

# TİCARİ SAF ALÜMİNYUMUN YÖNLÜ KATIŞTIRILMASI İÇİN DÜZENEK GELİŞTİRİLMESİ

**K. Kunt TÜZÜNALP, İlker ÜNALAN\*, Yusuf Tolga ÖKSÜZ\*\* ve Kadir KOCATEPE**

Teknik Eğitim Fakültesi, Gazi Üniversitesi, 06500-Beşevler, Ankara

\*Güven Başarı Sitesi, 195. Sokak, No 118, 06370-Batıkent Ankara

\*\*Dirinler Döküm, Atatürk Organize Sanayi Bölgesi, 10006. Caddesi, No 57, 35620, İZMİR

[tuzunalp@gazi.edu.tr](mailto:tuzunalp@gazi.edu.tr), [ilkerunalan@hotmail.com](mailto:ilkerunalan@hotmail.com), [yusuftolgaoksuz@hotmail.com](mailto:yusuftolgaoksuz@hotmail.com), [kadirkgazi.edu.tr](mailto:kadirkgazi.edu.tr)

(Geliş/Received: 16.04.2009 ; Kabul/Accepted: 16.10.2009)

## ÖZET

Bu çalışmada alüminyum alaşımlarının yönlü katılaştırılabilmesi için doğru sıcaklık kontrolü sağlayabilecek bir deney düzeneği kurulmuştur. Hazırlanan düzeneğin üzerinde sıcaklık kontrolünün sağlanabilmesi amacıyla hareketli ısı bariyeri, soğutucu ısıtma fırını ve soğutma sistemi entegre edilmiştir. Deney düzeneğinin kalibrasyonu için sıcaklık haritası çıkarılmıştır. Sıcaklık haritası sonuçlarına göre fırının farklı konumlarında kalıp içinde 2,5–4,8°C/cm aralığında sıcaklık gradyan değerleri elde edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Yönlü katılma, alüminyum.

## A SYSTEM DEVELOPMENT FOR DIRECTIONAL SOLIDIFICATION OF COMMERCIALY PURE ALUMINUM

### ABSTRACT

An experimental apparatus which can provide an accurate temperature control was constructed for directional solidification of aluminium alloys. A moving heat barrier, a chill heater and a cooling system was integrated to the system for temperature control purpose. Temperature map was achieved in order to calibrate the apparatus. The results of the temperature map showed that 2.5-4.8°C/cm temperature gradients were obtained in the mold at various positions of the furnace.

**Keywords:** Directional solidification, aluminum.

### 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Bridgman yönlü katılma tekniği döküm alaşımlarının tek yönlü ısı akış koşullarında katılaştırılabilmesi için yaygın biçimde kullanılmaktadır. Bridgman sisteminde katılaştırılmış metal malzemelerde mikro ve makro yapı kontrolü ile mekanik özelliklerde iyileşme sağlanmaktadır [1-3]. Geleneksel döküm yöntemlerinin aksine, Bridgman tekniğinde çekirdeklenme tek bir sıvı-katı ara yüzeyinden başlatılır ve kristaller uygun bir sıcaklık gradyanı yardımıyla tek yönde büyütülür.

Tek yönlü tane büyümesinin sağlanabilmesi amacıyla, su soğutmalı bir soğutucu üzerine yerleştirilmiş silindirik şekilli bir kalıbın içinde yer alan metalik bir alaşım, sabit bir sıcaklık gradyanı altında sabit bir

kalıp ilerleme hızında fırın içindeki sıcak bölgeden soğutma alanına doğru çekilmelidir. Bu çekilme sırasında kalıbın alt bölgeleri soğutucunun etkisiyle soğuk, fırın içinde kalan üst bölgeleri ise sıcak olur ve alt-üst bölgeler arasında bir sıcaklık gradyanı oluşur. Bu sıcaklık gradyanı altında, katılmanın kalıp tabanından başlayarak dikey yönde üst bölgelere doğru ilerletilmesi numune boyunca düzgün yönelmiş bir tane yapısı üretir [4-6]. Bridgman sistemleri kullanılarak yatay veya dikey yönde kristal büyütülebilir [7].

Katılmanın olabilmesi için ısının kalıbın dışına taşınması gereklidir. Sıvı metal katılma sıcaklığına kadar soğutmalı ve ilerleyen sıvı-katı ara yüzeyinde oluşan ergime gizli ısı sistem dışına verilmelidir [4,5]. Mikro yapının gelişimi ise, ergime gizli ısısının

ilerleyen sıvı-katı ara yüzeyinden hangi şekilde uzaklaşığına bağlıdır [8]. Burada serbest büyüme ve zorlanmış büyüme olmak üzere iki farklı ısı çıkış şartı vardır [9,10]. Serbest büyüme koşulunda katılma alt soğumaya uğramış bir eriyik içinde gerçekleşir. Ergime gizli ısısı ise sıvı üzerinden dış ortama transfer edilir. Zorlanmış büyümede ise ergime gizli ısısı katılma metal üzerinden sistem dışına taşınır [5] ve sıvı-katı ara yüzeyinin önündeki sıvı içindeki sıcaklık gradyanı pozitifdir. Zorlanmış büyüme tarzı yönlü katılma için gerekli koşulu oluşturur [8]. Bridgman sisteminde yüksek ve pozitif bir sıcaklık gradyanı altında kararlı bir sıvı-katı ara yüzeyinin büyümesi gözlenir. Büyüme hızının çok yüksek olmadığı durumlarda, ısı akışı ve tane büyüme hızı yönde ilerlerler. Fırın ilerleme hızı ile büyüme hızının senkronize edilmesi mutlaka gerekli değildir ve sıcaklık gradyanı, G, ayrıca kontrol edilmelidir [4].

Metalik malzemelerin tek yönlü ısı akışı altında zorlanmış biçimde katılaştırılması, döküm makro yapısı üzerinde tanelerin belirgin bir biçimde yönelmesine yol açmaktadır [11,12]. Mikro yapıda ise, dendrit veya hücrelerin yönelmesi ile alaşım sistemlerinde ikinci fazın yönelmesi sağlanmaktadır [13,14,15].

Bridgman tipi düzeneklerin bazı dezavantajları da rapor edilmiştir. Bu sistem sıcaklık kontrolünün sağlanabilmesi amacıyla ancak yeterince küçük numune çapları için kullanılabilir. Bu yöntem kullanıldığında işlem süresi yavaş gerçekleşir ve pozitif sıcaklık gradyanını işlem sırasında koruyabilmek için sıvıya sürekli ısı verilmelidir. Bu nedenle Bridgman sistemleri yüksek maliyet oluşturan özellikleri nedeniyle daha çok araştırma çalışmaları için kullanılabilir [4].

Katılmanın başlangıç ve bitiş aşamalarında sıvı-katı ara yüzey ilerleme hızında artış veya azalma oluşabilir. Bu nedenle katılma işlemi sırasında sıvı-katı ara yüzey hızının sabit tutulabilmesi zordur. Ara yüzey hız değişiminin sonucu olarak kalıbın fırından yüksek hızlarda çekildiği durumlarda kalıp hızı ile katılma hızı senkronize olamamaktadır [15]. Bu hız ancak çok yavaş katılma şartlarında yaklaşık olarak sabit tutulabilmektedir [5]. Hızlı katılma durumunda ise tane büyüme hızı değişkendir. Katılma başlangıcından itibaren büyümenin kararlı şekilde (steady-state) gerçekleşebilmesi için belli bir zaman ve mesafe geçmesi gereklidir [16].

Bridgman yönteminde kullanılan tüp şekline sahip fırınlarda ısı kalıba radyal şekilde sağlanmaktadır [17]. Büyük kalıp çapları için kalıp merkezi ile dış duvarı arasında sıcaklık farkları ortaya çıktığından eriyik ve büyüyen taneler üzerinde radyal sıcaklık gradyanları ortaya çıkmasına yol açabilir. Bu sorunun çözümü için 35mm çapında silindirik şekilli numunenin sabit büyümesinde daldırılmış ve sıvı içinde hareket eden ısıtıcı yöntemi önerilmiştir [17]. Ancak bu büyüklükteki bir numune içinde bir ısıtıcıyı hassas

biçimde hareket ettirecek sistemin işletilebilmesi yüksek maliyet gerektirecektir.

Tek yönlü katılma düzeneğinde bulunması gereken temel elemanlar aşağıda verilmiştir.

1. İstenen sıcaklık gradyanını sağlayabilecek bir fırın,
2. Uygun geometriye sahip bir kalıp,
3. Verimli bir kalıp soğutma sistemi
4. Sıcaklık kontrol sistemi [6].

Bu çalışmada, yukarıda açıklanan dezavantajların bir bölümü giderilerek, olabildiğince optimize edilen elemanların kullanılmasıyla tek yönlü bir katılma düzeneği inşa edildi. Düzenek üzerinde kaynak [17]'de kullanılan ve ticari boyutları temsil edebilecek numune boyutu esas alındı. Daldırılmış ısıtıcı kullanılmadan ısı şartlarının olabildiğince sıkı kontrol edilebileceği bir sistem oluşturuldu. Bu sistem sabit kalıp-hareketli fırın prensibine dayalı olarak inşa edildi. Hareketli fırın ile senkronize hareket eden bir ısı perdesi, soğutucu başlangıç sıcaklığını ayarlayan ısıtma fırını ve soğuk-sıcak ara bölgeleri birbirinden izole edebilecek bir fırın tabanı tasarımı sisteme ilave edildi. Soğutma sisteminde dolaşan akışkanın verimli şekilde soğutulması amacıyla termik santrallerde kullanılan soğutma sisteminin küçültülmüş bir benzeri oluşturuldu.

Düzenek kurulmasından sonra sistemin sıcaklık haritası çıkarılarak genel karakteri belirlendi. Sıcaklık haritasının çıkarılması amacıyla ısı çift tarama yöntemi [18] kullanıldı.

## 2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR (EXPERIMENTAL RESEARCH)

Döküm alaşımların tek yönlü katılaştırılması için kullanılan Bridgman sistemleri oldukça yüksek maliyetlidir. Bu nedenle, bu çalışmada hafif alaşımların yönlü katılaştırılması için düşük maliyetli ancak minimum yönlendirme koşullarını sağlayabilmesi amaçlanan bir deney düzeneği hazırlanmıştır. Düzenek hazırlanmasında aşağıda verilen ölçütler dikkate alınmıştır.

1. Hazırlanan düzenek maliyetinin düşük seviyede olması ve ticari ortamda kolaylıkla bulunabilecek malzemeler ile imal edilebilmesi.
2. Düzenek kullanımındaki toplam enerji kullanımının minimum seviyede tutulması.
3. Kullanılan numune çapının ticari döküm boyutlarına yakın olması.
4. Düzenek üzerinde bu düşük maliyet ile elde edilebilecek en yüksek sıcaklık kontrolünün sağlanabilmesi.

Düzenek üzerinde katılma sırasındaki yönlendirme işlemi, bir soğutucu üzerine yerleştirilmiş sabit bir kalıp çevresindeki hareketli fırının yukarı yönde kaldırılması ile sağlanmaktadır. Kalıbın sabit tutularak

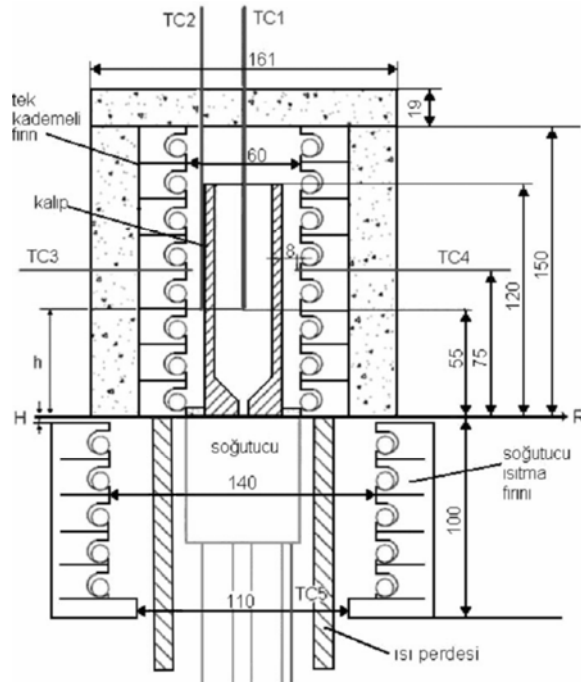
fırının hareket etmesi prensibi hareketli kalıp-sabit fırın kullanılan Bridgman yönteminin tersidir ve daha önceki çalışmalarda gaz türbin kanatlarının üretimi [19] ve yönlü katılma amacıyla [20] kullanılmıştır. Bu sistemin en önemli avantajı, kalıbın sabit durması nedeniyle herhangi bir titreşime maruz kalmaması ve fırının kalıptan bağımsız hareket etmesi nedeniyle yüksek hassasiyete sahip belirgin bir titreşim oluşturmayan bir kaldırma sisteminin oluşturulmasına gerek bulunmaması şeklinde verilebilir.

Şekil 1’de gösterilen deney düzeneğinin fiziksel özellikleri ticari saflık derecesinde (Ek-1) alüminyum metalinin yönlü katılaştırılması dikkate alınarak hazırlandı. Düzenek tasarımı, ısının kalıp içinden tek yönde alınması prensibine göre yapılmakla birlikte Bridgman sistemlerinde kullanılan temel elemanlardan farklı bazı parçalar ilave edildi. Sıcaklık kontrolünün sağlanmasını amaçlayan bu parçalar fırın ile birlikte hareket eden ısı perdesi, soğutucu ön ısıtma fırını ve daha etkinleştirilmiş bir soğutma sistemidir. Düzeneğin temel bölümleri aşağıda sıralanmıştır.

1. Fırın ve ısı perdesi
2. Fırın kaldırma mekanizması
3. Bakır soğutucu ve soğutucu ısıtma fırını
4. Yönlü katılma kalıbı
5. Sıcaklık kontrol sistemi
6. Soğutma sistemi
7. Isıl çift asansörü

## 2.1. Fırın ve Isı Perdesi (The Furnace and The Heat Barrier)

Sistem üzerinde beklenen sıcaklık gradyanını üretmek için yeterli olan tek kademeli bir fırın ve fırın ile bir-



Şekil 1. Deneylerde kullanılan deney düzeneğinin şematik gösterimi ve ölçüleri (mm) (Schematic representation and dimensions of the experimental setup)

likte hareket eden ısı perdesi tasarlanmıştır. Bridgman yönteminin aksine, bu çalışmada kullanılan sistem üzerinde kalıp sabit fırın ise hareketli tutulmuştur. Kalıp dışında dikey olarak hareket eden bir rezistans fırını konumlandırılmıştır. Bu fırın yukarı yönde ilerledikçe kalıbın açığa çıkan bölgelerinde soğuma oluşmakta ve fırının ilerlemeye devam etmesiyle bu soğuk bölge yukarı yönde ilerlemektedir. Fırın, 1200°C maksimum kapasiteye sahip, 1000°C sıcaklıkta sürekli çalışabilen ve bilinen bir ticari rezistans malzemesi kullanılarak imal edilmiştir. Fırına gerekli hallerde değiştirilebilir bir rezistans elementi uygulanmıştır. Çalışma voltajı 220V, toplam tel direnci 22Ω ve bu değerlere bağlı olarak toplam gücü 2200W’dır. Bu fırının yapılan denemelerde 350-400gr ticari saflıkta alüminyum malzemeyi 2 saat 30 dakika sürede 1000°C sıcaklığa ulaştırabildiği gözlenmiştir. Kalıp içindeki numune üzerinde yüksek sıcaklık gradyanı oluşturabilmek için 60mm iç çapa sahip fırın ile kalıp arasındaki açıklık fırının yukarı hareketini engellemeyecek en düşük seviye olan 5mm değerinde tutulmuştur.

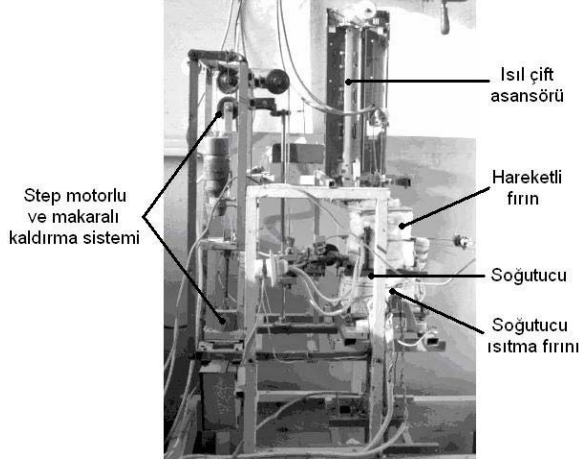
Isı iletim katsayısı düşük olan ve özellikleri EK-2’de verilen LOD-607 refrakter malzemeden imal edilen bir ısı perdesi, yan bölgelerden ısı çıkışına karşı direnç oluşturmak, sıvı metal içinde radyal sıcaklık gradyanı oluşumunu azaltmak ve sıvı-katı ara yüzünün olabildiğince sabit bir hızda büyümesini sağlamak amacıyla fırın tabanına entegre edilmiştir (Şekil 1). Bir ısı valfi şeklinde görev yapması düşünülen ısı perdesinin düzenek üzerinde yer alan fırın yukarı yönde kaldırıldığında fırın ile birlikte hareket ederek kalıbın doğrudan hava ile temasını ve katılma sırasında çekirdeklenmenin kalıp duvarından başlamasını engelleyebileceği öngörülmüştür. Bu düzenekte kullanılan ısı perdesi klasik Bridgman sistemlerinde mevcut değildir.

## 2.2. Fırın Kaldırma Mekanizması (Furnace Removal Mechanism)

Literatür incelemesinde, Bridgman katılaştırma sistemlerinde kalıp hareketini sağlamak için sınırlı sayıda hız kademesine sahip mekanik dişli kutuları [5,19,21] veya hidrolik sistemlerin [13] kullanıldığı görülmüştür. Sadece iki çalışmada [14,22] geniş aralıkta değişken hızlı bir sistem kullanılmıştır. Bu çalışmada ise, yüksek maliyet ve sınırlı hız oranlarına sahip olan hidrolik ve mekanik sistemlerin yerine geniş aralıkta değişken hız sağlayan bilgisayar kontrollü step motor tercih edilmiştir.

Bilgisayar kontrollü step motorlu bir kaldırma mekanizması daha önce yönlü katılma amacıyla kullanılmıştır [23]. Bu çalışmada, kaynak [24]’de kullanılan sistem hassasiyet açısından geliştirilerek yeni oluşturulan deney düzeneğine uygulanmıştır. Bu mekanizmanın temel özelliği önceki yayınlarda [5,19,21] belirtildiğinin aksine kaldırma hızının daha geniş

oranda değiştirilebilmesidir. Burada bilgisayar yardımı ile kontrol edilen step motor bir sonsuz vidaya doğrudan bağlanmıştır. Bu sonsuz vida üzerinde çalışan kızak sistemi bir kabloyu aşağıya doğru çekmektedir. Bu kablo bir makara sistemi ile fırının hareket etmesini sağlayan taşıyıcıya bağlanmıştır. Bu taşıyıcı hassas bir dikey mil üzerinde rulmanlar üzerinde yataklanarak titreşimler en düşük seviyede tutulmaya çalışılmıştır (Şekil 2).



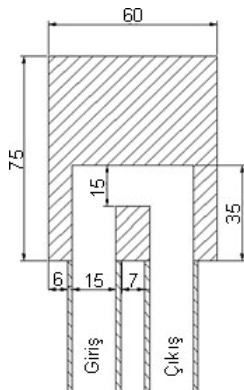
Şekil 2. Yönlü katılaşma düzeneğinin genel görünümü (General view of the directional solidification apparatus)

### 2.3. Bakır Soğutucu ve Soğutucu Isıtma Fırını (Copper Chill and Chill Heating furnace)

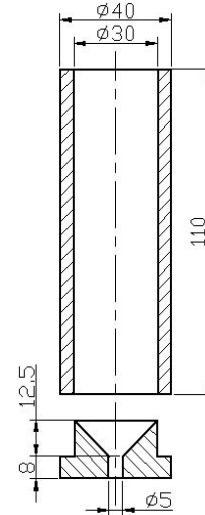
Soğutma etkisinin artırılması amacıyla önceden ekstrüzyon işlemi uygulanmış bir bakır malzeme seçilmiştir. Kalıp içindeki ergiyik metal bakır soğutucu yüzeyi ile doğrudan temas halinde bulunacağı için deney başlangıcındaki hızlı soğuma ve çil oluşumunu engellemek amacıyla sisteme bir soğutucu ısıtma fırını eklenmiştir. Bu fırın ile bakır soğutucunun deney öncesinde ısıtılabilmesi sağlanmıştır. Soğutucu ve soğutucu içindeki su kanalı ölçüleri Şekil 3’de verilmiştir.

### 2.4. Yönlü Katılaşma Kalıbı (Directional Solidification Mold)

Sıvı metalin yönlü katılaşmasını sağlayan ve ölçüleri Şekil 4’de verilen ani ısı değişimlerine dayanıklı yön-



Şekil 3. Yönlü katılaşma deney düzeneğinde kullanılan soğutucunun ölçüleri (mm) (Dimensions of the chill used in the directional solidification apparatus)



Şekil 4. Düzenekte kullanılan kalıp ve boyutları (mm) (Dimensions of the mold used in directional solidification apparatus)

lü katılaşma kalıbı metal ile reaksiyona girmeyen adyabatik özellikli LOD-607 refrakter malzemeden imal edilmiştir. Kalıbın üst yüzeyi numunenin döküm sonrası atmosfer ile temasının kesilmesi amacıyla seramik yünü ile kapatılmıştır.

### 2.5. Sıcaklık Kontrol Sistemi (Temperature Control System)

Yönlü katılaşma düzeneği üzerinde sıcaklık kontrolünü sağlayabilmek için Şekil 1’de konumları belirtilen TC1, TC2, TC3, TC4 ve TC5 ısı çiftleri kullanılmıştır. Isıl çiftler “K” tipinde, mineral izoleli ve 3mm dış çapa sahiptirler. Isıl çiftler saf alüminyumun katılaşma sıcaklığına göre (660°C) kalibre edilmiştir.

“TC1” ısı çifti, deney sırasında sıvı metal içindeki sıcaklık profilini takip etmek için kullanılmıştır. Bu ısı çifti, ısı çift asansörü üzerinde düşey yönde hareketlidir ve istenildiğinde fırın hareketi ile senkronize olarak numune merkez eksenini boyunca hareket edebilmektedir. Bu hareketin amacı, ısı çiftinin sıvı-katı ara yüzeyinin üzerinde olması şartıyla, ara yüzeyin üzerindeki sıcaklığı farklı yükseklikler için ölçülebilmektir. Bu sistem Kaynak [18] örnek alınarak tasarlanmıştır. TC1 ısı çifti, yüksek sıcaklıkta alüminyum metali ile reaksiyonu engellemek için 0,5mm kalınlığında LOD-607 malzeme ile kaplanmıştır.

“TC2” ısı çifti, deney sırasında kalıp dış duvarındaki sıcaklığı ölçmektedir. Bu ısı çifti TC1 ısı çifti ile aynı mekanizma üzerinde düşey yönde hareket edebilmektedir. TC2 hareketli ısı çifti de Kaynak [18] örnek alınarak tasarlanmıştır. TC1 ile TC2 ısı çiftlerinin ölçme seviyeleri aynı yükseklikte konumlandırılmıştır (Şekil 1).

“TC3” ısı çifti, fırın sıcaklığını kontrol etmek amacıyla kullanılmaktadır. Burada TC3 ısı çiftinin seviyesi referans yüksekliğinden (R, Şekil 1) itibaren 75mm yükseklikte ve yatay konumdadır. Isıl çiftin ölçme ucu ise rezistans telinden itibaren kalıba doğru

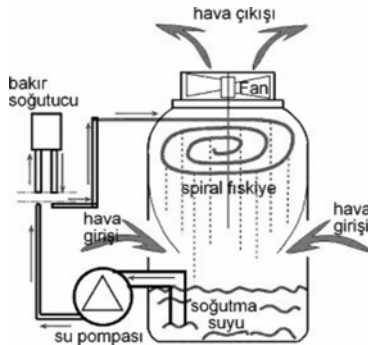
8mm uzatılmıştır.

“TC4” ısı çifti, TC3 gibi fırın sıcaklığını ölçen ikinci bir ısı çiftidir. Görevi, TC3 ısı çiftinden okunan değerlerin doğruluğunu kontrol etmektir. Yükseklik ve pozisyon olarak TC3 ile aynı değerlere sahiptir, ancak fırın içinde TC3 ısı çiftinin karşısında yer almaktadır.

“TC5” ısı çifti soğutucu sıcaklığını okuyan bir dijital göstergeye bağlıdır. Görevi, deney boyunca soğutucu sıcaklığındaki değişimleri tespit etmektir.

## 2.6. Soğutma Sistemi (Cooling System)

Bölüm 2.3’de verilen bakır soğutucu üzerinden ısının alınması için termik santral hava soğutma sistemleri prensibine dayalı bir soğutma sistemi yapıldı [25]. Şekil 5’de verilen su soğutma sistemi spiral şekle sahip bir fiskiyeden akan şebeke suyu ile ters yönde akan havanın çarpıştırılması ile soğutma sağlamaktadır. Soğutulan akışkan haznenin tabanında toplanarak basınç altında bakır soğutucu içine gönderilmektedir.



Şekil 5. Su soğutma sisteminin şematik görünümü (Schematic view of the cooling system)

Soğutma sistemi üzerinde suyun depolandığı hacim  $0.014\text{m}^3$  ( $14482\text{cm}^3$ ), havanın spiral fiskiyeden akan su ile çarpıştırıldığı etkili hacim  $0.011\text{m}^3$  ( $11263\text{cm}^3$ ), pompa motor gücü 550Watt ve motor besleme gerilimi ise 220V değerindedir.

## 2.7. Isıl Çift Asansörü (Thermocouple Elevator)

Şekil 1’de verilen deney düzeneği üzerindeki TC1 ve TC2 ısı çiftlerinin düşey hareketini sağlayan kızaklı bir sistem düzenek üzerine monte edilmiştir. Bu kızak sayesinde ısı çiftlerinin manuel veya istendiğinde fırın ile senkronize hareketi sağlanmıştır (Şekil 2).

## 2.8. Sistemin Sıcaklık Haritasının Elde Edilmesi (Acquisition of the Temperature Map of the System)

Sıcaklık haritasının elde edilmesinde kaynak [18]’de tarif edilen sıcaklık takip prensibi benimsendi. Kalıp içinden sıcaklık takibi için Bölüm 2.5’de anlatılan TC1 ve TC2 ısı çiftleri kullanıldı. Burada, ocak zemini, ısı çiftleri için referans eksenini kabul

edilmiştir (R seviyesi, Şekil 1). Benzer şekilde, “H” büyüklüğü fırın hareket miktarını ve “h” ölçüsü ise ısı çifti yüksekliğini R seviyesine göre bildirmektedir. Deney düzeneğinin karmaşık bir yapıda olması nedeniyle TC1, TC2, TC3 ve TC4 konumlarında  $\pm 1\text{mm}$  ölçüsünde sapma olabileceği dikkate alınmalıdır.

Deneyisel çalışmada EK-1’de kimyasal bileşimi verilen ticari saflıkta alüminyum metali kullanılmıştır. 260 gr ağırlığında metal grafit pota içinde rezistans ısıtıcılı bir fırında ergitilmiştir. TC3 ve TC4 ısı çiftlerinden okunan değerler  $850^\circ\text{C}$  değerinde sabit kalıncaya kadar hareketli fırın 1 saat ısıtılmıştır. Bunun ardından dışarıda ergitilen  $830^\circ\text{C}$  sıcaklıktaki sıvı alüminyum kalıba dökülerek ve döküm sıvı metal yüksekliği tabandan itibaren 100 mm olacak şekilde ayarlanmıştır. Sıvı metalin kalıba dökümü için LOD-607 malzemeden üretilmiş bir yolluk kullanılmıştır. Döküm işleminden sonra kalıbın üstü seramik battaniye ile kapatılmış ve sıvı metalin sabit sıcaklığa ( $780^\circ\text{C}$ ) ulaşması için 15dk beklenmiştir.

Birinci aşamada hareketli fırın  $H=8,3\text{mm}$  konumuna ayarlanarak bu konumda TC1 ile TC2 ısı çiftlerinin verdiği sıcaklıklar 6 farklı “h” seviyesinden okunmuştur (Tablo 1). Her okuma sırasında TC1 ve TC2 değerlerinin sabit değer gösterebilmesi için yeterli süre beklenmiştir. Daha sonra bu işlemler Şekil 2’de verilen ısı çifti asansörü sayesinde ısı çiftlerinin yükseklikleri değiştirilerek  $H=16,6\text{mm}$ ,  $H=24,9\text{mm}$ ,  $H=33,2\text{mm}$ ,  $H=41,5\text{mm}$  ve  $H=49,8\text{mm}$  olmak üzere beş farklı fırın seviyesi için tekrarlanmıştır. Yukarıda anlatılan ölçümler daha sonra bütün olarak iki defa tekrarlanmış ve aynı koşullar altında en fazla  $\pm 3$  derecelik sapmalar olduğu gözlenmiştir.

Bu ölçümlerden elde edilen değerler Tablo 1’de verilmiştir. Bu değerlere dayalı olarak kalıp içindeki sıvı metalden alınan sıcaklık dağılımı Şekil 6’da, kalıp duvarındaki sıcaklık dağılımı ise Şekil 7’de görülmektedir.

## 2.9. Sıvı Metal Üzerinden Sıcaklık Kontrolü (Temperature Control Over Liquid Metal)

Hareketli fırın üzerinde yer alan TC3 ve TC4 ısı çiftlerinden elde edilen veriler ile fırın sıcaklığının kontrol edilmesi durumunda sıcaklığın kalıp içinde bulunan sıvı metal üzerine etkisinde gecikmeler söz konusu olabilmektedir. Bu nedenle sistemde sıcaklık kontrolünün daha verimli yapılması amacıyla hareketli fırın sıcaklığının TC3 ve TC4 ısı çiftleri yerine kalıp içinde bulunan sıvı metale bir ısı çifti (TC1) yerleştirilerek kontrol edilip edilemeyeceği araştırılmıştır.

Şekil 1’de verilen hareketli fırının sıcaklık kontrolü TC1 ısı çifti ile yapılmıştır. Kompozisyonu EK-1’de verilen ticari saflık derecesine sahip alüminyum sistem dışında rezistans ısıtıcılı bir fırında ergitilmiş

ve 800°C sıcaklıkta yönlü katılaştırma düzeneğinde bulunan kalıba dökülmüştür. Sıvı metal sıcaklığı 780°C değerine sabitlenen sıcaklık kontrol sistemi ile sabit tutulmaya çalışılmıştır.

### 3. DENEYSEL BULGULAR (EXPERIMENTAL RESULTS)

#### 3.1. Sıcaklık Haritası Sonuçları (Results of the Temperature Map)

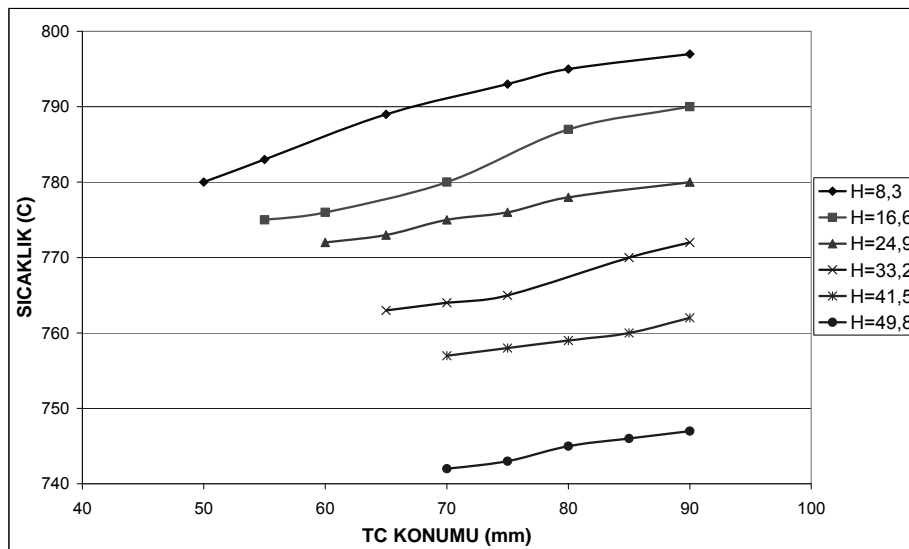
Bölüm 2.8'de açıklandığı şekilde sıcaklık haritası ölçümlerinden elde edilen veriler Tablo 1'de sunulmuştur. Bu verilere bağlı olarak kalıp içindeki sıcak-

lık dağılımı, Şekil 6'da ve kalıp duvarındaki sıcaklık dağılımı ise Şekil 7'de gösterilmiştir.

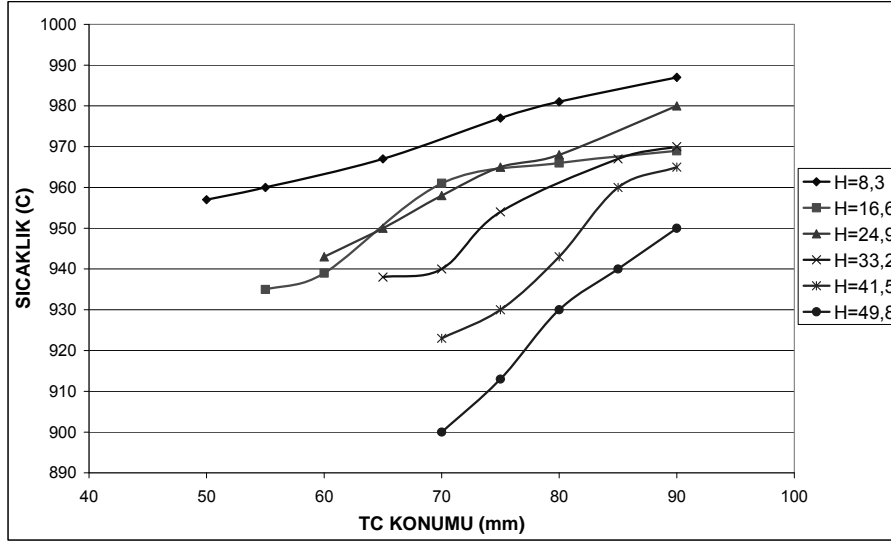
Tablo 1'de "h" ölçüm yüksekliklerinin her fırın yüksekliği olan "H" değeri için farklılık göstermesi metalin katılaştıran bölümünün zamana bağlı olarak yukarı doğru ilerlemesinden kaynaklanmıştır. Bundan dolayı fırın yukarı yönde ilerledikçe, ısıl çiftlerin başlangıç okuma seviyeleri de yukarı doğru 5mm kaydırılmak zorunda kalmıştır. Bu durum kaynak [18]'de verilen şartlar ile uyum göstermektedir. Sıcaklık haritasının çıkarılışı sırasında katılaştırmanın kalıp üst bölümlerine doğru hızlı ilerlemesini engellemek amacıyla soğutma sistemi çalıştırılmamıştır.

**Tablo 1.** Şekil 1'de verilen TC1 (kalıp içi) ve TC2 (kalıp duvarı) ısıl çiftlerinden farklı fırın (H) ve farklı ısıl çift yükseklikleri (h) için ölçülen sıcaklıklar (Measured temperatures from thermocouples TC1 (within the mold) and TC2 (mold wall) given in Fig. 2.1 for different furnace heights (H) and thermocouple heights (h))

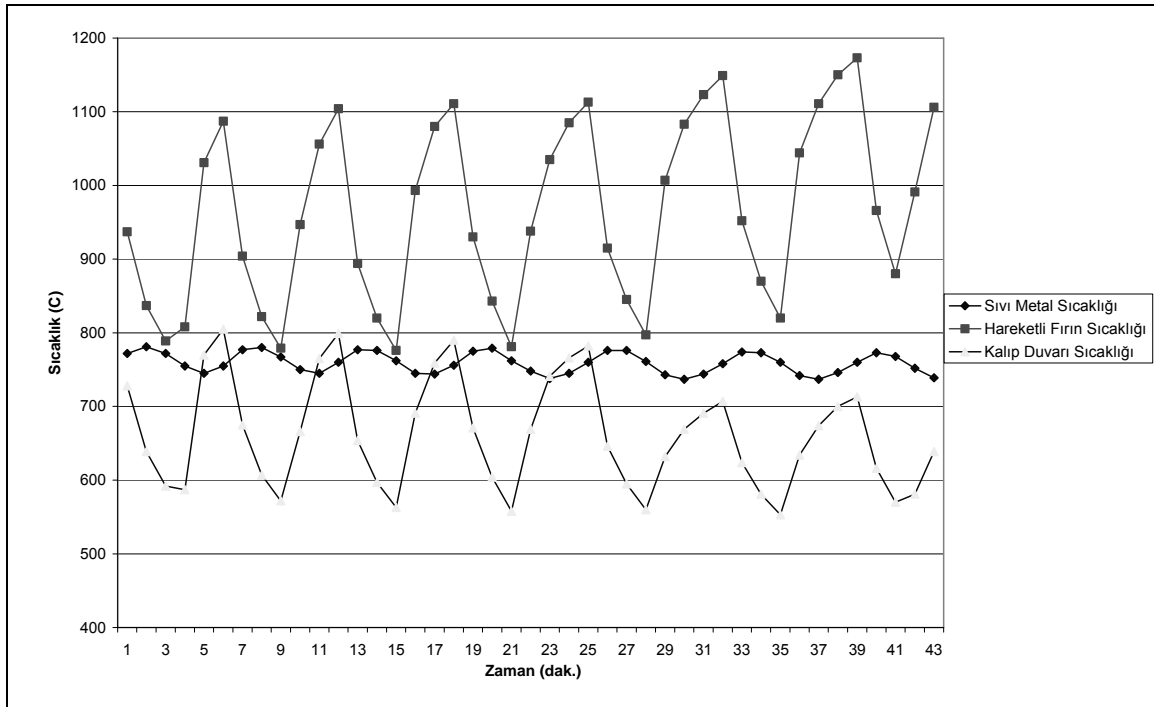
H(mm)	ISIL ÇİFT KALIP MERKEZİNDE						
8,3	h(mm)	50	55	65	75	80	90
	T °C	780	783	789	793	795	797
16,6	h(mm)	55	60	70	80	90	
	T °C	775	776	780	787	790	
24,9	h(mm)	60	65	70	75	80	90
	T °C	772	773	775	776	778	780
33,2	h(mm)	65	70	75	85	90	
	T °C	763	764	765	770	772	
41,5	h(mm)	70	75	80	85	90	
	T °C	757	758	759	760	762	
49,8	h(mm)	70	75	80	85	90	
	T °C	742	743	745	746	747	
H(mm)	ISIL ÇİFT KALIP DUVARINDA						
8,3	h(mm)	50	55	65	75	80	90
	T °C	957	960	967	977	981	987
16,6	h(mm)	55	60	70	80	90	
	T °C	935	939	961	966	969	
24,9	h(mm)	60	65	70	75	80	90
	T °C	943	950	958	965	968	980
33,2	h(mm)	65	70	75	85	90	
	T °C	938	940	954	967	970	
41,5	h(mm)	70	75	80	85	90	
	T °C	923	930	943	960	965	
49,8	h(mm)	70	75	80	85	90	
	T °C	900	913	930	940	950	



Şekil 6. Kalıp içindeki sıcaklık dağılımı (Temperature distribution in the mold)



Şekil 7. Kalıp dış duvarında sıcaklık dağılımı (Temperature distribution in the mold wall)



Şekil 8. Hareketli fırın sıcaklığının kalıp içindeki sıvı metalden kontrolü ile ilgili sıcaklık-zaman ilişkisi (Temperature-time relationship related to controlling the moving furnace temperature from the molten metal in the mold)

Bu çalışmada kurulan deney düzeneğinin sıcaklık haritası, aynı koşullar altında ısı yönünden aynı sonuçların elde edilebileceğini açık bir şekilde göstermiştir. Çünkü yapılan ölçümlerde aynı koşullar altında en fazla  $\pm 3$  derecelik farklılıklar olduğu gözlenmiştir. Sıcaklık haritası verilerinden elde edilen grafiklere göre (Şekil 6 ve Şekil 7), fırının farklı konumları için aşağıdaki bulgular elde edilmiştir:

Kalıp içinde sıcaklık dağılımı;

- 1- Fırının alt konumları için (H=8,3mm, H=16,6mm); sıcaklık gradyanları numune alt bölgelerinde yüksek, üst bölgelerinde ise düşüktür.
- 2- Fırının orta konumları için (H=24,9mm,

H=33,2mm), sıcaklık gradyanları üst pozisyonlara oranla azalmıştır.

- 3- Fırının üst konumları için (H=41,5mm, H=49,8mm) gradyanlar fırının en alt konumuna göre azalmıştır, ancak fırının orta yükseklikte konumlarına oranla yüksek gradyan farkının bulunmadığı görülmüştür.

Kalıp duvarında sıcaklık dağılımı;

- 1- Fırının alt konumları için (H=8,3mm, H=16,6mm); sıcaklık gradyanları numune alt bölgelerinde yüksek, üst bölgelerinde ise düşüktür.
- 2- Fırının orta konumları için (H=24,9mm, H=33,2mm), sıcaklık gradyanları üst pozisyonlara

oranla artmıştır.

3- Fırının üst konumları için (H=41,5mm, H=49,8mm) gradyanlar fırının en alt konumuna göre artmıştır, ancak fırının orta yükseklikte konumlarına oranla gradyan farkı daha yüksek artış göstermiştir.

Yukarıdaki bulgulara göre, kalıp içinden elde edilen sıcaklık gradyanlarının fırının yukarı kalkmasıyla birlikte hafifçe azaldığı söylenebilir. Örneğin, fırının alt konumu için (H=8,3mm) hesaplanan ortalama sıcaklık gradyanı yaklaşık 4,8°C/cm iken, fırının üst konumu için (H=49,8mm) hesaplanan ortalama sıcaklık gradyanı yaklaşık 2,5°C/cm olarak bulunmuştur. Fırının orta yükseklikleri için ise yukarıda verilen değerlerin arasında ortalama sıcaklık gradyan değerleri elde edilmiştir.

### 3.2. Sıvı Metal Üzerinden Sıcaklık Kontrolü

#### Sonuçları (Results of the Temperature Control Over Liquid Metal)

Yönlü katılaştırma düzeneğinde fırın sıcaklığının sıvı metal üzerinden kontrol edilmesi ile ilgili yapılan deneysel çalışmaların sonucu Şekil 8'de verilmiştir. Bu sonuçlara göre, fırın sıcaklığında yaklaşık 350°C aralığında dalgalanmalar oluşmuştur. Bu dalgalanmaların sıvı metale yansması ise 50°C aralığında gerçekleşmiştir. Bir yönlü katılma deneyi için sıvı metalde 50°C dalgalanma oluşmasının kabul edilebilir bir sonuç olmadığı kolaylıkla anlaşılabilir. Bu sebepten düzenekte sıcaklık kontrolünün fırın sıcaklığı yerine sıvı metal üzerinden etkin bir biçimde yapılması mümkün değildir.

### 4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Yönlü katılma deney düzeneğinde sıcaklık kontrolü ile ilgili çalışmaların sonuçları aşağıda verilmiştir.

1. Alüminyum alaşımlarının yönlü katılması için oluşturulan deney düzeneği yapım harcamaları ve deney süresindeki enerji kullanımı bakımından düşük maliyetli bir sistem olma özelliğini taşımaktadır.
2. Geliştirilen fırında kaldırma sistemi sayesinde kalıp üzerinde belirgin bir titreşimin oluşmadığı gözlenmiştir.
3. Sıcaklık haritası deneylerinden elde edilen bulgulara göre, sıvı metalden elde edilen ortalama sıcaklık gradyanlarının, fırının alt konumları için yüksek, fırının üst konumları için ise düşüktür.
4. Sıcaklık haritası sonuçlarına göre 4,8-2,5°C/cm sıcaklık gradyanları elde edilmiştir.
5. Kalıp içindeki sıvı metal sıcaklığının, aynı sıvı içine daldırılmış bir ısı çifti ile kontrolü bu düzenek için verimli değildir.

### TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)

Bu çalışmanın gerçekleştirilmesi sırasındaki bilimsel katkılarından dolayı Dr. Mehmet Erdoğan, Dr. H. Mehmet ŞAHİN ve Dr. Neşet AKAR ve projenin maddi altyapısının oluşturulmasındaki katkılarından dolayı Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri birimine teşekkür ederiz.

### SEMBOLLER (SYMBOLS)

G	: Sıcaklık gradyanı
$\Omega$	: Elektrik direnci
W	: Watt
K	: Kromel-Alumel ısı çift malzemesi
R	: Referans yüksekliği
TC1	: Sıvı metalden sıcaklık okuyan ısı çifti
TC2	: Kalıp duvarından sıcaklık okuyan ısı çifti
TC3	: Fırın sıcaklığını kontrol eden ısı çifti
TC4	: Fırın sıcaklığını denetleyen ısı çifti
TC5	: Soğutucudan sıcaklık okuyan ısı çifti
H	: Fırın yüksekliği
H	: Isıl çift yüksekliği
T	: Sıcaklık

### KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. McLean, M., **Directionally Solidified Materials for High Temperature Service**, The Metals Society, London, 3-22, 1983.
2. Brown, A.B., Kim, H., "Modelling of Directional Solidification: From Scheil to Detailed Numerical Simulation", **Journal of Crystal Growth**, Cilt 109, 50-65, 1991.
3. Pratt, R.A., Grugel, R.N., "Microstructural Response to Controlled Accelerations During the Directional Solidification of Al-6 wt.% Si alloys", **Materials Characterization**, Cilt 31, 225-231, 1993.
4. Kurz, W., Fisher, D.J., **Fundamentals of Solidification**, Trans Tech Publications, Switzerland, 2-44, 1992.
5. Khan, S., **Directional Solidification of Aluminium-Silicon Eutectic Alloys**, Doktora Tezi, University of Manchester Materials Science Center, England, 5-78, 1990.
6. Ying, T., **Segregation Reduction in Bridgman Crystal Growth**, Doktora Tezi, University Wisconsin-Madison, USA, 1-38, 1997.
7. Flemings, M.C., **Solidification Processing**, McGraw-Hill Inc., New York, 5-50, 1974.
8. Mazumder, P., **Transport Processes in Directional Solidification and Their Effects on Microstructure Development**, Doktora Tezi, Mechanical Engineering Iowa State University, USA, 1-6, 1999.
9. Hunt, J.D. and Lu, S., "Numerical modeling of cellular/dendritic array growth: Spacing and structure predictions", **Metalurgical Materials Trans. A**, Cilt 27A, 611, 1996.
10. Tewari, S.N. and Shah, R., "Effects of



- Electromagnetic Vibration on the Macro-segregation of 7075Al Alloy by Semi-continuous Casting”, **Metallurgical Materials Trans. A**, Cilt 27, 1353-1362, 1996.
11. Gandin, Ch. A., “From Constrained to Unconstrained Growth During Directional Solidification”, **Acta Materialia**, Cilt 48, 2483-2501, 2000.
  12. Rousset, P., Rappaz, M., Hannart, B., “Modeling of Inverse segregation and Porosity Formation in Directionally Solidified Aluminum Alloys”, **Metallurgical and Materials Transactions A**, Cilt 26A, 2349-2358, 1995.
  13. Henry, S., Minghetti, T., Rappaz, M., “Dendrite Growth Morphologies in Aluminium Alloys”, **Acta Materialia**, Cilt 46, 6431-6443, 1998.
  14. Nakae, H., Song, K., Fujii, H., “New Application of Unidirectional Solidification Method for Observation of Interfacial Morphology of Al-Si and Al-Si-Sr Alloys”, **Materials Transactions, JIM**, Cilt 33, 1051-1056, 1992.
  15. Yılmaz, F., Elliott, R., “The Microstructure and Mechanical Properties of Unidirectionally Solidified Al-Si Alloys”, **Journal of Materials Science**, Cilt 24, 2065-2070, 1989.
  16. Su, R-J., Ruel, A.O., Watan, A.J., “Microstructural and Compositional Transients During Accelerated Solidification of Al-4.5 wt pct Cu”, **Metallurgical and Materials Transactions A**, Cilt 29A, 2375-2381, 1998.
  17. Ostrogorsky, A.G., “Single-Crystal Growth by the Submerged Heater Method”, **Mechanical Engineering Department Columbia University New York, USA**, Cilt 1, 463-464, 1990.
  18. Quyang, H., **Multi-Level Simulation and Modeling of Vertical Bridgman Growth of Single Crystals And Solidification of Binary Alloys**, Doktora Tezi, Mechanics and Engineering Science, China, 34-39, 1996.
  19. Staub, F., Braun, R., Geiger, T., “Investigations in Connection with the Manufacture of Gas Turbine Blades with Unidirectionally Solidified Structure”, **Sulzer Research**, 3-13, 1972.
  20. Xie, F.Y., Kraft, T., Zuo, Y., Moon, C.H., Chang, Y.A., “Microstructure and Macro-segregation in Al-Rich Al-Cu-Mg Alloys”, **Acta Materialia**, Cilt 47, 489-500, 1999.
  21. Çadırılı, E., Ülgen, A., Gündüz, M., “Directional Solidification of the Aluminium-Copper Eutectic Alloy”, **Materials Transactions, JIM**, Cilt 40, 989-996, 1999.
  22. Formaro, O., Palacio, H.A., “Primary Spacing Evolution During Directional Solidification of Al-0.5%Cu”, **Scripta Metallurgica et Materialia**, Cilt 31, 1265-1270, 1994.
  23. Xinyan, Y., Xie, F., Chu, M., Chang, Y.A., “Microsegregation in Al-4.5Cu wt.% Alloy: Experimental Investigation and Numerical Modeling”, **Materials Science and Engineering A**, Cilt A302, 268-274, 2001.
  24. Tüzüenalp, K.K., **Alüminyum Alaşımlarının Yönlü Katılaşması ve Süreç Parametrelerinin İrdelenmesi**, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 5-90, 2002.
  25. Çengel, Y.A., Boles, M.A., **Thermodynamics, An Engineering Approach**, McGraw-Hill, New York, 1989.

#### EK-1 (APPENDIX 1)

Sıcaklık haritasının çıkarılışı sırasında kullanılan % 99.3 ticari saflık derecesindeki alüminyum malzemenin kompozisyonu

Element	wt. %	Element	wt. %
Si	0,177	Cr	0,00675
Fe	0,392	Pb	0,00475
Cu	0,0406	Sn	0,00500
Mn	0,00661	Ti	0,0162
Mg	0,00093	Sb	0,00300
Zn	0,0412	Al	99,30
Ni	0,00308		

#### EK-2 (APPENDIX 2)

LOD-607 malzemesinin kompozisyonu

Element	wt. %
Kalay	10-70
Çimento	20-50
Cam yünü	5-35
Kalsiyum oksit	<5
Eser maddeler	<1