

Seramik Esaslı Köpük Filtreler ve Uygulamaları: Kısa Bir Derleme

Emine Gizem YILDIZ^{1*}, Nil TOPLAN²

^{1,2} Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, 54050, Sakarya

¹<https://orcid.org/0000-0002-7153-8970>

²<https://orcid.org/0000-0003-4130-0002>

*Sorumlu yazar: emine.yildiz20@ogr.sakarya.edu.tr

Derleme

ÖZ

Makale Tarihiçesi:

Geliş tarihi: 26.05.2023

Kabul tarihi: 18.09.2023

Online Yayınlanma: 11.03.2024

Anahtar Kelimeler:

Filtre

Seramik köpük

Gözeneklilik

Yüksek oranda gözeneklilik içeren metal, seramik ve polimerler günümüzde giderek artan bir şekilde yaygın olarak kullanılmaktadır. Son yıllarda bilhassa aşındırıcı - korozyif şartların olduğu yerlerde ve yüksek sıcaklıkta gözenekli seramiğin tercih edildiği uygulamalarda artma söz konusudur. Gözenekli seramikler, metal ve polimerlerle kıyaslandığında yüksek sıcaklık dayanımına ve çevresel kararlılığa ihtiyaç duyulan uygulamalarda avantajlara sahiptir. Gözenekli seramikler, son zamanlarda termal yalıtım malzemelerinde, kemik yerine kullanılan biyo-malzemelerde, polimer ve metal matris kompozit malzemeler gibi dikkat çekici malzemelerde kullanılmaktadır. Bu derleme dikkat çekici özelliklerinden dolayı seramik köpük filtrelerin özelliklerini ve kullanım alanlarını incelemeyi amaçlamıştır. Uygulama alanları açık ve kapalı gözenek yapılarına göre farklılık arz etmektedir. Açık gözenekli seramik malzemeler sıvı metal ve gaz filtrelerinde kullanılırken, kapalı gözenekli seramikler termal yalıtım malzemeleri, refrakter astarları ve hafif yapı malzemelerinde kullanılır. Temel gözenekli seramik üretim metotları kısmi sinterleme, replikasyon yöntemi, doğrudan köpükleştirme yöntemi ve karbon preformlarının CVD yöntemiyle kaplanmasıdır. Gözenekli seramikleri köpük, içi boş küreler, bal peteği ve fiberler gibi pek çok farklı formda üretmek mümkündür. Bu çeşitli formların içinde köpük filtreler en yüksek gözeneklilik oranına sahiptirler.

Ceramic Based Foam Filters and Applications: A Brief Review

Review Article

Article History:

Received: 26.05.2023

Accepted: 18.09.2023

Published online: 11.03.2024

Keywords:

Filter

Ceramic foam

Porosity

ABSTRACT

Metals, ceramics and polymers with high porosity are increasingly used today. In recent years, there has been an increase in applications where porous ceramics are preferred, especially where there are abrasive - corrosive conditions and high temperature. Compared to metals and polymers, porous ceramics have advantages in applications requiring high temperature resistance and environmental stability. Porous ceramics have recently been used in remarkable materials thermal insulation materials, such as bone substitutes biomaterials, and polymer and metal matrix composite materials. This review aimed to examine the properties and usage areas of ceramic foam filters due to their remarkable features. Application areas differ according to open and closed pore structures. Open-pore ceramic materials are used in liquid metal and gas filters, while closed-pore ceramics are used in refractory linings, thermal insulation materials, and lightweight construction materials. The main porous ceramic production methods are partial sintering, replication methods, direct foaming method and coating of carbon preforms by CVD method. It is possible to produce porous ceramics in many different forms such as foam, honeycomb, hollow spheres and fibers. Of these various forms, foam filters have the highest porosity.

1. Giriş

Gözenekli seramikler şekilleri bakımından iki genel kategoride ele alınabilir. Bu kategoriler, köpük (foam) seramikler ve bal peteği şeklindeki (honeycomb) seramiklerdir. Köpük seramikler birbirleri ile temaslı açık boşlukların sürekli bir seramik bağla bağlanmasıyla meydana gelen üç boyutlu gözenekli malzemelerdir. Bal peteği şeklindeki seramikler ise ekstrüzyon veya presleme yöntemiyle elde edilen iki boyutlu gözenekli malzemelerdir. Bilhassa, sıvı filtrasyonundaki uygulamalarda petek şekilli ve köpük seramik malzemelerin farklılaştığı noktalar mukavemet ve geçirgenlik özellikleridir. Köpük seramiklerin yüksek oranda gözenek (%70–90) içermesi sebebiyle geçirgenliği yüksek iken, daha az gözeneklilik oranına sahip olan petek şekilli seramiklerde geçirgenlik düşüktür. Köpük seramikler mekanik özellikleri bakımından incelendiğinde iskelet yapısının seramik ağı incedir ve seramik ağ uçlarında oluşan üçgen şekilli boşluklar içerdiği görülür. Bu özelliklerinden dolayı köpük seramikler petek şekilli seramiklere kıyasla daha düşük mukavemetlidir. Köpük seramikler gözenekli malzemelerin bir sınıfını oluşturmaktadır ve çoğunlukla 10 µm–5 mm aralığında büyük boşluklar içerirler. Bu boşluklar hücre olarak adlandırılır ve seramik duvarla çevrelenir (kapalı hücreli) veya birbirleri ile temas halinde sadece hücre uçlarında (strut) seramik bağla bağlanması ile (açık hücreli) meydana gelebilir. Köpük seramikler üretim yöntemleri bakımından açık veya kapalı gözenek yapılarında üretilebilirler (Tablo 1) (Akpınar, 2009). Uygulama sahaları da bu gözenek yapılarına göre farklılaşmaktadır. Açık gözenekli köpük seramikler sıvı metal filtreler, katalizör taşıyıcısı, gaz filtreler, gözenekli yanma hücreleri, kompozit matris yapısında ve kemik yerine kullanılan malzemelerin yapısında kullanılmaktadır. Kapalı gözenekli seramik köpükler ise hafif sandviç paneller, termal yalıtım malzemeleri, ısıtıcı elemanlar, fırın yardımcı malzemeleri ve darbe adsorblayıcılarda kullanılmaktadır (Şahin, 2010).

Tablo 1. Köpük seramiklerin bazı kullanım alanları (Akpınar, 2009).

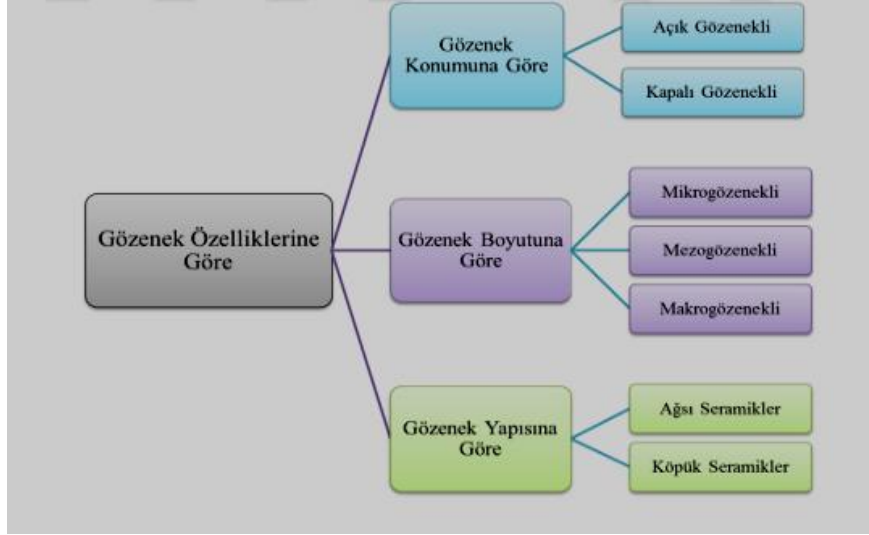
Açık Gözenekli	Kapalı Gözenekli
Gaz filtreler, sıvı metal	Hafif sandviç paneller
Katalizör taşıyıcısı	Fırın yardımcı malzemeler
Gözenekli yanma hücreler	Termal yalıtım malzemeleri
Kemik yerine kullanılan malzemeler	Isıtıcı elemanlar
Kompozit matris yapısı	Darbe adsorblayıcılar

Gözenek boyutunun ve dağılımının denetimi yapılabilen gözenekli malzemeler, yoğun malzemelerle karşılaştırıldığında çeşitli avantajlar sağlayan birçok özelliğe sahiptir. Yoğun malzemeler ile kıyaslandıklarında çok daha çeşitli ve özel davranışlar sergilerler (Kumar ve Kim 2010; Özey, 2018). Bu sebeple günümüzde gözenekli malzemeler pek çok uygulamada çoğunlukla tercih edilmektedir. Yüksek oranda gözenek bulduran seramik malzemelerin, yoğunluk, ısıl iletim gibi özellikleri azalırken, geçirgenlik, yüzey alanı gibi özellikleri artmaktadır. Yapıdaki yüksek gözenek miktarı

malzemenin hafif olmasına neden olmaktadır. Seramik malzemelerde gözenek oluşturulmasıyla; yüzey alanı, özgül mukavemet ve geçirgenlik gibi özelliklerinde artış, ısı iletim, yoğunluk, ısı kütlesi ve dielektrik sabiti değerlerinde düşme görülmektedir (Brenzy ve ark., 2006; Studart ve ark., 2006; Özey, 2018). Bu özellikleri gözenekli seramiklerin, polimer veya metal malzemeleri kullanmanın elverişli olmadığı kontrol edilebilir elektriksel özelliklere, yüksek sıcaklık dayanımına, yüksek korozyon ve aşınma direncine gereksinim olan uygulamalarda kullanılmasına olanak sunmaktadır. Malzemelerdeki gözenek özellikleri; gözenek boyutu, yapısı ve konumuna göre değişme göstermektedir. Şekil 1’de gözenekli malzemeler gözenek özelliklerine göre ifade edilmiştir. Gözenek boyutuna göre gözenekli malzemeler makro, mezo ve mikro gözenekli olarak incelenmektedir. Gözenek büyüklüğü 2 nm’den küçük gözenek boyutu içeren seramikler mikro, 2-50 nm olan seramikler ise mezo ve 50 nm’den büyük boyuta sahip seramikler de makro gözenekli seramikler olarak sınıflandırılmaktadır (Kelly, 2006, Özey, 2018). Açık ve kapalı olarak sınıflandırma gözenek konumuna göre iken, ağısı ve köpük sınıflandırma ise gözenek yapısına göre yapılmaktadır.

İlk filtrasyon malzemeleri çelikten imal edilen basit süzgeç tipi (ızgara veya elek benzeri) filtreler ile çelik tellerle örülmüş çelik örgü filtrelerdir. Araştırmaların yeni filtre alternatiflerine yönelmesine; metalik filtrelerin kimyasal kararlılıklarının olmaması, korozyon sorunları, düşük sıcaklıkta sahip oldukları dayanımın aksine bu özelliklerini yüksek sıcaklıklarda koruyamamaları neden olmuştur. Seramikler ise; yüksek sıcaklık kararlılıkları, yüksek ergime sıcaklıkları ve mukavemetleri, eriyik kompozisyonlara karşı inert olmaları, kimyasal olarak kararlılık, yüksek termal şok dayanımları, korozyon dirençleri ve oksit içerikli kompozisyonları sebebiyle cüruf ve oksit temizliğinde etkili olmuşlardır. İmal edilen ilk seramik filtreler, şekil olarak metalik filtrelerle benzerlik göstermektedir. Alümina ve silika karışımı ile presle elde edilmiş tabaka (veya çekirdek) tip filtreler en genel olanlarıdır. Küresel ve lamel grafitli dökme demirler çekirdek filtrelerin en geniş uygulama alanlarıdır. Yeni filtre türlerindeki (köpük filtreler ve hüresel) yüksek eleme verimleri çekirdek filtrelerin uygulama alanlarını sınırlamıştır (Gören ve Maraşoğlu, 1998).

Çelik tellerle örülerek elde edilen örgü filtrelerinin benzeri cam ve refrakterler ile geliştirilerek elde edilmiştir. Alüminyum gibi düşük ergime sıcaklıklarına sahip hafif metallerin filtrasyonunda cam liflerle üretilen örgü filtreler kullanılırken, lamel ve küresel grafitli dökme demirlerin filtrasyonunda ise refrakter örgülerle üretilen filtreler kullanılmaktadır. Ekstrüzyonla üretilen hüresel filtrelerle replikasyon süreci ile imal edilen köpük filtreler sözü edilen diğer filtrelerden daha yüksek filtrasyon verimlerine sahiptir. Sıvı akışını en iyi şekilde homojenleştiren hüresel filtreler diğer filterlere kıyasla bu özelliği bakımından üstünlük gösterir. Köpük filtreler ise eleme verimleri bakımından en iyi filtrelerdir. Tablo 2’de özet olarak filtrelerin filtrasyon amaçlı kullanımlarındaki avantaj ve dezavantajlar ifade edilmiştir (Akpınar, 2009).



Şekil 1. Gözenekli seramiklerin sınıflandırılması (Özey, 2018).

Tablo 2. Filtrelerin avantaj ve dezavantajları (Akpınar, 2009).

	Avantajları	Dezavantajları
Çekirdek Filtreler	<ul style="list-style-type: none"> • Ekonomik ve kolay kullanımı vardır. • Erozyon sorunu olmayıp, metalleri kirletmezler. • Mukavemetleri yüksektir. 	<ul style="list-style-type: none"> • Gözenek boyutu göreceli olarak büyük, gözenekliliği az olması nedeniyle eleme verimi düşüktür. • Fiziksel elemeye sahiptir. • Uygulama sahası belirli boyutlardaki safsızlıkları elemeleri nedeniyle sınırlıdır.
Örgü Filtreler	<ul style="list-style-type: none"> • Yolluk sisteminde kolaylıkla kullanılır. • İstenen boyutlarda kesilir. • Hüresel ve köpük filtreler göre ekonomiktir. 	<ul style="list-style-type: none"> • Eleme verimleri, gözenekleri en büyük boyutlu filtreler olmaları nedeniyle düşüktür. • Distorsiyon sorunları sebebiyle ergime sıcaklığı düşük metaller için uygundur.
Hüresel Filtreler	<ul style="list-style-type: none"> • Sabit hücre geometriye sahip olmaları nedeniyle homojen, güvenli ve türbülansız akış özellikleri mevcuttur. • Distorsiyon sorunu mevcut değildir. • Kimyasal kararlılık, yüksek sıcaklık mukavemeti gösterirler. • Gözenekliliği fazladır. 	<ul style="list-style-type: none"> • Nispeten pahalıdır ve bu nedenle minimal fakat kalitesi yüksek parçaların dökümünde ekonomiktir. • Sıvı akışının başlatılması ve akışın sürekli kılınmasındaki zorluk hüresel yapılarından kaynaklanmaktadır. • Köpük filtreler göre eleme verimleri genellikle düşüktür.
Köpük Filtreler	<ul style="list-style-type: none"> • Gözeneklilik yüzdesi yüksektir. • Üç boyutlu gözenek temasları dolayısıyla sıvıların akışları dolambaçlı olması safsızlıkların elenme ortamlarını yükseltir. • Derin yatak ve kimyasal filtrasyon özelliğe sahip tek filtredir. • En yüksek eleme verimine sahiptir. • Sıvı akışını başlatabilme kolaylığı veren düşük ısıl kütleye sahiptir. • Gaz kaçışına imkan veren üç boyutlu gözeneklere sahiptir. 	<ul style="list-style-type: none"> • Pahalıdır. • İnce ağları, keskin köseleri, vardır. Bu da kırılıp ufalanmasına ve dolayısıyla eriyik kirletme potansiyellerine neden olur. • Akış sürekliliği ve filtre ömrü açısından olumsuzluklara yol açabilirler. Bunun nedeni tıkalı gözenekleri ya da filtrasyon sürecinde gözeneklerin tıkanma riskinden kaynaklanmaktadır.

2. Seramik Köpük Filtreler

2.1. Seramik Köpük Filtrelerin Tarihiçesi

Seramik köpük filtreler başlangıçta alüminyum birincil döküm uygulamalarında kullanılmış daha sonra diğer alaşım malzemelerinin dökümünde kullanılmıştır (Baran, 2021). Başlarda alüminyum ve bakır

gibi düşük sıcaklık ve yüksek akıcılığa sahip sıvılara yönelik kullanılan seramik köpük filtreler şimdilerde çok daha kapsamlı sıvı uygulamalarında başarılı bir şekilde kullanılmaktadır (Gören, 1995). 1974'te seramik köpük filtreler dövme alüminyum alaşımlarının imalatında sıvı alüminyum filtrasyonunda kullanılmış, 1976'da ise alüminyum endüstrisinde ticari olarak uygulamaya başlamıştır. 1977'de tek parça kalıpların döküm filtrasyonları alüminyumla beraber başlamış, dökme demirle 1983'de devam etmiştir. Dövme alüminyum dökümlerin %50'sinin üzerinde günümüzde yılda yaklaşık 650.000 seramik filtre kullanımı söz konudur (Akpınar, 2009).

2.2. Seramik Köpük Filtreler ve Özellikleri

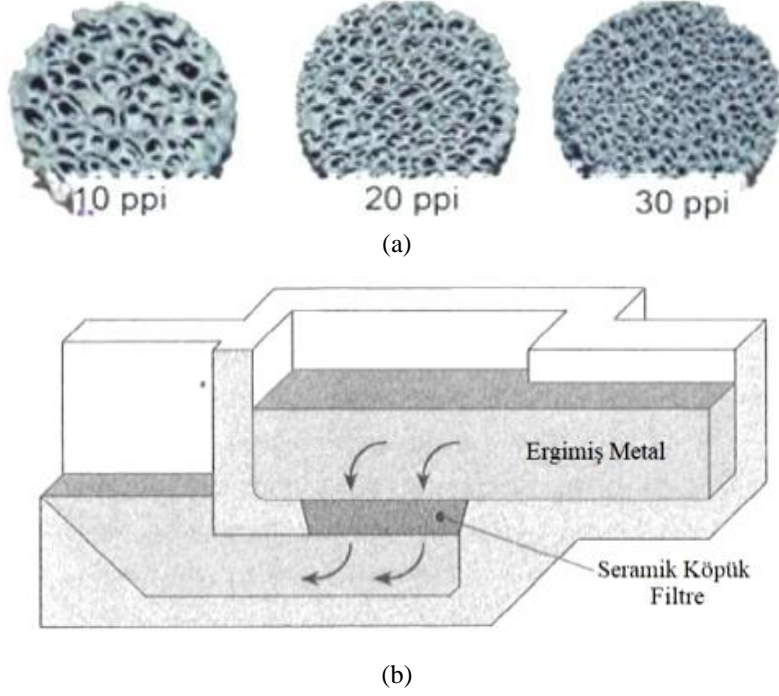
Filtreler, yapısında belli boyut ve yoğunlukta gözenekler içeren, yine standart veya isteğe uygun boyutlarda hazırlanabilen, filtrelenmesi istenilen sıvının kimyasal içeriğiyle büyük oranda uyumlu yapısal özelliklere sahip eleyici malzemelerdir (Gören, 1995).

Metalik filtrelerin çok sınırlı filtrasyona uygunluğu ve sıvıyı kirletme gibi potansiyellerinden dolayı çok kısa sürede seramik filtrelere ani geçişler olmuştur. Filtrasyon için kullanılan ilk seramik filtreler belli bir kesit ve bu kesit alan içinde genellikle yuvarlak şekilli delikleri olan basit süzükler şeklinde üretilmişlerdir. Filtrelerin filtrasyon amaçlı kullanımı yaygınlaştıkça çok daha çeşitli sıvı uygulamaları için fikirler ön plana çıkmıştır. Bu amaç ile köpük filtreler üretilmiştir. Seramik köpük filtreler geliştikçe artan filtrasyon verimlerinin yanında, dikkatli ve titiz, profesyonelce çalışma avantajları da sunmuşlardır (Gören, 1995). Seramik köpük filtreler üç boyutlu ağ içinde açık temiz boşluklar içerir (Şahin, 2010). Seramik köpük filtre malzemesi olarak kullanımları dışında; katalitik yanma, brülör artırıcılar, dizel motor egzozları için kurum filtreleri, katalizör destekleri ve biyomedikal cihazlarda da kullanılabilirler. Yapısal özelliklerine göre seramik köpük filtreler eriyiklerde eksojen ve kalıntıları giderebilir. Aynı zamanda seramik köpük filtreler düşük akış direncine ve yüksek filtrasyon verimine sahiptir. Filtreler, döküm işlemi sırasında direk döküm ünitesinin önüne yerleştirilmektedir (Baran, 2021). Şekil 2'de seramik köpük filtrenin görüntüsü verilmiştir.

Seramik köpük filtreleri kullanarak herhangi bir ek süreç gerekmeksizin döküm süreci içinde filtrasyon başarılı şekilde yapılabilmektedir. Seramik köpük filtreler en son oluşabilecek safsızlıkların önüne geçebilmek ve filtrasyon sıvısının en az yön değişimi ile kalıba akmasını sağlayabilmek için kalıp boşluğuna olabildiğince yakın yerleştirilir (Gören, 1995).

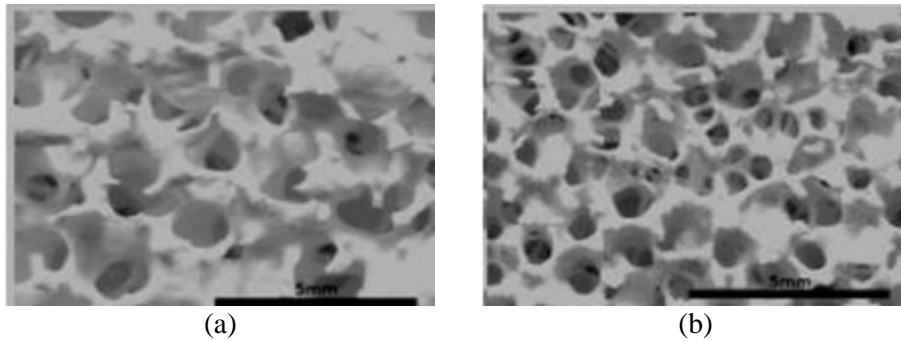
Filtrasyon verimliliği Şekil 3'ten de görülebileceği gibi filtre malzemesinin ppi'sinin yanı sıra çıkarılacak parçacıkların boyut dağılımına da bağlıdır. Ppi, seramik köpüğün üretimindeki plastik malzemenin inç başına düşen ortalama gözenek sayısı ile elde edilmektedir. Seramik köpük filtreler hava geçirgenliğine göre farklı ppi kategorileri ile ifade edilmektedir. Tipik ticari seramik köpük filtrelerin boyutları 10-80 ppi arasındadır. Endüstriyel dökümhanelerde istenen döküm hızını elde etmenin yanında minimum düzeyde kabul edilebilir filtrasyon verimliliğine ulaşmak için en çok kullanılan filtreler 20-40 ppi seramik köpük filtrelerdir. 10-20 ppi gözenek boyutlu filtreler ise zayıf partikül tutma yeteneğine sahiptir ve çoğunlukla hapsedilmiş yığınların, yüzey kaynaklı oksitlerin ve

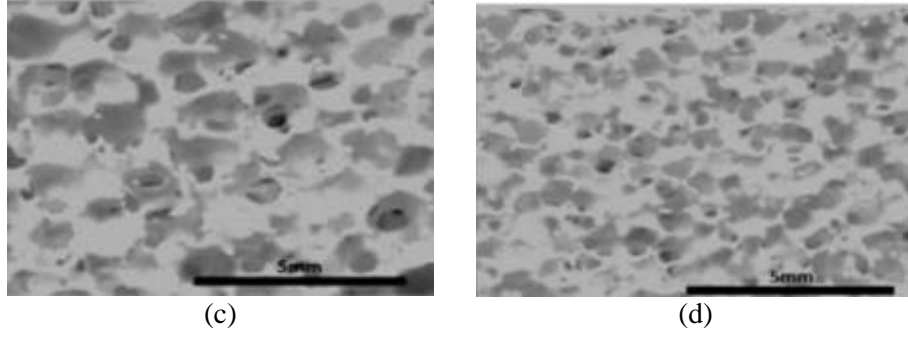
eritme, tutma, taşıma esnasında meydana gelen diğer büyük partiküllerin filtrasyonunda kullanılmaktadır. Yüksek gözenek yoğunluğuna sahip 60-80 ppi gözenek boyutundaki filtreler ise sadece yüzey bakımından kritik ekstrüzyon ve tabaka ürünleri gibi yüksek kalite ürünlerine ulaşmakta kullanılmaktadırlar. Şekil 3'te 30, 40, 50 ve 80 ppi gözenek boyutlarındaki seramik köpük filtreler görülmektedir (Baran, 2021; Olson ve ark., 2005).



Şekil 2. a. Metal döküm işlemindeki seramik köpük filtre (Kumru, 2019).
b. Seramik köpük filtre ve döküm kabı (Gören, 1995).

Filtre amacı ile geliştirilen seramik köpük filtreler açık poroziteli bir yapıya sahiptir. Yılmaz ve Çalışkan, (2019)'in çalışmasında ergimiş metal filtrasyonunda kullanılmak üzere poliüretan köpük (PUF) kullanılarak replikasyon metoduyla açık gözenek yapısına sahip silisyum karbür esaslı seramik filtre üretmişlerdir. (Doğan ve ark., 2022).





Şekil 3.a) 30 ppi, b) 40 ppi, c) 50 ppi ve d) 80 ppi gözenek boyutlarındaki seramik köpük filtreler (Baran, 2021).

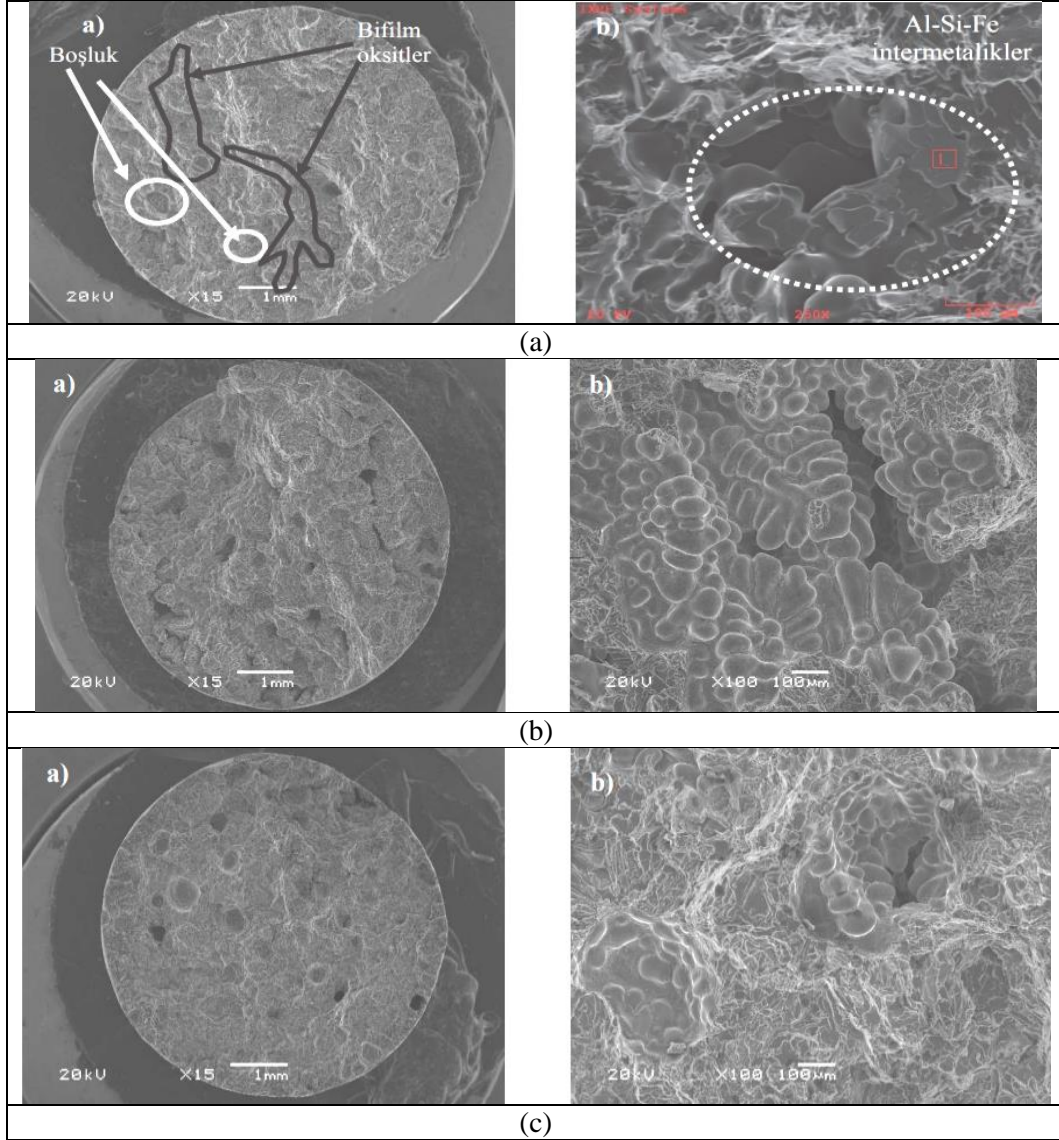
Seramik köpük filtrelerdeki yapı sıvının akması için eşsiz, dolambaçlı bir yol oluşturur, bu yol da inklüzyonları yakalamak ve ergimiş metalin kalıp boşluğuna temiz ve laminar olarak girişine izin vermektedir. Önemli filtre parametrelerinden bazıları gözeneklilik, kıvrımlı yapı, özgül yüzey alanı ve gözenek çapıdır. Alaşımın tipi, tane inceltici, dökümün hızı ve metal sıcaklığı gibi parametreler filtreleme işlemini etkilemektedir. Filtrelerden önce ilave edilen tane inceltici filtrasyon verimliliğini olumsuz etkileyen bir durumdur. Seramik köpük filtrelerin maliyeti, kullanım rahatlığı ve makul performans özellikleri onları genellikle dökümde en iyi filtreler olarak kabul edilmelerindeki etkenlerdir. Bu filtrelerin asıl avantajları; en zorlu döküm uygulamalarında yüksek filtrasyon verimliliği, türbülans azaltma, refrakterlik ve erozyona karşı direncidir (Baran, 2021).

Seramik köpük filtreler endüstride çoğunlukla folyodan kalın levhalara ve biyet imalatına kadar birçok alanda kullanılmaktadırlar. Hedeflenen inklüzyon konsantrasyonuna ve yakalanması amaçlanan inklüzyon boyutlarına uyumlu farklı kalınlıklarda üretilmektedirler. Büyük boyutlardaki inklüzyonları 10 ppi yakalarken, daha ince inklüzyonları ise 70 ppi yakalayabilmektedir. Filtrenin üst yüzeyinde filtreleme yapmak seramik köpük filtrelerin çalışma prensibi değildir. Sıvı metalin filtrede tıkama yapmadan filtrenin içinden geçmesi filtrenin iyi inklüzyon yakalama yeteneğine ulaşmasını sağlar (Yorulmaz, 2016).

Filtresiz, 20 ve 30 ppi filtreli dökülmüş Al-Si-Mg alaşımlarının kırık yüzey SEM görüntüleri Şekil 4'te görülmektedir. Şekil 4'te de görüleceği gibi filtresiz Al-Si-Mg alaşımı kırık yüzeyinde yaşlı oksit filmlerin dendritler arasında sıkışmıştır ve dinamik yük altında kopma gerçekleşmiştir. 20 ve 30 ppi seramik köpük filtreleri kullanan Al-Si-Mg alaşımının kırık yüzeylerinde farklı boyutta boşluk hataları mevcuttur. 20 ppi seramik köpük filtre kullanılarak dökülmüş Al-Si-Mg alaşımında daha büyük boşluklar yapıda bulunmaktadır. 30 ppi seramik köpük filtre kullanıldığında kırık yüzeyde daha ufak ve küresel boşluklar mevcuttur (Tuncay ve Özyürek, 2014).

Seramik köpük filtreler metal dışı kalıntıları temizlemesiyle döküm metallerinin imalatında verimlilikteki ve kalitedeki artışa katkı sağlamaktadır. Otomotiv sanayisinde Avrupa'da sıvı metal filtreleri araç başına ortalama 4,5 filtre kullanılırken, Ferrari firmasında araç başına bu oran 70 filtreye varmaktadır. Dökme demir filtrasyonunda yılda 140 milyon filtre, çelik dökümde yılda 2 milyon filtre

ve alüminyum dökümde yılda 20 milyon filtrede filtre malzemesi olarak gözenekli seramikler kullanılmaktadır. Yılda %3,5 oranı ile giderek pazar payında artış söz konusudur (Jaunich ve ark., 2004).



Şekil 4. a. Filtresiz dökülmüş Al-Si-Mg alaşımın **b.** 20 ppi ve **c.** 30 ppi seramik köpük filtre ile dökülmüş Al-Si-Mg alaşımının çekme numunesi kırık yüzey SEM görüntüleri (Tuncay ve Özyürek, 2014).

Seramik köpük filtrelerin katı yakıt proses teknolojileri, çöp yakma prosesleri ile dizel yakıt dumanlarının filtrasyonunda avantajlar sunması yüksek sıcaklarda bile yüksek performansta partikül kontrolüne sahip olmalarından kaynaklanmaktadır. İleri seviyede partikül uzaklaştırmada gözenekli filtrelerin başarı ile kullanılmasında ve uygulamasındaki ölçüt seramik malzemenin kimyasal, termal ve mekanik dayanımının yanında ayrıca entegre proses özelliklerinin yüksek güvenliğine ve uzun vadeli yapısal dayanıklılığına (>10,000 saat) bağlıdır. Filtreler partikül eleme yeteneğini ve yüksek akış kapasitesini korurken aynı zamanda da akışkan gazın kimyasal değişikliklerine, basınç ve sıcaklık değişikliklerine karşı dayanıklı olmalıdır. Alümina, kordiyerit, mullit, silisyum karbür, silisyum nitrid

içeren malzemeler bu tip uygulamaların temel malzemeleridir (Montanaro ve ark., 1998). İki fazlı, üç boyutlu bağlı kompozitlerin metal infiltrasyon tekniğiyle üretimi açık gözenekli seramik köpük filtrelerin başka uygulamalarına örnek verilebilir. Kompozit malzemedeki takviye elemanın dağılımının kontrolü seramik köpük kullanımı ile etkin olarak sağlanır (Peng ve ark., 2000).

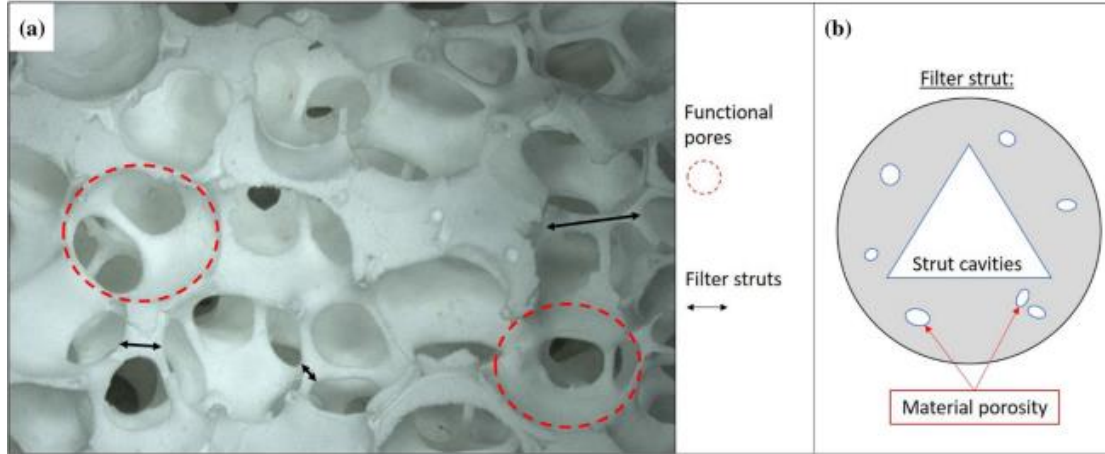
Tablo 3. Bazı seramik köpük filtrelerin fiziksel özellikleri (Gören, 1995).

Köpük Malzeme	Gözenek sayısı (ppi)	Ağ kalınlığı, (µm)	Birim yığın yoğunluğu (g/cc)	Birim gözeneklilik (%)
NCL MULLİT	10	686	0,44	78
	20	508	0,47	77
	30	279	0,45	81
98 ALUMİNA	10	508	0,51	82
	20	356	0,61	80
	30	254	0,66	77
ZTA ALUMİNA	10	432	0,57	85
	20	330	0,61	83
	30	229	0,69	80
Zirkonya (PSZ)	10	432	0,57	85
	20	330	0,61	83
	30	229	0,69	80
LD	10	457	0,93	81
	20	356	1,18	77
	30	254	1,12	76

İleri pek çok üretim sistemleri verimliliği artmak ve geliştirmek için döküm hatalarını bütünüyle bertaraf etmeye yöneliktir. Bunun için, hatasız metal döküm verimliliği amacıyla metal dışı kalıntıların eriyikten giderilmesi gereklidir. Bu işlev için seramik köpük filtre kullanımı en etkili yöntemlerden biridir. Burada filtre boyutları 18 ile 66 cm² aralığındadır ve filtreler 5 cm standart kalınlıktadır. Filtre kullanımı dökme demir parçalarının imalatında ikinci büyük öneme sahiptir. Seramik köpük filtre kullanılarak yapılan filtreleme ile dökme demir parçalarının %50'sinden fazlası imal edilmektedir. Farklı filtre boyutlarında (35 cm² ile 150–300 mm ve kalınlıkları 13–32 mm) yıllık olarak yaklaşık 400.000.000 filtre kullanılmaktadır. Rutin olarak seramik köpük filtre ile filtrelenen metal ürünleri arasında çelik döküm, alüminyum döküm, yüksek sıcaklık süper alaşımlarının ve bakır alaşımlarının dökümü gibi metal ürünleri yer almaktadır (Akpınar, 2009).

Köpük malzemelerde PSZ (Mg) yüksek performanslı, stabilize ajan olarak magnezyumun kullanıldığı kısmen kararlı zirkonyayı; ZTA ise bir mullit bağlayıcı sistem ile zirkonya toklaştırmacı alümina köpükleri tanımlamaktadır (Gören, 1995).

Filtrasyon, alüminyumdaki metalik olmayan inklüzyonların giderilmesinde genel bir şekilde kullanılan bir proses bölümüdür ve filtreleme ortamı olarak genellikle seramik köpük filtreler (CFF'ler) kullanılır (Bergin ve ark.,2021).

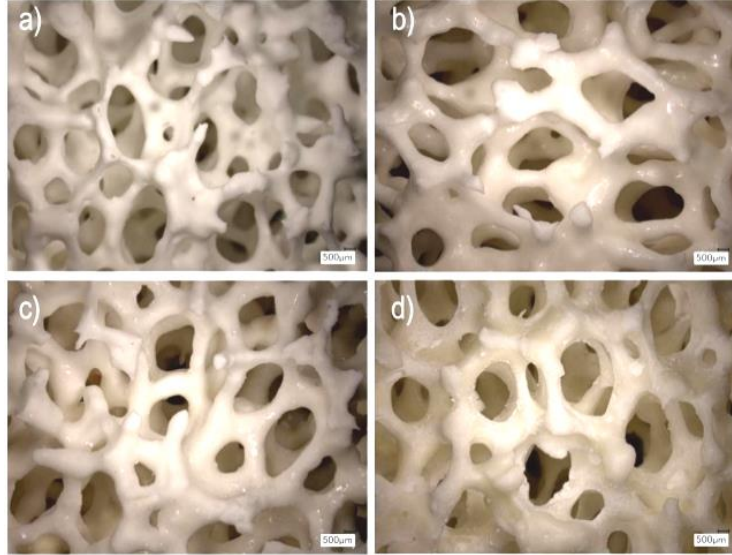


Şekil 5. Seramik bir köpük filtredeki gözeneklerin şematik gösterimi: (a) işlevsel gözeneklerin ve filtre desteklerinin işaretlendiği bir filtrenin fotoğrafı ve (b) bir filtre desteğinin dikme boşluğu ve malzeme gözenekliliği (Bergin ve ark.,2021).

Seramik köpük filtrelerin temel özelliği gözenekliliktir. Bunlar;

- (1) fonksiyonel gözeneklilik (dikmelerle çevrili gözenekler),
- (2) malzeme gözenekliliği (dikmelerdeki gözenekler) ve
- (3) dikme boşlukları (polimerik köpüğün ayrışmasının bir sonucu) olarak üç temel kategoride sınıflandırılabilir (Şekil 5).

Çoğu refrakter malzeme gibi, seramik köpük filtreler de çoğunlukla tek kullanımlık uygulamaları nedeniyle geçerli olan maliyete duyarlıdır. Bununla birlikte, sinterleme sıcaklığını ve dolayısıyla enerji tüketimini azaltan inorganik bir bağlayıcının eklenmesiyle üretim maliyetlerinde bir azalma mümkündür. Sıcak gaz filtrasyonu gibi diğer uygulamalarda seramik köpük filtre üretimindeki zorluğun, çoğu durumda filtrelerin maruz kaldığı sert ve aşındırıcı koşullara dayanabilecek uygun bir bağlayıcı bulmakta yattığı bulunmuştur. Erimiş alüminyum filtrasyonu alanında, yaygın olarak kullanılan fosfat bağlı seramik köpük filtrelerin, magnezyum (Mg) içeren alaşımları süzerken daha az dirençli olduğu bilinmektedir (Bergin ve ark. 2021). Şekil 6’da lityum içeren bir yüzeye sahip alümina bazlı seramik köpük filtreler görülmektedir.



Şekil 6. Alümina köpüklerin ışık mikroskopik görüntüleri (a) referans olarak kaplamasız saf alümina, (b) 1400°C’de termal işlem görmüş spodumen 1 kaplamalı alümina, (c) 1400 °C’de termal işlem görmüş spodumen 2 kaplamalı alümina ve (d) 1600°C’de sinterlenmiş lityum alüminat kaplamalı alümina (Voight ve ark.,2022).

2.3. Köpük Filtrelerde Filtrasyon Süreci

Köpük filtreleri diğer filtrelerden üstün kılan en mühim özellikleri yüksek filtrasyon verimleridir. Yüksek gözeneklilikleri, metalik sıvı kütlelerini parçaladığından akışı nispeten kolaylaştırmakta, sıvının filtreden dolambaçlı akışı safsızlıkların elenme ortamını artırmaktadır. Seramik filtreler sıvı yapısındaki safsızlıkları iki temel mekanizma ile gidermektedir. Bunlar derin yatak filtrasyonu ve fiziksel elemedir (Gören, 1998).

2.3.1. Fiziksel eleme

Filtre gözeneklerinden daha iri olan safsızlıklar, filtrenin temas yüzeylerinde fiziksel olarak süzülür. Zamanla filtrenin yüzeyinde elenen safsızlıklar bir kek tabakası oluşturur ve ikincil bir filtre görevi üstlenir. Daha ufak safsızlıkların elenmesinde oluşan kek tabakası bir avantaj gibi görünse de, bu kek tabakasının teşekkülü filtrasyon uygulamalarında tercih edilmez. Oluşan keklerin filtreden geçen sıvı miktarını azaltması nedeniyle filtre ömrünü negatif olarak etkilemektedir. Çekirdek, hücreli ve örgü filtreler fiziksel eleme mekanizmalı filtrelerdir (Er, 2004).

2.3.2. Derin yatak filtrasyonu

Filtre gözeneklerinden daha küçük safsızlıklar filtre içinde çeşitli ortamlarda elenir. Bu tür küçük parçacıkların elenmesi için tek filtre alternatifi köpük filtrelerdir. Ani yön değişimleri köpük filtrelerin dolambaçlı yollarındaki safsızlıklar tarafından karşılanamaz. Safsızlıklar filtre hücrelerinde parçacık hız ve sıvı dağılımları gibi faktörlerle filtrenin çukur ve çatlak yerlerinde yığılma ve çökme, efektif gözenek aralıklarında sıkışma ve yüzey kuvvetleri ile yüzeye tutunma şeklinde elenirler. Bu filtrelerin içerisinde metalik sıvılar gözeneklerin birbirleriyle dolambaçlı ortamlarında devamlı yön değiştirerek ilerlerler. Sıvıların bu dolambaçlı akışları, safsızlıklarla temas edecek olan filtre yüzeyinin ve

ortamlarının artmasına neden olur. Safsızlıklar filtrelerin çukur ve dar yerlerinde fiziksel olarak süzülür. Metalik olmayan safsızlıklar ise; yüzey ve ısı enerjileri dolayısıyla sıvı ile ıslatılmayan yüzeylerde kimyasal etkiyle tutulur. Filtre yüzeylerine zayıf olarak tutunan bir kısım safsızlıklar, sıvının sürüklenme etkisiyle taşınabilir bile çok sayıda gözenek ortamında fiziksel olarak elenmektedir. Köpük filtreler genellikle oksit yüzeylere sahip olduklarından, oksit safsızlıkların kimyasal tutunma ile (yüzey kuvvetleri ile) elenme oranı yüksektir (Er, 2004).

2.4. Seramik Köpük Filtrelerin Avantajları ve Dezavantajları

Seramik köpük filtre kullanmanın avantajları aşağıda sunulmuştur;

- Cüruf, kum, oksit filmler, seramik inklüzyonlar gibi yabancı maddelerin süzülerek metalden uzaklaştırılması,
- Sakin dolun sayesinde türbülanslı akışın laminar akışa çevrilmesi ve metalin yeniden oksitlenmesini minimuma indirilmesi,
- Model plakası üzerinde daha çok kullanım alanı ve daha minimum metal döngüsü, modelin hazırlanması amacıyla geniş levha alanına sahip olması
- Yolluk sisteminde kalıp erozyon riskinin azalması
- Yolluk sisteminin basitleştirilmesi, sıkı-kısa ve direk birleştirme sistemi,
- İnsan faktörü etkilerinin azaltılması (dökümcü deneyimi, niteliksiz işgücü, proses emniyeti)
- Döküm parçasının fiziksel özellikleri ve yüzey kalitesinde artış, döküm malzemesinin özelliklerinin geliştirilmesi,
- Yüksek filtrasyon verimliliği nedeniyle metalik olmayan kalıntıların mühim miktarda azaltılması,
- Döküm maliyetinde azalması,
- İşlenebilirlik nedeniyle işleme süresinin kısılması, işleme maliyetinin azalması ve aletlerin aşınmasının geciktirilmesi (Şahin, 2010; <https://lma.com.tr>).
- En yüksek gözeneklilik yüzdesi olan filtre olması
- Safsızlıkların elenme ortamlarını arttırmaları üç boyutlu gözenek temasları sebebiyle sıvıların akışlarının dolambaçlı olmasına neden olmalarıdır. Inklüzyon eleme verimi yüksek olması
- Kimyasal ve derin yatak filtrasyon özelliği olan tek filtreler olmaları.
- Sıvı akışını başlatabilme fırsatı veren düşük ısı kütleye sahip olmaları
- Gaz kaçışına imkan vermeleri üç boyutlu gözeneklere sahip olması
- Kontrollü sıvı akışı sağlamaları, akışı homojenleştirilmesi
- Döküm malzemesinde seramik köpük filtrelerin kullanımı ile %80 oranında hataların engellenmesi (Gören, 1995; Er, 2004; Tuncay ve ark., 2014).

Seramik filtrelerin özellikle de köpük filtrelerin bazı dezavantajları da vardır.

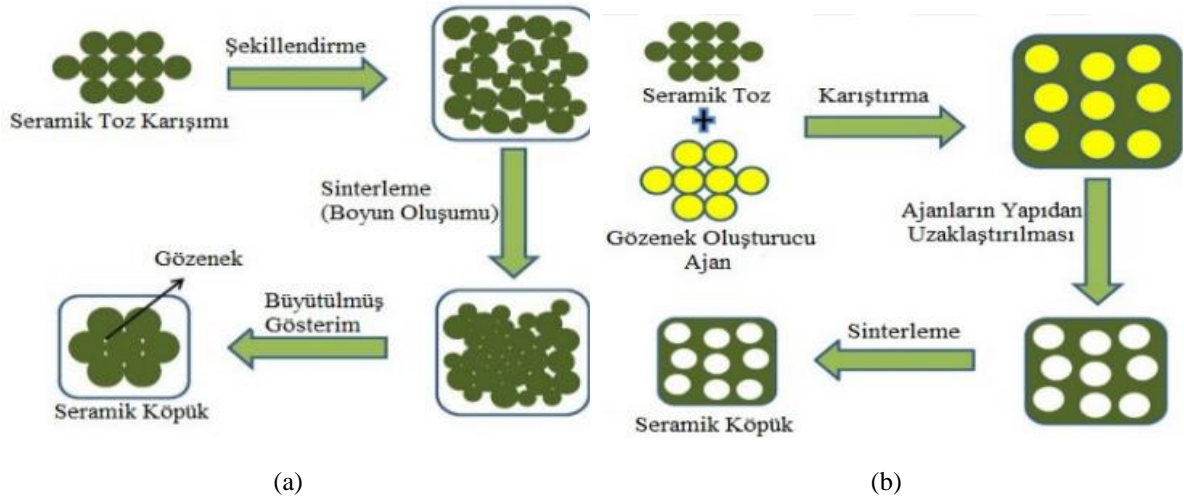
- Bir döküm için köpük filtrelerin yalnızca bir defa uygulanması ve atılması, bunun ekstra bir maliyet getirmesi(Gören, 1995).
- Köpük filtrelerin pahalı olması
- Tıkalı gözenekleri ya da filtrasyon süresince gözeneklerin tıkanma riski dolayısıyla filtre ömrü ve akış sürekliliği açısından olumsuzluklara yol açabilmeleri (Er, 2004; Akpınar, 2009).

2.5. Seramik Köpük Filtrelerin Üretim Yöntemleri

Kısmi sinterleme, kurban şablon, karbon preformlarının CVD yöntemiyle kaplanması, bonding yöntemi, polimer sünger (replikasyon) yöntemi, doğrudan köpükleştirme yöntemi köpük seramik üretim yöntemlerinin başlıcalarıdır (Şahin, 2010).

2.5.1. Kısmi sinterleme

Kısmi sinterleme yöntemi, gözenekli seramiklerin imalatında çok kullanılan metotlardan biridir. Metodun proses diyagramı Şekil 7.a.'da görülmektedir. Metotta toz seramik partikülleri tamamen yoğunlaştırılmadan öncesinde sinterleme işlemi sona erdirilmekte ve böylece gözenekli bir yapı oluşturulmaktadır (Baran, 2021). Bu teknikle oluşturulan gözenekli seramikler azami %60 gözenekliliğe sahiptir (Yılmaz ve Çalışkan, 2019).



Şekil 7. a. Kısmi sinterleme ve b. Kurban şablon yöntemlerine ait proses şemaları (Baran, 2021).

2.5.2. Kurban şablon

Kurban şablon metodunda, uygun değerde gözenek oluşturan ajanın seramik toz karışımına eklenmesi ve sinterleme öncesinde veya sinterleme sırasında buharlaştırması ya da yakılması ile seramik filtre imal edilmektedir. Gözeneklilik %15-95 arasında değişen yöntemin üretim şeması Şekil 7.b.'de gösterilmektedir.

Elde edilen gözenekli seramikteki gözeneklilik, kullanılan ajanların miktarına, şekil ve boyutuna göre değişir. Aynı zamanda ajanlar düzenli gözenek dağılımını sağlamak amacıyla homojen bir şekilde

karıştırılmalıdır. Doğal ve sentetik malzemeler gözenek oluşturuju ajan olarak kullanılmaktadır. Tablo 4'te gözenek oluşturan ajanlar görölmektedir.

Tablo 4. Gözenek oluşturuju olarak kullanılan malzemeler (Baran, 2021).

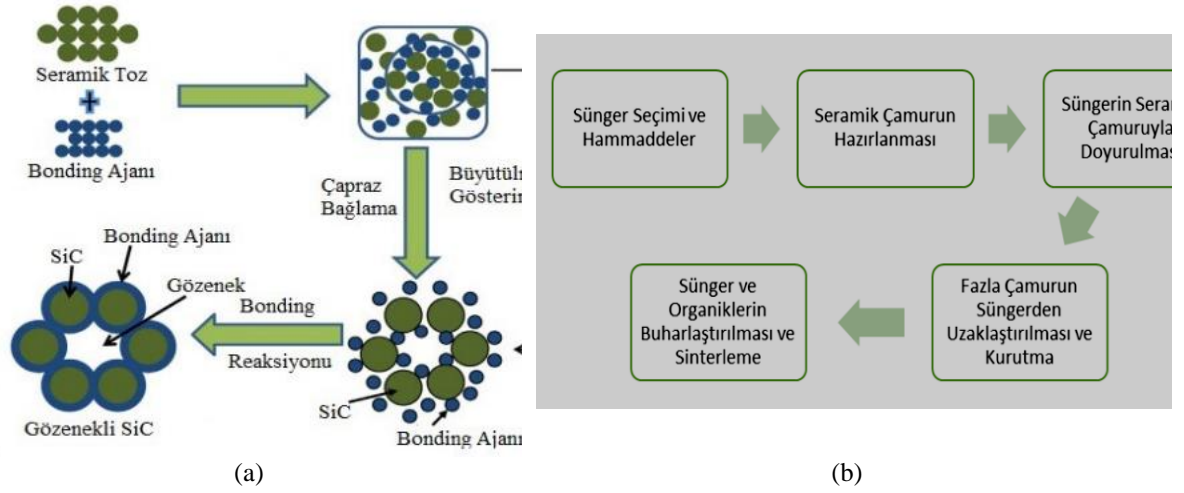
Gözenek oluşturan malzemeler	
Sentetik maddeler	Polimer tanecikleri
Doğal maddeler	Nişasta, selüloz, pamuk
Metalik, inorganik maddeler	Nikel, karbon, uçucu kül, cam parçaları
Sıvı maddeler	Su, jel, emülsiyonlar

2.5.3. Karbon preformlarının CVD yöntemiyle kaplanması

Karbon preformların CVD/CVI metoduyla kaplanması; termoset polimer (polikarbosilan/ polisilan) köpüklerin pirolizi aracılıyla karbon iskelet yapısının oluşturulması ve bu yapılar farklı oksit dışı seramiklerin CVD/CVI yöntemleri ile kaplanması temelinden oluşmaktadır. Bu metot, bir CVD reaktörü icap eder ki köpükler sistem içerisinde altlık olarak bu reaktörden yararlanır. Piroliz yapılmış köpükler sistem içerisindeki reaktant gazlarla tekdüze kaplanırlar. Aynı büyüklükte gözeneklerin denetlenerek imalatı mümkündür ve sinterleme prosesi çoğunlukla yüksek sıcaklıklar ve uzun süreler gerektirir (Akpınar, 2009).

2.5.4. Bonding yöntemi

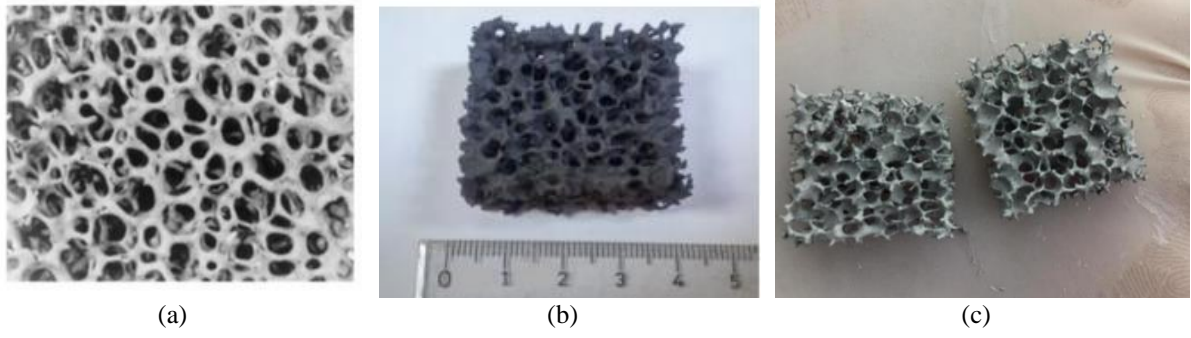
Silisyum karbür, replika, kurban şablon, direkt köpükleştirme ve kısmi sinterleme yöntemlerinin tamamında 1500 °C ve üzeri sıcaklıkları kullanmaktadır. Bu durum silisyum karbürün yapısındaki güçlü kovalent bağdan kaynaklanmaktadır. Bonding yöntemi SiC seramiklerinin biraz düşük sıcaklıklarda üretilmesini sağlamak amacıyla geliştirilmiştir. Metotta silisyum karbür için ön seramik polimerleri birinci olarak kullanılmaktadır. Bu yöntemde gözenekli silisyum karbür seramiklerinin işleme sıcaklığının düşürülmesi ve bununla birlikte oksidasyon direncinin iyileştirilmesi amaçlanır. Silisyum karbürün üzeri bağlayıcı ajanlarla kaplanır ve işlem kısmi sinterleme işlemine benzer olarak gerçekleştirilir. Gözenekli SiC üretiminde kordiyerit ($2Mg.2Al_2O_3.5SiO_2$), mullit ($3Al_2O_3.2SiO_2$), silika (SiO_2), silisyum oksikarbür (SiOC) ve frit fazları bonding ajanları olarak kullanılmaktadır. Bonding tekniğiyle gözenekli SiC seramiklerinin üretimi Şekil 8.a'da görölmektedir (Baran, 2021; Kim, 2013).



Şekil 8. a. Bonding yöntemi (Baran, 2021; Studart, 2006) b. Replikasyon proses şeması (Aydın, 2022).

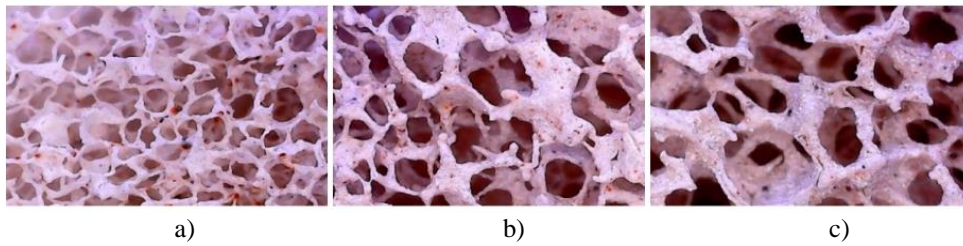
2.5.5. Polimer sünger (replikasyon) yöntemi

Açık gözenekli seramiklerin üretimindeki son nokta replikasyon yöntemidir (Akpınar, 2009). Filtre kullanımları için açık gözenekli seramik üretimi gerçekleştirilmelidir. Bu yöntem (Şekil 8.b.) (Özey, 2018), modern köpük seramiklerin üretiminde de yaygın olarak kullanılan yöntemdir (Şahin, 2010). Köpük filtreler belirli gözenek açıklığına sahip süngerler sayesinde açık gözenekli olarak üretilen süngerlerdir (Aydın, 2022). Bu imalat uygulaması açık hücreli bir polimer köpüğünün seramik çamurlarıyla kaplanmasından oluşur. Fazla çamurun polimerden uzaklaştırılması, takibinde sinterlenmesi ve polimerin yanmasıyla seramik köpük yalnız bir adımda üretilir (Yılmaz ve Çalışkan, 2019). Seramik partiküller uygulama alanına ve son ürünün hedeflenen özelliklerde olmasına göre belirlenirler. Sıvı metal filtrasyonu için uygulanacak bir seramik filtre üretiminde yüksek sıcaklıklara karşı ve kimyasallara karşı dayanıklı mullit gibi seramik malzemelerin tercih edilmesi örnek verilebilir (Özey, 2018). Bu metotta altlık malzeme tercihi için poliüretan (PU), polistiren (PS), polivinil klorür (PVC) ve selüloz gibi çeşitli polimer malzemeler uygulanmaktadır. Organik köpüğün özelliklerinin tekrarlanabilirliği son derece önemlidir. Sıkıştırılmayı takiben geriye dönebilmelidir. Sinterleme işleminin sonunda seramik köpüğün hasar oluşturmadan temiz ve bütünlüğüne sahip olması gereklidir. Örnek olarak, Amerika Birleşik Devleti'nde yapılan bir çalışmada organik altlık malzeme olarak %97 boşluk hacimli birbiriyle bağlantılı, açık hücreli bir poliüretan köpük kullanılmıştır. Seramik çamur hazırlandığında polimer köpüğe emdirilmesi suretiyle yapılı ve poliüretanın yüzeyleri kaplanır. Köpük çamura daldırılır ve sıkıştırmak suretiyle havası alınır. Seramik çamurun içindeyken, köpüğün tekrar genişlemesine imkân tanır ve köpüğün açık hücreleri tarafından çamur emilir. Arzu edilen kaplama yoğunluğunu sağlamak amacıyla bu adım birkaç defa yinelenebilir. Köpük dengeli bir biçimde kaplandığında, fırında kurutulur ve seramik yapıya çevrilir. Ardından organik katkıları seramik çamurdan uzaklaştırmanın yanı sıra seramik kolların içindeki polimeri yakmak amacıyla sinterleme işlemi uygulanır. Sinterleme işleminden sonra üretilen son seramik köpük Şekil 9.a'da gösterilmektedir (Scheffler ve Colombo, 2005).



Şekil 9. a. Replikasyon yöntemi ile üretilmiş (Scheffler ve Colombo, 2005) b. Sinterlenmiş seramik köpük (Yılmaz ve Çalışkan, 2019) ve c. Replikasyon prosesi uygulanmış sünger (Aydın, 2022).

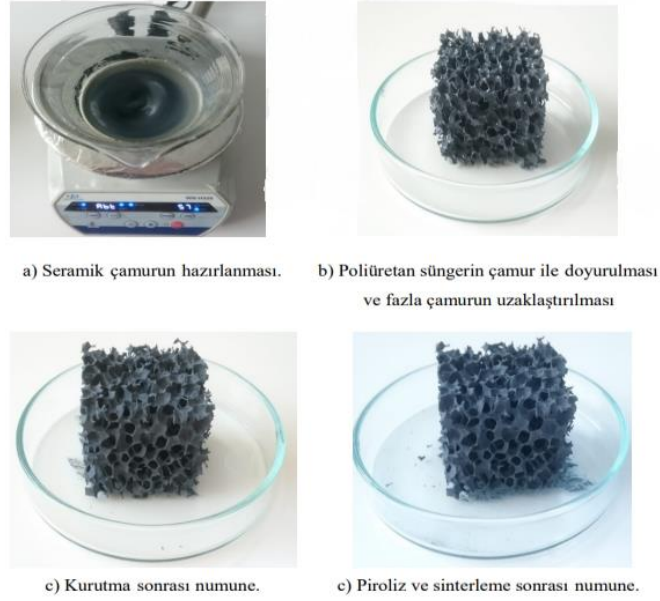
Yılmaz ve Çalışkan çalışmalarında alüminyum matrisli kompozit üretiminde kullanılmak amacıyla silisyum karbür seramik preformların üretiminde çeşitli kimyasal katkı malzemeleriyle elde edilen seramik çamurdan replikasyon yöntemiyle makroporoz seramik köpük üretimi gerçekleştirilmiştir. Partikül formda SiC ana malzeme olarak, MAS sıvı faz oluşturucu katkı malzemesi olarak kullanılarak replikasyon yöntemi ile elde edilen seramik köpüğün preform yapısı $>1000^{\circ}\text{C}$ sıcaklıklarda 1-3 saat sinterlenmiştir (Şekil 9.b.) (Yılmaz ve Çalışkan, 2019). SiC esaslı seramik köpük filtrelere alternatif olarak döküm prosesinde kullanılmak üzere daha az maliyetli ve yerli alümina esaslı seramik filtreleri replikasyon yöntemini kullanarak üreten çalışmalar da vardır (Şekil 9.c) (Kunduraci ve Aydın, 2022). Şekil 10'da replikasyon yöntemi ile elde edilmiş numunelerin birbirleriyle temas halinde açık gözenekler içerdiği ve bu gözeneklerin devamlı bir seramik bağ ile bağlanarak oluştuğu ve üç boyutlu gözenekli bir yapıda olduğu tespit edilmiştir. Müllit seramiklerin replikasyon yöntemiyle üretiminde kullanılan polimerik sünger ve seramik çamur emdirildikten sonra süngerin yok edilmesiyle ortaya çıkan seramik köpük Şekil 11'de görülmektedir.



Şekil 10. a) 1350°C , b) 1300°C , c) 1250°C 'de ısıtım işlemi gören numunelerin optik mikroskop görüntüleri (Aydın, 2022).



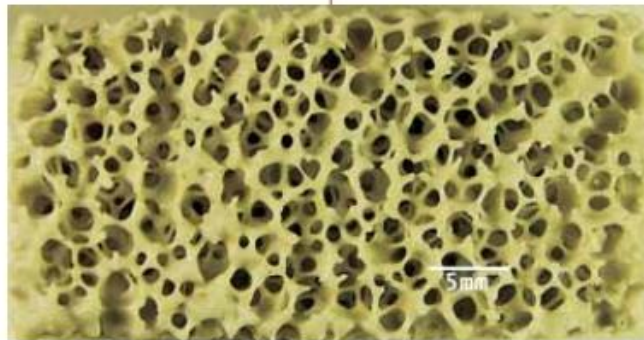
Şekil 11. Kullanılan polimerik sünger ve çamurun emdirilmesini takiben kurutulmuş gözenekli seramik numunelerin makro görüntüleri (Özey, 2018).



Şekil 12. 10 ppi poliüretan süngerle elde edilen silisyum karbür köpük filtre (Baran, 2021).

Replikasyon yöntemi ile SiC-bentonit esaslı seramik köpük filtre üretiminin aşamaları Şekil 12’de görülmektedir. Replikasyon yöntemi adımlarına uygun olarak seramik çamur hazırlanmış, sünger hazırlanan çamur ile doyurulmuş, kurutulmuş, piroliz ve sinterleme işlemlerinden sonra SiC köpük filtre elde edilmiştir.

Başka bir çalışmada (Akpınar, 2009) yine replikasyon yöntemi kullanılarak kordiyerit esaslı silisyum karbür katkılı seramik köpük filtre üretilmiştir. Magnezya, kaolen, kuvars ve SiC karışımlarından hazırlanan seramik solüsyonlar replikasyon yöntemiyle üretilmiş ve sprey tekniği ile şekillendirildikten sonra 1350 °C’de 1 saat sinterlenmiştir (Şekil 13).

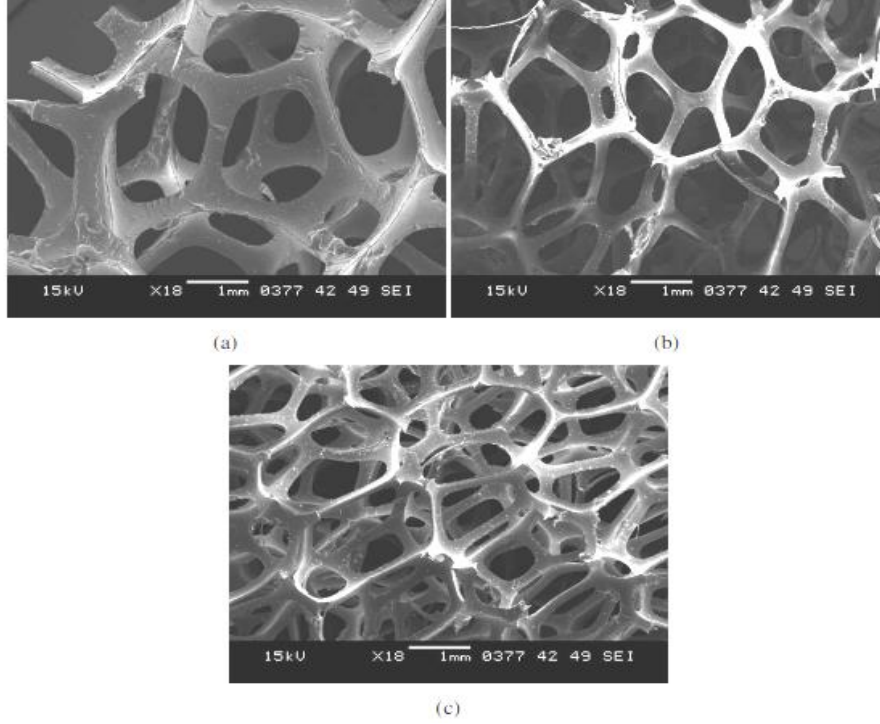


Şekil 13. Kordiyerit esaslı filtre numunenin sinterleme sonrası görüntüsü (Akpınar ve ark.,2009).

Tablo 5. A serisi süngerlerin SEM incelemesiyle tespit edilen yapısal parametreleri (Akpınar, 2009).

Özellik	A ₁	A ₂	A ₃
Gözenek yapısı	Açık	Açık	Açık
Gözenek yoğunluğu (PPI)	10	20	30
En büyük gözenek boyutu (mikron)	3100	1670	1340
En küçük gözenek çapı (mikron)	741	549	413
Yüzey pürüzlülüğü	Pürüzlülük düşük	Pürüzlülük düşük	Pürüzlülük düşük
Ortalama strut kalınlığı (mikron)	415	196	186
Ortalama gözenek boyutu (mikron)	1898	1127	885
Strut şekli	İçi dolu	İçi dolu	İçi dolu

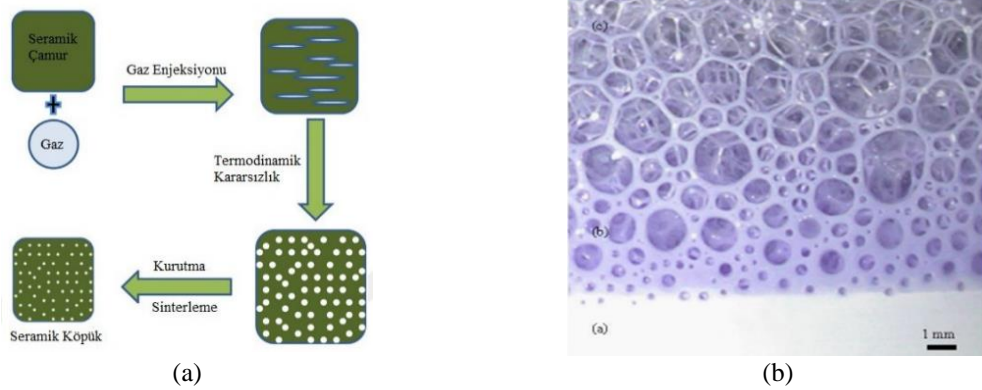
Replikasyon yönteminde kullanılan polimer süngerlerin SEM görüntüleri Şekil 14’te, özellikleri ise Tablo 5’te verilmektedir. Şekil 14’de A serisine ait sünger malzemelerin SEM mikrograflarının incelenmesiyle tamamının bütünüyle açık gözenekli ve strut biçiminin içi dolu olduğu fark edilmiştir (Akpınar, 2009).



Şekil 14. A serisine ait poliüretan süngerlerin SEM mikrografları, a) 10 ppi boyutu, b) 20 ppi boyutu, c) 30 ppi boyutu (Akpınar, 2009).

2.5.6. Doğrudan köpükleştirme yöntemi

Doğrudan köpükleştirme yöntemiyle; seramik bileşenlerin farklı organik bileşenlerle karıştırılmasıyla malzeme içerisinde gaz kabarcığı meydana gelmesi ile (mekanik karıştırma, köpükleştirici katkı, gaz enjeksiyonu vb.) köpük yapı oluşur. Nihai gözenekli seramik malzeme kurutulmanın ardından sinterlenir. Bu prosesle açık ve kapalı gözenekli köpükler üretilebilirse de kapalı gözenekli seramik malzemelerin üretimi daha fazladır (Akpınar, 2009).



Şekil 15.a. Doğrudan köpükleştirme prosesi b. Gaz kabarcıklarının çekirdeklenmesi (Baran, 2021)

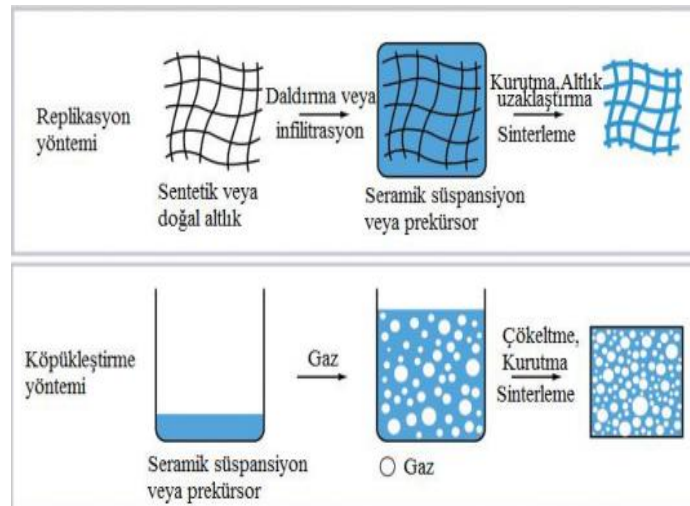
Gaz kabarcıkları öncelikle küre şeklinde çekirdeklenmekte takiben çok yüzlü hücreler olarak gelişmektedir. Şekil 15.b’de gaz kabarcıklarının ilk olarak küre şeklinde çekirdeklenmesinin akabinde çok yüzlü hücreler olarak büyümesi görülmektedir (Baran, 2021).

2.6. Replikasyon ve doğrudan köpükleştirme yöntemlerinin karşılaştırılması

Doğrudan köpükleştirme yöntemi ile elde edilen köpük seramiklerin replikasyon yöntemi ile elde edilen ağ yapılı köpük seramiklere kıyasla bazı faydaları mevcuttur. Belirli biçimlerde, birleşimde ve yoğunluktaki yapının köpükleştirme yöntemiyle rahatlıkla üretilebilmesi bunlardandır. Küçük gözenek çaplı kapalı gözenekli seramikler replikasyon yöntemi ile elde edilememektedir. Replikasyon yöntemiyle elde edilen köpük seramikler, tekdüze ve büyük oranda gözenek yapısında olmalarına rağmen, küçük gözenekler içermezler. Köpükleştirme yöntemi ile elde edilen seramiklerin mikrometre mertebesinde küçük gözenekler içermesi geniş bir yüzey alanına imkan verir. Fakat bu malzemelerin gözeneklilik oranları düşüktür. Bilhassa sıvı metal filtrasyonu için geniş yüzey alanına ve büyük oranda gözenekliliğe gereksinim duyulur. Replikasyon ya da doğrudan köpükleştirme yöntemleri toplam hacimde %70’den % 90’lara ulaşan oranlarda gözenekliliğe sahip seramik yapı oluşumuna olanak sağlamaktadırlar. Bu üretim yöntemleri ise köpük seramiklerin özelliklerinde ve hücre morfolojisinde çeşitlilik oluşturur. Replikasyon yöntemiyle üretilen köpük seramikler, köpük seramiklerle kıyaslandığında yüksek geçirgenlikte ve düşük mekanik mukavemettedirler. Bütün köpük seramiklerin en mühim özelliklerinden biri olan bağıl yoğunlukları (bulk yoğunluğu/katı yoğunluğu) karakteristik olarak 0,3’ün altındadır (Akpınar, 2009; (Dhara ve ark.,2005). Tablo 6’da bazı köpük seramik üretim yöntemlerinin kıyaslanması görülmektedir.

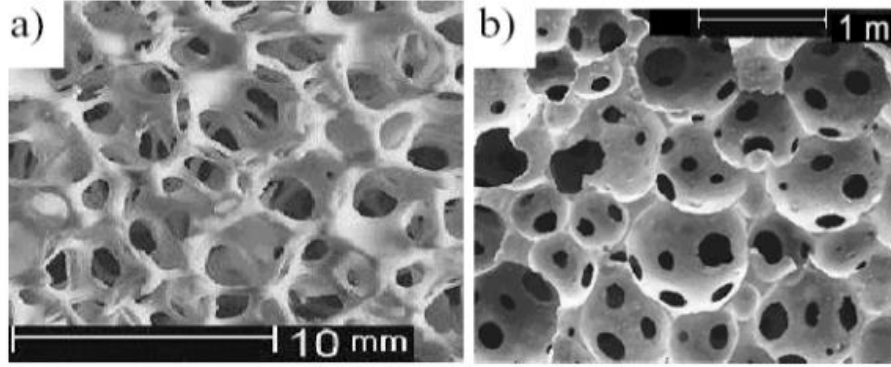
Tablo 6. Köpük seramiklerin üretim metotlarının kıyaslanması (Akpınar, 2009).

Üretim Yöntemi	Gözenek Dağılımı	Gözenek Büyüklüğü	Mekanik Özellikler	Maliyet
Doğrudan Köpükleştirme	Açık ve kapalı Gözenekli	Kontrolü zor	Mikron mertebesinde	Pahalı
Replikasyon	Açık Gözenekli	Üniform	Milimetre mertebesinde	Ucuz

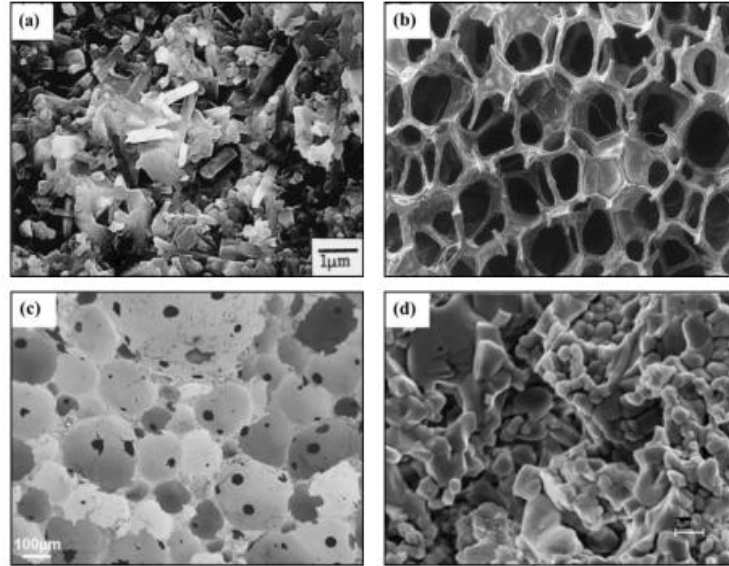


Şekil 16. Replikasyon ve köpükleştirme yöntemiyle seramik köpük üretimi (Akpınar, 2009).

Şekil 17 replikasyon ve direk köpükleştirme metotlarıyla elde edilmiş köpük seramik filtrelerin görüntüleri verilmiştir. Şekil 17 a’da replikasyon yöntemiyle elde edilen birbirine bağlantılı açık hücreli seramik ağ yapısı görülürken 17 b’de ise doğrudan köpükleştirme yöntemi ile elde edilen açık ve kapalı gözenekli hücre yapısı görülmektedir. Şekil 18’de temel gözenekli seramik üretim yöntemleriyle elde edilen bazı malzemelerin içyapıları ifade edilmiştir ve filtre amacıyla kullanıma uygun açık gözenek yapısının polimerik sünger yöntemi ile sağlanabildiği görülmektedir (Akpınar, 2009).



Şekil 17. (a) Replikasyon yöntemiyle imal edilen SiC köpük seramik filtre (b) silikon reçinenin doğrudan köpükleştirilmesi ile hazırlanan SiOC seramik filtre (Akpınar, 2009).



Şekil 18. Temel gözenekli seramik üretim yöntemleriyle üretilen seramikler (a) kısmi sinterleme ile elde edilen Si_3N_4 , (b) polimerik sünger ile elde edilen SiC- Si_3N_4 köpük, (c) doğrudan köpükleştirmeye elde edilen Al_2O_3 ve (d) nişasta eklenmesiyle elde edilen Al_2O_3 (Tarhan, 2015).

2.7. Seramik Köpük Filtrelerin Uygulama Alanları

Seramik köpük malzemeler günümüzde hem filtreleme hem de yalıtım amacıyla yaygın olarak kullanılmaktadır (Doğan ve ark., 2022). Günümüz dökümhanelerinde, kaynaklı tamirlerine izin verilmeyen veya oldukça zor olan, uçak ve otomotiv sanayilerine yönelik birçok hassas parçaların üretilmesinde en çok kullanılan seramik filtreler; seramik köpük filtrelerdir. Seramik köpük filtreler, alüminyum gibi hafif metallerin ve 1800°C'lere varan yüksek ergime sıcaklık metallerin dökümünde

yaygın olarak kullanılmaktadır. Seramik köpük filtrelerin en yaygın kullanım alanları; sıcak gaz ve ergimiş metal filtreleri, petrokimya endüstrisinde kullanılan katalitik destekler ve dizel motor egzoz filtreleridir (Er, 2004). İlerleyen uygulamalar içerisinde elektronik ve biyomedikal alanlar da bulunmaktadır (Akpınar, 2009).

3. Sonuç

Bu çalışmada, seramik köpük filtreler ve özellikleri ele alınmıştır. Seramik köpükler açık gözenekli yapıya sahip olmaları nedeniyle filtreleme uygulamalarında kullanım alanı bulmaktadır. Metaller ve polimerler ile kıyaslandıklarında ise yüksek sıcaklık dayanımları ile avantajlı olmaktadır. Bu filtreler metal dökümlerinde kullanıldıklarında daha temiz ve hatasız parçalar elde edilebilmektedir. Tek kullanımlık olmalarına rağmen petrokimya endüstrisi, elektronik ve biyomedikal alanlar gibi geniş bir uygulama alanına sahiptirler. Seramik köpük filtreler üretimde verimliliğe ve kalitede artışa katkı sağlamaktadır. Aynı zamanda pazar payı artarak devam etmektedir. Pazar payının artması seramik köpük filtreler konusuna ilginin hala devam ettiğini göstermektedir.

Yeni çalışma yapacak araştırmacılara öneri olarak;

- Filtre için gerekli açık gözenek yapısını elde etmek ve nihai ürünün gözenek boyutunun kullanılan polimerik sünger ile belirlenmesiyle istenilen özelliklere sahip filtre polimerik sünger yöntemi ile endüstriyel açıdan daha verimli ve uygun şekilde üretilebilir.
- Filtreler döküm gibi yüksek sıcaklık uygulamalarında kullanıldıklarından dolayı filtre malzemeleri yüksek sıcaklıklara maruz kalmaktadır. Bu yüksek sıcaklıklarda çalışmaya uygun seramik malzemelerin köpük filtre üretimi için tercih edilmesi tavsiye edilir. Aynı zamanda seramik köpük filtreler kimyasal değişikliklere, basınç ve sıcaklık değişikliklerine karşı dayanıklı olması gerektiğinden alümina, kordiyerit, mullit, silisyum karbür, silisyum nitrür içeren malzemeler filtre üretimi için tavsiye edilir.
- Köpük filtreler yüksek gözeneklilik oranına ve en yüksek eleme verimine sahip olan filtrelerdir ve metal dışı kalıntıları temizlemesiyle döküm metallerinin imalatında verimlilikteki ve kalitedeki artışa katkı sağlamaktadır. Döküm işleminde kullanılan seramik köpük filtrelerden yüksek verim elde etmek için filtrenin kalıp boşluğuna olabildiğince yakın yerleştirilmesi tavsiye edilir.

Çıkar Çatışması Beyanı

Makale yazarları aralarında herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan ederler.

Araştırmacıların Katkı Oranı Beyan Özeti

Yazarlar makaleye eşit oranda katkı sağlamış olduklarını beyan ederler.

Kaynakça

- Akpınar S., Altun A., Önel K. Kordiyerit esaslı silisyum karbür katkılı köpük filtrelerin karakterizasyonu ve bazı mekanik özelliklerinin belirlenmesi. Türkiye Seramik Federasyonu Dergisi 2009; 29: 140-146.
- Akpınar S. Kordiyerit mullit esaslı karbür katkılı sıvı metal filtreleri. Dokuz Eylül Üniversitesi, Doktora Tezi, sayfa no:4-38, İzmir, Türkiye, 2009.
- Aydın T., Kunduraci N. Yeni nesil alümina esaslı seramik köpük filtre üretimi. International Journal of Engineering Research & Development (IJERAD) 2022; 14(2): 861–866.
- Baran G. Replikasyon yöntemi ile SiC-Bentonit esaslı seramik köpük filtre üretimi. Yalova Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, sayfa no:15-17, Yalova, Türkiye, 2021.
- Bergin A., Voigt C., Fritsch R., Akhtar S., Arnberg L., Aneziris CG., Aune RE. Experimental study on the chemical stability of phosphate-bonded Al₂O₃-based ceramic foam filters (CFFs). Metallurgical and Materials Transactions B: Process Metallurgy and Materials Processing Science 2021; 52(4): 2008-2025.
- Brenzy R., Green DJ. Mechanical behaviour of cellular ceramics. Materials Science and Technology ed. R.W. Kahn, P. Haasen ve Kramer, E.J., vol. 11, Structure and Properties of Ceramics, Ed. M. Swain, Würzburg Germany, VCH Publishers INC, 2006.
- Dhara S., Pradhan M., Ghosh D., Bhargava P. Nature inspired novel processing routes for ceramic foams. Advances in Applied Ceramics 2005; 104(1): 9-21.
- Doğan B., Aydın T. SiC, MgCO₃ ve Li₂CO₃ ilavelerinin seramik köpükler üzerine etkisinin incelenmesi. International Journal of Engineering Research & Development (IJERAD) 2022; 14(2): 867–871.
- Er S. Silisyum karbür esaslı seramik köpük filtre üretimi. Anadolu Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, sayfa no: 4-10, Eskişehir, Türkiye, 2004.
- <https://lma.com.tr/tr/demirdisi-grubu-urunleri/seramik-kopuk-filtreler/> Erişim tarihi:19.04.2023
- Gören R. Seramik döküm filtreleri ve alümina bazlı köpük filtre üretimi. Yıldız Teknik Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, sayfa no: 16-61, İstanbul, Türkiye, 1995.
- Gören R., Marsoğlu M. Metalik eriyiklerin temizlenmesinde filtreler ve köpük filtre üstünlükleri. Metal Makina Dergisi 1998; 56-64.
- Jaunich H., Aneziris CG., Hubalkova J. Innovative filter and feeder approaches for advanced metal casting technologies. Interceram Refractories Manual 2004; 18-21.
- Kelly A. Why engineer porous materials. Phil. Trans. R. Soc. A. 2006; 364: 5-14.
- Kim Y., Eom J., Kim Y., Raju S. Processing and properties of macroporous Silicon carbide ceramics : A Review Journal of Asian Ceramic Societies Processing and properties of macroporous silicon carbide ceramics : A review. Integrative Medicine Research 2013; 1: 220–242.
- Kumar BM., Kim YW. Processing of polysiloxane-derived porous ceramics: A review, Science and Technology of Advanced Materials, 2010; 11: 044303.

- Kumru C. Farklı hammadde ve tekniklerle seramik rulo/köpük filtre üretimi ve karakterizasyonu. Afyon Kocatepe Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, sayfa no: 1, Afyon, Türkiye, 2019.
- Montanaro L., Jorand Y., Fantozzi G., Negro A. Ceramic foams by powder processing. *Journal of European Ceramic Society* 1998; 18: 1339-1350.
- Olson RA., Martins LCB. Cellular ceramics in metal filtration. *Advanced Engineering Materials* 2005; 7: 187-192.
- Özey N. Gözenekli müllit seramiklerin üretimi ve karakterizasyonu. Bursa Teknik Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, sayfa no:15,21, 23, Bursa, Türkiye, 2018.
- Peng HX., Fan Z., Evans JRG. Factors affecting the microstructure of a fine ceramic foam. *Ceramics International* 2000; 26: 887-895.
- Scheffler M., Colombo P. Cellular ceramics. *Structure, Manufacturing. Properties and Applications* 2005; 670.
- Studart AR., Gonzenbach UT., Tervoort E., Gauckler LJ., Processing routes to macroporous ceramics: A review. *Journal of the American Ceramic Society* 2006; 89: 1771-1789.
- Şahin A. Uçucu kül katkılı camsı köpük malzemelerin üretim imkânlarının araştırılması. Sakarya Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, sayfa no:27-36, Sakarya, Türkiye, 2010.
- Tarhan ŞB. Karbotermal indirgeme nitrürleme yöntemi ile dizel partikül filtre (DPF) üretimine yönelik Si_3N_4 esaslı malzeme geliştirilmesi. Anadolu Üniversitesi, Doktora Tezi, sayfa no:8, Eskişehir, Türkiye, 2015.
- Tuncay T., Özyürek D. Al-Si-Mg döküm alaşımlarında filtrasyonun mekanik özelliklere ve mikroyapıya etkisi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi* 2014; 29(2): 271-279.
- Voigt C., Schramm A., Nel BF., Schmid E., Malczyk P., Lkova JH., Stelter M., Charitos A., Aneziris CG. Preparation of ceramic foam filters with a Lithium-containing surface. *Metallurgical and Materials Transactions B: Process Metallurgy and Materials Processing Science* 2022; 53(4): 2349-2363.
- Yılmaz E., Çalışkan F. Farklı bağlayıcı ve sinterleme katkılarının SiC seramik prefom mikroyapısı üzerine etkisi. 7th International Symposium on Innovative Technologies in Engineering and Science 22-24 November 2019 (ISITES2019 Sanliurfa - Turkey). doi:10.33793/acperpro.02.03.145.
- Yorulmaz A. Direkt soğutmalı döküm yönteminde sıvı metal kalitesi ve döküm şartlarının nihai ürün kalitesine etkisi. İstanbul Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, sayfa no: 35, İstanbul, Türkiye, 2016.