

# **Hassas Döküm**

**Prof. Dr. Kerem Altuğ GÜLER**

## Giriş / Tarihçe

M.Ö. 4. bin yılın ortalarında bilinmeyen bir tarihte ve yerde muhtemelen bağımsız olarak birden fazla bölgede bir çömlekçi veya metal işçisi, büyük ihtimalle ikisi birden, parlak bir fikir ortaya çıkardılar. Balmumundan işlenmiş bir modeli kil ile kapladılar sonra bu kompozit yapıyı ısıtıp, kili sertleştirdiler; mum ergiyerek uzaklaştı ve böylece elde edilen kalıbı kullanarak mumdaki tüm detaylara sahip döküm yaptılar. Bu yenilik büyük bir coşkuyla karşılanmış olmalıydı. Önceki tekniklere göre pek çok avantajla, her şekilde obje çok daha özenli bir şekilde üretilebiliyordu.

Taşla kıyaslandığında insan kol ve bacakları, hayvan ayak ve boynuzları çok daha kolay bir şekilde işlenebiliyor ve kil ile karşılaştırıldığında elde edilen dayanıklılık çok yüksek oluyordu. Mum yabani arılardan elde edilebiliyordu ve zaten farklı amaçlar için kullanılan ticari bir üründü, arıcılık ise yine erken zamanlarda Batı Asya'da başlamıştı.

Kaybolan mum döküm tekniğinin (hassas döküm) bu başlangıcı, arkeologlar tarafından tekniğinin isminin Fransızcası olan “cire perdue” olarak adlandırılır. İlk dökümler arı bakırla yapılmış ve bunu arsenikli bakır ile kalay bronz dökümleri izlemiştir, bunlardan kısa bir süre sonra da altın dökümleri gerçekleştirilmiştir.

Hassas dökümün bazı ilk bakır örnekleri Mezopotamya'da MÖ 3500 civarında, yazının icadından önce kullanılan, kireç taşı veya manyezite oyulan mühürlerin arkasına monte edilen hayvan figürlerinde görülmektedir. Aynı zaman dilimine ait benzer örnekler, eğilmiş dağ keçisi ve farklı hayvan figürlerindeki büyük elbise iğneleri şeklinde Elam' da (Güney Batı İran'da) bulunmuştur ve günümüzde Louvre Müzesi'nde sergilenmektedir. Bir kaç yüzyıl sonra ise yine benzer örneklerle bu defa Truva'da ve çeşitli Yunan şehirlerinde rastlanmaktadır.



Şekilde Çorum yakınlarındaki Alaca Höyük'te bulunan ve Hitit medeniyetine ait olduğu belirlenen; daha sonraları Anadolu otomobillerinin ambleminde de kullanılan ünlü bronz geyik heykeli görülmektedir. MÖ 2400'lü yıllara tarihlenen bu heykelin, yolluk parçalarının üzerinde bulunması heykelin hassas döküm ile döküldüğünü göstermektedir. Bu tarihi eser, Ankara Anadolu Medeniyetleri Müzesinde sergilenmektedir.

Hassas döküm yönteminde, harcanabilen bir modelin etrafı, oda sıcaklığında sertleşen refrakter bir çamurla sarılarak hazırlanan bir kalıp kullanılır. Genellikle mum veya benzeri plastikten hazırlanan model daha sonra ergitilerek veya yakılarak kalıp boşluğu meydana getirilir. Bu nedenle hassas döküm yöntemine “harcanan (kaybolan) mum yöntemi” adı da verilir.

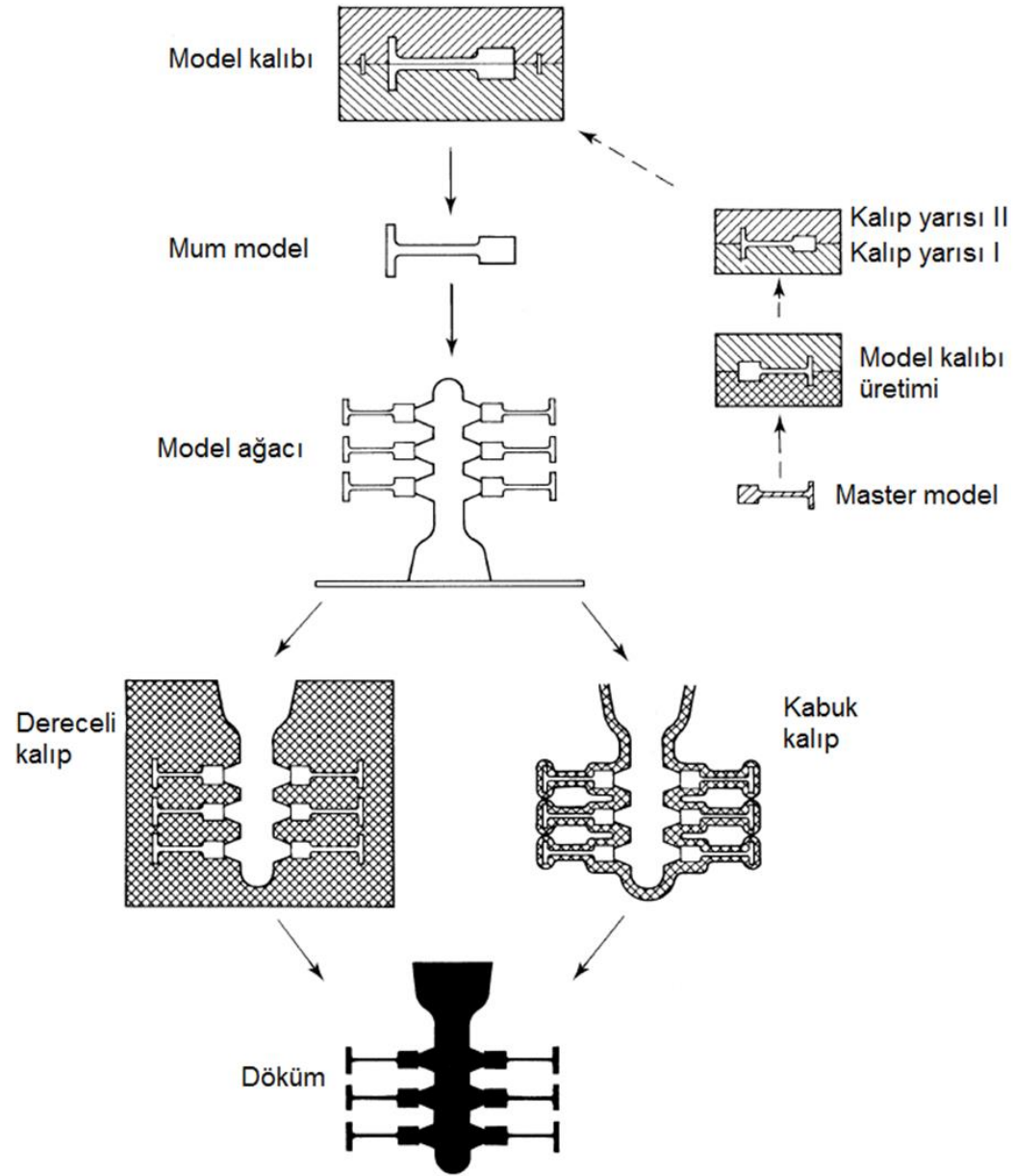
## Hassas dökümün avantajları

- Geleneksel döküm yöntemleri ve makineyle işleme yoluyla imali zor veya bazen imkânsız olan karmaşık şekilli parçaların kitle üretimi bu yöntemle mümkün olmaktadır.
- Diğer döküm yöntemlerine nazaran daha yüksek boyutsal hassasiyet, daha düzgün yüzey ve ince detay kısımların daha hassas elde edilmesi imkânı verir.
- Yöntem ergitilip dökülebilen bütün metallere uygulanabilir.
- 25 kg ağırlığa kadar dökümler ve bazen de (nadir olarak) 400 kg'a kadar parçalar bu yöntemle üretilebilir.

- Hassas döküm yolu ile elde edilen parçaların hemen hemen hiç ilave işlem gerektirmemesi, “kolay işlenebilir metal seçimi” faktörünü ortadan kaldırmaktadır.
- Bu yöntem ile tane boyutu, tane yönlenmesi ve yönlenmiş katılaşma gibi metalurjik faktörler yakından kontrol edilebilmekte ve bu sayede mekanik özellikler de kontrol altında tutulabilmektedir.
- Vakum veya koruyucu atmosfer altında dökülmesi gerekli olan metal veya alaşımlara da yöntem kolaylıkla uygulanabilmektedir.
- Hassas döküm yönteminde tek parça kalıp kullanıldığından ayırma yüzeyi veya “mala işlem yüzeyi” yoktur. Ve parça üzerinde, diğer döküm yöntemlerinin ürünlerinde olduğu gibi bu yüzeyin izi bulunmaz.



- Kalıp hazırlama açısından iki farklı hassas döküm yöntemi vardır.
- Seramik kabuklu hassas döküm (Shell Investment Casting)
- Dereceli hassas döküm (Solid /Block Investment-Flask)



Hassas döküm teknikleri şeması

## Seramik kabuklu hassas döküm

Seramik kabuklu kalıplar karbon ve alaşımlı çeliklerin, paslanmaz çeliklerin, ısıya dayanıklı alaşımların ve ergime sıcaklığı 1000 °C üzerinde olan diğer alaşımların dökümünde yaygın olarak kullanılır. Bunun dışında ergime sıcaklığı düşük demir dışı alaşımların da dökümünde kullanılmaktadır. Seramik kabuk yapımında mum modele temas eden ilk yüzey katmanının oluşturulmasında geleneksel olanlardan farklı malzemeler kullanılmasıyla, titanyum esaslı reaktif alaşımların da dökümünde seramik kabuklu yöntem tercih edilmektedir.

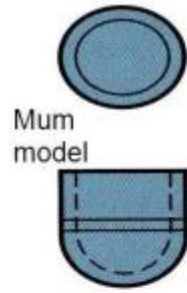
## Süreç adımları

- Tasarım ve metal mum model enjeksiyon kalıbının imalatı. (Kalıplar genellikle Al 6061 alaşımından imal edilmektedir.)
- Enjeksiyonla mum model üretimi.
- **Mum/Model ağacı yapımı:** Modellerin mum yolluk veya yolluklarla birleştirilmesi.
- **Seramik kabuk yapımı:** Model ağacının seramik çamura daldırılması ve hemen sonrasında üzerine toz seramik uygulanması ile katlı bir kaplama yapılması. Toz kaplaması yağmurlama veya akışkan yatak teknikleri ile gerçekleştirilir. Bu işlem farklı toz boyutları ile 6-9 kez tekrar edilir ve her kaplama bir önceki tam olarak kuruduktan sonra yapılır. Elde edilen kabuk kalınlığı 5-15 mm arasındadır.

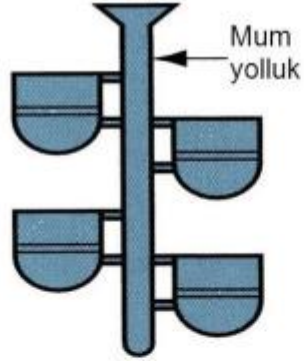
- **Mum alma:** Yaygın yöntem otoklavda buhar basıncı ile mumun ergitilip akıtılmasıdır. Sıcaklık 120-130 °C basınç 6-9 bar arasındır. Yüksek sıcaklık mumun ergimesini sağlarken buhar basıncı mumun genişlemesinden oluşan iç basıncı dengeleyerek seramik kabuk kalıbın kırılmasını engeller.
- **Kalıp pişirme:** Seramik kabuk kalıplar döküm öncesinde bir fırın içinde 900-1000 °C arasında pişirilir. Bu işlem sinterleme etkisiyle kalıbın dayanımını yükseltir, mum artığı küllerin yanarak uzaklaşmasını sağlar, kalıbın ısıl şok direncini yükseltir. Sıvı metalin yolluklardan ve ince kesitlerden rahat akmasını ve kalıbı doldurmasını kolaylaştırır.

**Döküm:** Fırından çıkartılan sıcak kalıplar bir kum yatağına veya düzgün durabileceği uygun bir zemine yerleştirilir ve potayla doldurulur. Kalıpların doğrudan ocaktan doldurulması ve uygun bir zemine yerleştirilmesi de yapılabilmektedir.

**Kalıp bozma ve bitirme işlemleri:** Katılaşmayı takiben oda sıcaklığına doğru soğuyan kalıp çatlamaya başlar. Daha sonra kalıplar titreşim ve püskürtme sistemleri ile tamamen döküm parçadan uzaklaştırılır. Ardından yolluk kesme ve gerekiyorsa talaş kaldırma, kumlama ve parlatma gibi işlemler yapılır.



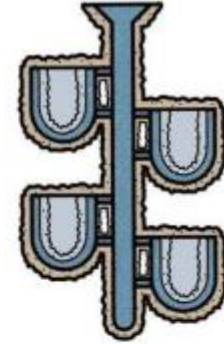
1



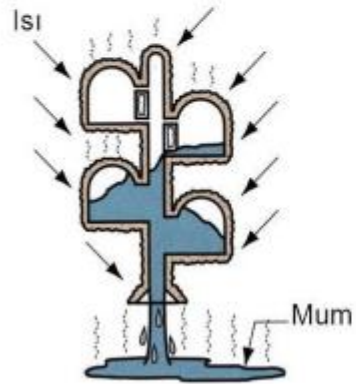
2



3



4



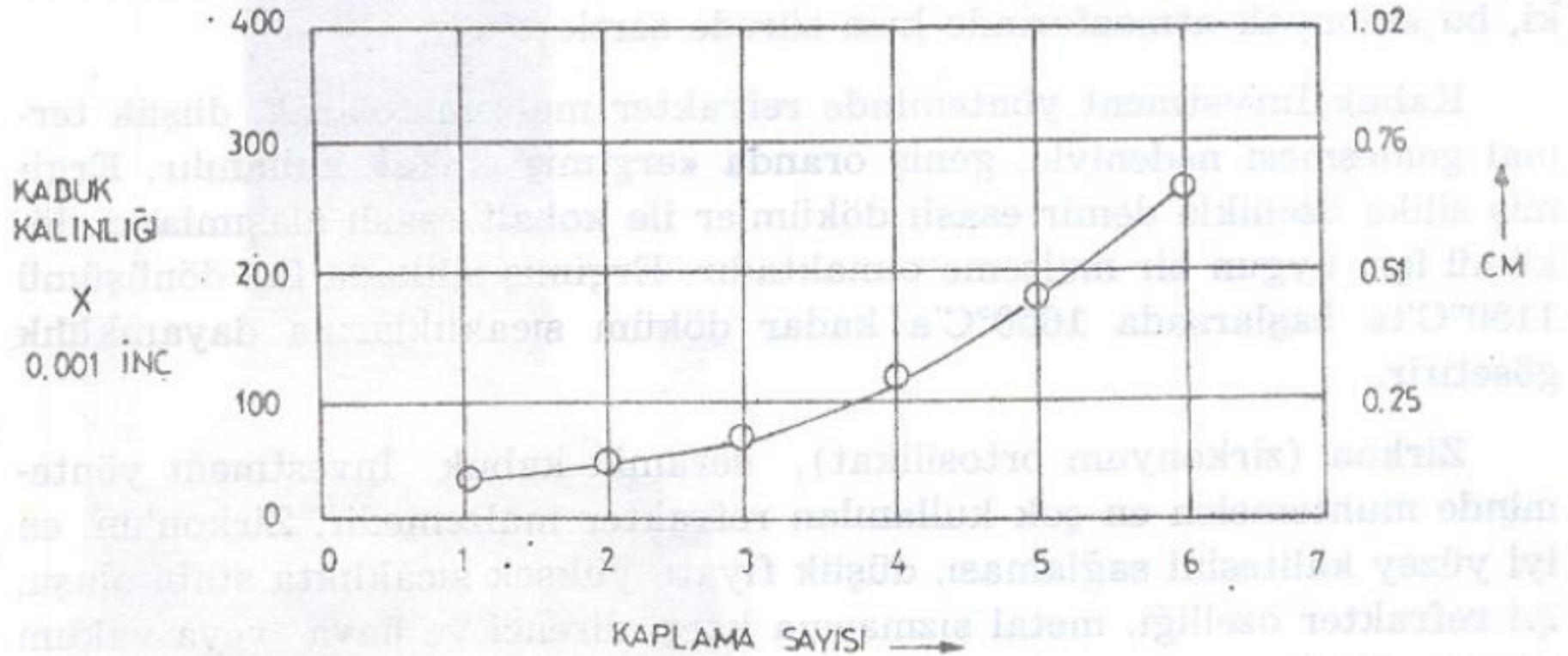
5



6



7



Kaplama sayısının kabuk kalınlığına etkisi



source: [www.hycast.com.au](http://www.hycast.com.au)

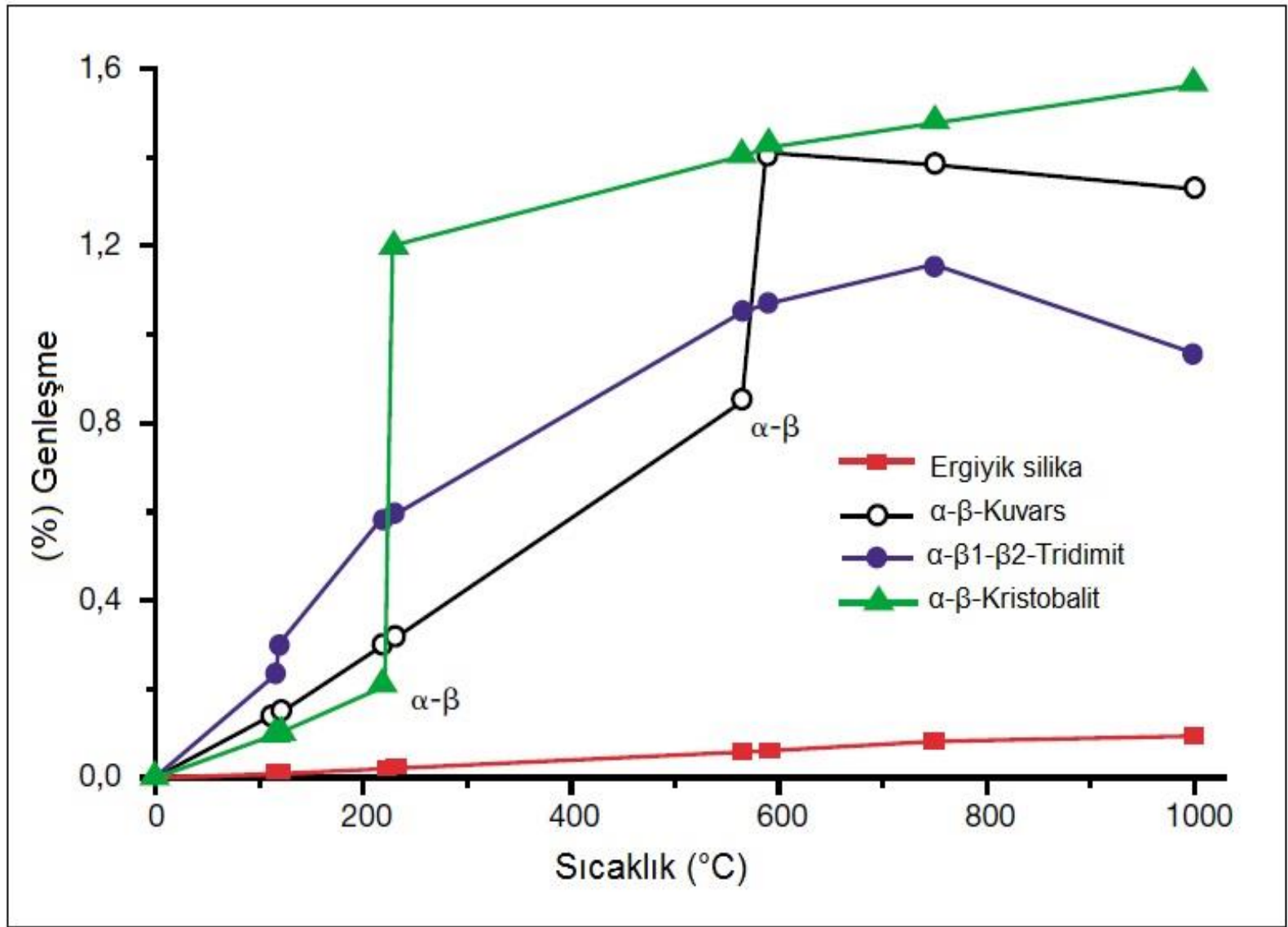




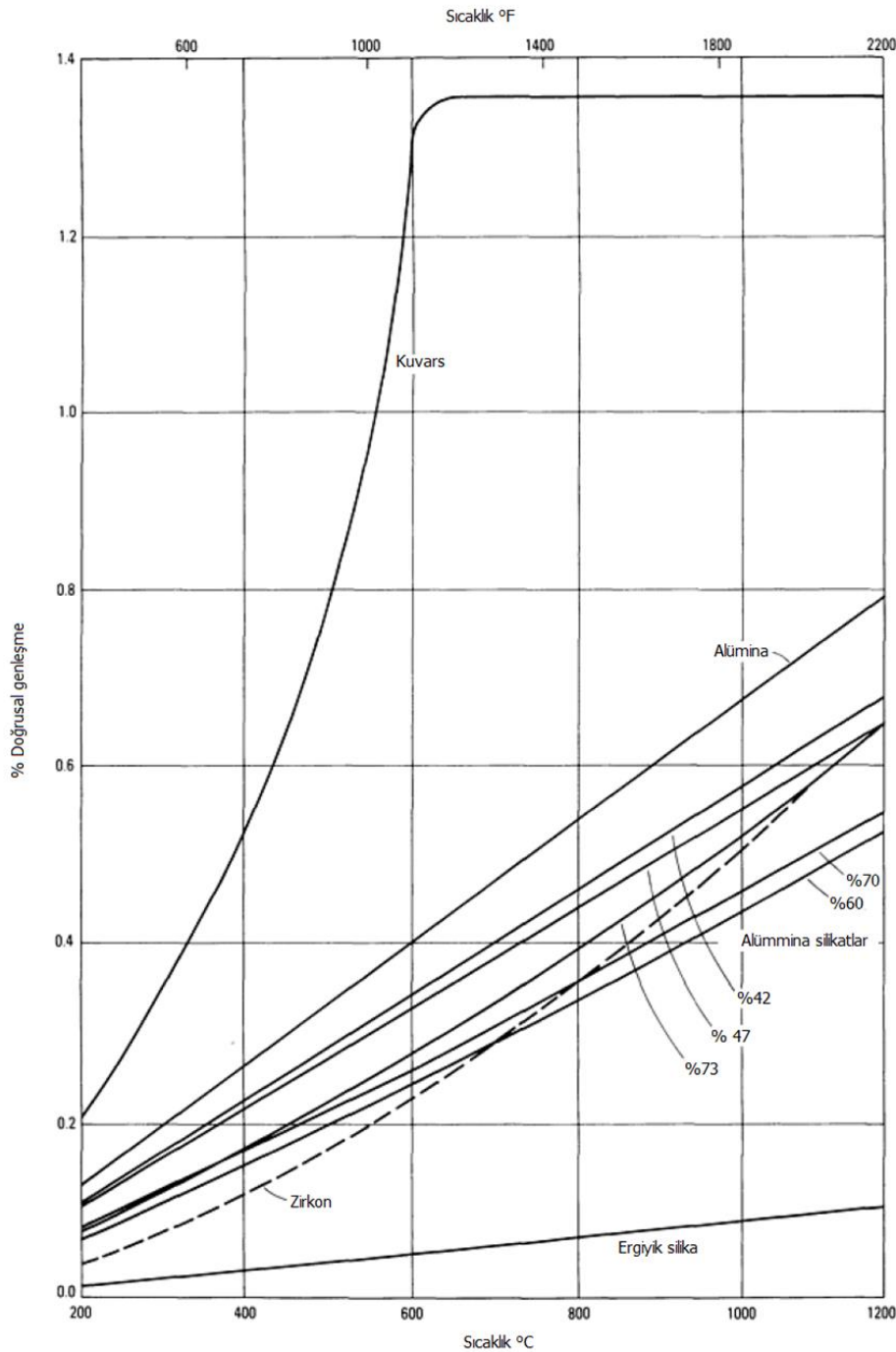
## Kalıp malzemeleri

- İlk kat(lar) (Face coat(s))
  - Çamur (slurry) → Bağlayıcı: Kolloidal silika (sıvı)  
Agrega: Fuse (kaynaşık) silika/Zirkon ( $\text{ZrSiO}_4$ )
  - Seramik toz (stucco) → Fuse silika/Zirkon ( $\text{ZrSiO}_4$ )
- Destek katları (Back up layers)
  - Çamur (slurry) → Bağlayıcı: Kolloidal silika (sıvı)  
Agrega: Zirkon
  - Seramik toz (stucco) → Molokit (molochite)  
(alümina silikat) (artan boyutlarla)

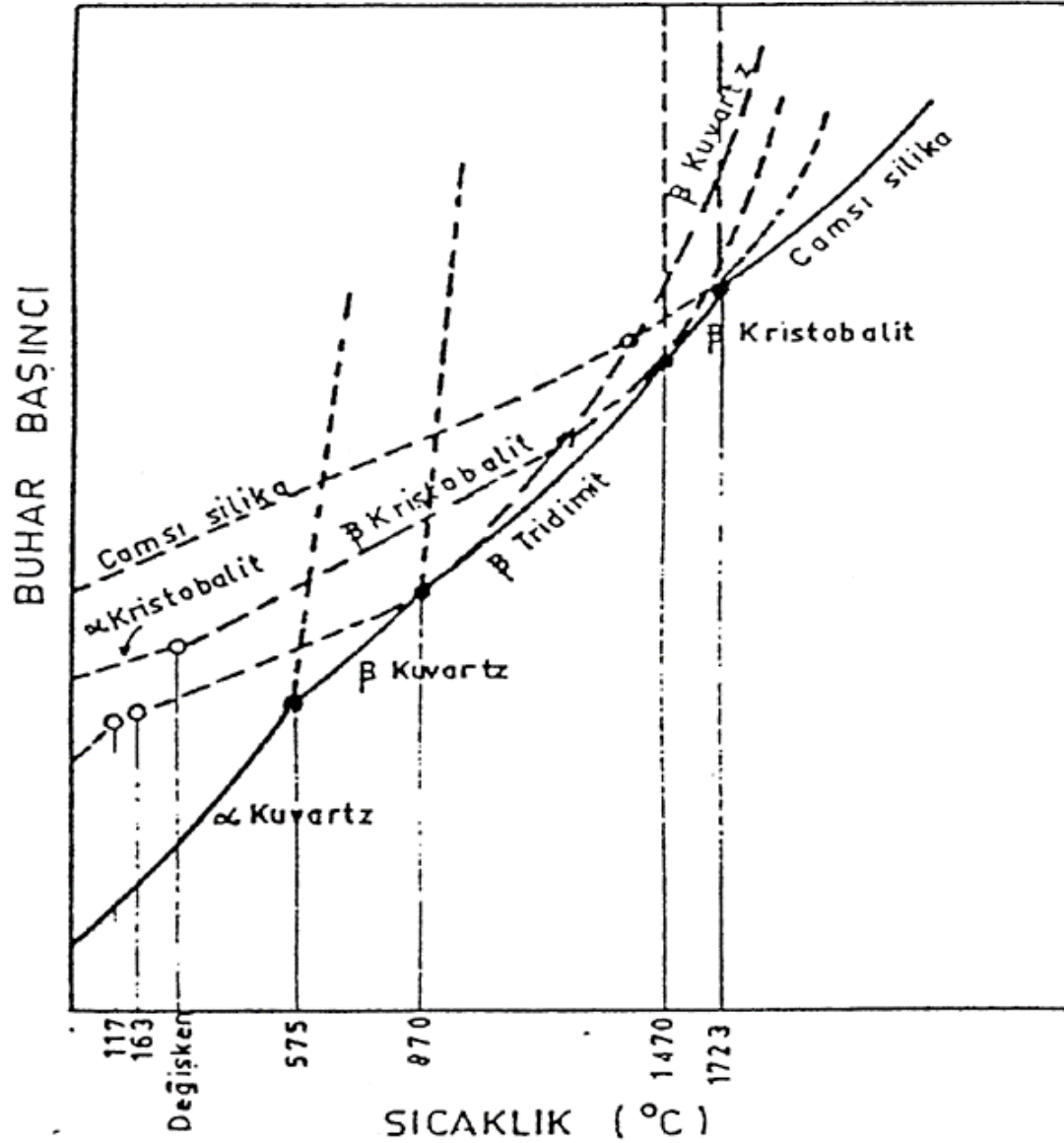
- Titanyum alaşımları için ilk kat(lar)
  - Çamur (slurry) → Bağlayıcı: Kolloidal zirkonya ( $\text{ZrO}_2$ )  
Agrega: Zirkonya toz
  - Seramik toz (stucco) → Zirkonya toz
  - Alternatif malzemeler: Yitriya ( $\text{Y}_2\text{O}_3$ ), Alümina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), Magnezya ( $\text{MgO}$ ) veya Kalsiya ( $\text{CaO}$ )
  - Destek katları geleneksel kalıplarla aynı malzemelerden oluşmaktadır.



Silika mineralinin ısı genleşmesi



Hassas dökümde  
yaygın olarak  
kullanılan bazı  
refrakter  
malzemelerin  
doğrusal  
genleşmeleri



$\text{SiO}_2$ 'nin sıcaklık ve basınca göre kararlı ve yarı kararlı fazları

## Dereceli hassas döküm

Seramik kabuklu hassas dökümün modern tarihçesinin başlangıcında dereceli yöntemle birlikte kullanılması yaygın bir uygulamaydı. İlk katları seramik kabuklu yöntemle yapılan model ağaçları sonrasında metal ve genellikle silindirik bir derece içerisine yerleştirilir ve destek katmanı derece içerisine doldurulan bir seramik çamuru ile tek aşamada oluşturulurdu. Uzun zamandır seramik kabuklu yöntemle dereceli yöntem farklı boyutta ve tipte parçalar üzerinde uzmanlaşarak hitap ettikleri sektörler büyük oranda ayrılmıştır.



Seramik kabuklu hassas döküm başta havacılık, savunma sanayi, otomotiv, genel makine sanayi ve tıbbi teçhizat ve protez imalatı olmak üzere çok geniş ve farklı sektörlerle hitap etmektedir. Kalıpların ve dökülen parçaların boyutları dereceli yöntemle göre daha büyüktür. Dereceli hassas döküm yöntemi ise özellikle ağız içi protezlerin ve takıların, ziynet eşyalarının ve çeşitli özel aksesuarların üretiminde uzmanlaşmıştır. Metal diş protezlerinin dereceli hassas döküm ile üretimi 19. yy. sonunda başlamış ve 1930'lu yıllardan itibaren yöntem takı üretimine aktarılmıştır. Bu alanda temel imalat tekniklerinden biri olarak günümüze kadar oldukça gelişerek gelmiştir.

## Süreç adımları

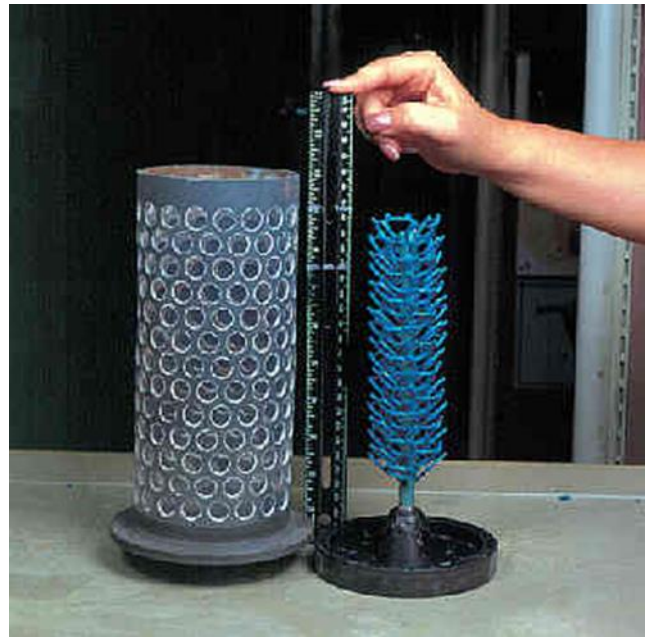
- **Tasarım ve mum model kalıbının imalatı:** Dereceli yöntemde metal mum enjeksiyon kalıpları sadece ana yolluk gibi sabit boyutlu ve basit şekilli parçalar için kullanılır. Takı üretiminde görece karmaşık şekilli ve küçük modelleri metal bir kalıptan çıkarmak pratik olmadığı için esnek kauçuk kalıplar kullanılmaktadır. Bu kalıplar, bir master modelin ham kauçuk katmaları arasına yerleştirilmesi ve özel bir vidalı preste sıkıştırılıp ısıtılarak vulkanize edilmesiyle üretilir. Alternatif bir yöntem eklemeli imalattır, üç boyutlu yazıcılarla polimerik esaslı modeller üretilmesidir. Diş protezleri için ise kişiye özel üretimler olduğu için hastanın çenesinden alınan şablonlar kullanılarak model üretimi gerçekleştirilir.

- **Mum/Model ağacı yapımı:** Çok sayıda aynı veya farklı mum model, üzerlerindeki ara yolluk parçasıyla merkezi bir yolluğa genellikle 45 °'lik bir açıyla birleştirilir.
- **Kalıp yapımı:** Bağlayıcı, agrega ve az miktar özel ilavelerden oluşan bir seramik tozu uygun oranda su ile karıştırılır. Bu kalıp tozu genelde hazır tedarik edilir. Elde edilen çamur derece içine doldurulur. Çamur karıştırma ve doldurma işlemlerinde hava boşluklarını gidermek için vakum uygulanır. Bu işlemlerin öncesinde model ağacı derecenin içine yerleştirilmiştir. Model ağacı ve dereceyi tutan lastik bir altlık bulunur. Bu altlık döküm ağzına da şekil verir ve kalıp sertleştikten sonra çıkartılır. Dereceler silindirik ve çoğunlukla paslanmaz çelikten üretilir. Döküm esnasında vakum desteği uygulanacaksa dereceler delikli olarak üretilir. Çamur doldurma öncesinde delikler yapışkan bant ile kapatılır, çamur sertleşince bu bant çıkartılır.

- **Mum alma:** Dereceli yöntemde mum almak için otoklav kullanılmaz. Kalıp kabuk şeklinde olmadığı için mumun genleşmesiyle kırılması olası değildir. Mum alma işlemi genellikle kalıpların pişirildiği fırında pişirme sürecinin ilk aşaması olarak gerçekleştirilir.
- **Kalıp pişirme:** Pişirme rejimi genellikle kalıp malzemesi üreticisinin tavsiyeleri doğrultusunda belirlenir. Kalıp bileşenlerinin artan sıcaklıkla geçirecekleri polimorfik değişimler göz önüne alınır ve bu değişimlerin gerçekleştiği kritik sıcaklıklarda kalıp boyutuna bağlı olarak belli süreler beklenerek kademeli bir pişirme işlemi uygulanır. Takı üretiminde bu süreç genelde bir gece sürer (overnight).

- **Döküm:** Pişirme süreci sonunda dökümü yapılacak alaşıma bağlı olarak doğru sıcaklığa getirilmiş kalıplara metal dökümü yapılır. Görece büyük parçalar için gravite döküm yapılabilir ancak genellikle ince kesitli parçaları doldurmak için üst basınç, vakum veya merkezkaç desteği gereklidir. Üretim adet ve hızına uygun bir makine ile döküm işlemi gerçekleştirilir. Takı üretiminde çoğunlukla tabandan boşaltmalı indüksiyon tipi vakum ve üst basınç uygulayan ocaklar kullanılmaktadır. Genellikle kıymetli metaller döküldüğü için her kalıp için tek ve ayrı şarj ergitmesi yapılmaktadır.
- **Kalıp bozma ve bitirme:** Katılaşmanın ardından genellikle kalıplar suya daldırılarak bozulur. Çıkan döküm ağaçları asit banyosunda temizlenir sonrasında yolluk kesme ve parlatma işlemlerine tabi tutulur.









1. Kalıp malzemesi tartılır



2. Su ölçülür



3. Toz suya katılır



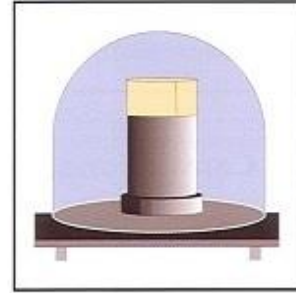
4. 3-3,5 dakika karıştırılır



5. 60 saniye vakumlanır



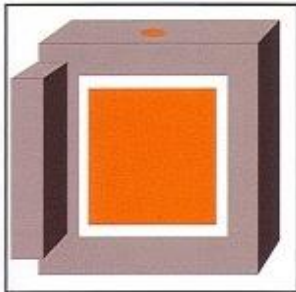
6. Derece doldurulur



7. 90 saniye vakumlanır



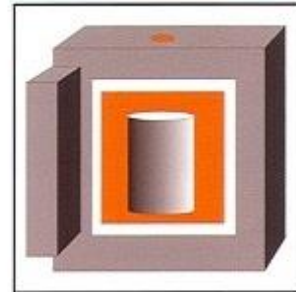
8. Dereceler 2 saat bekletilir



9. Fırın ön ısıtılır



10. Altlık çıkarılır

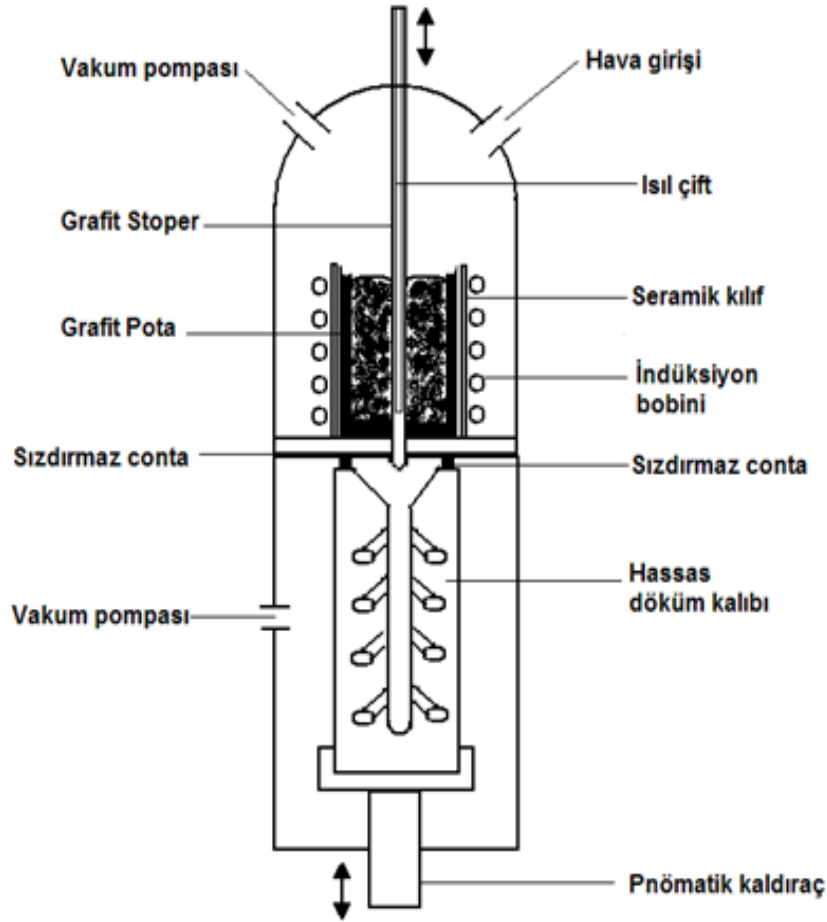


11. Kalıp fırına yüklenir



12. Uygun pişirme rejimi takip edilir

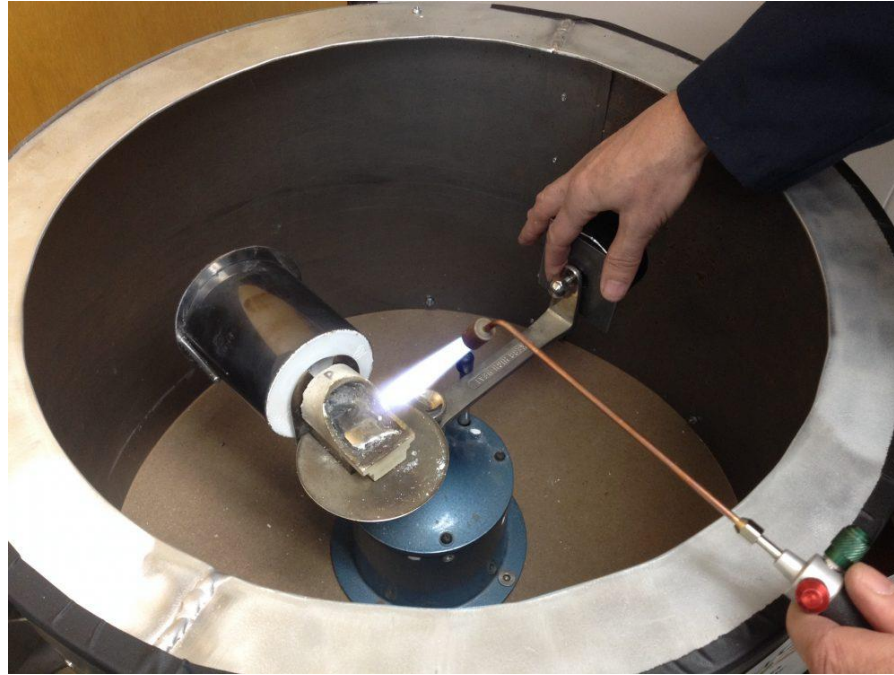
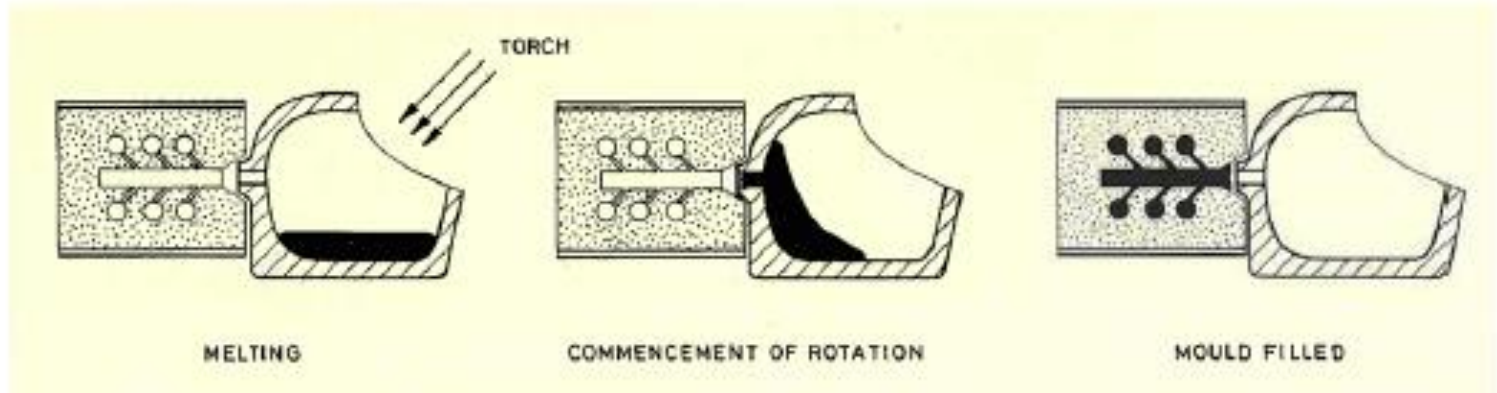




Basıncılı vakum döküm şeması



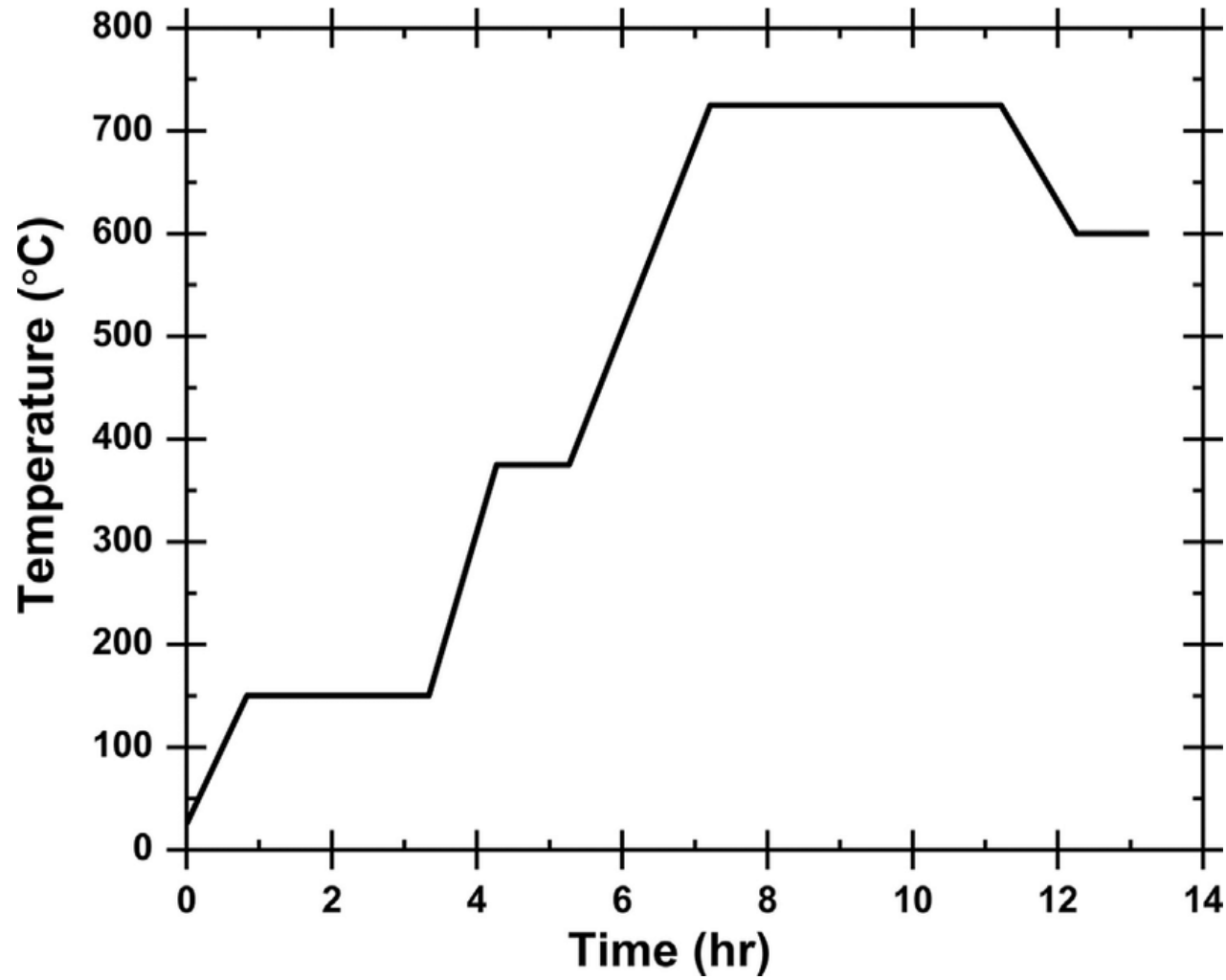
Basıncılı vakum döküm makinesi



Savurma destekli döküm makinesi

## Kalıp malzemeleri

- $T_{\text{erg}} < 1200\text{ }^{\circ}\text{C}$  olan alaşımlar (altın, gümüş ve bazı bakır alaşımları) için alçı bağlı kalıp malzemeleri kullanılır.
  - $\alpha$  Alçı bağlayıcı (%25-27)
  - + Silika agrega (Kuvars+Kristobalit)
  - + Kontrol ilaveleri (~%1)
- $T_{\text{erg}} > 1200\text{ }^{\circ}\text{C}$  olan alaşımlar (platin, paslanmaz çelik, Cr-Co ve bazı beyaz altın alaşımları) için fosfat bağlı kalıp malzemeleri kullanılır. Ayrıca yüksek alüminalı çimentolar da kullanılabilir.
  - Fosfat çimentosu bağlayıcı (~%20-25) → Monoamonyum fosfat (MAP)/Diamonyum fosfat (DAP) + Magnezyum oksit (MGO)
  - + Silika agrega (Kuvars+Kristobalit)
  - + Kontrol ilaveleri (~%1)



Alçı bağı dereceli hassas döküm kalıp malzemesi için örnek bir pişirme rejimi

## Mum Türleri

**Dolgulu model mumları**, dolgu maddeleri eklenmiş bir tür hassas döküm mumudur. Bu dolgu maddeleri, dayanım, boyutsal kararlılık, daha düşük ısı genleşme ve minimum büzülme sağlayarak döküme belirli özellikler kazandırabilir. Dolgulu model mumlarında bulunan dolgu maddesi türleri tedarikçiye göre değişir, ancak bazı yaygın dolgu maddeleri bisfenol-A (BPA), organik dolgu maddeleri, tereftalik asit ve çapraz bağlı polistireni içerebilir. Hem küçük hem de büyük modellerin üretimlerinde dolgulu kalıp mumları kullanılabilir. Bu mumların en önemli iki avantajı düşük ısı genleşmeye ve minimum büzülmeye sahip olmalarıdır. Mum katılaştıkça büzülmeyi önlemek için kalıpların boşluğuna mum soğutucularının yerleştirilmesini gerektirmezler. Bu mum türü genellikle oluşturulan parça veya bileşen üzerinde daha fazla boyutsal kontrol arandığında ve geniş bir enjeksiyon sıcaklığı aralığı olduğunda kullanılır. Eklenen dolgu maddesi nedeniyle, mum yanması daha uzun sürdüğü için mum alma işleminden sonra seramik kabukta bir miktar artık mum kalabilir. Dolgu malzemesinin yoğunluğuna bağlı olarak dolgulu model mumlarının geri kazanılması ve geri dönüştürülmesi zor olabilir.

**Dolgunsuz model mumu karışımları** daha az dolgu malzemesi içerir. Bu tip mumlar tutarlı mekanik ve ısı performans sunar. Karmaşık geometriler ve çok detaylı modeller söz konusu olduğunda tipik olarak küçük ve orta boy parçalar için kullanılır. Dolgunsuz mumlar olağanüstü akış özelliklerine sahiptir ve ana avantajı yüksek yüzey kalitesi sağlamasıdır. Böylece seramik kalıpta daha az çatlak ve kusur meydana gelir. Ayrıca, geri kazanılabildiği ve geri dönüştürülebildiği için seramik kabuktan tamamen arındırılır. Hassas döküm işlemlerinde dolgunsuz mumlar kullanılırken dikkatli olunmalıdır. Daha yavaş katılaşma nedeniyle modelin yüzeyi çökebilir. Mum sıcaklığına bağlı olarak modelin enine kesitleri boyunca istenmeyen büzölmeler de olabilir. Parça konfigürasyonuna bağlı olarak, büzölmeyi önlemek için dolgunsuz model mumlarında soğutucuların kullanılması gerekebilir.

**Yolluk mumu karışımları,** hassas döküm şirketleri tarafından yüksek mekanik dayanım ve daha düşük viskozite istendiğinde kullanılır. Bu tip mumlar model mumlarından daha düşük bir erime noktasına sahiptir. Böylece mum alma işlemi sırasında daha yüksek sıcaklıklar kullanmaya gerek kalmadan eriyen mum seramik kalıptan tamamen akar. Yolluk mumunun avantajları, iyi birleşme gücüne ve minimum ısıl genleşmeye sahip olmasıdır. Modellerin seramik kalıpta kırılmasından endişe etmeden yolluk mumları kullanabilir. Mum yolluğun üretimi takiben suya daldırılması ve tamamen katılaşıp kadar orada tutulması gerekir.

**Suda çözünen mumlar.** Bazı parçalar ve bileşenler karmaşık ve girift iç tasarımlar gerektirir. Bu nedenle mum modelin içine karmaşık maçalar yerleştirilmelidir. Bu maçaları oluşturmak için suda çözünen bir mum kullanılır. Maça, üretildikten sonra model kalıbına yerleştirilir ve ardından model mumu kalıba enjekte edilir. Model soğutulduktan sonra, suda çözünen maçalar su ve asit banyosu içinde çözülür.

**Yapışkan mumlar** genellikle birleştirme ve bitirme işlemleri sırasında kullanılır. Farklı model mumlarını birbirine bağlamaya veya bir yolluk düzeneği oluşturmaya yardımcı olur. Bu mumlar, seramik kabuğu oluştururken işçiler tarafından elle tutulmaya dayanabilmeleri için modellerin birleşim kısımlarında güçlü bir yapışma sağlar.



## Video linkleri

- <https://www.youtube.com/watch?v=npHQPXGGkgI>
- <https://www.youtube.com/watch?v=cptlGzWYFEk>
- <https://www.youtube.com/watch?v=FS0uM3OC76I>
- <https://www.youtube.com/watch?v=HtidZOsmFXg>
- <https://www.youtube.com/watch?v=9w8QvO5UQ6Q>
- <https://www.youtube.com/watch?v=WXFRRg8YMT0>
- <https://www.youtube.com/watch?v=GWVli5iY8BI>
- <https://www.youtube.com/watch?v=ifwcOscIBHw>
- <https://www.youtube.com/watch?v=13NwPMDpdAU>
- <https://www.youtube.com/watch?v=gmR8-zjBsik>