si-Cu-Mg Systems", **Acta Materialia**, 53: 807-819 (2005).

Martinez, R.A. and Flemings, M.C., "Evolution of particle morphology in the semisolid processing", **Metallurgical and Materials Transactions A**, 36 (8): 2205-2210 (2005).

Mat, M., "Yarı-katı metal eriyiklerin karakteristiklerinin incelenmesi" **TÜBİTAK Proje Raporu, MİSAG-124**, Niğde, 4-5 (2001).

Modigell, M., and Koke, J., "Time Dependent Rheological Properties of Semi-Solid Metal Alloys", **Mechanics of Time-Dependent Materials**, 3:15-39(1999).

Mutlu, İ., "AA2024 Alaşımında Tikotropik Yapı Üretimi", Yüksek Lisans Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 5-26 (2010).

Nafisi S. and Ghomashchi R., "Semi-solid metal processing routes: an overview", **Canadian Metallurgical Quarterly**, 44 (3): 289-304 (2005).

Nafisi, S., Lashkari, O., Ghomashchi, R., Ajersch, F., Charette, A., "Microstructure and rheological behavior of grain refined and modified semi-solid A356 Al-Si slurries", **Acta Materialia**, 54: 3503-3511 (2006).

Önsel, M., "The influence of heating conditions on semi-solid forming of aluminum alloys", Yüksek Lisans Tezi, **Boğaziçi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, İstanbul, 90 (2005).

Önsel, M., Birol, Y., Bozkurt, U., Kubilay, C., ve Altıntaş, S., “Alüminyum alaşımlarında SIMA prosesiyle tiksotropik yapı elde edilmesi”, **12. Uluslararası Metalurji ve Malzeme Kongresi Bildiriler Kitabı**, İstanbul, Türkiye, 991-998 (2005).

Özer, M., “Yarı-katı Döküm Tekniği İle Üretilen Al-Si Alaşımlarında Yapı-Özellik İlişkisinin İncelenmesi” Doktora Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 8-42 (2010).

Porter, D.A., and Easterling K.E. “Phase transformation in metals and alloys” **CRC Press**, UK, 131 (2001).

Saklakoğlu, İ.E., “SIMA prosesiyle yarı-katı halde küresel mikroyapı oluşumu”, **Metalurji Dergisi**, 138: 53-57 (2004).

Saklakoğlu, N., Çolakoğlu H. ve Gençalp S., “SIMA prosesi ile üretilmiş Al-4Zn-3Mg alaşımında mikroyapı gelişimi”, **Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi**, 6(3): 89-100 (2009).

Salamcı, E., “Spray döküm”, **G.Ü. Fen Bilimleri Dergisi**, 17(2):155-173 (2004).

Seo, P.K., Kim, D.U., Kang, C.G., “The characteristics of grain size controlled microstructure and mechanical properties of Al-Si alloy by thixocasting and rheocasting process” P.K.Seo, , **Journal of processing Technology**, 162-163:570-578 (2005).

Sirong, Y., Dongcheng, L., Kim, N., “Microstructure evolution of SIMA processed AA2024”, **Materials Science and Engineering A**, 420 (1-2):165-170 (2006).

Spencer, D.B., Mehrabian, R. and Flemings, M.C., “Rheological Behavior of Sn-15 pct Pb in the Crystallization Range”, **Metallurgical Transaction A**, 3A:1925-1932 (1972).

Sukimoto, M., Aluminium Technology Proceedings of The International Conference, London, (1986).

Taghavi, F., Ghassemi, A., “Study on the effects of the length and angle of inclined plate on the thixotropic microstructure of A356 aluminum alloy”, **Materials and Design** 30:1762–1767 (2009).

Tietmann, A., Bremer, T., Hirt, G. and Kopp, R., “Preliminary results in thixoforging aluminum wrought alloys”, **Proceedings of Second International Conference on the Semi-Solid Processing of Alloys and Composites**, Massachusetts, USA, 170-179 (1992).

Türkeli, A., “Yarı-katı halde döküm ve şekil verme”, **4. Denizli Malzeme Sempozyumu Bildiriler Kitabı**, Denizli, Türkiye, 335-344 (1991).

Türkeli, A. and Akbaş, N., “Formation of non-dendritic structure in 7075 wrought aluminum alloy by SIMA process and effect of heat treatment”, **Proceedings of Fourth International Conference on the Semi-Solid Processing of Alloys and Composites**, Sheffield, UK, 71-74 (1996).

Türkeli, A., “Yarı-katı durumda döküm şekil verme ve rafinasyon prosesleri”, **Metalurji Dergisi**, 98:37-43, (1995).

Türkeli, A., 7001 dövme alüminyum alaşımından SIMA yöntemiyle tiksotropik malzeme üretimi, **5. Denizli Malzeme Sempozyumu Bildiriler Kitabı**, Denizli, Türkiye, 52-62 (1993).

Tzimas, E., Zavaliangos, A., “Materials Science and Engineering,” A289, 217-227, (2000).

Wang, S., Li, Y., Chen, W., Zheng, X., “Microstructure evolution of semi-solid 2024 alloy during two-step reheating process”, **Transactions of Nonferrous Metals Society of China**, 18 (4): 784-788 (2008).

Wu, C., “A numerical study of high pressure die castind with light alloys”, M.Sc.Thesis , Mechanical and Materials Engineering, **Queen’s University**, Kingston-Ontario, Canada, (2004).

Yang, S.J.J., “Analysis and development of a simple procedure for measuring the rheological properties of thixotropic magnesium alloys”, M.Sc.Thesis,**Queen’s University Mechanical Engineering**, Kingston-Ontario, Canada,1-16 (2004).

Young, K.P., Curtis, P.K. and James, .C., “Fine Grained Metal Composition”, **United States Patent**, Patent No: 4415374, USA (1983).

Zoqui, E.J., Paes, M., Es-Sadiqi, E., “Macro- and microstructure analysis of SSM A356 produced by electromagnetic stirring” **Journal of Materials Processing Technology**, 120: 365–373 (2002).

Zoqui E.J. “Morphological analysis of SSM Al–4.5 wt.% Cu measured by the rheocast quality index”, **Journal of Materials Processing Technology**, 143–144: 195–201 (2003).

Zhang, L., Liu, Y.B., Cao, Z.Y., Zhang, Y.F.,Zhang, Q.Q. “Effects of isothermal process parameters on the microstructure of semisolid AZ91D alloy produced by SIMA”, **Journal of Materials Processing Technology**, 209: 792–797 (2009).

## ÖZGEÇMİŞ

### ***Kişisel Bilgiler***

Soyadı, adı : TANEROĞLU, Hasan  
Uyruğu : T.C.  
Doğum tarihi ve yeri : 20.04.1981 Çorum  
Medeni hali : Evli  
Telefon : 0 (544) 767 37 54  
Faks : 0 (312) 815 10 09  
e-mail : hasan\_taneroglu@hotmail.com.tr

### ***Eğitim***

<b><i>Derece</i></b>	<b><i>Eğitim Birimi</i></b>	<b><i>Mezuniyet tarihi</i></b>
Lisans	Gazi Üniversitesi/ Tek.Eğt.Fak.	2007
Lise	Sultanahmet End. Mes. Lisesi	1998

### ***İş Deneyimi***

<b><i>Yıl</i></b>	<b><i>Yer</i></b>	<b><i>Görev</i></b>
2006-2007	Öz-bil Metal LTD. ŞTİ.	Laborant
2008-2009	Yazkan Müh. LTD.ŞTİ.	Ü. Sorumlusu
2009-.....	Lotus Döküm LTD.ŞTİ.	M. Temsilcisi

### ***Yabancı Dil***

İngilizce

### ***Hobiler***

Müzik dinlemek, Tarihi mekanları gezmek, Döküm teknolojileri.