

## Bağlayıcı sistemi ve sıcaklığın su atomize 316L toz enjeksiyon kalıplama besleme stoklarının reolojik özelliklerine etkisi

### Influence of binder system and temperature on rheological properties of water atomized 316L powder injection moulding feedstocks

Uğur GÖKMEN<sup>1\*</sup>, Mehmet TÜRKER<sup>2</sup>, Hanifi ÇİNİCİ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye.  
ugurgokmen@gazi.edu.tr

<sup>2</sup>Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Teknoloji Fakültesi, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye.  
mturker@gazi.edu.tr, hcinici@gazi.edu.tr

Geliş Tarihi/Received: 09.10.2014, Kabul Tarihi/Accepted: 01.09.2015  
\* Yazışılan yazar/Corresponding author

doi: 10.5505/pajes.2015.00378  
Araştırma Makalesi/Research Article

#### Öz

Hatasız toz enjeksiyon kalıplama (TEK) işlemi için besleme stoklarının reolojik özellikleri iyi bilinmelidir. Bu çalışmada 316L paslanmaz çelik tozunun reolojik özelliklerine bağlayıcı sisteminin etkisini belirlemek amacıyla 2 farklı bağlayıcı sistemi kullanılarak besleme stokları hazırlanmıştır. Deneysel çalışmalarda 20 mikron altı su atomize 316L paslanmaz çelik tozu kullanılmıştır. Heptan içerisinde çözünebilen parafin wax (PW) esaslı ve su içerisinde çözünebilen polietilenglikol (PEG) esaslı iki farklı bağlayıcı sistemi hazırlanmıştır. Her iki bağlayıcı sistemi içerisinde iskelet bağlayıcı olarak polipropilen (PP) ve yağlayıcı olarak stearik asit (SA) kullanılmıştır. Bağlayıcı sistemleri kuru olarak turbula marka 3 boyutlu karıştırıcıda 30 dakika karıştırılarak hazırlanmıştır. Toz ve bağlayıcı sistemleri kullanılarak hazırlanan besleme stoklarının reolojik özellikleri kılcal reometre kullanılarak karakterize edilmiştir. Kılcal reometrenin sıcaklığı 150-200 °C aralığında basınç değerleri ise 0.165-2.069 MPa arasında değiştirilmiştir. PEG esaslı bağlayıcı sistemi kullanılarak hazırlanan besleme stoklarında toz taşıma kapasitesi hacimce %55'e, PW esaslı bağlayıcı sistemi kullanılarak hazırlanan besleme stoklarında ise %61'e çıkartılmıştır. PEG esaslı besleme stoklarında en düşük viskozite değeri 304.707 Pa.s olarak, PW esaslı besleme stoklarında en düşük viskozite değeri 48.857 Pa.s olarak elde edilmiştir.

**Anahtar kelimeler:** TEK, Bağlayıcı, Reolojik özellikler

#### Abstract

In order to obtain a proper powder injection molding the rheological behavior of feedstocks should be known. To determine the binder effect on the rheological behavior of 316L stainless steel powders feedstock two different feedstock were prepared. In the current experiments water atomized 316L stainless steel powders (-20 µm) were used. Two types of binders, one of which is mainly paraffin wax can be dissolved in heptane and the other Polietilenglikol (PEG) based and can be dissolved in water, were used. Polypropylene was used as binder and steric acid was used as lubricant for both binder systems as skeleton binder. Dry binder system were mixed for 30 min in a three dimensional Turbula. Capillary rheometer was used to characterize the rheological properties of feed stocks at 150-200 °C and a pressures of 0.165-2.069 MPa. Powder loading capacity of PEG and PW based feed stocks were found to be %55 and %61 respectively. The lowest viscosity of PEG and PW based feed stocks were found to be 304.707 Pa.s and 48.857 Pa.s respectively.

**Keywords:** PIM, Binder, Rheological properties

## 1 Giriş

Toz enjeksiyon kalıplama (TEK), karmaşık geometriye sahip parçaların düşük maliyette ve yüksek miktarlarda üretilebilmesi için geliştirilmiş olan bir tekniktir. TEK yöntemi seramik ve metal matrisli kompozit parçaların üretimi için günümüzde yaygın olarak kullanılmaktadır [1]. TEK işlemi metal tozları ve bağlayıcının karıştırılması, enjeksiyon kalıplama, bağlayıcı ayrıştırma ve tam yoğunluk için sinterleme aşamalarını içermektedir [2]. İşlemin ilk bölümü besleme stoğu hazırlama aşamasıdır. Besleme stoğu; toz ve bağlayıcı karışımından oluşan, enjeksiyon kalıplama yöntemine ait bir terim olarak kabul edilebilir. Hazırlanan besleme stokları uygun basınç ve planlanan işlem sistematiği dâhilinde kalıplanarak ham yoğunluğa sahip ilk ürün elde edilir. Ham yoğunluk kazandırılmış numuneler işlem sürecinde kritik bir dilimi oluşturan bağlayıcı ayrıştırma aşamasına tabii tutulurlar. TEK yönteminin son aşamasında ise numuneler kullanılan toz özelliklerine bağlı olarak sinterlenir ve nihai ürün elde edilir [3]. Başarılı bir TEK işlemi için bağlayıcı miktarı ve bileşimi belirlenmesi gereken bir faktördür. Besleme stoku içerisindeki bağlayıcı miktarının az olması, besleme stokları içerisinde

boşluklar ile birlikte yüksek viskoziteye ve bu durum kalıplama işlemi sırasında zorlanmaya sebep olmaktadır. Ayrıca çok miktarda bağlayıcı, kalıplanmış parçanın bağlayıcı giderme ve sinterleme işlemleri sırasında şekil kaybına ve çarpılmaya neden olmaktadır. Toz-bağlayıcı arasında bağlayıcının bir miktarı vardır ve bu değer besleme stokları için optimum değerdir. Bu değer kullanılan toz bağlayıcı sistemi için özeldir ve değişebilir [4],[5]. Son yıllarda toz metal (TM) paslanmaz çelik parçaların aşınma direnci ve korozyon dayanımını artırmak üzere işlem parametreleri değiştirilerek çalışmalar yapılmaktadır [6]. TM parçaların yoğunluğunu artırmak ve gözenekliliğini azaltmak için birçok yöntem denenmektedir. TEK teknolojisi birçok mühendislik malzemesine günümüzde başarılı bir şekilde uygulanmaktadır. Bu malzemeler arasında korozyon direnci ile ön plana çıkan paslanmaz çelikler önemli bir yer oluşturmaktadır. Paslanmaz çelik tozlarından TEK yöntemi ile parça üretimi için çeşitli çalışmalar yapılmaktadır [7],[8]. TEK yöntemi ile parça üretiminde öne çıkan önemli noktalardan birisi kullanılan besleme stoklarının reolojik özellikleridir. Sotomayor ve arkadaşları yaptıkları çalışmada ferritik ve östenik paslanmaz çelik tozlarını karıştırarak toz enjeksiyon kalıplanabilirliğini incelemişlerdir. Parafin wax ve

yüksek yoğunluklu polietilen içeren bağlayıcı sistemi kullanarak hazırladıkları besleme stoklarında elde edilen reoloji sonuçlarına göre optimum toz yükleme oranını hacimce %68 olarak belirlemişlerdir [9]. Su atomize nano boyutta 316L paslanmaz çelik tozları ile yapılan bir çalışmada parafin wax esaslı bağlayıcı sistemi kullanılarak hazırlanan besleme stoklarının toz yükleme oranı hacimce %62-70 aralığında değiştirilmiş ve kullanılan bağlayıcı sistemine bağlı olarak elde edilen reoloji sonuçlarına göre optimum toz yükleme oranı %66 olarak tespit edilmiştir [10]. Besleme stokları içerisinde bulunan bağlayıcı bileşenleri ve miktarı toz enjeksiyon kalıplama işleminde kritik bir aşamayı oluşturmaktadır. Bağlayıcı bileşenleri besleme stokunun akış özelliklerini etkilemesinin yanı sıra bağlayıcı giderme ve sinterleme işlemleri sonrası kalıplanmış parça şekline doğrudan etki eden bir tasarım parametresi olarak değerlendirilebilir.

Yapılan çalışmada PEG ve PW esaslı iki farklı bağlayıcı sistemi hazırlanmıştır. Bağlayıcı sistemleri içerisinde kullanılan bağlayıcı bileşenlerinin miktarları özgün değerler olup besleme stoklarının reolojik özelliklerine doğrudan etkisi bulunmaktadır. Yağlayıcı olarak SA kullanılmıştır. Hazırlanan iki farklı bağlayıcı sistemi ve su atomize karmaşık şekilli 316L paslanmaz çelik tozu kullanılarak farklı toz yükleme (hacimce %55-61) oranlarında besleme stokları hazırlanmıştır. Hazırlanan besleme stoklarının, değişen sıcaklığa ve basınca bağlı olarak reolojik özellikleri karakterize edilmiştir.

## 2 Malzeme ve Yöntem

Yapılan çalışmalarda kullanılan 316L paslanmaz çelik tozu Ametek firmasından temin edilmiş 20 mikron altı su atomize karmaşık şekilli tozdur. Piknometre yoğunluğu 7.84 g/cm<sup>3</sup>'tür. 316L paslanmaz çelik tozunun kimyasal bileşimi Tablo 1'de ve toz şekli Şekil 1'de verilmiştir.

Malvern Mastersizer marka lazer saçınım boyut ölçme cihazı kullanılarak ortalama toz boyutları belirlenmiştir. 316L tozunun ortalama boyut değerleri ve parçacık boyut dağılımları Tablo 2 ve Şekil 2'de verilmiştir.

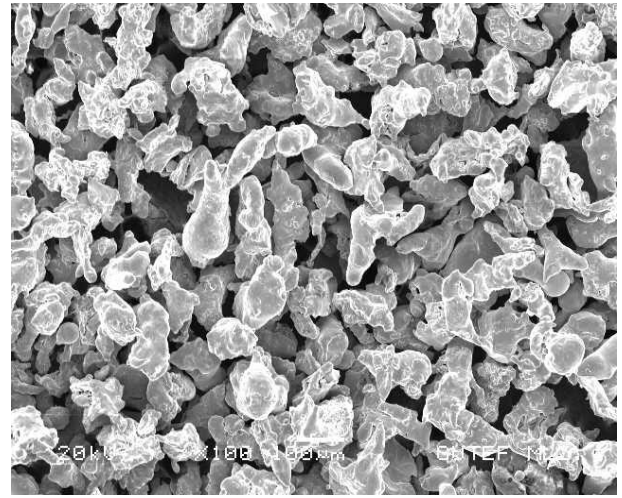
Birden fazla bağlayıcı bileşeni içeren bileşenlerin kullanılması durumunda bağlayıcı giderme aşamasında oluşabilecek hataların minimuma indirilebileceği bildirilmektedir [11].

Deneysel çalışmalarda kullanılmak üzere 2 farklı bağlayıcı

sistemi hazırlanmıştır. Bağlayıcı sistemleri içerisinde kullanılan bileşenlerin özellikleri Tablo 3'te ve çalışmada kullanılan bağlayıcıların oranları Tablo 4'te verilmiştir.

Tablo 1: 316L paslanmaz çelik tozunun kimyasal bileşimi.

Element	% Ağırlıkça
C	0.02
Mn	0.2
Si	0.8
P	0.01
S	0.01
Cr	17
Mo	2.5
Ni	13
Fe	Kalan

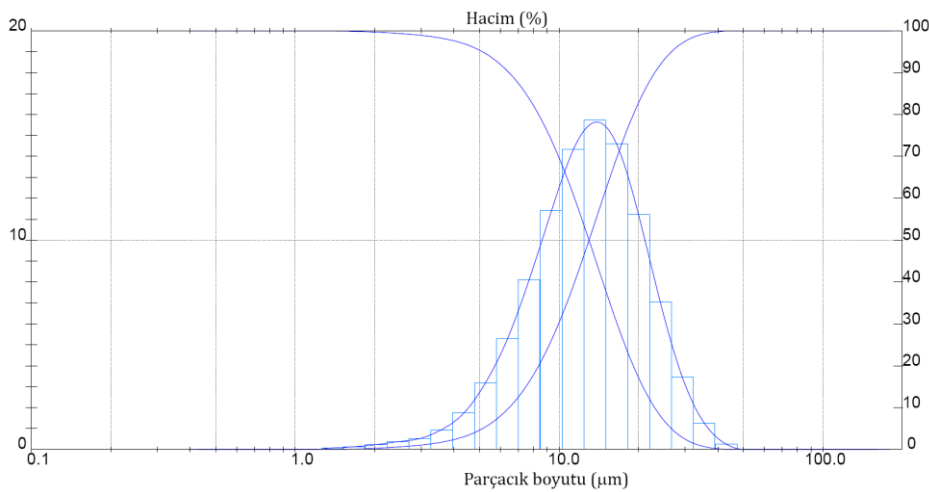


Şekil 1: 316L paslanmaz çelik tozunun SEM görüntüsü.

Tablo 2: 316L paslanmaz çelik tozunun D<sub>(10)</sub>, D<sub>(50)</sub> ve D<sub>(90)</sub> değerleri.

D <sub>(10)</sub> , µm	D <sub>(50)</sub> , µm	D <sub>(90)</sub> , µm
6.46	12.99	23.05

Bağlayıcı sistemleri B1 ve B2 olarak adlandırılmıştır. B1 bağlayıcı sistemi ağırlıkça suda çözünebilir PEG esaslı malzemeden oluşmaktadır.



Şekil 2: 316L paslanmaz çelik tozunun boyut dağılım grafiği.

Tablo 3: Bağlayıcı bileşenlerinin bazı özellikleri.

Cins	Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )	Ergime noktası (°C)
Polipropilen	0.85	189
(PEG10000)	1.200	58-63
(PEG8000)	1.204	60-63
Parafin Wax	0.90	90
Carnauba Wax	0.97	98-112
Stearik Asit	0.84	67-69

Tablo 4: Bağlayıcı sistemlerinin bileşenleri

Bağlayıcı sistemi	Bağlayıcı bileşenleri	Oran (% Ağırlıkça)
B1	PEG 8.000	68
	Polipropilen	27
	StearikAsit	5
B2	Parafin Wax	67
	Carnauba Wax	12
	Polipropilen	20
	Stearik Asit	1

B2 bağlayıcı sistemi ağırlıkça kimyasal ayrıştırıcı (heptan) içerisinde çözünebilir parafin esaslı malzemeden oluşmaktadır.

Bağlayıcı sistemleri Turbula marka 3 boyutlu karıştırıcıda kuru olarak 30 dakika süreyle karıştırılarak hazırlanmıştır (Tablo 4). Besleme stoğunda fazla toz, az bağlayıcı kullanılması durumunda viskozitenin arttığı ve kalıplanmada zorluklar yaşandığı bilinmektedir [12],[13]. Fazla bağlayıcı olması durumunda ise sinterleme sırasında parçada aşırı bir boyutsal çekme, kalıplama sırasında bağlayıcı ayrışması ve bağlayıcı giderme sırasında çökme olduğu belirtilmiştir [11]-[13]. Homojen bir besleme stoğu hazırlamak amacıyla bağlayıcı küreleri ve 316L tozu bir sıcak karıştırma sistemi ile 45 dakika süre ile karıştırılmıştır. Besleme stokları içerisindeki toz miktarı bağlayıcı türüne bağlı olarak hacimce %51 ile %61 aralığında değişmiştir.

Bağlayıcı bileşenlerinin ayrışma sıcaklıklarını ve malzeme kaybının başlangıç sıcaklığını tespit etmek amacıyla TG ve DTA analizleri yapılmıştır. TG ve DTA analizleri Exstar S11 7300 marka cihaz kullanılarak 10 °C/dakika ısıtma hızında 500 °C sıcaklığa çıkılarak Argon atmosferinde gerçekleştirilmiştir.

Reolojik incelemelerde en yaygın kullanılan yaklaşım viskozite ve kayma hızının karakterize edilmesidir. Reoloji çalışmaları Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İmalat Mühendisliği Laboratuvarlarında bulunan ASTM D 1238 (TS EN ISO 1133) standardına uygun Ergime Akış İndeksi (EAI) cihazı (ASTM D 1238 ve TS 1675 standartlarına göre kılcal reometre) kullanılarak yapılmıştır. Kılcal reometre cihazı içerisinde çapı 9.5 mm ve yüksekliği 8 mm olan kalıp bulunmaktadır.

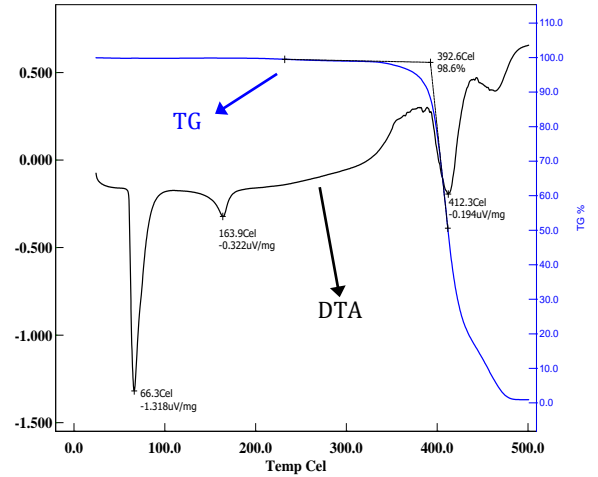
Kalıp üzerinde bulunan ve besleme stokunun içerisinden geçerek aktığı silindirik nozul 2.095 mm çapındadır. Kalıp içerisinde bulunan besleme stoku içerisine piston ile basınç uygulanmıştır. Uygulanan basınç sonrasında oluşan hız ve hızla bağlı olarak yer değiştirme miktarı ölçülmektedir. Değişen kayma gerilmelerine ve kayma hızlarına bağlı olarak viskoziteler hesaplanmıştır. Besleme stoklarının reolojik ölçümleri 150-200 °C sıcaklık aralığında ve 0.165-2.069 MPa aralığında basınç değerlerinde gerçekleştirilmiştir.

### 3 Bulgular ve tartışma

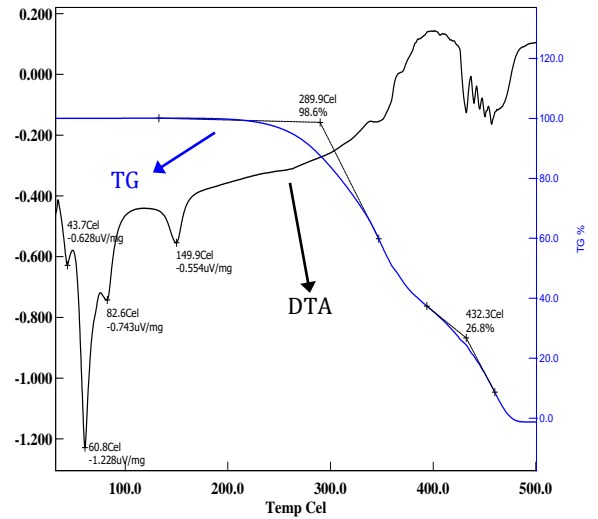
#### 3.1 Bağlayıcı sistemlerinin DTA ve TG analizleri

Bağlayıcı sistemlerine ait DTA ve TG eğrileri Şekil 3 ve Şekil 4'te verilmiştir. B1 bağlayıcı sistemi için Şekil 3'te verilen DTA eğrisi üzerinde ilk tepkime piki yaklaşık 66.3 °C ikinci tepkime piki ise 164 °C sıcaklıkta gözlenmiştir. B1 sistemine ait TG eğrisine göre malzeme kaybının başladığı sıcaklığın yaklaşık 390 °C olduğu tespit edilmiştir. 412 °C civarında bağlayıcı sisteminin yaklaşık %40 oranında kayb olduğu gözlenmiştir. 490 °C civarında bağlayıcı sisteminin tamamen kayb olduğu tespit edilmiştir. B2 bağlayıcı sistemi için Şekil 4'te verilen DTA eğrisi incelendiğinde 200 °C sıcaklık altında 4 farklı noktada tepkime piki gözlenmiştir. DTA ve TG eğrilerinin kesişme aralığı dikkate alındığında yaklaşık 280-290 °C sıcaklık aralığında malzemede bozunma olduğu ve buna bağlı olarak kütle kaybı olduğu tespit edilmiştir. 430 °C civarında bağlayıcı sisteminin yaklaşık %75 oranında ve 480 °C'de ise tamamına yakınını kayb olduğu gözlenmiştir.

B1 ve B2 bağlayıcı sistemlerinin her ikisi de yapıları içerisinde bulunan bileşenlerin ergime sıcaklıklarına göre yapıdan sırayla uzaklaşmıştır. Bu durum enjeksiyon kalıplama için istenilen bir sonuçtur [13],[14].



Şekil 3: B1 bağlayıcı sisteminin TG ve DTA grafiği.



Şekil 4: B2 bağlayıcı küresinin TG ve DTA grafiği.

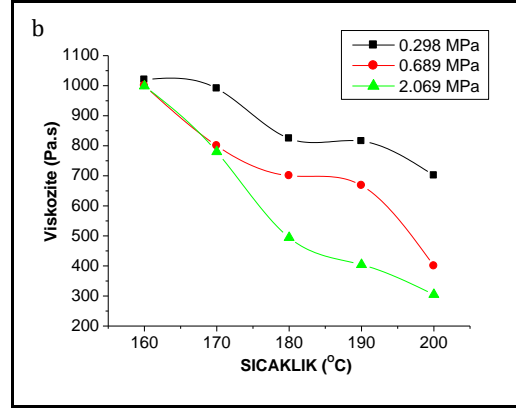
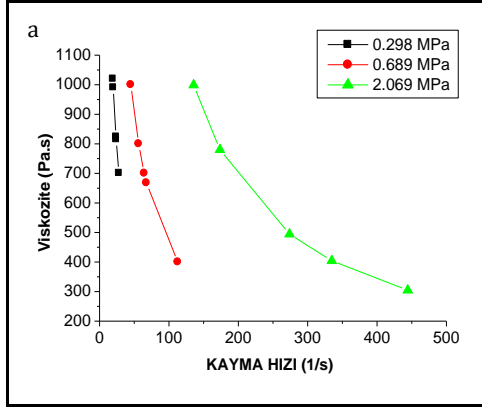
### 3.2 316L+B1 ile hazırlanan besleme stoklarının reolojik özellikleri

Besleme stoklarının reolojik davranışlarının enjeksiyon kalıplama işlemine uygunluğu bakımından genel değerlendirme besleme stoklarının viskozite-kayma hızı ve viskozite-sıcaklık değişimlerinin incelenmesi ile yapılmaktadır.

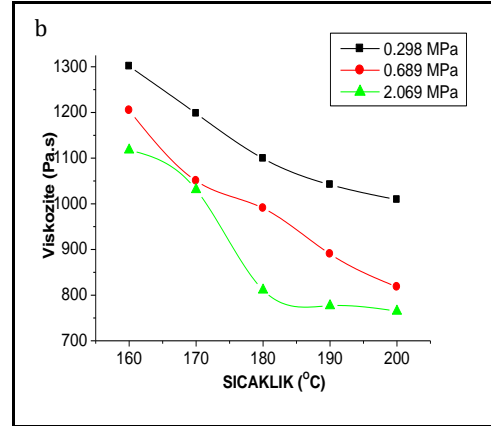
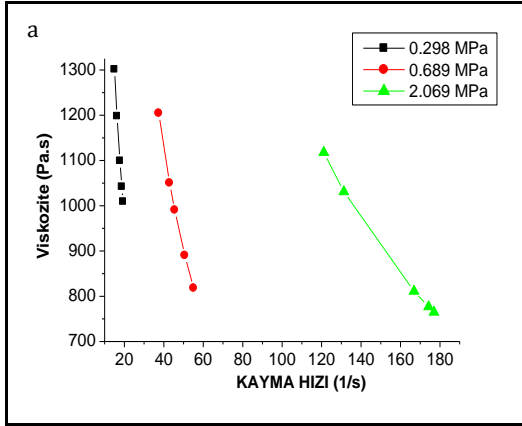
B1 bağlayıcı sistemi ve 316L paslanmaz çelik tozu kullanılarak üç farklı besleme stoku hazırlanmıştır. Hazırlanan besleme stokları içerisinde bulunan toz yüzdeleri hacimce %51, 53 ve 55 olarak belirlenmiştir. B1+316L paslanmaz çelik tozu

kullanılarak hazırlanan besleme stoklarının viskozite-kayma hızı ve viskozite-sıcaklık değişim grafikleri Şekil 5-7'de verilmiştir.

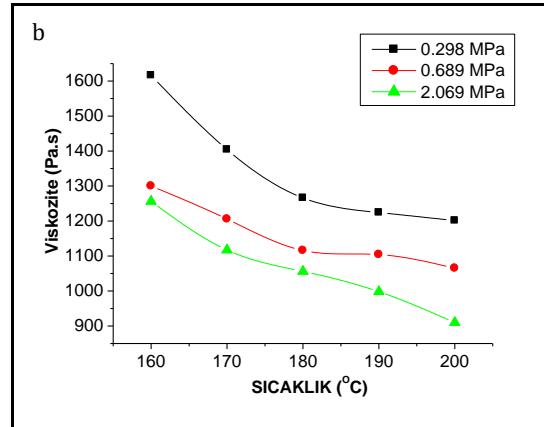
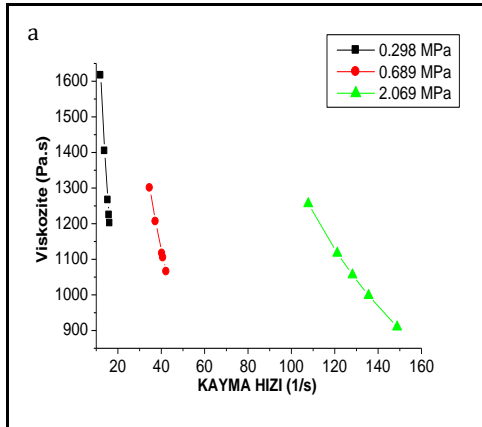
Şekil 5-7'de verilen grafikler incelendiğinde artan kayma hızına, sıcaklığa ve basınca bağlı olarak besleme stoklarının viskozitelerinde azalma meydana geldiği açıkça görülmektedir. Enjeksiyon kalıplama sırasında besleme stoklarının kayma hızının 100-1000 s<sup>-1</sup> aralığında ve buna bağlı olarak hatasız bir kalıplama için viskozitesinin 1000 Pa.s'nin altında olması gerektiği belirtilmiştir [8],[15]-[17].



Şekil 5: B1+%51 316L için. a): Viskozite-kayma hızına, b): Viskozite-sıcaklık değişimleri.

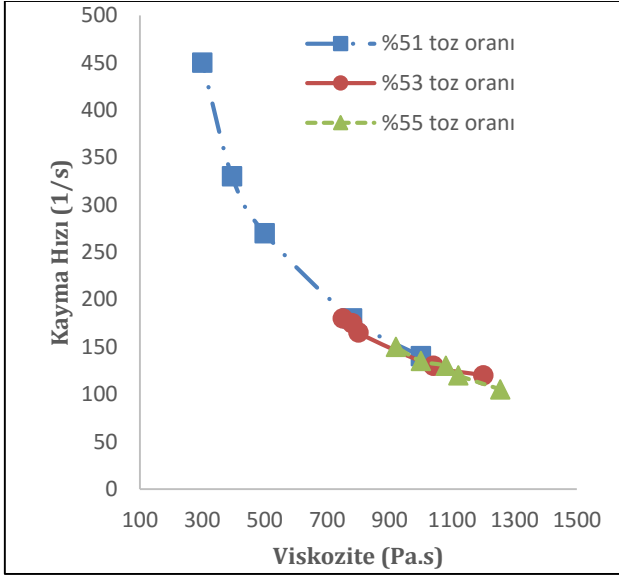


Şekil 6: B1+%53 316L için. a): Viskozite-kayma hızına, b): Viskozite - sıcaklık değişimleri.



Şekil 7: B1+%55 316L için. a): Viskozite-kayma hızına, b): Viskozite - sıcaklık değişimleri.

Şekil 8'de verilen grafikler değerlendirildiğinde besleme stokları içerisinde bulunan toz miktarı artışına paralel olarak kayma hızı değeri azalmıştır ve viskozite artmıştır. Toz enjeksiyon kalıplama işleminde toz şeklinin ve boyutunun besleme stokunun akışkanlığına etki ettiği bilinmektedir. TEK işlemin için ideal tozun yüksek paketleme yoğunluğu, hızlı sinterleme için küçük tane büyüklüğü, küresel parçacık şekli gibi çeşitli özelliklere sahip olması gerektiği bildirilmiştir [18],[19].



Şekil 8: B1 bağlayıcı sistemi için toz miktarına bağlı kayma hızı-viskozite değişimi (2.069 MPa).

Bakan ve arkadaşları yaptıkları çalışmada belirtilen özelliklere sahip en iyi toz şeklinin gaz atomize küresel şekilli tozlar olduğunu ve bu toz şeklinin su atomize karmaşık şekilli tozlar ile kıyaslandığında kalıplama sırasında düşük viskoziteye sahip olduklarını belirtmişlerdir [19]. Fakat gaz atomize tozların çok pahalı olduğu, sinterleme ve bağlayıcı giderme aşamaların da parçacık şekil bozukluklarına su atomize tozlara kıyasla daha meyilli olduğu vurgulanmıştır. Su atomize tozların daha iyi ham yoğunluk sağladığı ve gaz atomize tozlardan daha ucuz olduğu bilinmektedir [18],[19]. Deneysel çalışmalarda kullanılan 316L paslanmaz çelik tozlarının su atomize karmaşık şekilli tozlar olduğu dikkate alındığında elde edilen viskozite değerlerinin gaz atomize küresel şekilli paslanmaz çelik tozlarına göre yüksek çıkmasının toz şekline bağlı olarak normal bir sonuç olduğu düşünülmektedir. Amin ve arkadaşları gaz atomize küresel şekilli 316L paslanmaz çelik tozu üzerine benzer bir bağlayıcı içeriği kullanarak yaptıkları çalışmada %62 toz yükleme oranında daha düşük viskozite değerleri elde etmişlerdir [20]. Bu durum toz şeklinin viskoziteye etkisini daha net açıklamaktadır. B1 kullanılarak hazırlanan besleme stokları içerisinde bulunan toz miktarı hacimce %55'e kadar çıkarılmıştır, elde edilen kayma hızı değerlerinin çok düşük olması ve viskozitenin ideal (<1000 Pa.s) aralığı geçmesinden dolayı besleme stoğu içerisindeki toz oranı artırılmaya devam edilmemiştir. B1 bağlayıcı sistemi suda çözünebilen PEG ağırlıklı bir bağlayıcı formülüdür. Bağlayıcı formülü içerisinde bulunan bileşenlerin toz taşıma kapasitesini etkilediği bilinmektedir [21].

B1 ve su atomize 316L paslanmaz çelik tozu için hacimce %51

ve %53 toz yükleme oranlarında artan basınca ve sıcaklığa bağlı olarak 1000 Pa.s'nin altında viskozite değerleri elde edilmiştir. Fakat %55 toz yükleme oranında belirlenen sıcaklık aralıklarında elde edilen viskozite değerleri çok yüksek çıkmıştır ve bu durum enjeksiyon kalıplama için uygun değildir. Bütün besleme stokları 160-200 °C aralığında denenmiştir. 200 °C üzerinde yapılan denemelerde numunelerde bozunma (şişme) başladığı gözlenmiştir. Elde edilen viskozite değerleri ve akış şekilleri dikkate alındığında B1 bağlayıcı sistemi ve 316L paslanmaz çelik tozu için ideal sıcaklığın 185-200 °C aralığı olduğu söylenebilir. 185-200 °C sıcaklık aralığında yapılan denemelerde akış şeklinin spiral olduğu belirlenmiş olup bu akış şeklinin enjeksiyon kalıplamada istenilen akış tipi olduğu bilinmektedir [22],[23].

### 3.3 316L+B2 ile hazırlanan besleme stoklarının reolojik özellikleri

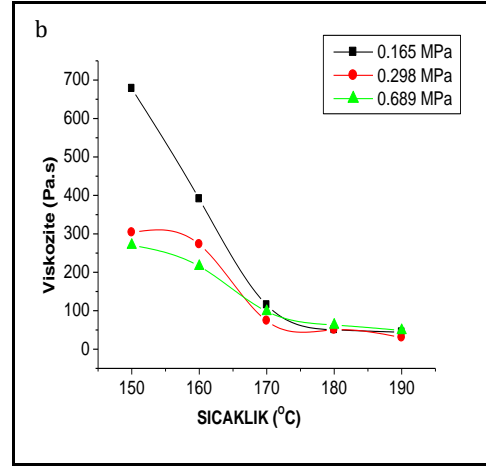
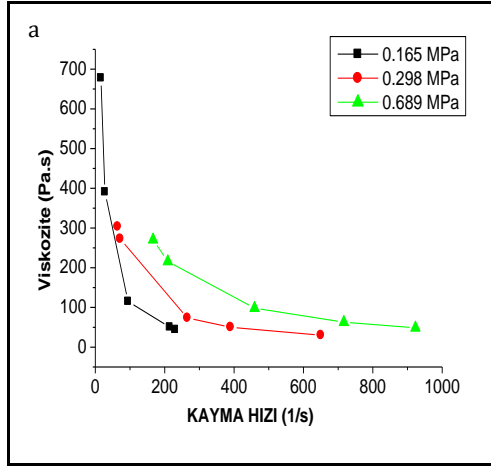
Şekil 9-11'de hacimce %55, %57 ve %59 316L paslanmaz çelik tozu ve B2 içeren besleme stoklarına ait sıcaklık-viskozite ve sıcaklık-kayma hızı grafikleri verilmiştir. Kullanılan tozun türüne, boyutuna ve bağlayıcı küresel TGA ve DTA sonuçlarına göre reoloji çalışmaları 150-200 °C sıcaklık aralığında yapılmıştır. Besleme stoklarının toz yükleme alt ve üst sınırı sırasıyla %55 ve %61 olarak belirlenmiştir. %55 toz içeren besleme stokları kullanılan bağlayıcı türüne bağlı olarak çok düşük viskozite değeri göstermişlerdir ve alt yükleme aralığına inmeye gerek görülmemiştir. %59 ve 61 oranında toz içeren besleme stoklarından elde edilen viskozite değerleri enjeksiyon kalıplama için uygun değerlerin üst sınırlarına yaklaştığı için, %61 toz yükleme oranından yukarı çıkılmamıştır. B2 bağlayıcı küre ile hazırlanan besleme stoklarının üst yükleme sınırı %61 olarak kabul edilmiştir ve %59 toz yükleme değeri ile yakın değerler elde edildiği için grafik olarak verilmeye gerek görülmemiştir.

%55 316L paslanmaz çelik tozu içeren besleme stoğu için elde edilen ürünün akış şekline ve akan ürünün makro boyutta incelenen özelliklerine göre en uygun akış aralığının 160-170 °C olduğu söylenebilir.

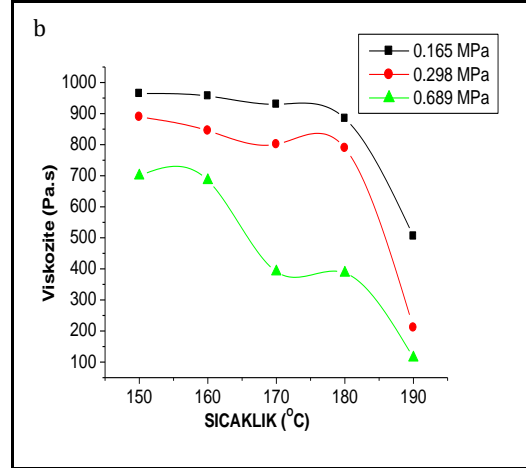
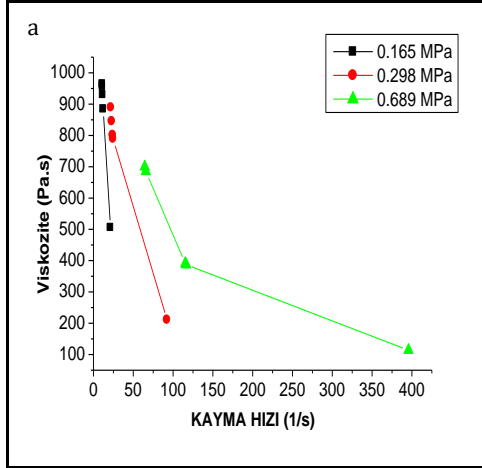
Bütün besleme stoklarında artan sıcaklığa ve basınca bağlı olarak viskozite de azalma gözlenmiştir. Her üç besleme stoğunda artan kayma hızına bağlı olarak azalan viskozite eğrisi sergilemişlerdir ve bu durum enjeksiyon kalıp için uygundur. Fakat Şekil 11'de verilen grafik incelendiğinde görülecektir ki %59 toz yükleme oranında elde edilen viskozite değerleri 1000 Pa.s' nin üstündedir ve enjeksiyon için uygun değildir.

Besleme stoğu içerisinde bulunan toz miktarına bağlı olarak basınç artırılmıştır. Artan basınca bağlı olarak viskozite de azalma kayma hızında artma gözlenmiştir. Şekil 12'de verilen grafikler incelendiğinde besleme stokları içerisinde bulunan toz miktarı artışına bağlı olarak kayma hızı değeri azalmıştır ve viskozite artmıştır. B2 küre kullanılarak yapılan reoloji çalışmalarında verilen grafiklere göre söylenebilir ki kritik toz yükleme oranı %61'dir ve bu oranın altında bir değer seçilerek enjeksiyon kalıplama yapılmalıdır.

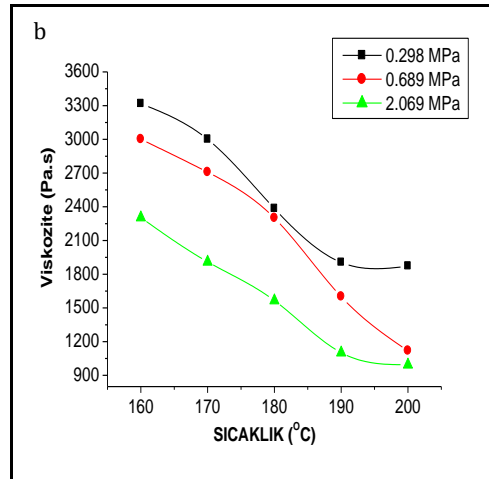
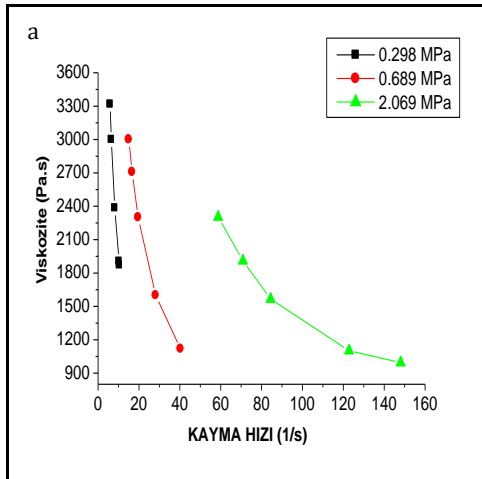
316L paslanmaz çelik tozu kullanılarak oluşturulan besleme stoklarında B2 bağlayıcı küre kullanılarak yapılan deneylerde toz taşıma kapasitesi %61'in üzerine çıkartılamamıştır. Bunun sebebinin 316L tozunun karmaşık parçacık şekline sahip olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Su atomize karmaşık şekilli tozların enjeksiyon kalıplama sırasında düşük akış davranışı sergiledikleri rapor edilmiştir [23],[24].



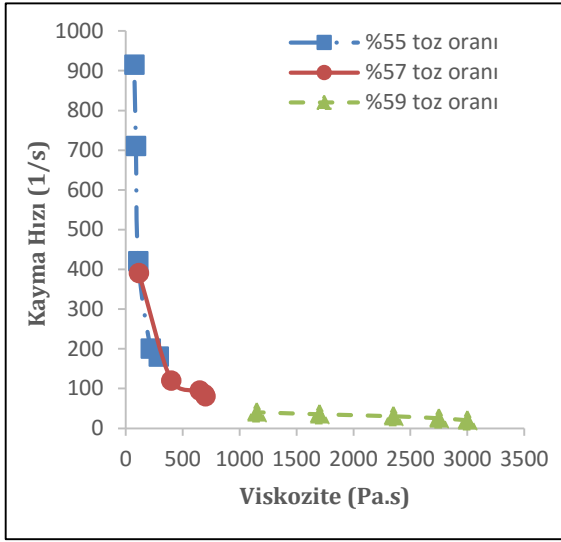
Şekil 9: B2+%55 316L için. a): Viskozite-kayma hızına, b): Viskozite-sıcaklık değişimleri.



Şekil 10: B2+%57 316L için. a): Viskozite-kayma hızına, b): Viskozite-sıcaklık değişimleri.



Şekil 11: B2 + %59 316L için. a): Viskozite - kayma hızına, b): Viskozite - sıcaklık değişimleri.



Şekil 12: B2 bağlayıcı sistemi için toz miktarına bağlı kayma hızı-viskozite değişimi (0.689 MPa).

#### 4 Sonuçlar

B1 bağlayıcı sistemi kullanılarak hazırlanan besleme stoklarında (hacimce %51, 53, 55) en yüksek kayma hızı değeri  $444,23 \text{ s}^{-1}$  olarak elde edilirken B2 bağlayıcı sistemi ile hazırlanan besleme stoklarında (hacimce %55, 57, 59, 61) bu değer  $5.879-922.964 \text{ s}^{-1}$  aralığında değişmiştir. Kayma hızlarına bağlı olarak B1 içeren besleme stoklarında en düşük viskozite değeri  $304.707 \text{ Pa.s}$  olarak, B2 ile hazırlanan besleme stoklarında en düşük viskozite değeri  $48.857 \text{ Pa.s}$  olarak elde edilmiştir.

B1 sistemi kullanılarak maksimum %55 toz taşınabilirken, B2 ile bu değer %61'e çıkartılmıştır. B2 bağlayıcı sistemi ile daha düşük viskozite elde edilmesinin ve daha yüksek toz taşıma kapasitesine ulaşılmasının sebebinin B2 bağlayıcı sistemi içerisinde yüksek miktarda bulunan PW ve CW'dan kaynaklandığı düşünülmektedir. Wax tipi bağlayıcı elemanlarının enjeksiyon kalıplama işleminde yüksek toz taşıma kapasitesine sahip oldukları bilinmektedir [25],[26]. Elde edilen akış değerlerine göre viskozite ve akış şekli (spiral) bakımından karmaşık şekilli 316L paslanmaz çelik tozları ile hazırlanan besleme stokları içerisindeki toz taşıma kapasitesini artırmak bakımından Wax esaslı bağlayıcı sistemlerinin PEG esaslı bağlayıcı sistemlerine göre daha uygun olduğu söylenebilir.

#### 5 Kaynaklar

- [1] Raza Rafi M, Ahmad F, Omar MA, German RM. "Effects of Cooling Rate on Mechanical Properties and Corrosion Resistance of Vacuum Sintered Powder Injection Molded 316L Stainless Steel". *Journal of Materials Processing Technology*, 212(1), 164-170, 2012.
- [2] Zlatkov BS, Griesmayer E, Loibl H, Aleksic OS, Danninger H, Gierl C, Lukic LS. "Recent advances in PIM Technology". *Science Sintering*, 40, 79-88, 2008.
- [3] Gökmen U. Nikel Esaslı Metal Tozlarının Enjeksiyon Kalıplanabilmesi İçin Bağlayıcı Sisteminin Geliştirilmesi ve Sinterlenmesi. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 2014.

- [4] German RM, Bose A. *Injection Molding of Metals and Ceramics*. Princeton, NJ, Metal Powder Industries Federation, Princeton, New Jersey, USA, 1997.
- [5] Barbosa APC. *Development of the 2-Component-Injection Moulding for Metal Powders*. 127. Jülich, Germany, Forschungszentrum Jülich GmbH, 2011.
- [6] Kurgan N, Ünlü BS, Yılmaz SS, Varol R. "Sae 316l T/M Paslanmaz Çelik Malzemelerin Mikroyapı Özellikleri". *5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (IATS'09)*, Karabük, Türkiye, 13-15 Mayıs 2009.
- [7] Auzene D, Roberjot S. "Investigation into Water Soluble Binder Systems for Powder Injection Moulding". *Powder Injection Moulding International*, 5(1), 54-57, 2011.
- [8] Sotomayor ME, Várez A, Levenfeld B. "Influence of Powder Particle Size Distribution on Rheological Properties of 316L Powder Injection Moulding Feedstocks". *Powder Technology*, 200, 30-36, 2010.
- [9] Sotomayor ME, Levenfeld B, Várez A. "Powder Injection Moulding of Premixed Ferritic and Austenitic Stainless Steel Powders", *Materials Science and Engineering A*, 528(9), 3480-3488, 2011.
- [10] Choi JP, Lyu HG, Lee WS, Lee JS. "Investigation of the Rheological Behavior of 316L Stainless Steel Micro-Nano Powder Feedstock for Micro Powder Injection Molding". *Powder Technology*, 261, 201-209, 2014.
- [11] Gökmen U, Türker M. "IN718 Süperalaşım Tozunun Enjeksiyon Kalıplanabilmesi için İskelet Bağlayıcı Polipropilen Kullanılarak Hazırlanan Besleme Stoklarının Reolojik Özelliklerinin İncelenmesi". *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 29(1), 165-174, 2014.
- [12] Karataş Ç, Sarıtaş S. "Toz Enjeksiyon Kalıplama: Bir Yüksek Teknoloji İmalat Metodu". *Journal of Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 13(2), 193, 1998.
- [13] German RM. *Powder Injection Molding*. New Jersey, USA, Metal Powder Industries Federation, 1990.
- [14] Karataş Ç. Toz Enjeksiyon Kalıplamada Karışımın Reolojisi. Doktora Tezi. Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 1997.
- [15] Yang WW, Yang KY, Wang MC, Hon MH. "Solvent Debinding Mechanism for Alumina Injection Molded Compacts with Water-Soluble Binders" *Ceramics International*, 29, 745-756, 2003.
- [16] Li D, Hou H, Tan Z, Lee K. "Metal Injection Molding of Pure Molybdenum" *Advanced Powder Technology*, 20(5), 480-487, 2009.
- [17] Raza MR, Ahmad F, Omar MA, German RM. "Binder Removal from Powder Injection Molded 316L Stainless Steel". *Journal of Applied Science*, 11(11), 2042-2047, 2011.
- [18] Karataş Ç, Sarıtaş S. "Rheological Properties of Mixtures of 316L Stainless Steel Powders with Polypropylen Based Binders". *Tübitak-Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences*, 22(4), 353-363, 1998.
- [19] Bakan HI, Heaney D, German RM. "Effect of Nickel Boride and Boron Additions on Sintering Characteristics of Injection Moulded 316l Powder Using Water Soluble Binder System". *Powder Metallurgy*, (44)3, 235-242, 2001.

- [20] Amin SYM, Jamaludin KR, Muhamad N. "Rheological properties of SS316L MIM Feedstock Prepared with Different Particle Sizes and Powder Loading". *Journal-The Institution of Engineers, Malaysia*, 71(2), 59-63, 2009.
- [21] Song M, Park MS, Kim JK. "Water-Soluble Binder with High Flexural Modulus for Powder Injection Molding". *Journal of Materials Science*, 40, 1105-1109, 2005.
- [22] Gökten M. Steatit ve 316L Paslanmaz Çelik Tozları ile Peg Ağırlıklı Reçinelerden Meydana Gelen Besleme Stoklarının Reolojik Özelliklerinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 2003.
- [23] Huang MS, Hsu HC. "Effect of Backbone Polymer on Properties of 316L Stainless Steel MIM Compact". *Journal of Materials Processing Technology*, 209(15-16), 5527-5535, 2009.
- [24] Ibrahim MHI, Muhamad N, Sulong AB. "Rheological Investigation of Water Atomised Stainless Steel Powder for Micro Metal Injection Molding". *International Journal of Mechanical and Materials Engineering (IJMME)*, 4(1), 1-8, 2009.
- [25] Rhee BO. "Processing Behavior of Powder/Binder Mixtures in Powder Injection Molding-Binder Separation and Quick Freezing". PhD Thesis, Rensselaer Polytechnic Institute Troy, New York, USA, 1992.
- [26] Zaky MT, Soliman FS, Farag AS. "Influence of Paraffin wax Characteristics on the Formulation of Wax-Based binders and Their Debinding from Green Molded Parts using Two comparative Techniques" *Journal of Materials Processing Technology*, 209(18-19), 5981-5989, 2009.