

Ar. Gör. *Research Assistant* Emre Özkol (oezkol@ghi.rwth-aachen.de), Ar. Gör. *Research Assistant* Jörg Ebert, Prof. Dr. Rainer Telle
Seramik ve Refrakter Malzemeler Bölümü, RWTH Aachen Üniversitesi, Aachen/Almanya - www.ghi.rwth-aachen.de

Department of Ceramics and Refractory Materials, RWTH Aachen University, Germany - www.ghi.rwth-aachen.de

İleri Seramik Malzemeler İçin Yeni Bir Üretim Tekniği Olarak Mürekkep Püskürtmeli Doğrudan Baskı Yöntemi

Direct Inkjet Printing as a novel production method for engineering ceramics

Özet

Hızlı ilk örnekleme (rapid prototyping) yöntemleri kullanılarak ileri seramik malzemelerin üretilmesi, seramik sektörü açısından gün geçtikçe önem kazanan bir ihtiyaçtır. Çalışmamızda, bu ihtiyaca cevap vermek üzere, hızlı ilk örnekleme yöntemlerinden mürekkep püskürtmeli doğrudan baskı tekniğini (MPDB), seramik malzemelere uyarlamak amacıyla bir yazıcı düzeneği geliştirilmiştir. Geliştirilen yazıcı düzeneği ile basılmak üzere su bazlı 3Y-TZP içeren bir katı asıltı hazırlanmıştır. Katı asıltı ile yazıcı düzeneği arasında tam bir uyum sağlayabilmek için, katı asıltının tane boyu ve dağılımı, viskozitesi, yüzey gerilimi ve pH değerleri, yazıcının ihtiyaçlarına göre ayarlanmıştır. MPDB tekniği ile üç boyutlu 3Y-TZP numuneler üretilmiştir. Sinterlenen numunelerde, teorik malzeme yoğunluğunun yüzde 97'sine kadar ulaşıldığı görülmüştür.

Abstract

Rapid prototyping of ceramic materials has become an important topic of research in the recent years. This study focuses on the development of a printing unit for the Direct Inkjet Printing (DIP) process, which is a promising rapid prototyping method especially for engineering ceramics. A ceramic ink was developed as well, which was an aqueous 3Y-TZP suspension. The particle size and distribution, viscosity, pH-value, and surface tension of the suspension were adjusted to ensure the compatibility with the printing unit. Three-dimensional 3Y-TZP components in millimeter scale were produced. The printed structures were sintered up to 97 % of the full density.

1. Giriş

Hızlı ilk örnekleme, üç boyutlu bilgisayar modellerinin, elle tutulur gerçek nesnelere dönüştürülmesinde kullanılan yöntemlerinin genel adıdır. Bu yöntemlerle yapılan üretimin herhangi bir aşamasında bir kalıbın kullanımı ya da ürün üzerinde ek bir işlem yapılması söz konusu değildir.

Hızlı ilk örnekleme yöntemlerinden biri olan MPDB kısaca, üç boyutlu bir modelin iki boyutlu kesitlerinin üst üste gelecek şekilde, bir yazıcı vasıtasıyla basılması ve böylece parçanın elde edilmesi süreci olarak tanımlanır. Bu süreç tamamen bilgisayar kontrolünde gerçekleşir ve temel safhaları şunlardır: 1. Üç boyutlu modelin bilgisayar ortamında tasarlanması, 2. Bu modele ait bilgilerin iki boyutlu kesit verilerine dönüştürülmesi, 3. Yazıcı vasıtasıyla kesitlerin basılması, 4. Basılmış olan sıvı haldeki katmanların katılaştırılması, 5. Organik unsurlara yönelik ısı işlem ve 6. Sinterleme.

MPDB yönteminin diğer hızlı ilk örnekleme yöntemlerine gö-

1. Introduction

Rapid Prototyping is a general term for the production techniques, which are used to build up 3D-objects using computer models. These methods do not require any mold or die and there is no need for any further machining of the prototypes as well.

DIP is a solid free-forming process, in which 2D-slices of a 3D-model are deposited on top of each other, in order to produce a component of desired geometry and composition. The entire process is computer-controlled and the main steps can be given as: 1. Creation of the 3D-model, 2. Conversion of the model into 2D-data, 3. Printing individual 2D-slices, 4. Hardening, 5. Debinding, and 6. Sintering.

The main advantages of DIP in comparison to the other rapid prototyping methods are:

- *Production of components of complex shape and varying composition (functionally graded materials', compo-*

re en önemli artıları şunlardır:

- Karmaşık şekilli ve parça bütününde farklı bileşimlerden oluşan elemanların (tabakalı fonksiyonel malzemeler¹, boşluklu elemanlar²) üretimi,

- Üretilen elemanların, yazıcının yüksek düzlemsel ve yanal çözünürlüğü sayesinde, modelle şeklen bire bir uyumu,

- Sinterlenen elemanlarda, yüksek yoğunluk, pürüzsüz yüzey ve iyi mekanik özellikler,

- Tasarlanan modele ulaşmak için sinterleme haricinde bir işleme gerek olmaması ve benzer yöntemlere göre daha ekonomik oluşu.

Bugüne kadar yayımlanmış olan MPDB ile seramik üretimi konulu araştırmalarda, hepsi mikrometrik boyutta olmak üzere, ince tabakalar, sütunlar ve duvarlar gibi birtakım elemanların bu yöntemle üretilebileceği gösterilmiştir.³ Bu sahada yayımlanan çalışmalarımız, bu yöntem ile milimetrik boyutlardaki elemanların da üretilebileceğini göstermektedir.^{4,5}

Şekil 1'de genel bir MPDB yazıcı düzeneğinin şeması görülmektedir. Bu yazıcıda dört adet baskı kafası bulunmaktadır ve bunlar x ekseninde hareket eden bir yazıcı kazağı ile püskürtmenin yapılacağı koordinatlara taşınmaktadır. Baskı kafaları A, B, C ve D örnek maddelerini içermektedirler. Üretilen elemanın (şekildeki dişliler) kesitleri altlık üzerine aşağıdan yukarıya doğru katmanlar halinde püskürtülür ve en üst kesitin de püskürtülmesi ile eleman tamamlanır. Baskı esnasında baskı kafaları ile basılan yüzey arasındaki mesafeyi sabit tutmak için altlık aşağıya doğru hareket ettirilir. Çalışmamızda geliştirilmiş düzeneğin şekildekinden tek farkı, tek bir baskı kafasının olmasıdır. Şekilde birden fazla baskı kafasına yer verilmesinin sebebi, MPDB yöntemi ile üretilen elemanların çeşitliliğini ve karmaşıklığını daha iyi ifade edebilmektir.

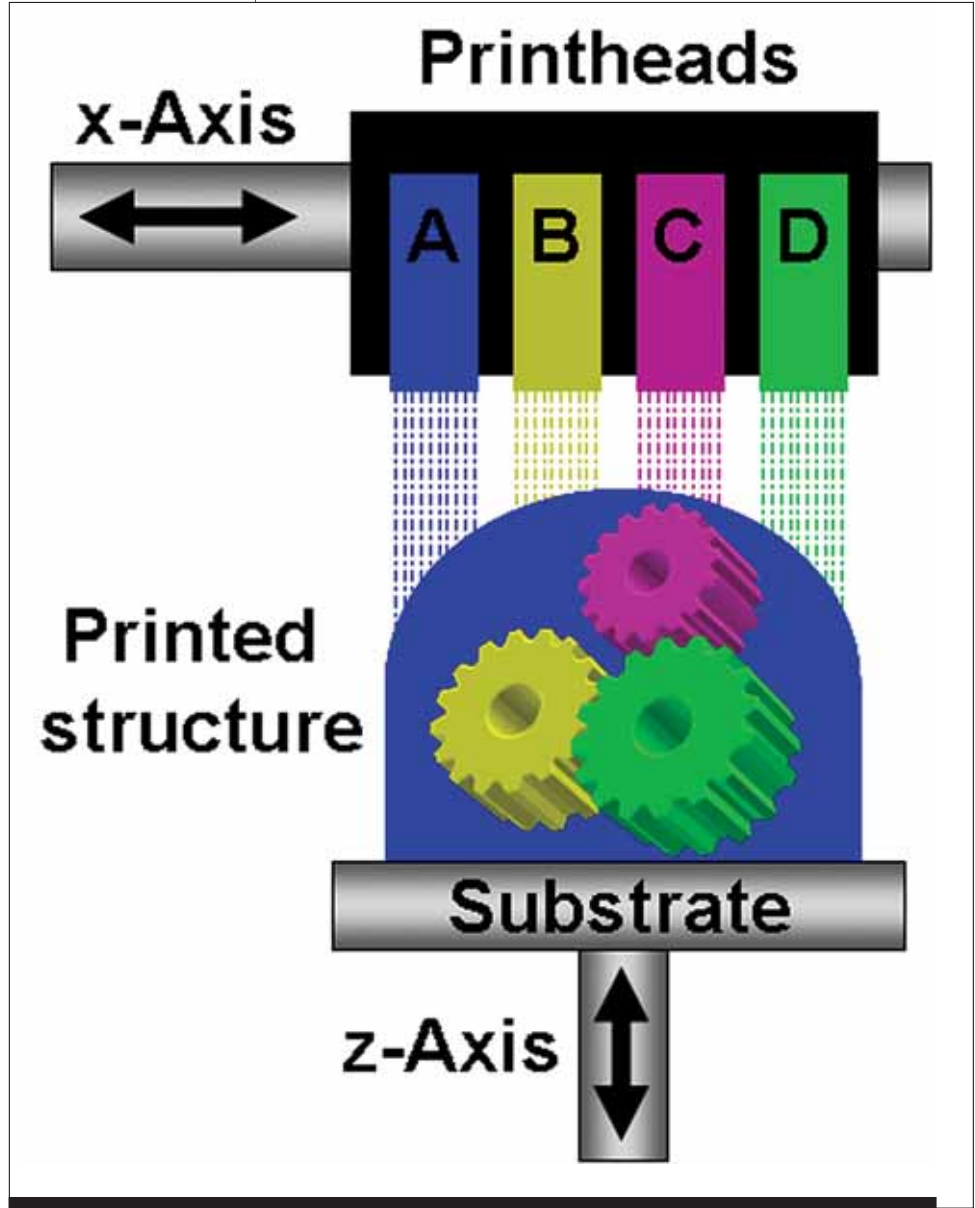
Çalışmamızın hedefi, MPDB için kullanılacak bir yazıcı düzeneği ile bu düzenek ile uyumlu su bazlı bir 3Y-TZP katı asıltısı geliştirmektir. Buradaki çelişki, geliştirilecek asıltının hem yüksek bir katı madde miktarına sahip olması, hem de yazıcı ile basılabilecek kadar düşük bir viskoziteye sahip olması gerekliliğidir. Çalışmanın diğer bir hedefi de, geliştirilen bu sistemi kullanarak gözenekliliği düşük ve milimetrik boyutlarda 3Y-TZP elemanlar üretmektir.

Çalışmamızın hedefi, MPDB için kullanılacak bir yazıcı düzeneği ile bu düzenek ile uyumlu su bazlı bir 3Y-TZP katı asıltısı geliştirmektir. Buradaki çelişki, geliştirilecek asıltının hem yüksek bir katı madde miktarına sahip olması, hem de yazıcı ile basılabilecek kadar düşük bir viskoziteye sahip olması gerekliliğidir. Çalışmanın diğer bir hedefi de, geliştirilen bu sistemi kullanarak gözenekliliği düşük ve milimetrik boyutlarda 3Y-TZP elemanlar üretmektir.

2. Deneysel Çalışmalar

2.1. Yazıcı Düzeneğinin Kurulması

Bu çalışmada kullanılan yazıcı düzeneği, HP® DeskJet marka ısıtıcı baskı kafaları olan büro tipi bir yazıcının MPDB'ye uygun şekilde değiştirilmesi ile geliştirilmiştir. Hazırlanan asıltı siyah



Şekil 1. MPDB yazıcı düzeneği şeması.

Fig. 1. A sketch of a general DIP system.

nents including cavities²),

- Good match in shape between the model and the printed due to high planar and lateral resolution of the printing system,

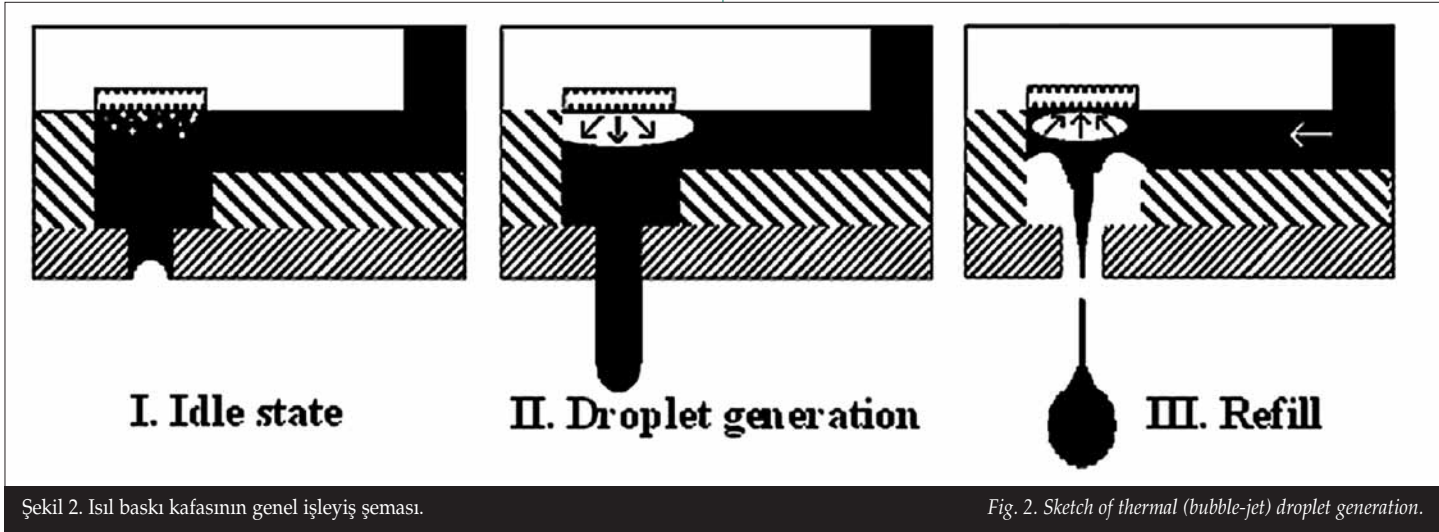
- High density, good surface quality, and mechanical properties of the products,

- No need for further processing except sintering, which distinguishes DIP to be more economical in comparison to similar techniques.

State of the art until our results was production of ceramic structures such as thin films, pillars, and thin walls in micrometer scale.³ Our previous studies demonstrated that producing ceramic components in millimeter scale was possible as well.^{4,5}

The objective of this study was to develop a printing unit and a highly loaded printable aqueous 3Y-TZP suspension. A significant challenge was developing an ink, which contains a high amount of solid particles but is also low viscous because of compatibility reasons. A further goal was to produce dense 3Y-TZP structures in millimeter scale using the developed printing system.

A simple sketch of a general DIP system is shown in



Şekil 2. Isıl baskı kafasının genel işleyiş şeması.

Fig. 2. Sketch of thermal (bubble-jet) droplet generation.

mürekkebe ait baskı kafası kullanılarak basılmıştır. Şekil 2'de ısıl bir baskı kafasının genel işleyiş şeması verilmiştir. Kısaca açıklamak gerekirse, her püskürtme memesinin tabanında bir direnç elemanı bulunmaktadır. Bu eleman ani olarak ısıtıldığında meme haznesinde bulunan mürekkep kısmen buharlaşmakta ve hazne içerisinde bir gaz kabarcığı oluşturmaktadır. Bu kabarcığın sebep olduğu basınç, mürekkep damlasının meme ağzından dışarı itilmesini sağlamaktadır.

Yazıcı düzeneği aşağıdaki ihtiyaçlara karşılık verecek şekilde değiştirilmiştir: 1. İki boyutlu kesit verilerinin yazıcı vasıtasıyla, kusursuz olarak altlık yüzeyine basılması, 2. Basılmış sıvı haldeki katmanların katılaştırılması, 3. Baskı kafası ile basılan kesitler arasındaki en uygun (optimum) mesafenin sağlanması. Altlık üzerindeki bir noktaya birçok katmanın üst üste basılabilmesi için bir kontrol devresi geliştirilmiştir. Asıltıdaki parçacıkların, püskürtme memelerini tıkamasını engellemek ve devamlı bir baskı süreci sağlamak için, baskı kafasını düzenli olarak temizleyecek sesüstü (ultrasonik) bir cihaz geliştirilmiştir. Basılan katmanların kurutulabilmesi için, düzeneğin üzerine 300 vat gücünde bir projektör yerleştirilmiştir. Düzeneğin altına, altlığı z eksenı yönünde hareket ettirerek basılan son katman ile baskı kafası arasındaki mesafeyi sabit tutacak bir taşıyıcı monte edilmiştir.

2.2. Çalışmada Kullanılan Malzemeler

Bu çalışmada, 3Y-TZP (TZ-3YS-E, Tosoh Corp., Japonya) tozu, karbositik asit içeren yüzey etkin, organik bir dağıtıcı madde (deflokkulant) (Dolapix CE64, Z&S, Almanya) kullanılarak su içerisinde dağıtılarak (dispersiyon) bir katı asıltı elde edilmiştir. Üretici verilerine göre, kullanılmış olan 3Y-TZP tozunun özgül yüzey alanı $7 \pm 2 \text{ m}^2/\text{g}$ ve ortalama temel parçacık boyutu 90 nm'dir. Katı asıltının fiziksel özelliklerini ve dağılım kararlılığını ayarlamak amacıyla asıltıya, nem tutucu maddeler (etilen glikol, 2-pirolidon, üre vb.), uçucu maddeler (isopropanol vb.) ve yüzey etkin dağıtıcı maddeler eklenmiştir.

2.3. Mürekkebin Hazırlanması ve Özelliklerinin Belirlenmesi

Topaklanmış (aglomere olmuş) parçacıkları parçalamak ve katı asıltıyı homojen bir hale getirebilmek için, asıltı sürtünmeli yüksek enerji değirmeni (atritör) vasıtasıyla öğütülmüştür. Öğü-

Fig.1. The depicted printer has four identical printheads, which are driven on the x-axis in order to ensure the deposition onto the defined coordinates. The four printheads are filled with various suspensions of different sample materials such as A, B, C, and D. The cross sections of the model object (the gears in Fig.1) are printed on a substrate from bottom to up and the object is generated when the printing of all cross sections is finished. In order to maintain an optimum distance between the printheads and the printing zone, the substrate is moved gradually downwards in the z direction. The only difference between the developed printing system and the printer in Fig. 1 is the number of the printheads. The printer, which is described in this study, uses only one printhead. The reason that a printer with four printheads (Fig. 1) is shown, is to visualize the diversity and complexity of the DIP process and the possible products.

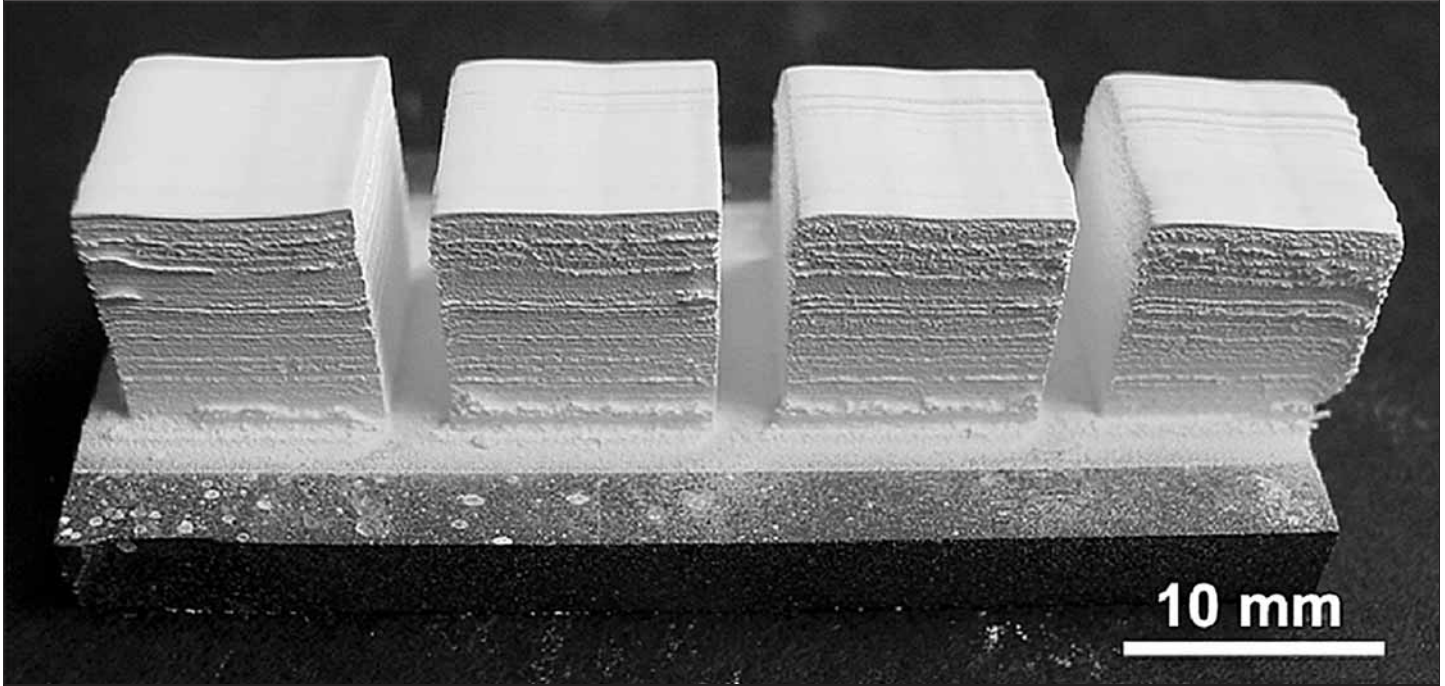
The results of this study definitely demonstrate, that the DIP process offers a promising potential to produce complex ceramic components.

2. Experimental

2.1. The Printing Device

The printing unit was a modified HP® DeskJet office printer, which is a thermal inkjet printer. The printer includes two cartridges for black and color inks. The black ink printhead was utilized to print the suspensions. The thermal (bubble-jet) droplet generation principle (Fig. 2) can briefly be defined as a local overheating of the ink in the nozzle, which creates a bubble that ejects the ink through the nozzle-orifice.

The modified printing unit meets the following demands of a DIP system: 1. Printing individual two-dimensional cross-section data onto the substrate, 2. Hardening the printed layers, 3. Maintaining the optimum working distance. In order to provide an over-printing in the same position a control unit was developed. An ultrasonic cleaning mechanism was developed, which prevented the nozzle-clogging and maintained a continuous printing process. To dry the deposited layers a spotlight (300 W) was mounted above the printing path. A substrate carrying platform, which is movable in the z-direction, was mounted to provide a constant working distance between the substrate and the printhead.



Şekil 3. 10x10x11 mm³ boyutunda, görece büyük boyutlu, 3Y-TZP numuneler.

Fig. 3. Printed massive 3Y-TZP structures of 10x10x11 mm³.

tülmüş katı asıltıdaki parçacıkların tane boyu ve dağılımı lazer kırınımı yöntemi (MasterSizer2000, Malvern, Birleşik Krallık) ile tespit edilmiştir. Katı asıltının viskozitesi dönel bir viskometre (Viscolab LC 10, Physica, Almanya) ile, pH değeri de bir pH elektrodu (InLab 417, Mettler Toledo, Almanya) ile ölçülmüştür. Katı asıltının devingen (dinamik) yüzey gerilimi değerleri, azami hava kabarcığı basıncı yöntemi (pro line t15, SITA, Almanya) ile tespit edilmiştir.

2.4. Üretilen Numunelerin Sinterlenmesi ve Özelliklerinin Belirlenmesi

MPDB ile üretilen numuneler, 80 °C'deki bir kurutma fırınında 12 saat kurutulmuş, ardından da yapılarındaki organik maddelerden arındırılmak üzere, 550 °C'de 1 saat ısıtım görmüşlerdir. Numuneler daha sonra 1450 °C'de, 2,5 saat, iri taneli ZrO₂ tozu içerisinde sinterlenmişlerdir. Sinterlenen numunelerin yoğunluk ve gözeneklilik ölçümleri, Arşimet prensibine göre yapılmıştır.

Deneylerde kullanılan baskı kafasının ve üretilen numunelerin mikro yapısı, taramalı elektron mikroskobu (SEM) (Leo 440i, Carl Zeiss, Almanya) ile incelenmiştir. İşlem görmemiş 3Y-TZP tozunun parçacık boyu ile sinterlenen numunelerin tane boyu, transmisyon elektron mikroskobu (TEM) (CM30, Philips, Hollanda) ile tespit edilmiştir.

3. Deney Sonuçları ve Tartışma

3.1. Mürekkebin Özellikleri

Mürekkep, hacmen yüzde 25 3Y-TZP tozu içeren su bazlı bir katı asıltıya çeşitli maddelerin eklenmesi ile hazırlanmıştır. Öğütülmüş asıltının d₅₀ ve d₉₀ değerleri sırasıyla 0,150 µm ve 0,600 µm olarak ölçülmüştür. Katı asıltının viskozitesinin artan kayma hızı ile sürekli olarak azalarak, kayma hızı 500 s⁻¹'e yaklaştığında 15 mPas civarında sabit bir değer aldığı saptanmıştır. Yazıcı mürekkebinin 500 s⁻¹'deki viskozitesi ise 5 mPas olarak ölçülmüştür. Buna rağmen, geliştirilen katı asıltının viskozi-

2.2. Materials

In this study, 3Y-TZP powder (TZ-3YS-E, Tosoh Corp., Japan) was dispersed in aqueous medium using a dispersant based on carboxylic acid (Dolapix CE64, Z&S, Germany). According to the manufacturer's datasheet the powder has a specific surface area of 7 ± 2 m²/g and a primary particle size of 90 nm. The physical properties of the suspension were adjusted by addition of moisture-retaining additives (such as ethylene glycol, 2-pyrrolidone, urea etc.) and volatile additives (such as isopropanol), and the dispersant.

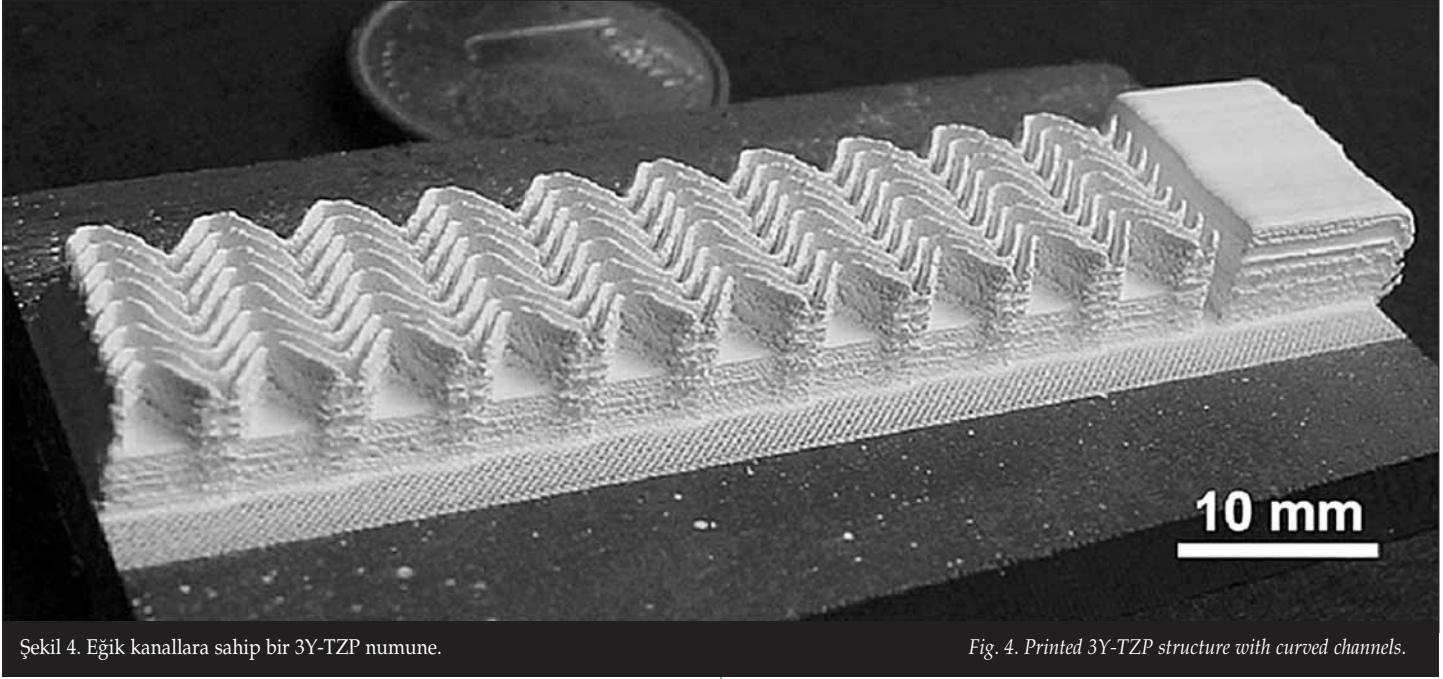
2.3. Preparation and Characterization of the Ceramic Ink

The suspension was attrition milled for homogenization and deagglomeration. The particle size and distribution was measured by laser-scattering (MasterSizer2000, Malvern Instruments, UK). The viscosity of the suspension was determined using a rotational rheometer (Viscolab LC 10, Physica, Germany). The pH-value of the suspension was recorded by a pH-electrode (InLab 417, Mettler Toledo, Germany). The surface tension of the suspension was determined using bubble pressure tensiometry (pro line t15, SITA, Germany).

2.4. Sintering and Evaluation of the Printed Samples

Printed components were dried in a drying chamber at 80 °C for 12 h. The organic residue in the components was pyrolyzed 1 h at 550 °C. The parts were subsequently sintered 2.5 h at 1450 °C in a powder bed of coarse ZrO₂. The density of the sintered parts was determined according to the buoyancy principle.

The printing system and the microstructure of printed structures were analyzed with scanning electron microscopy (SEM) (Leo 440i, Carl Zeiss, Germany). The particle and grain size were determined by transmission electron microscopy (TEM) (CM30, Philips, The Netherlands).



Şekil 4. Eğik kanallara sahip bir 3Y-TZP numune.

Fig. 4. Printed 3Y-TZP structure with curved channels.

te açısından yazıcı ile uyumlu olduğu görülmüştür. Geliştirilen katı asıltının içerdiği tanecik miktarının hacmen yüzde 25 ile sınırlandırılmasının sebebi, yazıcının düşük viskozite değerlerine sahip asıltılarla uyum içerisinde çalışmasıdır. Kararlı bir parçacık dağılımı gösteren katı asıltının pH değeri 8,5 olarak ölçülmüştür. Yazıcı mürekkebi ile katı asıltının devingen yüzey gerilimleri (yüzey yaşı < 20 ms) sırasıyla 50 mN/m ve 47,5 mN/m olarak ölçülmüştür.

3.2. Numunelerin Üretilmesi ve Özellikleri

Baskı kafası temizleme cihazı, püskürtme memelerini baskı esnasında etkili bir şekilde temizlemiş ve bu sayede katı asıltının bütün memeler kullanılarak, kararlı bir şekilde basılabilmemesini sağlamıştır. Basılmış katmanlarda kuruma esnasında gerilim ve çatlakların oluşmaması için, katmanlar hızlı bir şekilde kurutulmuşlardır. Çalışmamızın giriş bölümünde de değinildiği gibi, şimdye kadar MPDB yöntemi ile ancak mikrometrik boyutlarda seramik elemanlar üretilebilmiştir. O açıdan bu çalışmada üretilen milimetrik boyutlu seramik elemanlar, MPDB çalışmaları alanında bir yeniliktir. Şekil 3'de gösterilen 10x10x11 mm³ boyutundaki numunelerin önemi bu açıdan büyüktür.

Şekil 4'da, karmaşık yapıdaki elemana örnek olarak, sinüs eğrisi benzeri kanalları (duvar kalınlığı 400 µm) olan bir numune gösterilmektedir. Bu numune yaklaşık otuz dakikada üretilmiştir.

Üretilen elemanların yaş geometrik yoğunluğu yaklaşık yüzde 50 olarak ölçülmüştür. Sinterlenmiş numunelerde ise teorik malzeme yoğunluğunun yüzde 97'sine kadar ulaşılmıştır. Sinterlenen 3Y-TZP numunelerin mikro yapısı TEM (Şekil 5) ile incelenmiştir ve tane boyunun 200 nm olduğu gözükmemektedir.

4. Çalışmanın Genel Sonuçları

Bu çalışmada, MPDB ile seramik elemanların üretilebilmesine yönelik bir yazıcı düzeneği ile su bazlı ve 3Y-TZP parçacıkları içeren bir katı asıltı geliştirilmiştir. Bu düzeneğin kurulmasında büro tipi bir yazıcının üzerinde şu değişiklikler yapılmıştır: aynı noktaya basmayı sağlayan bir kontrol devresinin gelişi-

3. Results and Discussion

3.1. Properties of the Ceramic Ink

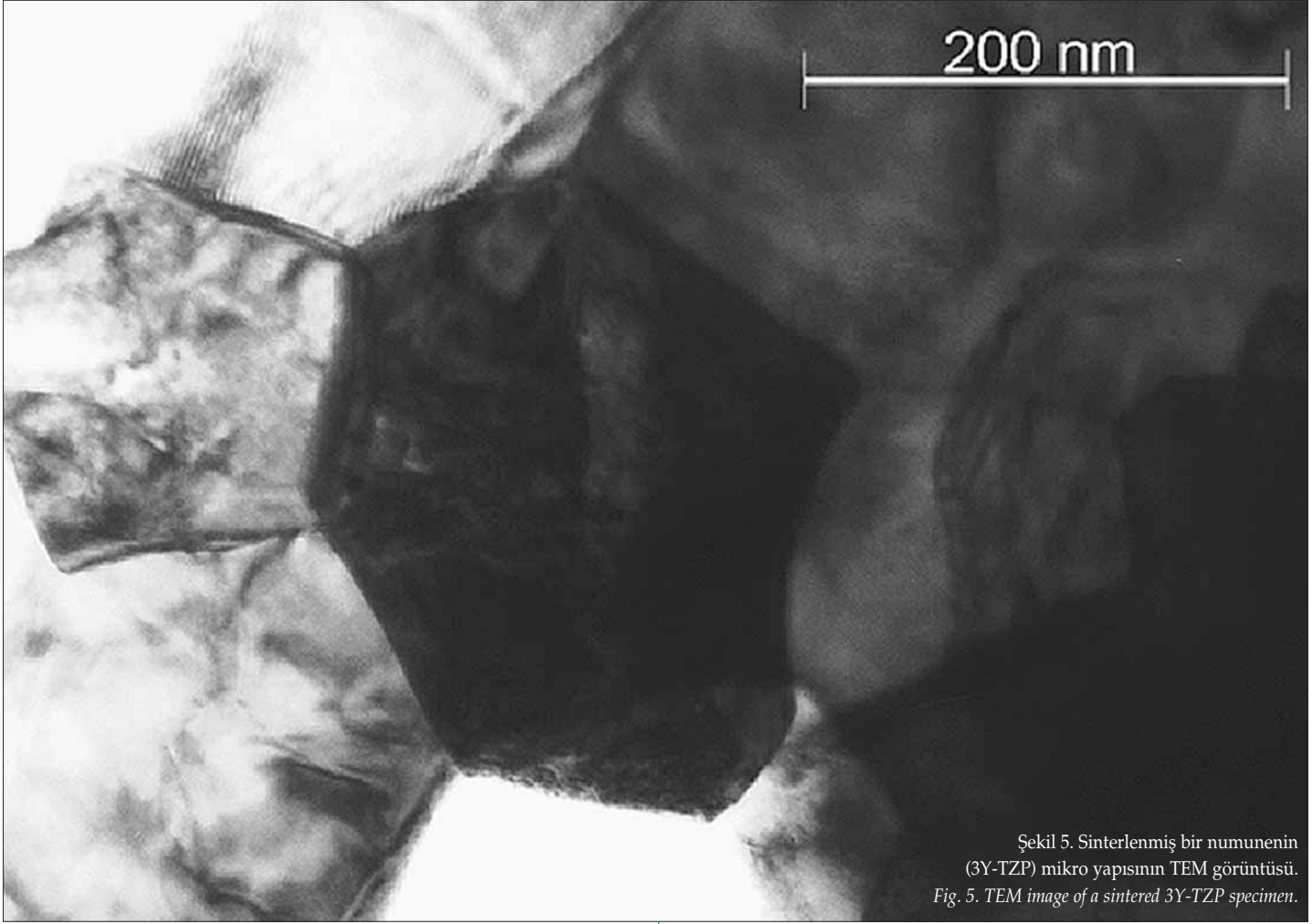
An aqueous 3Y-TZP suspension with a solid content of 25 vol.% was prepared. After attrition milling mean (d_{50}) and ultimate particle (d_{90}) size values of 0.150 µm and 0.600 µm were achieved. The viscosity was 15 mPas at shear rates > 500 s⁻¹ and the suspension showed a shear thinning behavior. Although this value was higher than the viscosity of the original ink (5 mPas), the suspension was compatible with the printing system. Because of viscosity constraints the solid content of the suspension was limited to 25 vol.%. The pH-value was 8.5 and the suspension was stable at this value. The dynamic surface tension (surface age < 20 ms) of the suspension was determined to be 47.5 mN/m, which was close to the dynamic surface tension of the original ink (50 mN/m).

3.2. The Printing Process and Properties of the Printed Samples

The printhead-cleaning mechanism ensured a stable printing of the suspension through all nozzles. The deposited layers were hardened individually to ensure a crack-free and uniform drying. As mentioned in the introduction, only ceramic parts of micrometric scale are reported in the previously published studies on DIP. This study is of special interest, because it demonstrates that the production of millimeter-sized components is possible as well. Directly printed green bodies (10x10x11 mm³) are shown in Fig. 3, which are important examples of such components.

A printed 3Y-TZP structure with sinusoidal curved channels (wall thickness of 400 µm) is shown in Fig. 4. The entire printing process for this component was about 30 minutes.

The green density of the printed 3Y-TZP components was measured to be about 50 %. After sintering, some of the components revealed a density up to 97 %. The microstructure of sintered 3Y-TZP specimens was analyzed with TEM (Fig. 5). The grain size is about 200 nm, which points to good mechanical properties.



Şekil 5. Sinterlenmiş bir numunenin (3Y-TZP) mikro yapısının TEM görüntüsü.
Fig. 5. TEM image of a sintered 3Y-TZP specimen.

tirilmesi, baskı kafasını düzenli olarak temizleyecek bir cihazın geliştirilmesi, basılan katmanlar ile baskı kafası arasındaki mesafeyi ayarlayan bir taşıyıcının geliştirilmesi ve basılan katmanların katılmasını sağlayan bir düzeneğin geliştirilmesi. Hazırlanan mürekkep, geliştirilen yazıcı ile kararlı ve devamlı bir şekilde basılmış ve azami yüzde 97 yoğunlukta ve tane boyu 200 nm olan 3Z-TYP elemanlar üretilmiştir.

MPDB için geliştirilen 3Y-TZP katı asıltısı hacmen yüzde 25 seramik parçacık içermektedir. Bu asıltının viskozitesi, yüzey gerilimi, pH değeri ve asıltı içerisindeki parçacıkların boyutu ve dağılımı ayarlanarak, asıltı ile yazıcı düzeneği uyumlu hale getirilmiştir.

Bu çalışma, seramiklerin MPDB ile üretilmesinde başlangıç niteliğinde olmasına rağmen, karmaşık şekilli, sade veya karma bir bileşime sahip ve gözenekliliği ayarlanabilir elemanların üretimi için, MPDB'nin uygun bir yöntem olarak gelecek vadettiğini göstermektedir.

Önümüzdeki hedefler, geliştirilmiş MPDB düzeneğinin donanım ve yazılım yönündeki eksiklerini tamamlamak ve çeşitli seramik malzemelere ait kararlı katı asıltılar geliştirilerek MPDB yöntemini seramik elemanlar için ticari bir üretim metodu haline getirmektir.

Kaynakça References

1. Calvert, P. and Crockett, R., Chemical solid free-form fabrication: making shapes without molds. Chem. Mater., 1997, 9, 650-63.
2. Mott, M., Song, J. H. and Evans, J. R. G., Microengineering of ceramics by direct ink-jet printing. J. Am. Ceram. Soc., 1999, 82(7), 1653-8.
3. Lewis, J.A., Smay, J.E., Stuecker, J. and Ceserano III, J., Direct ink writing of three-dimensional ceramic structures. J. Am. Ceram. Soc., 2006, 89(12), 3599-609.
4. Özkol, E., Ebert, J., Uibel, K., Wätjen, A.M. and Telle, R., Development of high solid content aqueous 3Y-TZP suspensions for direct inkjet printing using a thermal inkjet printer. J. Eur. Ceram. Soc., 2009, 29(3), 403-9.
5. Cappi, B., Özkol, E., Ebert, J. and Telle, R., Direct inkjet printing of Si₃N₄: characterization of ink, green bodies and microstructure. J. Eur. Ceram. Soc., 2008, 28(13), 2625-8.

4. Conclusions

A DIP printing unit and a compatible 3Y-TZP suspension were developed. The printing unit included the modifications: a control unit for overprinting, a printhead-cleaning mechanism, a z-drive for substrate positioning, and a deposit-hardening mechanism. A continuous and stable printing process as well as generation of dense three-dimensional 3Y-TZP components was demonstrated. The sintered components revealed a density of 97 % and the grain size of the components was about 200 nm.

The 3Y-TZP suspension had 25 vol.% solid content. Particle size and distribution, viscosity, surface tension, and pH-value of the suspension were adjusted to ensure a compatibility with the printing unit.

As these preliminary results show, DIP is one of the most promising rapid manufacturing techniques especially for dense ceramic components of any geometrical shape and composition.

Further research in this area should focus on improvement of hardware and software of the printing system and the development of stable inks with a high solid content of various materials in order to commercialize the DIP method.