

# TİKSO-DÖKÜM YÖNTEMİYLE ÜRETİLEN Al2024 ALAŞIMININ MİKROYAPI VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Hasan TANEROĞLU<sup>1</sup>, Neşet AKAR<sup>2</sup>, Volkan KILIÇLI<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Lotus Döküm Makine San. Tic. Ltd. Şti., 06980, Sarayköy, Ankara

<sup>2</sup> Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, 06500, Teknikokullar, Ankara

[taneroğlu.hasan@gmail.com](mailto:taneroğlu.hasan@gmail.com), [nakar@gazi.edu.tr](mailto:nakar@gazi.edu.tr), [vkilicli@gazi.edu.tr](mailto:vkilicli@gazi.edu.tr)

(Geliş/Received: 31.08.2012; Kabul/Accepted: 25.10.2013)

## ÖZET

Bu çalışmada, bir dövme alaşım olan Al2024 alaşımı yarı-katı metal şekillendirme tekniklerinden tiksodöküm yöntemiyle şekillendirilmiş, sıvı oranı ve yaşlandırma ısıl işleminin (T6) mikroyapı ve mekanik özellikler üzerine etkisi araştırılmıştır. Tikso-dökümde gerininin neden olduğu sıvı aktivasyonu (SIMA-Strain Induced Melt Activation) 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 sabit piston hızında mikroyapı ve mekanik özelliklerin değişimi araştırılmıştır. 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 boşluğunu tam olarak doldurulabilmiştir. Tikso-dökümle şekillendirilen numunelerin mekanik özellikleri ekstrüze+T6 koşullarındaki numunelerin mekanik özelliklerinden %45 daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Tikso-dökümle üretilen ve T6 yaşlandırma ısıl işlemi uygulanmış numunelerin mekanik özellikleri ekstrüze haldeki numunelere yakın olduğu belirlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Tikso-döküm, Yarı-katı metal şekillendirme, Al2024 alaşımı, Mikroyapı, Mekanik özellik.

## EXAMINATION OF MICROSTRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF Al2024 ALLOY PRODUCED BY THIXOCASTING

### ABSTRACT

In this study, a wrought Al2024 aluminum alloy formed with thixocasting method which is one of the semi-solid metal forming processes and the effect of liquid fraction and aging heat treatment (T6) on microstructure and mechanical properties has been investigated. Billets produced by strain induced melt activation (SIMA) process were used in thixocasting. 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 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 45% 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.

**Keywords:** Thixocasting, Semi Solid Metal Forming, Al2024 alloy, Microstructure, Mechanical Property.

### 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Yarı-katı metal şekillendirme; karmaşık şekilli parçaların daha az işleme ve daha düşük maliyetle

üretildiği, döküm ve dövme tekniklerinin avantajlarını bir araya getiren bir metal şekillendirme yöntemidir. Bu şekillendirme yönteminde, yarı-katı haldeki alaşımların tiksotropik özelliğinden yararlanılarak

parça üretilir [1]. Tiksootropi, kuvvet altında zamanla viskozitenin sürekli olarak azalması olarak tanımlanır ve kuvvet kaldırıldığında malzeme eski özelliklerine geri döner [2].

Yarı-katı metal şekillendirme yönteminde metal alaşımı sıvı ve katı sıcaklık aralığında bir sıcaklığa (genellikle %30-%70 katı oranına karşılık gelen sıcaklıklara) ısıtılır. Bu sıcaklıkta yarı-katı durumdaki malzeme, döküm yönteminde olduğu gibi kapalı bir kalıpta veya dövme yönteminde olduğu gibi açık bir kalıpta şekillendirilir. Bu işlemin uygulanabilmesi için alaşımın dentritik kollardan bağımsız ve küresel bir mikroyapıya sahip olması gerekmektedir. Eşeksiz ve küresel tane yapısına sahip alaşımlar yarı-katı durumda tiksootropik davranış gösterirler [3, 4].

Alaşımların katılaşma esnasında karıştırılması ile dendritik olmayan hamurumsu halde malzeme üretilmesi ve bu malzemenin sıvı metal gibi doğrudan bir kalıba enjekte edilmesi “reo-döküm” olarak adlandırılmaktadır. “Tikso-döküm” ise önceden hazırlanan küresel mikroyapıya sahip numunelerin tekrar yarı-katı bölgeye ısıtılıp bir kalıba enjekte edilmesi işlemidir [5].

Al2024 alaşımının tiksootropik yapı üretimi ile ilgili ilk çalışma 1983’de K.P. Young ve arkadaşları [6] tarafından yapılmıştır. Bu çalışma SIMA yönteminin patentidir. Bu çalışmada dövme ve döküm alaşımlarında SIMA yöntemi ile tiksootropik 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.

Liu ve arkadaşları [7] Al2014 alaşımını yarı-katı metal şekillendirme yöntemlerinden tikso-şekillendirme yöntemiyle başarıyla şekillendirmişlerdir. Tikso-döküm + T6 ısıl işlemi uygulanmış koşullardaki Al2014 alaşımının mekanik özellikleri dövme + T6 koşullarına çok yakın elde edilmiştir. Tikso-şekillendirilmiş ve T6 ısıl işlemi uygulanmış koşullardaki Al2014 alaşımında %3,6 toplam uzama ile birlikte 219 MPa akma dayanımı ve 283 MPa çekme dayanımı elde ettiklerini bildirmişlerdir.

Dai ve arkadaşları [8] Al2014 alaşımının kimyasal kompozisyonuna benzer AlCu5MnTi alaşımında yarı-katı metal şekillendirme yöntemlerinden biri olan reo-sıkıştırma döküm (rheo-squeeze casting) yöntemiyle şekillendirmişlerdir. Araştırmacılar kalıplama sıcaklığı ve kalıplama basıncının mikroyapı ve mekanik özelliklere etkisini araştırdıkları çalışmalarında, artan kalıplama basıncı ile mekanik özelliklerin (çekme dayanımı ve toplam uzama) iyileştiğini ve reo-sıkıştırma döküm yöntemiyle

şekillendirmede en iyi mekanik özelliklerin 270°C kalıp sıcaklığında elde edildiğini bildirmişlerdir. Araştırmacılar en iyi mekanik özelliklerin T6 ısıl işlem koşullarında (326,5 MPa çekme dayanımı ve %11 toplam uzama) 100 MPa kalıplama basıncı ve 270°C kalıp sıcaklığında elde edildiğini vurgulamaktadırlar [8].

Cho ve Kang [9] AA2024 alaşımının tikso dövme ile şekillendirilmesinde farklı işlem parametrelerine bağlı olarak mikroyapı ve mekanik özelliklerini araştırmışlardır. Araştırmacılar yüksek kalıplama basıncının mekanik özellikleri ve toplam % uzamaya iyileştirdiğini ve tikso dövme ile üretilen numunelerde çekme dayanımının 199-249 MPa arasında olduğu rapor etmektedirler.

Bu çalışmada Al2024 alaşımın tikso-döküm yöntemi ile şekillendirilmesinde yarı-katı sıcaklığın (sıvı oranı) ve yaşlandırma ısıl işleminin (T6) mikroyapı ve mekanik özellikler üzerine etkisi araştırılmıştır.

## 2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR (EXPERIMENTAL STUDIES)

Bu çalışmada Çizelge 1’de kimyasal kompozisyonu verilen ekstrüze halde temin edilmiş Al2024 alaşımı kullanılmıştır.

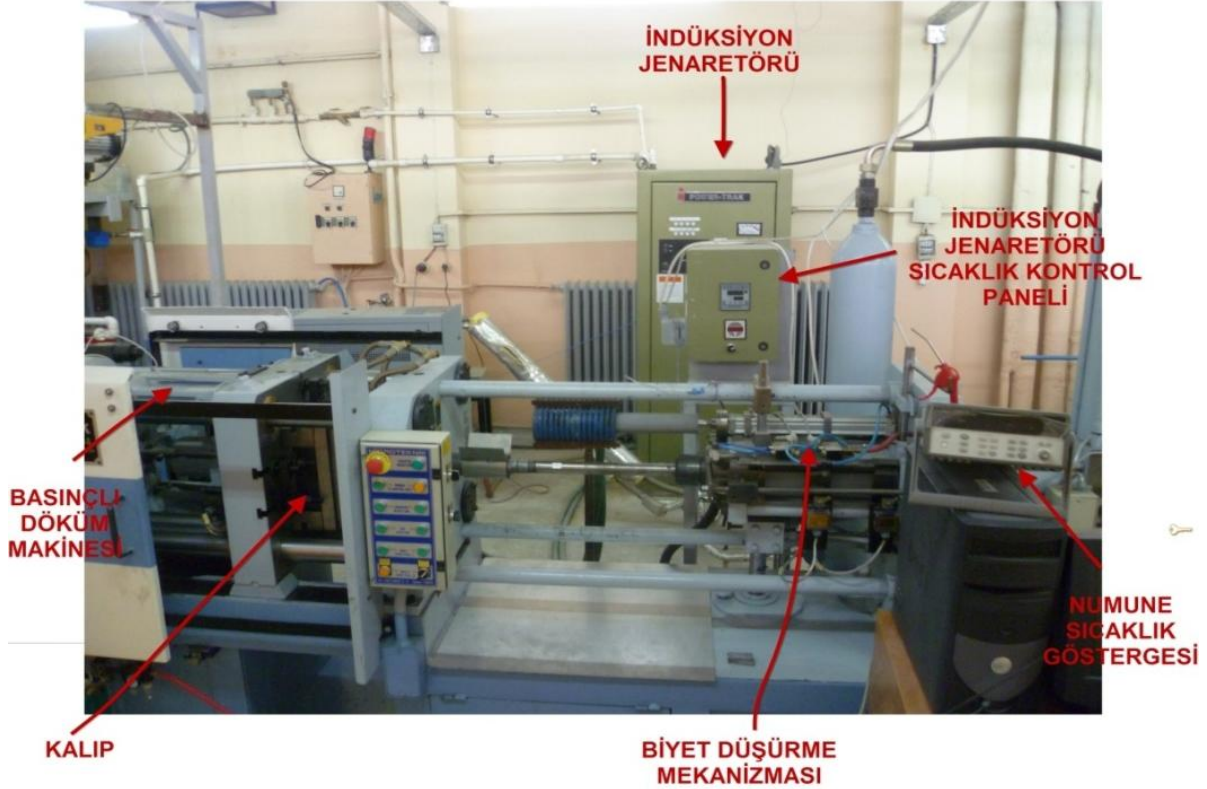
**Çizelge 1.** Al2024 alaşımının kimyasal kompozisyonu (Ağırlıkça %). (The chemical composition of Al2024 alloy (weight-%))

Cu	Mg	Mn	Fe	Zn	Si	Al
4,515	0,913	0,597	0,398	0,236	0,218	Kalan

Yarı katı metal şekillendirmede ön malzeme üretimi SIMA (Strain Induced Melt Activation) yöntemiyle gerçekleştirilmiştir. SIMA yöntemi ile üretilen %30 soğuk deformasyon uygulanmış bilyetler tikso-dökümle şekillendirmede kullanılmıştır. SIMA yöntemi ile ön malzeme üretimi daha önce yapılan çalışmalarda detaylı olarak verilmiştir [10, 11].

Soğuk deformasyon işlemi takiben yüzeyde oluşan kalıntı gerilmelerini ve yüzey pürüzlülüğünü gidermek için numuneler 40 mm çapına ve 55 mm boyuna işlenmiştir. Sıcaklık kontrolünü sağlamak için işlenmiş numunenin düşey konumda tam ortasından ve yüzeyden merkeze 3 mm çapında ısıl çiftlerin yerleştirileceği delikler açılmıştır.

Tikso-döküm işlemlerinde Şekil 1’de görülen yarı-katı metal şekillendirme ünitesi kullanılmıştır. Bu ünite iki bölümden oluşmaktadır. Birinci bölüm basınçlı döküm makinesi, ikinci bölüm indüksiyon ısıtma ünitesidir. Bunlara ilave olarak kalıp ısıtma ünitesi ve ısıtılan bilyeti düşürme mekanizması da bulunmaktadır.



Şekil 1. Yarı-katı şekillendirme ünitesinin görünümü (A view of semi solid processing unit)

Numuneyi sıvı+katı bölgeye (yarı katı bölge) kadar ısıtma işlemi Inductotherm 35 kW ve 9,6 kHz orta frekanslı Power VIP Dual Track Modelli induksiyon jeneratörü ile yapılmıştır. İndüksiyon ünitesi; induksiyon jeneratörü, ertirme potası ve ısıtma bobininden oluşmaktadır.

Tikso-döküm ile şekillendirme işlemi, 150 ton mengene kapatma ve 20 ton enjeksiyon kuvvetine sahip yüksek basınçlı döküm makinesi ile 2,37 m/s enjeksiyon hızında ve 50 MPa enjeksiyon basıncında yapılmıştır.

H13 sıcak iş takım çeliğinden üretilmiş kalıbı ısıtmak için Tool-Temp marka TT288 model 8 kW kalıp şartlandırıcı kullanılmıştır. Kalıp ısı transfer yağı ile 150°C sıcaklığa homojen olarak ısıtılmıştır.

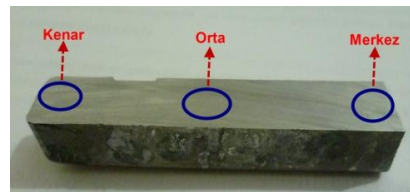
SIMA yöntemiyle üretilen Al2024 alaşım biyetler induksiyon bobini içerisine yerleştirilerek yarı-katı sıcaklık (608 °C, 616 °C ve 619 °C) bölgesine kadar ısıtılmış ve bekleme yapmadan biyet düşürme mekanizması yardımı ile induksiyon bobini içerisinden döküm haznesine düşürülerek çekiç mili yardımıyla kalıba enjekte etmek suretiyle şekillendirilmiştir.

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. Numunenin yarı-katı sıcaklığa ısıtma

işleminde sıcaklık kontrolü dijital sıcaklık göstergesinden sürekli olarak takip edilmiştir. Basınçlı döküm makinesinde şekillendirilen numune kalıp iticileri vasıtası ile kalıptan çıkartılarak oda sıcaklığına kadar havada soğumaya bırakılmıştır.

Metalografik mikroyapı inceleme çalışmaları optik mikroskop ile yapılmıştır. Tikso-dökümle üretilen numuneler boyuna dikey olarak 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.

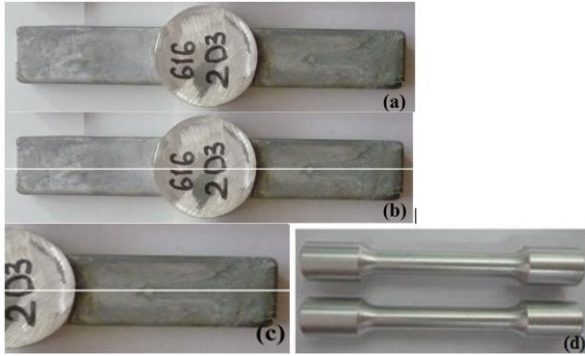
Mikroyapıların karakteristik incelenmesi kenar-orta ve merkez olmak üzere üç ayrı bölgeden yapılmıştır (Şekil 2). Mikroyapıların görüntülenmesinde Leica DFC 320 dijital kamera bağlantılı Leica DM 4000M marka optik mikroskop kullanılmıştır.



Şekil 2. Tikso-dökümle üretilmiş numunenin mikroyapı incelenen bölgeleri (Microstructure examined regions of specimen produced by thixocasting).

Tikso-döküm ile şekillendirilmiş numunelere daha iyi özellik kazandırmak için yapay yaşlandırma ısı işlemi (T6) uygulanmıştır. Bunun için numuneler 495°C sıcaklıkta 12 saat süre ile fırın ortamında bekletildikten sonra oda sıcaklığındaki suda soğutulmuştur. Suda soğutulan numune tekrar 190°C sıcaklıkta 12 saat süre ile yaşlandırılarak T6 ısı işlemine tabi tutulmuştur.

Çekme testleri Instron 3369 model 50 kN çekme ve basma kapasitesine sahip üniversal test cihazında ASTM E8 M standardına göre oda sıcaklığında yapılmıştır. Çekme çubuğu numune hazırlanmasında yarı-katı şekillendirilmiş numuneler (Şekil 3.a) önce boyuna kesilerek iki eşit parçaya ayrılmış (Şekil 3.b) daha sonra her bir parça enine kesilerek toplam 4 eşit parçaya ayrılmıştır (Şekil 3.c). Çekme numunesi ASTM E8 M standardında belirtilen boyutlara göre işlenmiştir (Şekil 3.d).



**Şekil 3.** a) Tikso-döküm ile üretilmiş numune, b) numune boyuna kesilmiş, c) dörde ayrılmış hali, d) işlenmiş çekme çubuğu numunesi (a) The specimen produced by thixocasting, b) the specimen cut across, c) the specimen separated four parts, d) mechined tensile test specimen).

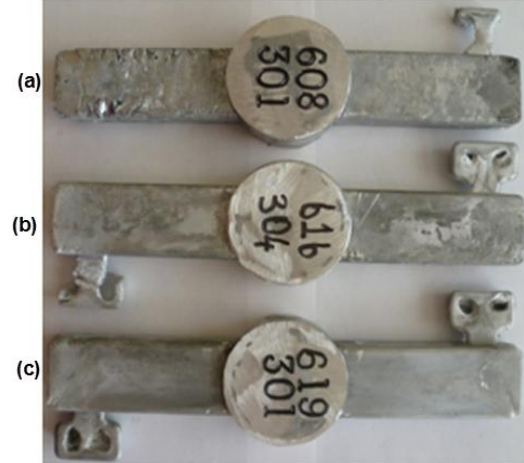
### 3. SONUÇLAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

#### 3.1. Tikso-dökümle Üretilen Numunelerin Kalıp Doldurma Karakteristikleri (Die Filling Characteristics of Specimens Produced by Thixocasting)

Kalıp sıcaklığı 150°C ve 150 ton kapasiteli yüksek basınçlı döküm makinesinde tikso-döküm yöntemiyle şekillendirilmiş numunelerin görünüşleri Şekil 4'de verilmiştir. 608°C sıcaklıkta %50 sıvı oranı ile her iki deformasyon oranında da kalıp tam olarak doldurulamamıştır (Şekil 4.a). %60 ve %65 sıvı oranına sahip 616°C ve 619°C sıcaklıklardaki numuneler kalıbı başarılı bir şekilde tam doldurmuştur.

Al2024 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 mikroyapı ve mekanik özellikleri incelenmiştir.

%50 sıvı oranına sahip yarı-katı haldeki numunenin kalıbı tam olarak dolduramamasının nedenlerinden biri kalıp sıcaklığının yeterli olmamasıdır. Nitekim araştırmacılar [8,9] tikso-şekillendirme çalışmalarında AA2024 alaşımı için en az 270-350 °C olması gerektiğini bildirmektedirler. Bu çalışmada kullanılan akışkan ısıtmalı kalıp şartlandırıcı ile kalıp en fazla 150°C'ye ısıtılabilmiştir.



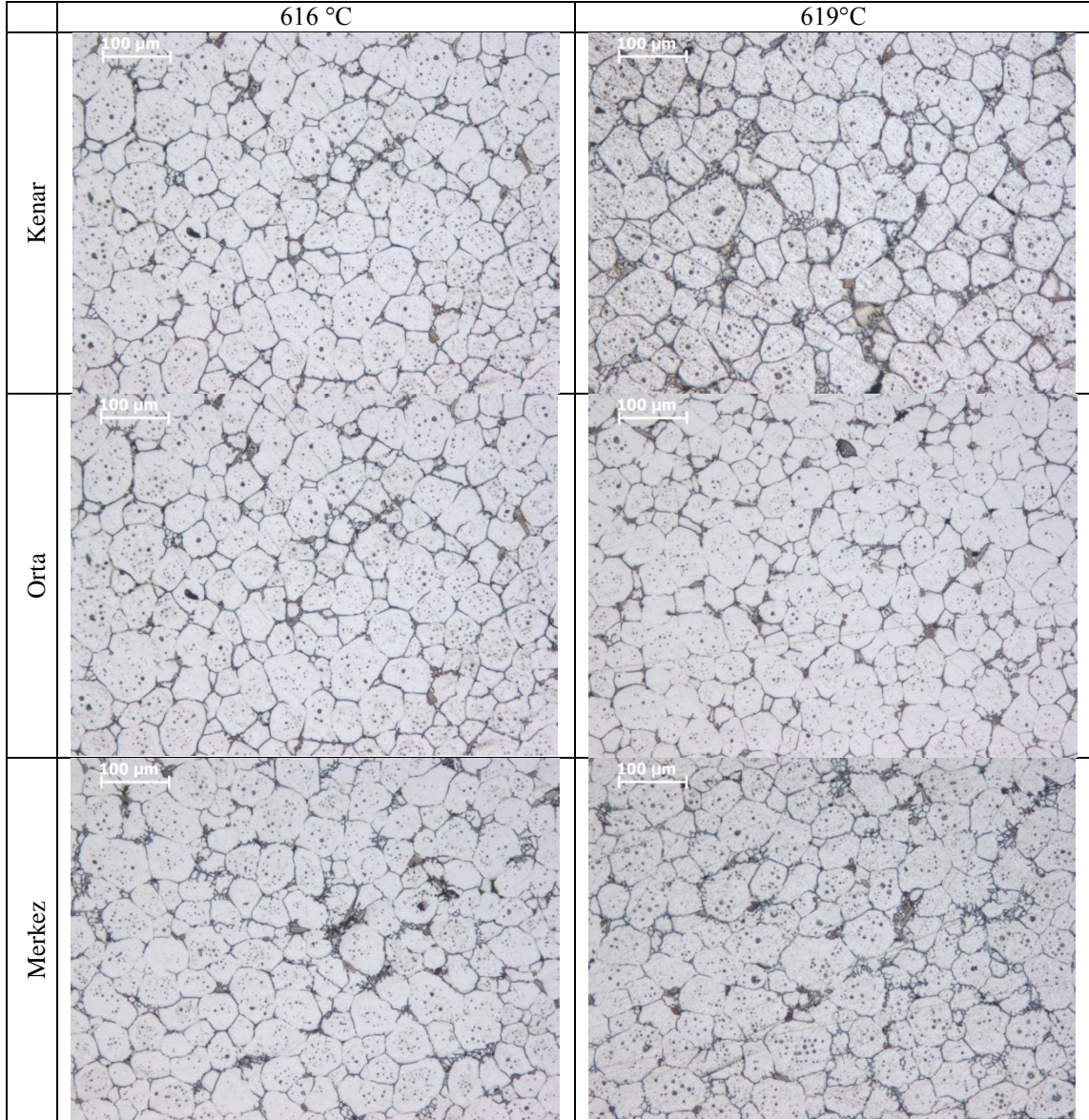
**Şekil 4.** Tikso-döküm ile üretilen numunelerin görünümü (A view of specimens produced by thixocasting).

#### 3.2. Mikroyapısal İnceleme (Microstructural Examination)

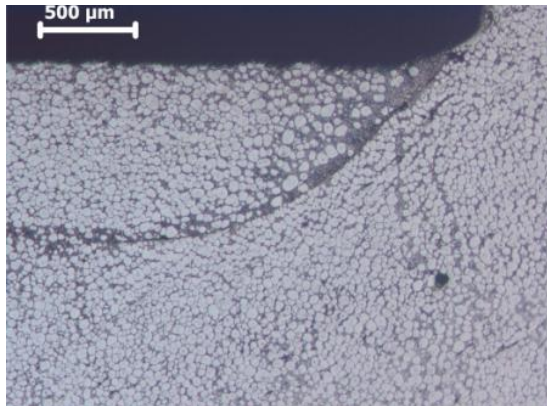
SIMA yöntemiyle üretilmiş biyetlerden 616°C ve 619°C yarı-katı sıcaklıklarda, numuneler tikso-dökümle şekillendirme sonrası mikroyapıları incelenmiştir (Şekil 5). SIMA yöntemiyle üretilmiş biyetlerden 616°C ve 619 °C sıcaklıklarda tikso-dökümle üretilen numunelerin mikroyapılarının birbirlerine benzer olduğu ve aralarında belirgin bir fark olmadığı tespit edilmiştir. Yapının tamamen yeniden kristalleşmiş, küresel, ince ve eşeksenli tanelerden oluştuğu tespit edilmiştir. SIMA yöntemiyle üretilmiş biyetlerde çok sayıda yeniden kristalleşme için yeterli çekirdeklenme potansiyeline ulaşıldığı ve bu şekilde küçük tanelerin yeniden kristalleşmiş taneler olduğu düşünülmektedir.

Tikso-döküm yöntemi ile üretilmiş dökümlerin kalıbın keskin köşelerindeki alanlarda sıvı segregasyonu oluştuğu görülmüştür (Şekil 6). Yarı-katı sıcaklıktaki alaşımların çift fazlı yapıda olması, basıncın etkisiyle birbirinden ayrışmasına neden olmaktadır. Bu sıvı faz yarı-katı haldeki alaşımın vizkositesini düşürerek akışkanlığını artırmıştır. Kalıbın keskin köşelerinde fazla basınca maruz kalan numunelerde sıvı segregasyonu oluştuğu düşünülmektedir. Kalıptaki keskin köşelerde ve kalıp duvarlarına yakın bölgelerde sıvı segregasyonunun oluştuğunu diğer araştırmacılar da tespit etmişlerdir [12-14]. Tikso-dökümdeki sıvı segregasyonu, optimum yolluk sistemi (yolluk kesit alanlarındaki değişikliği) tasarımı, keskin köşelerin yuvarlatılması ve katı oranının artırılması ile önlenmektedir [14, 15].





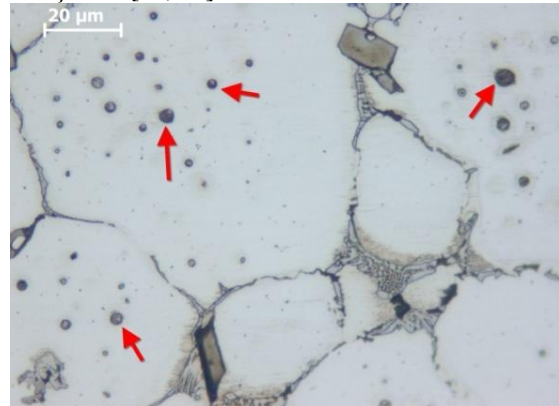
**Şekil 5.** 616°C ve 619 °C'de tikso-dökümle şekillendirilen numunelerin mikroyapıları (Microstructures of specimens formed by thixocasting at 616°C and 619 °C).



**Şekil 6.** Numunelerin keskin köşelerinde sıvı segregasyonu (The liquid segregation at sharp corner of the specimen).

Tikso döküm yöntemi ile şekillendirilmiş numunelerin incelenmesinde tane sınırları arasındaki sıvıların, tane sınırlarının hareketinden kaynaklanan

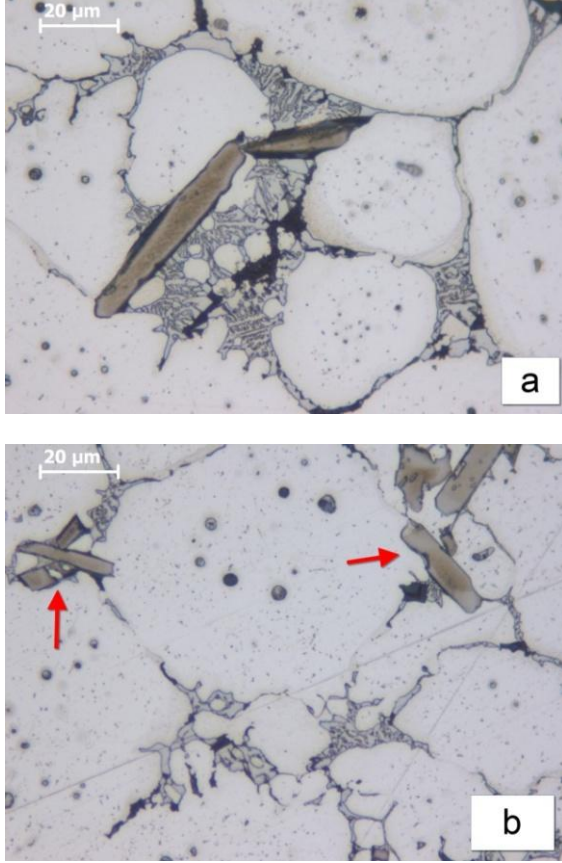
tane birleşmesi tanelerin içinde küçük sıvı havuzcuklarını oluşturdukları gözlemlenmiştir (Şekil 7). Daha önce yapılan çalışmalarda da araştırmacılar tikso dökümde sıvı havuzcuklarının oluştuğunu tespit etmişlerdir [13, 16]



**Şekil 7.** Numunelerde sıvı havuzcuk oluşumu (The liquid pool formation in the specimens).



Tane sınırlarındaki sıvı bölgelerde ötektik katılaşma meydana gelmiştir. Tane sınırlarında aynı zamanda metallerearası bileşiklerin olduğu görülmüştür (Şekil 8). Metallerearası bileşikler tane sınırlarına çökerek tane büyümesini engellemiştir.



**Şekil 8.** Numunelerde ötektik yapı ve metallerearası bileşikler (The eutectic and intermetallic compounds in the specimens).

### 3.3. Çekme Test Sonuçları (Tensile Test Results)

Farklı sıcaklıklarda SIMA yöntemiyle üretilmiş biyetlerde %60 ve %65 sıvı oranları (616°C ve 619°C sıcaklıklarda) ve 2,37 m/s piston hızında tikso şekillendirilmesi ile elde edilen numunelerin, tikso döküm sonrası T6 yaşlandırma ısıl işlemi uygulanmış numunelerin ve ekstrüze+T6 haldeki numunelerin çekme test sonuçları Çizelge 2’de verilmiştir.

**Çizelge 2.** Tikso-dökümle üretilen numunelerin çekme test sonuçları (ortalama değerler) (Tensile test results of specimens produced by thixocasting (average values))

Şekillendirme Sıcaklığı	%0,2 Akma Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Toplam Uzama (%)
616 °C	136,5	244,1	5,6
619 °C	133,6	246	7,1
T6 Isıl işlemi sonrası çekme test sonuçları			
616 °C	159,3	284,4	6,5
619 °C	156,3	313,9	9,7
Ekstrüze+T6 haldeki numunenin çekme test sonuçları			
Ekstrüze	198,7	445,6	15

Tikso-döküm yöntemi ile şekillendirilen numunelerin çekme test sonuçları dikkate alındığında 616°C ve 619°C sıcaklıklarda şekillendirme sonrası akma dayanımları sırası ile 133; 136 MPa ve çekme dayanımları sırası ile 244; 246 MPa arasında olup birbirine çok yakın olduğu görülürken % uzama değerleri 5,6; 7,1 olarak elde edilmiştir. Bunun nedeni 619°C’de şekillendirmede daha yüksek sıvı oranının kalıp boşluğunu daha iyi doldurmasına ve homojen şekillendirme sağlamasına bağlanmaktadır [17].

Tikso-döküm yöntemi ile üretilen ve ardından T6 yapay yaşlandırma ısıl işlemi uygulanan numunelerin çekme test sonuçları incelendiğinde akma ve çekme dayanımlarının birbirine çok yakın olup çok belirgin bir fark gözlenmemiştir (Çizelge 2). Tikso-döküm+T6 koşullarındaki numunelerin yarı-katı şekillendirme sıcaklığına bağlı akma dayanımları sırası ile 156; 159 MPa, çekme dayanımları 284; 313 MPa ve toplam % uzama değerleri sırası ile 6,5; 9,7 arasında değişmektedir. Ekstrüze + T6 haldeki numunenin çekme özellikleri tikso-dökümle üretilen ve T6 yapay yaşlandırma ısıl işlemi numunelerin çekme özelliklerinden daha yüksek sonuç vermiştir (Çizelge 2). Akma dayanımı yaklaşık %20, çekme dayanımı %30 ve toplam uzama değeri %35 daha düşük elde edilmiştir. Bu çekme özellikleri sonucuna göre tikso-dökümle üretilmiş Al2024 alaşımı, ekstrüze+T6 koşullarındaki parçaların yerine ikame edilebilir.

Tikso-dökümle üretilen numunelerin çekme özelliklerinin ekstrüze+T6 koşullarına göre düşük çıkması mikroyapısal hatalara ve kalıp sıcaklığına bağlanmıştır (Şekil 9-10). Döküm koşullarında mikroyapıda oluşan sıvı havuzcuğu, sıvı segregasyonu, mikro-gözenek, mikro-çekme ve mikrosegregasyon gibi yapısal hataların sonucunda çekme özellikleri düşük çıkmıştır. Ancak bu gibi yapısal hataların giderilmesinde uzun süreli çözeltiye alma ve yaşlandırma ile çökelti mukavemetlenmesinde dayanım artışı görülmüştür (Çizelge 2). Tikso-dökümle şekillendirilmiş numunelerin toplam % uzamasının daha düşük olmasının nedeni mikroyapıda tane sınırlarındaki metallerearası bileşiklere bağlanmaktadır. Benzer sonuçlar diğer araştırmacılar tarafından da rapor edilmiştir [14, 18].

## 4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada SIMA yöntemiyle üretilen Al2024 alaşımına ait biyetler tikso-döküm yöntemiyle şekillendirilmiştir. Şekillendirme işlemi biyetlere %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. Al2024 alaşımının, SIMA yöntemi ile %30 soğuk deformasyon uygulandıktan sonra %60 ve %65 sıvı oranlarına karşılık gelen sıcaklıklarda ve 2,37 m/s piston hızında tikso-dökümle başarıyla şekillendirilebildiği tespit edilmiştir.
2. Tikso-döküm yöntemiyle üretilmiş numunelerde kalıbın keskin köşelerinde ve geniş bölgelerin sıvı segregasyonun meydana geldiği gözlemlenmiştir.
3. Yarı-katı şekillendirmede metallerearası bileşikler bazı tanelerin etrafını çevreleyerek tanelerin büyümesine engellediği tespit edilmiştir.
4. Tikso-dökümle şekillendirilmiş numunelerin akma dayanımı 133-136 MPa arasında akma dayanımı ve 244-246 MPa arasında çekme dayanım değerlerinin birbirine çok yakın olduğu görülürken % uzama 5.6- 7.1 arasında değişmiştir.
5. Tikso-döküm+T6 koşullarındaki numunelerin akma dayanımı 156-159 MPa, çekme dayanımı 284-313 MPa ve toplam uzama değeri %6,5-9,7 arasında gerçekleşmiştir.
6. Tikso-dökümle üretilen numunelerin T6 yaşlandırma ısı işleminden sonra mekanik özelliklerinde artış olduğu tespit edilmiştir.
7. Mekanik özelliklerde ekstrüze+T6 koşullarındaki Al2024 alaşımının mekanik özelliklerini elde etmek için 150°C'den daha yüksek kalıp sıcaklığında çalışılmalıdır.

#### TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu çalışmayı destekleyen Devlet Planlama Teşkilatına (2003K-120470-27) ve Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimine (07/2010-34) teşekkür ederiz.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. 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.T
2. Tzimas, E., "Evolution of microstructure and rheological behavior of alloys in the semi solid state", Ph.D. Thesis, **Drexel University, USA**, 1-12, 1997.
3. Spencer, D.B., Mehrabian, R. and Flemings, M.C., "Rheological Behavior of Sn-15 pct Pb in the Crystallization Range", **Metallurgical Transaction A**, Cilt 3A, 1925-1932, 1972.
4. Flemings, M.C., Riek R.G. and Young K.P., "Rheocasting", **Materials Science and Engineering**, Cilt 25, 103-117, 1976.
5. Kirkwood, D.H., "Semisolid metal processing" **International Materials Reviews**, Cilt 39, 173-189 1994.
6. Young, K.P., Curtis, P.K. and James, C., "Fine Grained Metal Composition", **United States Patent**, Patent No: 4415374, USA, 1983.
7. Liu, D., Atkinson, H.V., Kapranos, P., Jirattiticharoean, W., Jones, H., "Microstructural

- evolution and tensile mechanical properties of thixoformed high performance aluminium alloys", **Materials Science and Engineering A**, Cilt 361, 213-224, 2003.
8. Dai, W., Wu, S., Lü, S., Lin., C, " Effects of rheo-squeeze casting parameters on microstructure and mechanical properties of AlCuMnTi alloy", **Materials Science and Engineering A**, Cilt 538, 320-326, 2012.
9. Cho, W.G., Kang, C.G. "Mechanical properties and their microstructure evaluation in the thixoforming process of semi-solid aluminum alloys" **Journal of Materials Processing Technology**, Cilt 105, 269-277, 2000.
10. Akar, N., "The effect of reheating temperature on the production of thixotropic structure with SIMA process in AA2024 alloy", **Journal of The Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University**, Cilt 26, 381-388, 2011.
11. Akar, N., Mutlu, I., "Effect of Predeformation Rate in SIMA Process on Thixotropic Structure of AA2024 Aluminium Alloy", **Journal of The Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University**, Cilt 25, 663-670, 2010.
12. Mat, M., "Yarı-katı metal eriyiklerin karakteristiklerinin incelenmesi" **TÜBİTAK Proje Raporu, MİSAG-124**, Niğde, 4-5, 2001.
13. Chayong, S., Atkinson, H.V. and Kapranos, P., "Thixoforming 7075 aluminium alloys", **Materials Science and Engineering A**, Cilt 390, 3-12, 2005
14. Kılıçlı, V., "Yarı-Katı Döküm Tekniği ile Üretilen Al-Zn Alaşımında Yapı-Özellik İlişkisinin İncelenmesi", Doktora Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 9-45, 2010.
15. 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**, Cilt 39, 1213-1224, 2008.
16. 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**, Cilt 39, 99-105, 2004.
17. Kılıçlı, V., Akar, N., Erdoğan, M., and Kocatepe, K., "Microstructural Investigation of Casting Defects in AA7075 Alloy Produced by Thixocasting", **International Virtual Journal of Machines, Technologies, Materials**, Cilt 9, 25-29, 2012.
18. 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, Cilt 2, 1415-1420, 1997.

