

TOZ ENJEKSİYON KALIPLAMA YÖNTEMİ İÇİN ÜRETİLMİŞ KOBALT ESASLI SÜPERALAŞIM BESLEME STOKLARININ REOLOJİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Eren GAYRETLİ ¹, Batuhan SORUŞBAY ², H. Özkan GÜLSOY ^{3*}

¹ Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 34722, Türkiye,

ORCID No : <https://orcid.org/0000-0003-3054-2348>

² Marmara Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, İstanbul, 34722, Türkiye,

ORCID No : <https://orcid.org/0000-0001-8108-1399>

³ Marmara Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, İstanbul, 34722, Türkiye,

ORCID No : <https://orcid.org/0000-0001-5366-5741>

| Anahtar Kelimeler | Öz |
|---|---|
| <i>Toz Enjeksiyon Kalıplama, Kobalt esaslı süperalaşım, Reolojik özellikler</i> | <i>Toz Enjeksiyon Kalıplama (TEK) gelişmiş bir Toz Metalurjisi (TM) üretim tekniği olup karmaşık geometriye ve dar tolerans aralıklarına sahip parçaların seri üretiminde kullanılan modern bir üretim metodudur. TEK'te kullanılan besleme stoklarının reolojik özellikleri, başarılı kalıplama işlemi üzerinde doğrudan etkiye sahiptir. Bu çalışmada, Co-212-C, Stellite-6 ve Fe50Co0,2Si kobalt esaslı süperalaşım tozları ve çeşitli polimerik bağlayıcılar kullanılarak üç farklı TEK besleme stoğu hazırlanmıştır. Kullanılan tozların besleme stoklarındaki kritik toz yükleme değerleri ve reolojik özellikler üzerindeki etkisi farklı sıcaklıklarda rotasyonel reometre cihazı kullanılarak incelenmiştir. Kullanılan tozların morfolojisi taramalı elektron mikroskopu (SEM) ile analiz edilmiştir. Hacimce %2,5'lük artışla %57,5-65 toz yükleme aralığında elde edilen besleme stoklarının TEK tekniği için temel gereksinimlerden biri olan psödoplastik akış davranışı sergilediği görülmüştür. Ayrıca yüksek toz yüklemelerindeki besleme stoklarının sıcaklığa karşı yüksek hassasiyet gösterdiği, düşük toz yüklemesi ve yüksek kayma hızı kombinasyonunun ise düşük viskoziteye ve bunun sonucunda toz ve bağlayıcının ayrışmasına neden olacağından TEK için uygun olmadığı görülmüştür.</i> |

INVESTIGATION OF RHEOLOGICAL PROPERTIES OF COBALT BASED SUPERALLOY FEEDSTOCKS MANUFACTURED FOR POWDER INJECTION MOLDING METHOD

| Keywords | Abstract |
|--|--|
| <i>Powder Injection Molding, Cobalt-based superalloy, Rheological properties</i> | <i>Powder Injection Molding (PIM) is an advanced Powder Metallurgy (PM) production technique, a modern production method used in the mass production of parts with complex geometry and narrow tolerance ranges. The rheological properties of the feedstock used in PIM have a direct impact on the successful molding process. In this study, three different powder injection molding (PIM) feedstocks were prepared by using Co-212-C, Stellite-6 and Fe50Co0.2Si cobalt-based superalloy powders and various polymeric binders. The effects of the powders used on the critical powder loading values and rheological properties in the feedstocks were investigated using a rotational rheometer device at different temperatures. The morphology of the powder was analyzed by scanning electron microscope (SEM). It has been observed that the feedstocks obtained in the powder loading range of 57.5-65% with an increase of 2.5% by volume exhibit pseudoplastic flow behavior, which is one of the main requirements for the PIM process. In addition, it has been observed that the feedstock at high powder loading is highly sensitive to temperature, and the combination of low powder loading and high shear rate is not suitable for PIM since it will cause low viscosity and as a result, the separation of powder and binder.</i> |

* Sorumlu yazar; e-posta : ogulsoy@marmara.edu.tr



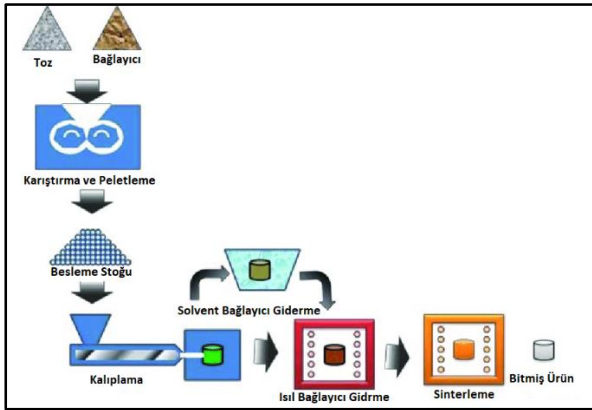
Bu eser, Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>) hükümlerine göre açık erişimli bir makaledir.

This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

| | | | |
|--------------------|--------------|------------------|--------------|
| Araştırma Makalesi | | Research Article | |
| Başvuru Tarihi | : 03.03.2022 | Submission Date | : 03.03.2022 |
| Kabul Tarihi | : 03.10.2022 | Accepted Date | : 03.10.2022 |

1. Giriş

TEK üretim tekniği, yüksek hacimdeki küçük ve karmaşık şekilli metal veya seramik parçaların efektif bir biçimde üretilebilmesi için plastik enjeksiyon kalıplamadan türetilmiş olan bir TM yöntemidir. Diğer geleneksel TM yöntemleri ile karşılaştırıldığında talaşlı işleme ihtiyaç duyulmaması, daha düşük maliyetli oluşu ve yüksek sertlikteki malzemelerden üretilecek olan parçalar için oldukça hassas boyutsal tolerans sağlaması temel avantajlarıdır. TEK sırasıyla; toz karışımına termoplastik bağlayıcı karıştırılarak besleme stoğunun oluşturulması, istenilen şeklin elde edilmesi için besleme stoğunun basınç altında kalıba enjeksiyonu, sıcaklık veya çözücü kullanılarak yapılan bağlayıcı giderme ve son olarak numuneleri yoğunlaştırmak için yapılan sinterleme işlemleri olmak üzere dört aşamadan oluşmaktadır (German, 1990; German ve Bose, 1997). TEK prosesinin genel akışı Şekil 1’de gösterilmiştir.



Şekil 1. TEK Akış Diyagramı

TEK prosesinde kullanılacak besleme stoğunun yüksek toz yüklemeye oranına sahip olması arzu edilmektedir. Uygun reolojik özellik sergilemeyen besleme stokları sadece kalıplama aşamasında başarıyı sınırlamakla kalmayıp aynı zamanda bağlayıcı giderme ve sinterleme aşamalarında da önemli problemlerin oluşmasına neden olurlar. Yüksek miktarda bağlayıcı kullanımı, kalıplama sırasında bağlayıcıların tozlardan ayrışmasına ve homojen olmayan parçalara sebep olacağından istenmeyen bir durumdur. Ancak aşırı toz yüklemesi de yüksek besleme viskozitesi sebebiyle akışı kısıtlayarak enjeksiyon kalıplamanın başarısız olmasına neden olacaktır (German, 1990; German ve Bose, 1997; Gülsoy, Özbek ve Baykara, 2007; Gülsoy ve Karataş, 2007). Bu nedenle toz ve bağlayıcı hacim oranına bağlı olan akıcılık, kalıplama aşaması için kritik öneme sahiptir ve besleme stoğunun belirli reolojik davranış göstermesi gerekmektedir (Karataş, Koçer, Ünal ve

Sarıtaş, 2004). Besleme stoğunun viskozitesi, başarılı TEK prosesinde akış davranışını belirlemek için gerekli olan en önemli özelliktir.

Yaşlandırılabilir kobalt esaslı süperalaşım, iyi mekanik özellik, korozyon direnci ve yüksek sıcaklıklarda oksidasyon direnci kombinasyonlarını gerektiren havacılık ve diğer uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak zayıf işlenebilirlik ve şekillendirilebilirlik özellikleri karmaşık şekilli parçaların üretim sonrası şekillendirilebilmelerine olanak sağlamamaktadır. Co esaslı süperalaşımın özellikleri büyük ölçüde kimyasal bileşimleri tarafından belirlenir. Cr, W ve Mo gibi katı çözümlü sertleştiricileri mukavemete katkı sağlarken temel mukavemet kazandırma mekanizmasını karbürler gerçekleştirir (Özgün, Gülsoy, Yılmaz ve Fındık, 2013a; Resende, Klein ve Prata, 2001). Karbürlerin tür, boyut ve şekilleri bu tip alaşımların özelliklerini güçlü bir şekilde etkilemektedir. Örneğin daha büyük boyutlu karbürler genellikle daha yüksek mukavemet elde edilmesine katkıda bulunmaktadır. Özellikler üzerinde önemli etkileri bulunan karbürlerin oluşumu başta karbon olmak üzere alaşım elementlerinin türü ve miktarı, üretim yöntemi, sinterleme sıcaklığı ve soğuma hızı ve operasyonel parametrelerden etkilenmektedir. Co esaslı alaşımların döküm yöntemi ile üretiminde porozite, segregasyon, iri tane boyutu ve dendritler arası ötektik karbür ağı gibi problemlerin önlenmesi veya giderilebilmesi için önemli tedbirler veya ilave ısıl işlemler gerekmektedir. Yüksek karbon oranına sahip Co esaslı alaşımların şekillendirilmesi ise yüksek sıcaklıklarda bile zordur (Gülsoy, Özgün ve Bilketaş, 2016).

Literatürde yapılan çalışmalarda, geleneksel metal enjeksiyon kalıplama yöntemi kullanılarak kobalt esaslı süperalaşım tozunun teorik yoğunluğunun %92-97'si aralığında elde edilebileceği bildirilmiştir (Özgün ve diğ., 2013a; Gülsoy ve diğ., 2016; Özgün, Gülsoy, Yılmaz ve Fındık, 2013b). Ancak TEK yöntemi ile üretimleri literatürde çok az ilgi görmüştür. Geleneksel üretim metotları ile üretilebilen kobalt esaslı süperalaşımın özellikle hassas ısıl işlem şartları altında mühendislik özellikleri üst seviyelere çıkartılabilmektedir.

Bu çalışmada, kobalt esaslı süperalaşım tozlarının reolojik karakterizasyonunun yanı sıra besleme stoğunun hazırlanmasına da odaklanmıştır. Besleme stoğunun reolojik özelliklerinin belirlenebilmesi için bağlayıcıların ısıl bozunma sıcaklığı, katı toz oranı ve karıştırma sıcaklığı tayinleri gerçekleştirilmiştir. Bu bağlamda, katı oranı ile sıcaklık arasındaki ilişki deneysel değerlendirme için büyük önem taşımaktadır.

2. Yöntem

Bu çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur, Sandvik Company'den bilgileri ile birlikte tedarik edilmiş kobalt esaslı Co-212-C, Stellite-6 ve Fe50Co0,2Si tozları kullanılmıştır. Tozların kimyasal bileşimi Tablo 1'de verilmiştir. Co-212-C, Stellite-6 ve Fe50Co0,2Si tozlarının özgül yüzölçümü sırasıyla 0,724 m²/g, 0,599 m²/g ve 0,719 m²/g'dır. Ortalama tane boyutu dağılım ölçümleri Malvern Mastersizer 2000 cihazı ile gerçekleştirilmiş olup Şekil 2'de SEM (FEI-Srion) fotoğrafları ile birlikte verilmiştir. Tozların D₅₀ ve D₉₀ değerleri sırasıyla 11,5 µm, 13,7 µm ve 11,1 µm ve 21,7 µm, 26,9 µm ve 21,8 µm olarak ölçülmüştür. Her üç tip tozun genel olarak küresel şekilli olduğu ve toz yüzeylerinde uydulaşma olsa da genel anlamda toz yüzey pürüzlülüğü oldukça düzdür.

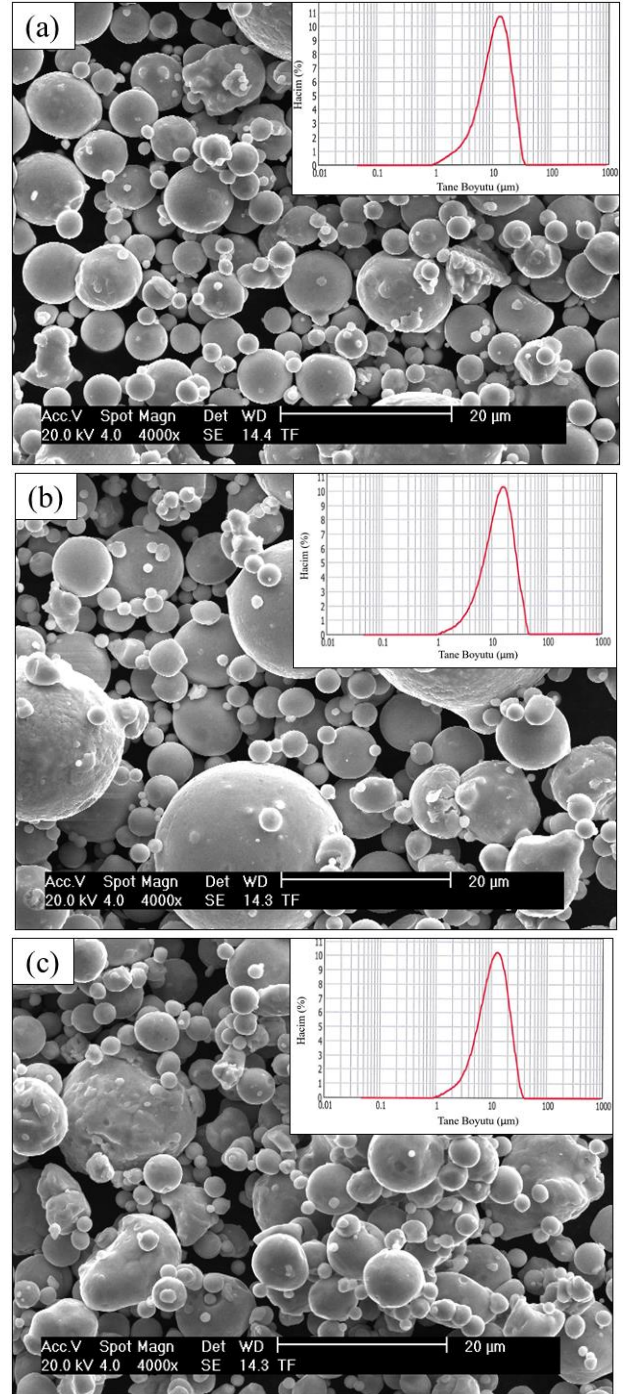
Tablo 1

Kullanılan Tozların Kimyasal Bileşimi (ağ.%)

| Toz | Co-212-C | Stellite-6 | Fe50Co0,2Si |
|-----|----------|------------|-------------|
| Co | Kalan | 50 | Kalan |
| Fe | 0,75 | Kalan | - |
| Cr | 28 | 0,70 | 27-32 |
| C | Eser | - | 0,90-1,40 |
| W | - | - | 4-6 |
| Mo | 6 | - | - |
| Mn | 0,70 | 0,25 | - |
| Ni | 0,10 | 0,70 | - |
| Si | 0,70 | 0,25 | - |

Çok bileşenli bağlayıcı sistemi, hacimce %69 parafin mum (PW), %20 carnauba mum (CW), %10 polipropilen (PP), ve %1 stearik asitten (SA) oluşmaktadır. SA ve belirli miktardaki süperalaşım tozları Turbula karıştırıcısında kuru halde 1 saat karıştırılmıştır. Bu işlem sonraki proses aşamaları için aktif toz yüzeyi oluşturmaktadır. Tablo 2'de kullanılan bağlayıcıların karakteristik özellikleri verilmiştir.

Bağlayıcı sisteminde en yüksek erime sıcaklığına sahip PP, 160°C üzerinde eridiğinden dolayı bağlayıcı sistemi 180-200°C'de 1 saat boyunca karıştırılarak eritilmiştir. %57,5, 60, 62,5 ve 65 hacim oranlarındaki tozlar bağlayıcı sistemi ile karıştırılarak besleme stokları elde edilmiştir. Bağlayıcıların ısıl bozunma sıcaklıklarının tespiti için SII 6300 TGA-DTA (SII Nanaotechnology Inc. Tokyo) markalı Termogravimetrik Analiz (TGA) cihazı ile oda sıcaklığından 600°C'ye kadar 10°C/dk ısıtma hızında gerçekleştirilmiştir. Besleme stoğunun reolojik davranışları 10-1000 s⁻¹ kayma hızı ve 130-160°C sıcaklık aralığında Anton Paar Physica MCR51 markalı rotasyonel reometre cihazı ile analiz edilmiştir. Viskozite değeri, kayma gerilmesinin kayma hızına bölünmesiyle bulunmuştur. Elde edilen veriler literatür bilgileri ile karşılaştırılarak TEK için en uygun akış özelliklerini sergileyen besleme stokları tespit edilmiştir.



Şekil 2. Kobalt Esaslı Tozların SEM Fotoğrafları ve Ortalama Boyutu Dağılımları: a) Co-212-C, b) Stellite-6, c) Fe50Co0,2Si

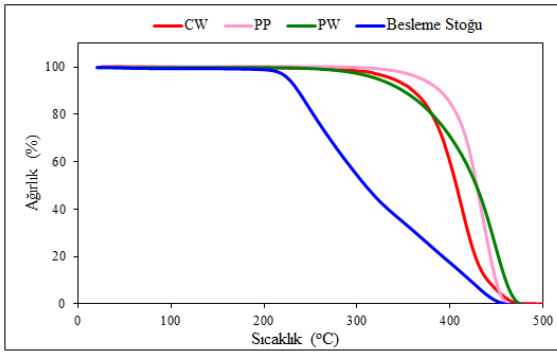
Tablo 2

Bağlayıcı Sistemindeki Bağlayıcı Bileşenlerinin Karakteristik Özellikleri

| Bağlayıcı | Firma | Şekil | Yoğunluk (g/cm ³) | Erime Sıcaklığı (°C) | Molekül Ağırlığı (g/mol) |
|---------------|--------|-------|-------------------------------|----------------------|--------------------------|
| Parafin mumu | MERC | Tane | 0,90 | 60 | 350-420 |
| Carnauba mumu | MERC | Pul | 0,97 | 82 | 1300-1500 |
| Polipropilen | PETKIM | Tane | 0,89 | 161 | 43000 |
| Stearik asit | MERC | Pul | 0,85 | 73 | 285 |

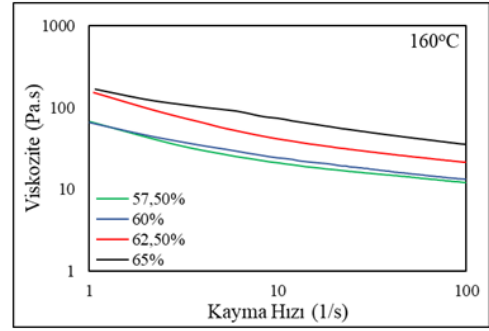
3. Bulgular ve Tartışma

Şekil 3'de bağlayıcıların sıcaklığa bağlı ağırlık kaybı eğrilerini gösteren TGA grafiği verilmiştir. 200°C'ye kadar bağlayıcılarda herhangi bir bozunma gözlenmezken, 200°C üzerinde SA, 300°C'ye gelindiğinde ise diğer bağlayıcıların bozunmaya başladığı, 475°C üzerinde ise tüm bağlayıcıların tamamen bozulduğu görülmektedir. Bu durum bağlayıcı sistemindeki temel bir ayrışma mekanizmasıdır. Özellikle farklı polimerik bağlayıcılar kullanılarak bağlayıcıların sırasıyla bozunması ve bozunma sırasında kalıplanmış numunelerde herhangi bir hasara yol açmaması sinterleme öncesinde büyük önem arz etmektedir (German ve Bose, 1997). Artan sıcaklığa bağlı olarak bağlayıcı sistemini oluşturan bileşenlerin sırasıyla bozunmaları gerek bağlayıcı giderme gerekse de ön sinterleme sırasında kalıplanmış parçaların şekillerinin muhafazası için gereklidir (German ve Bose, 1997; Gülsoy ve diğ., 2016).

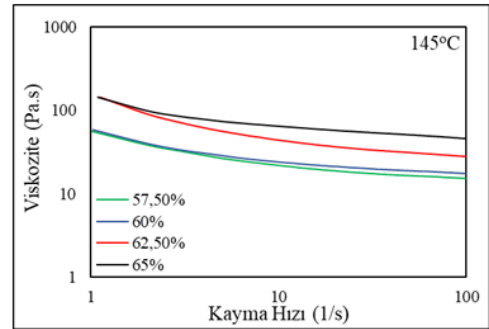


Şekil 3. Bağlayıcıların TGA Eğrileri

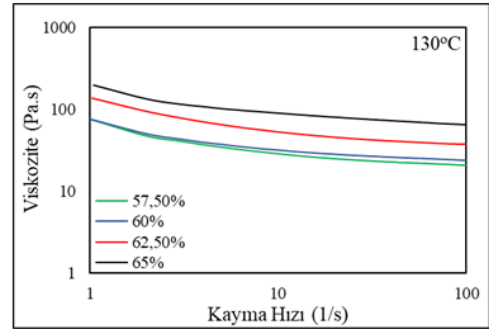
Besleme stoklarının farklı sıcaklık ve kayma hızlarında viskozite değişimleri Şekil 4-12'de verilmiştir. 130°C'de akış elde edilemediği için bu sıcaklık değerinin altı incelenmemiştir. Bazı durumlarda karışım 160°C üzerinde yüksek viskozite değerleri göstermiştir. Bu nedenle 160°C üzeri sıcaklıklar da çalışılmamıştır. Bununla birlikte bu çalışmada sadece 130, 145 ve 160°C sıcaklıklarındaki davranışlar açıklanmıştır. Tüm farklı toz besleme oranlarında, artan kayma hızına bağlı olarak besleme stoğu viskozite değerleri düşüş göstermiştir. Bu ise yüksek kayma hızlarında kalıplama işleminin daha kolay gerçekleşeceğinin bir göstergesidir. Genel olarak 100 Pa.s değerlerinin altındaki viskozite değerleri ideal kalıplama şartlarını işaret etmektedir (German, 1990; German ve Bose, 1997). Bağlayıcı ve toz karışımı uyum içinde olmalıdır. Aşırı bağlayıcı kullanımı toz ve bağlayıcı ayrışması, sinter problemleri ve sedimentasyon gibi sorunlara yol açmaktadır (German, 1990). Buna ek olarak aşırı toz kullanımında viskozitenin artışı ve kalıplama problemleri görülebilmektedir (German, 1990; German ve Bose, 1997).



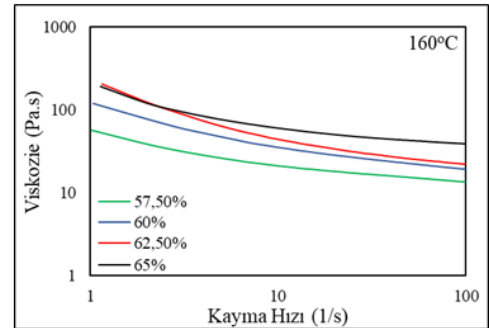
Şekil 4. Farklı Toz Oranlarındaki Co-212-C Besleme Stoklarının 160°C'deki Viskozite Değerleri



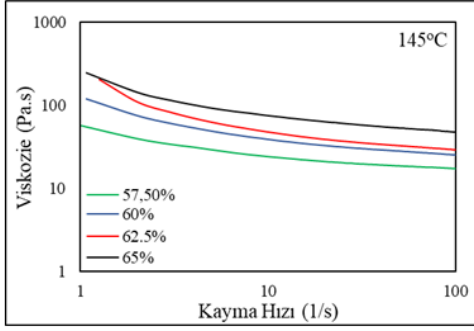
Şekil 5. Farklı Toz Oranlarındaki Co-212-C Besleme Stoklarının 145°C'deki Viskozite Değerleri



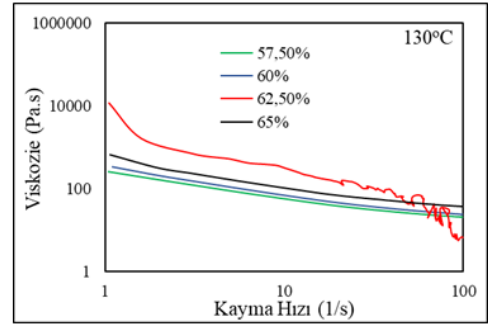
Şekil 6. Farklı Toz Oranlarındaki Co-212-C Besleme Stoklarının 130°C'deki Viskozite Değerleri



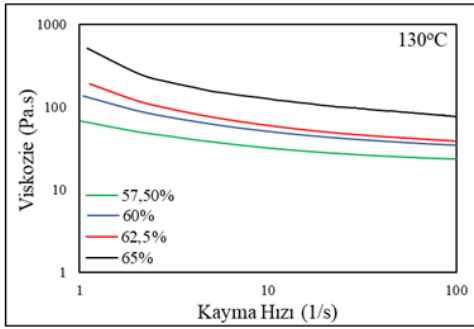
Şekil 7. Farklı Toz Oranlarındaki Stellite-6 Besleme Stoklarının 160°C'deki Viskozite Değerleri



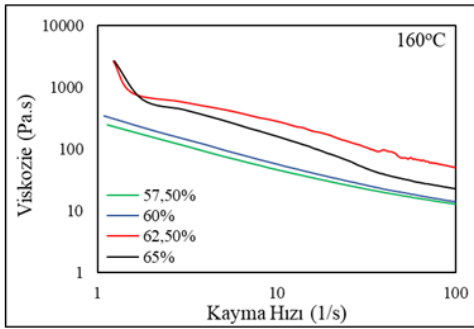
Şekil 8. Farklı Toz Oranlarındaki Stellite-6 Besleme Stoklarının 145°C'deki Viskozite Değerleri



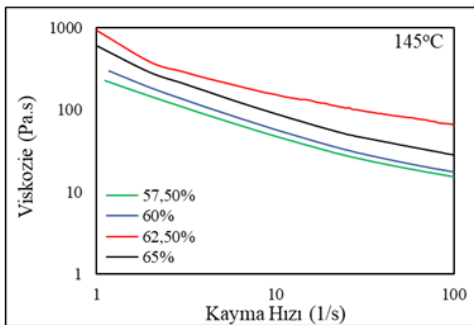
Şekil 12. Farklı Toz Oranlarındaki Fe50Co0,2Si Besleme Stoklarının 130°C'deki Viskozite Değerleri



Şekil 9. Farklı Toz Oranlarındaki Stellite-6 Besleme Stoklarının 130°C'deki Viskozite Değerleri



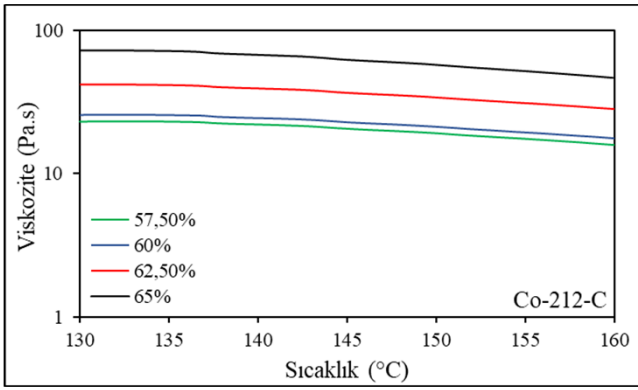
Şekil 10. Farklı Toz Oranlarındaki Fe50Co0,2Si Besleme Stoklarının 160°C'deki Viskozite Değerleri



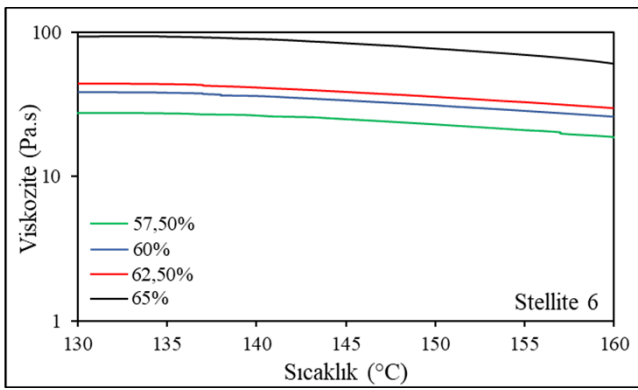
Şekil 11. Farklı Toz Oranlarındaki Fe50Co0,2Si Besleme Stoklarının 145°C'deki Viskozite Değerleri

TEK metodunda kalıplamanın başarılı bir şekilde gerçekleştirilebilmesi için kayma hızının 10-100 s⁻¹ aralığında, viskozitenin ise 100 Pa.s'den küçük olması; bağlayıcı ve tozun birbirinden ayrışmaması için ise psödoplastik akış göstermesi gerekmektedir (Resende ve diğ., 2001; Thavanayagam, Pickering, Swan ve Cao, 2015). Psödoplastik davranış, kaymanın artmasının düzgün parçacık dağılımını desteklediğini ve küçük parçacıkların büyük parçacıklar arasındaki boşluğa sığmasına izin verdiğini göstermektedir (Martin ve diğ., 2013). Düşük kayma hızlarında eriyik polimer içindeki kararlı parçacık ağ yapısı yüksek kayma hızlarında bozulmaktadır (Thavanayagam ve diğ., 2015). Besleme stoğunun reolojik özellikleri kalıplama prosesini etkilemektedir. Uygun olmayan reolojik davranış kalıpta short-shot, flash, çatlama, köpürme, çarpılma ve toz-bağlayıcı sisteminde ayrışmaya neden olabilir (Lin, Sanetnik, Cho, Chung, Kwon, Kate, Hausnerova, Atre ve Park, 2016).

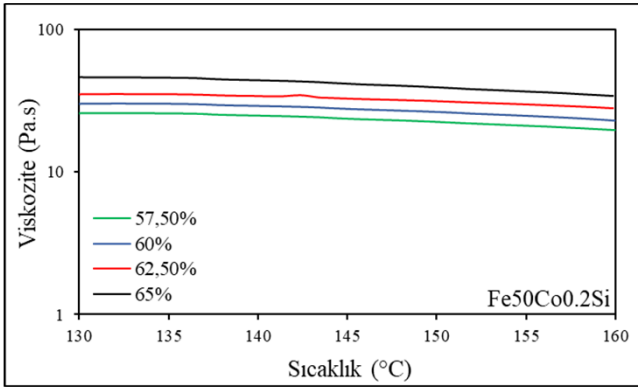
Şekil 13-15'de besleme stoklarının, sabit kayma hızında sıcaklığa bağlı viskozite değişiminin grafiği gösterilmektedir. Tüm yüzde hacim toz oranlarında besleme stoklarının viskoziteleri sıcaklığın artışıyla azalma göstererek psödoplastik akış davranışı sergilemektedir. Bu davranış, sıvı bağlayıcının serbest bırakılmasıyla parçacık yığınlarının kırılmasından kaynaklanmaktadır (German, 1990; German ve Bose, 1997). Artan toz yüklemesi ile hem viskozite değerlerinde hem de sabit bir viskozite değerindeki gerekli olan sıcaklıklarda da artma olmaktadır. Ayrıca minimum toz yükleme oranından yukarı çıkıldıkça besleme stoklarının katılma sıcaklıklarında artış gerçekleşmektedir.



Şekil 13. Sabit Kayma Hızında Artan Sıcaklıkla Co-212-C Toz İçerikli Besleme Stoğuna Ait Viskozite Değişimi



Şekil 14. Sabit Kayma Hızında Artan Sıcaklıkla Stellite-6 Toz İçerikli Besleme Stoğuna Ait Viskozite Değişimi



Şekil 15. Sabit Kayma Hızında Artan Sıcaklıkla Fe50Co0,2Si Toz İçerikli Besleme Stoğuna Ait Viskozite Değişimi

4. Sonuçlar

Yapılan bu çalışmada, kobalt esaslı toz besleme stoklarının reolojik davranışları çeşitli kayma hızı, sıcaklık ve toz hacim oranlarında incelenmiş olup besleme stoklarının farklı sıcaklık ve toz yükleme oranlarında farklı reolojik özellikler gösterdikleri görülmüştür. Tüm besleme stoklarında, toz yükleme

oranının artışı viskoziteyi arttırırken, kayma hızının artışı viskoziteyi düşürmüştür. Fe50Co0,2Si besleme stoğunun tüm sıcaklık değerlerinde en yüksek viskoziteye sahip olduğu görülmüştür. Co-212-C tozundan elde edilen %57,5 ve 60 toz yükleme oranlarındaki besleme stoklarının tüm sıcaklık değerlerinde TEK kalıplama için uygun olduğu, %62,5 ve 65 toz yükleme oranlarının ise yüksek kayma hızlarında istenilen viskozite değerine yaklaştığı ancak yüksek kayma hızlarında kalıplama yapılmasının pek pratik olmaması nedeniyle TEK kalıplama için uygun olmadıklarını göstermektedir. Stellite 6 tozlarından elde edilmiş besleme stoklarında, %57,5 toz yükleme oranındaki besleme stoğunun tüm sıcaklık değerlerinde TEK kalıplama için uygun olduğu, %60 toz yükleme oranının 145°C üstündeki sıcaklarda uygun davranış gösterdiği, %62,5 ve %65 toz yükleme oranlarının ise yüksek viskozite nedeniyle uygun olmadığı tespit edilmiştir. Fe50Co0,2Si tozlarından elde edilmiş tüm besleme stoklarının düşük kayma hızlarında istenilen viskozite değerinin üstünde olduğu, 145 ve 160°C'de yapılmış olan incelemelerde kayma hızı artışıyla birlikte viskozitede hızlı düşüşün gerçekleştiği görülmüştür. %57,5 ve 60 toz oranları ile üretilmiş besleme stoklarının 145 ve 160°C sıcaklıkları için uygun olabileceği ancak kayma hızındaki artışın sebep olduğu viskozite düşüşünün kalıplama sırasında sorun oluşturabileceği göz önüne alınmalıdır. Sonuç olarak üç farklı toz kullanılarak üretilmiş kobalt esaslı besleme stoklarında %57,5 ve 60 toz yükleme oranlarının TEK prosesi için uygun olduğu tespit edilmiştir.

Teşekkür

FEN-C-YLP-120917-0550 proje nolu bu çalışmayı desteklemiş olan Marmara Üniversitesi'ne teşekkür ederiz.

Araştırmacıların Katkısı

Bu çalışmada; Eren GAYRETLİ, deneylerin gerçekleştirilmesinde, literatür araştırmasında, sonuçların değerlendirilmesi ve yazımında, Batuhan SORUŞBAY, sonuçların değerlendirilmesi, yorumlanması ve yazımında, H. Özkan GÜLSOY, deneylerin tasarlanması, sonuçların değerlendirilmesi, yorumlanması ve yazımında katkı sağlamıştır.

Çıkar Çatışması

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir.

Kaynaklar

- German, R.M. (1990). *Powder Injection Molding*. NJ, USA: Metal Powder Industries Federation.
- German, R.M. ve Bose, A. (1997). *Injection Molding of Metals and Ceramics*. Princeton, NJ: Metal Powder Industries Federation.
- Gulsoy, H.O. ve Karatas C. (2007). Development of poly(2-ethyl-2-oxaline) based water-soluble binder for injection molding of stainless steel powder. *Materials and Design*, 28 (9), 2488-2491. doi: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2006.09.002>
- Gulsoy, H.O., Ozbek S. ve Baykara T. (2007). Microstructural and mechanical properties of injection moulded gas and water atomized 17-4 PH stainless steel powder. *Powder Metallurgy*, 50 (2), 120-126. doi: <https://doi.org/10.1179/174329007X153288>
- Gulsoy, H.O., Ozgun, O. ve Bilketaş, S. (2016). Powder injection molding of Stellite 6 powder: Sintering, microstructural and mechanical properties. *Materials Science and Engineering A*, 651, 914-924. doi: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2015.11.058>
- Karatas, C., Kocer, A., Unal, H.I. ve Saritas, S. (2004). Rheological properties of feedstocks prepared with steatite powder polyethylene based thermoplastic binders. *Journal of Materials Processing Technology*, 152 (1), 77-83. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2004.03.009>
- Lin, D., Sanetnik, D., Cho, H., Chung, T.S., Kwon, Y.S., Kate, K.H., Hausnerova, B., Atre, S. ve Park, S.J. (2016). Rheological and thermal debinding properties of blended elemental Ti-6Al-4V powder injection molding feedstock. *Powder Metallurgy*, 311, 353-363. doi: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2016.12.071>
- Martin, R., Vick, M., Kelly, M. M., DeSouza, J.P., Ravi K. ve Atre, S. (2013). Metal injection moulding of titanium and titanium alloys: Challenges and recent development. *Journals of Material Research and Technology*, 319, 263-268. doi: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2017.06.053>
- Ozgun, O., Gulsoy, H.O., Yilmaz, R. ve Findik, F. (2013a). Microstructural and mechanical characterization of injection molded 718 superalloy powders. *Journal of Alloys and Compounds*, 576, 140-153. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2013.04.042>
- Ozgun, O., Gulsoy, H.O., Yilmaz, R. ve Findik, F. (2013b). Injection molding of nickel based 625 superalloy: Sintering, heat treatment, microstructure and mechanical properties. *Journal of Alloys and Compounds*, 546, 192-207. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2012.08.069>
- Resende, L.M., Klein, A.N. ve Prata, A.T. (2001). Rheological Properties of Granulometric Mixtures for Powder Injection Molding. *Key Engineering Materials*, 189-191, 598-603. doi: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.189-191.598>
- Thavanayagam, G., Pickering, K.L., Swan, J.E. ve Cao, P. (2015). Analysis of rheological behaviour of titanium feedstocks formulated with a water-soluble binder system for powder injection moulding. *Powder Technology*, 269, 227-232. doi: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2014.09.020>