



**VERMİKÜLİT KATKISININ VİTRİFİYE SERAMİK
ÖZELLİKLERİNE ETKİLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İsa UÇAR

Danışman

Doç. Dr. Süleyman AKPINAR

MALZEME BİLİMİ VE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Temmuz 2024

Bu tez çalışması 21.FEN.BİL.19 numaralı proje ile AKÜ-BAPK tarafından desteklenmiştir.

AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

VERMİKÜLİT KATKISININ VİTRİFİYE SERAMİK
ÖZELLİKLERİNE ETKİLERİNİN ARAŞTIRILMASI

İsa UÇAR

Danışman

Doç. Dr. Süleyman AKPINAR

MALZEME BİLİMİ VE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Temmuz 2024

TEZ ONAY SAYFASI

İsa UÇAR tarafından hazırlanan “Vermikülit Katkısının Vitrikiye Seramik Özelliklerine Etkilerinin Araştırılması” adlı tez çalışması lisansüstü eğitim ve öğretim yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca 31/ 07/ 2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından **oy birliği** ile Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman : Doç. Dr. Süleyman AKPINAR

Başkan : Prof. Dr. Atilla EVCİN
Afyon Kocatepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi

Üye : Doç. Dr. Süleyman AKPINAR
Afyon Kocatepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi

Üye : Doç. Dr. Tuna Aydın
Kırıkkale Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi

Afyon Kocatepe Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun
...../...../..... tarih ve
..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

.....
Prof. Dr. Bekir YALÇIN
Enstitü Müdürü

BİLİMSEL ETİK BİLDİRİM SAYFASI
Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- Atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- Ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

31 / 07/2024

İsa UÇAR

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

VERMİKÜLİT KATKISININ VİTRİFİYE SERAMİK ÖZELLİKLERİNE ETKİLERİNİN ARAŞTIRILMASI

İsa UÇAR

Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Süleyman AKPINAR

Bu çalışma, vitrifiye seramik üretiminde yerel bir hammadde olan vermikülitin kullanımıyla enerji tasarrufu sağlama ve ürün özelliklerini iyileştirme amaçlarını taşımaktadır. Araştırmada, farklı oranlarda (% 0, 5, 10) vermikülit katkısı içeren vitrifiye örnekler hazırlanmış ve bu örneklerin fiziksel ve mekanik özellikleri incelenmiştir. Katkı olarak kullanılacak olan vermikülit hammaddesi önce $>1250\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de ergitilmiş, hızla soğutularak fritleştirme sonrasında vitrifiye massesindeki diğer hammaddeler ile eş boyutta olması için bilyalı değirmende 100 mikron altına öğütülmüştür. Sonrasında ticari vitrifiye massesi ile homojen bir şekilde karıştırılmış ve alçı kalıplara dökülerek etüv içerisinde kurutma işlemine tabii tutulmuştur. Kurutulan numuneler daha sonra $1210\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de 1 saat pişirilmiştir.

Pişmiş numuneler, fiziksel ve mekanik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla çeşitli testlere tabi tutulmuştur. Hazırlanan numunelerin pişme küçülmeleri, su emme, üç nokta eğme mukavemeti ve renk indisi ölçümleri yapılmıştır. Analizler sonucunda, vermikülit katkısının vitrifiye seramiklerin fiziksel ve mekanik özellikleri üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir.

2024, ix + 39 sayfa

Anahtar Kelimeler: Vermikülit, Vitrifiye seramik, Pişirme, Eğme mukavemeti.

ABSTRACT

M.Sc. Thesis

INVESTIGATION OF THE EFFECTS OF VERMICULITE ON THE PROPERTIES OF SANITARYWARE

İsa UÇAR

Afyon Kocatepe University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Materials Science and Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. Süleyman AKPINAR

This study aims to save energy and improve product properties by using vermiculite, a local raw material, in vitrified ceramic production. In the study, ceramic samples containing different proportions (0, 5, 10 wt.%) of vermiculite additives were prepared and their physical and mechanical properties were investigated. The vermiculite to be used as an additive was first melted at $>1250\text{ }^{\circ}\text{C}$, cooled rapidly and then ground below 100 microns in a ball mill to be of the same size as the other raw materials in the vitrified mass. It was then homogeneously mixed with commercial vitrified mass and poured into plaster molds and dried in an oven. The dried samples were then baked at $1210\text{ }^{\circ}\text{C}$ for 1 hour.

After the firing process was completed, the samples were subjected to various tests to determine their physical and mechanical properties. Firing shrinkage, water absorption, bending strength and color analysis of the prepared samples were performed. As a result of the analysis, the effects of vermiculite additive on the physical and mechanical properties of vitrified ceramics were evaluated.

2024, ix + 39 pages

Keywords: Vermiculite, Vitrified ceramic, Firing, Bending strength.

TEŞEKKÜR

Bu araştırmanın konusu, deneysel çalışmaların yönlendirilmesi, sonuçların değerlendirilmesi ve yazımı aşamasında yapmış olduğu büyük katkılarından dolayı tez danışmanım Sayın Doç. Dr. Süleyman AKPINAR, araştırma ve yazım süresince yardımlarını esirgemeyen her konuda öneri ve eleştirileriyle yardımlarını gördüğüm hocalarıma ve arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Bu araştırma boyunca maddi ve manevi desteklerinden dolayı aileme teşekkür ederim.

İsa UÇAR
Afyonkarahisar 2024

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	Sayfa
ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER DİZİNİ.....	iv
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	viii
RESİMLER DİZİNİ	ix
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR BİLGİLERİ	3
2.1 Vitrifiye Seramikler	3
2.2 Türkiye Vitrifiye Seramik Seramik Sektörü	3
2.3 Vitrifiye Seramik Üretim Süreçleri.....	4
2.3.1 Masse Hazırlama	6
2.3.2 Döküm Prosesi	7
2.3.3 Kurutma Prosesi	8
2.3.4 Pişirme Prosesi	8
2.4 Vitrifiye Seramikler Üzerine Literatür Taraması.....	11
2.4.1 Hammadde Tane Boyutu Küçültmesine Yönelik Çalışmaların Özeti	11
2.4.2 Alkali Oranlarının Değiştirilmesine Yönelik Çalışmaların Özeti	11
2.4.3 Alternatif Ergitici Kullanımına Yönelik Çalışmaların Özeti	12
2.5 Vermikülit.....	14
2.5.1 Vermikülitin Mineralojik Yapısı.....	16
2.5.2 Vermikülitin Endüstriyel Kullanım Alanları	16
2.5.3 Vermikülit Üzerine Literatür Taraması.....	17
3. MATERYAL ve METOT	20
3.1 Hammadde Hazırlama	20
3.2 Reçete Oluşturma.....	21
3.3 Süspansiyon Hazırlama.....	21
3.3 Döküm ve Pişirme	22
3.4 Karakterizasyon	22
3.4.1 Kuru ve Pişme Küçülmesi Ölçümü.....	22

3.4.2 Su Emme Tayini.....	23
3.4.3 Üç Nokta Eğme Mukavemet Ölçümü	23
3.4.4 Renk İndeksi Ölçümü.....	24
4. BULGULAR	25
4.1 Kuru ve Pişme Küçülmesi Sonuçları	25
4.2 Su Emme Tayini Sonuçları	26
4.3 Üç Nokta Eğme Mukavemet Ölçüm Sonuçları	27
4.4 Renk İndeksi Ölçüm Sonuçları	28
5. TARTIŞMA ve SONUÇ	30
6. KAYNAKLAR.....	32



SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

%	Yüzde
°C	Santigrat derece
CaO	Kalsiyum oksit
MgO	Magnezyum oksit
Na ₂ O	Sodyum oksit
K ₂ O	Potasyum oksit
SiO ₂	Silisyum dioksit
Al ₂ O ₃	Alüminyum dioksit
Li ₂ O	Lityum oksit
TiO ₂	Titanyum dioksit
MgCO ₃	Magnezyum karbonat
CaCO ₃	Kalsiyum karbonat
Mg	Magnezyum
cm ³	Santimetreküp
gr	Gram
N	Newton
kN	Kilonewton
L	Litre
g/L	Gram/litre
mm	Milimetre
MPa	Megapaskal

Kısaltmalar

2D	İki Boyutlu
3D	Üç Boyutlu
T-O-T	Tetrahedral-Oktahedral-Tetrahedral

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 2.1 Vitrifiye seramik üretim akım şeması	5
Şekil 2.2 Vitfiriye seramiklerin pişirim eğrisi	9
Şekil 2.3 Vitfiriye seramik bünyelerin genel mikroyapısı	10
Şekil 3.1 Renk ölçüm değerlerinin anlamsal dağılımı	24
Şekil 4.1 Kuru küçülme sonuçları	25
Şekil 4.2 Pişme küçülmesi sonuçları	25
Şekil 4.3 Su emme tayini sonuçları	26
Şekil 4.4 Ham mukavemet ölçüm sonuçları	27
Şekil 4.5 Pişme mukavemeti ölçüm sonuçları	28

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 3.1 Vitrikiye massesinin reçetesi	21
Çizelge 4.1 Renk indeksi ölçüm sonuçları	29



RESİMLER DİZİNİ

	Sayfa
Resim 3.1 Vermikülit katkısının neden olduğu deformasyon görüntüleri.....	20
Resim 3.2 Vermikülitin ergitme işlemi sonrası katkı olarak hazırlanma süreci	21
Resim 3.3 Vermikülit katkılı pişmiş vitrifiye örnekleri	22
Resim 3.4 X-Rite marka spektrofotometre	24



1. GİRİŞ

Seramik sektörü, yoğun enerji kullanımı gerektiren bir sektördür ve üretim maliyetlerinin yaklaşık % 20'si enerji giderlerinden oluşmaktadır. Bu bağlamda, seramik sektöründe rekabet gücünü artırmak amacıyla enerji maliyetlerini düşürmek ve enerji verimliliğini artırmak büyük önem taşımaktadır. Enerji verimliliğini artırmak ve maliyetleri azaltmak için çeşitli stratejiler geliştirilmiştir, ancak bu stratejilerin uygulanması genellikle maliyetli ve zaman alıcıdır.

Seramik ürünlerin üretim sürecinde, pişirim işlemi ürünlerin nihai teknik özelliklerini belirleyen kritik bir adımdır. Pişirim sıcaklıklarının düşürülmesi, enerji tüketimini azaltarak maliyet tasarrufu sağlayabilir. Ancak, bu sürecin etkin bir şekilde yönetilmesi, kullanılan hammaddelerin kimyasal ve mineralojik bileşimine bağlıdır. Seramik hammaddelerinin sinterlenmesi için gerekli olan enerji, pişirim sıcaklığı ile doğrudan ilişkilidir. Bu nedenle, pişirim sıcaklıklarının düşürülmesi için ergitici (flux) özellikteki katkı maddelerinin kullanılması yaygın bir uygulamadır.

Bu çalışmada, Sivas Yıldızeli yöresinden temin edilen yerel vermikülit hammaddesinin vitrifiye seramik üretiminde ergitici katkı maddesi olarak kullanılması ve pişirim sıcaklıklarının azaltılmasındaki etkileri araştırılmıştır. Vermikülit, içeriğinde bulundurduğu alkali ve toprak alkali oksitler dolayısıyla ergitici özelliklere sahiptir ve bu özellikleri sayesinde seramiklerin pişirim sıcaklıklarını düşürme potansiyeline sahiptir. Araştırmanın amacı, vitrifiye seramiklerin teknik özelliklerinden ödün vermeden en uygun vermikülit katkı oranını belirlemektir.

Bu çalışmanın önemi, enerji tüketiminde verimlilik sağlamanın yanı sıra, yerel hammaddelerin değerlendirilmesi ve ekonomik olarak kazanç sağlanması açısından da büyük bir değere sahiptir. Vermikülitin seramik sektöründe kullanımı, enerji maliyetlerinin azaltılmasına ve ürünlerin rekabet gücünün artırılmasına katkı sağlayacaktır. Ayrıca, bu çalışmanın sonuçları, seramik sektöründeki diğer araştırmalar ve uygulamalar için de yol gösterici olacaktır.

Bu çalışma kapsamında, farklı oranlarda (% 0, 5, 10) vermikülit katkısı ile üretilen vitrifiye seramik numuneleri üzerinde yapılan analizler ve testler ile pişirim davranışı ve teknik özellikler incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar literatür temelinde tartışılmış ve yorumlanmıştır. Bu sayede, seramik sektöründe enerji maliyetlerinin düşürülmesine yönelik önemli bir katkı sağlanması hedeflenmiştir.



2. LİTERATÜR BİLGİLERİ

2.1 Vitrifiye Seramikler

Vitrifiye seramikler, inorganik hammaddelerin uygun oranlarda karıştırılarak akışkan bir süspansiyon haline getirilmesi, alçı ve/veya sentetik reçine kalıplarda şekillendirilmesi ve 1200-1250 °C sıcaklıklarda pişirilmesi sonucunda su emme değeri %0,5'in altında olan beyaz veya renkli sırlarla kaplanmış ürünlerdir (Sarı 2012). Düşük su emme, sızdırmazlık, kir tutmama, kolay temizlenebilme, görünüm açısından istenilen kalitenin elde edilmesi, suya, kimyasallara ve ısıya karşı dayanıklı olmasının yanı sıra uzun ömürlü bir malzeme olması vitrifiye seramiklerden beklenen temel özelliklerdir. Lavabo, ayak, klozet, rezervuar, bide, tuvalet taşı, pisuvar ve duş teknesi beyaz ve renkli olarak ürün yelpazesinin ana ürünleridir (Atılğan 2006).

Vitrifiye seramikler, inşaat sektöründeki gelişmelere bağlı olarak her geçen gün daha da önem kazanmaktadır. Yaşam alanlarında nemin en yüksek olduğu banyo ve tuvaletlerde kullanılan ve atıklarla temas halinde olan vitrifiye ürünlerin insan sağlığı açısından hijyenik özelliklere sahip olması gerekmektedir. Hijyenik özelliklerinin yanı sıra insan vücudu ağırlığına maruz kalan bu ürünlerin mukavemet değerlerinin de yüksek olması istenen bir diğer önemli özelliktir. Gerekli olan hijyen ve mukavemet özelliklerini bir arada sağlayabilmek için vitrifiye seramikler sert ve gözeneksiz bir yapıda üretilmektedir. Bu tür ürünlerin nihai mikroyapısı ağırlıkça %50-70 oranında camsı faz içermektedir (Tunçel 2012).

2.2 Türkiye Vitrifiye Seramik Seramik Sektörü

Vitrifiye seramik sektörü istihdam ve döviz girdisi sağlayarak, ülkemiz ekonomisinde etkin ve önemli bir yeri olan sanayi dalıdır. Türkiye vitrifiye seramik sektörü 1980'li yılların başından itibaren üretim, iç talep, ihracat ve kapasite açısından hızlı bir büyüme yaşamıştır. Süreç içinde üretim modernizasyon yatırımları ve kapasitesi artışı ile birlikte Türkiye vitrifiye seramik sektörü dünya standardını yakalamış, dünyada ve Avrupa'da önemli bir oyuncu haline gelmiştir (Tunçel 2012).

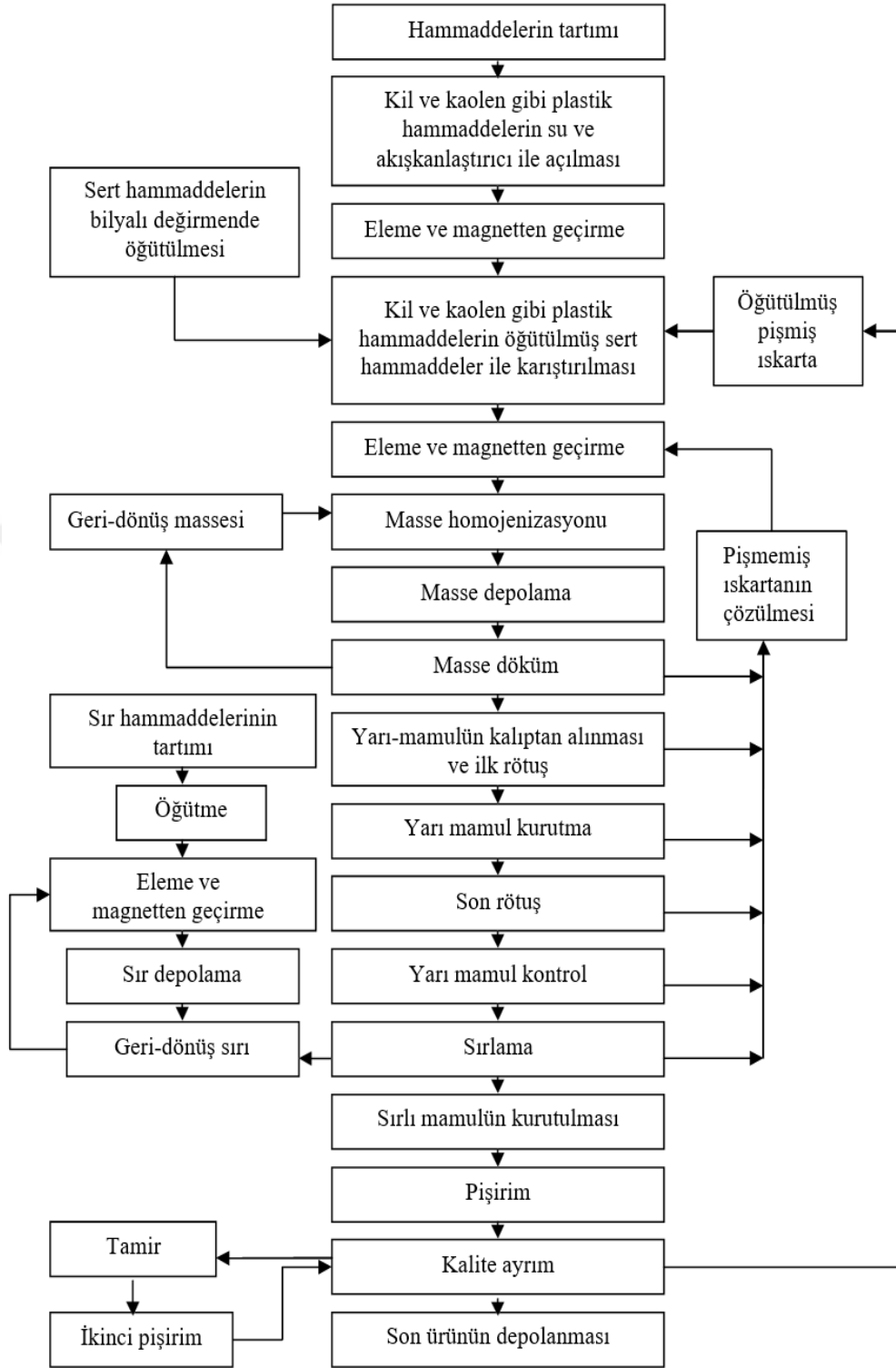
Türkiye, vitrifiye seramik sektöründe Avrupa'nın en büyük üreticisi konumundadır. Ülkemiz, yıllık yaklaşık 22 milyon adetlik üretimi ile bu alanda Avrupa'nın zirvesindedir ve 8 milyon adetlik ihracatıyla da vitrifiye seramik ihracatında Avrupa'da ilk sıradadır. Türkiye, dünya vitrifiye seramik üretiminin % 10'una yakınına karşılamaktadır. Sektörde, büyük ölçekli 9 şirket ve 1980'lerin sonlarından itibaren faaliyete geçen orta ve küçük ölçekli yaklaşık 30 şirket bulunmaktadır. Bu geniş üretim ve ihracat kapasitesi, Türkiye'yi vitrifiye seramik sektöründe geleneksel ve rekabetçi bir oyuncu haline getirmiştir. 2014-2017 yılları arasında Türkiye'deki vitrifiye seramik üretimi kademeli bir artış göstermiştir. Ancak, 2018 yılında üretim % 0,6 oranında gerilemiş ve 350 bin ton olarak gerçekleşmiştir. 2019 yılında ise üretimde % 7,8'lik bir daralma yaşanmış ve kapasite 322.700 tona inmiştir. Bu üretim trendleri, iç tüketimi de etkilemiştir. 2014-2017 yılları arasında iç tüketim artış göstermişken, 2018 ve 2019 yıllarında üretim trendindeki değişim iç tüketimde de belirgin bir gerilemeye neden olmuştur. Özellikle 2019 yılında iç tüketim %19,5 oranında azalarak 159.255 tona düşmüştür (Karataş 2023).

2.3 Vitrifiye Seramik Üretim Süreçleri

Vitrifiye seramiklerin üretim süreci, hammadde hazırlamadan nihai ürüne ulaşana kadar pek çok aşamayı içerir ve oldukça kapsamlı bir süreçtir. Bu süreç temel olarak birkaç ana aşamadan oluşur: masse, sır ve kalıp hazırlama, şekillendirme, kurutma, sırlama ve pişirme (Özdemir 2005). Şekil 2.1'de, vitrifiye seramik ürünlerinin üretim akış şeması ara basamaklarıyla birlikte gösterilmiştir.

Vitrifiye seramikler, döküm yöntemi ile üretilir (Singer 1963). Üretim sürecinin ilk adımı, masse ve döküm kalıbının hazırlanmasıdır. Masse hazırlığında, gerekli hammaddeler ve yardımcı katkıları su ile karıştırılarak değirmende öğütülür. Bu aşama, seramik üretiminin önemli aşaması olup ve kalitenin belirlenmesinde kritik rol oynar.

Özsüz hammaddeler değirmenlerde öğütülürken, özlü hammaddeler karıştırıcılarda açıldıktan sonra bu hammaddeler birleştirilir ve nihai karışım viskozite ve tiksotropi değerleri optimize edilerek şekillendirme işlemi için dökümhanelere aktarılır.



Şekil 2.1 Vitriye seramik üretim akım şeması (Fortuna 2000).

Üretilcek ürünlerin 2D tasarımlarından 3D modelleri oluşturulur. Bu modeller üzerinden, ürünlerin üretilebileceği kalıplar yapılır. Kalıba döküm testi uygulanarak deneme ürünü üretilir. Deneme ürünü pişirilerek boyutsal ve işlevsel olarak

değerlendirilir. Gerekli durumlarda kalıp tamir edilir veya onaylanan ürünün prototip kalıbı, teksir kalıbının hazırlanması için kalıp hazırlama departmanına yönlendirilir ve iş kalıpları hazırlanır. Klasik dökümde alçı kalıplar kullanılırken, basınçlı dökümde polimer menşeli kalıplar tercih edilir. Klasik dökümde alçı kalıpların porozitesi, kapiler etkiler yaratır ve bu etkiler ham mamulün elde edilmesinde kullanılırken, basınçlı sistemde polimerik kalıplara dışarıdan basınç uygulanarak ham mamul elde edilir. İstenilen tabaka kalınlığına ulaşılan ham mamüller kalıptan alınır, fazlalıkları kesilir ve yüzey rötuşlama işlemleri yapılır. Şekillendirilen ürünlerdeki nem, kontrollü kurutma ile bünyeden uzaklaştırılır. Bu işlem için kalıptan çıkarılan ham mamul, 33-36 °C sıcaklıkta ve %40-60 bağıl nemde, ürünün karmaşıklık derecesine göre en az bir gün bekletilir. %15-17 nem seviyesine ulaşan ham mamuller, 80-100 °C sıcaklıkta kurutma fırınlarında 10-13 saat kurutulur (Fortuna 2000). Kurutulmuş mamuller, statik sırlama, robotik sırlama veya pistole ile sırlama gibi çeşitli tekniklerle sırlanır. Sırlama tekniği, ürünün şekline ve geometrisine bağlı olarak belirlenir. Ham mamuller sırlanıp kurutulduktan sonra, endüstriyel fırınlarda yaklaşık 1200-1250 °C sıcaklıklarda pişirilir. Pişirim sonrası ürünler kalite kontrolünden geçirilir ve uygun olanlar depoya alınır. Hatalı ürünler ise soğuk veya sıcak tamir işlemlerine tabi tutulur. Sıcak tamir uygulanan ürünler, ikinci pişirime gönderilirken, tamir edilemeyen ürünler ıskarta olarak geri dönüşüme gönderilir (Daday 2012).

2.3.1 Masse Hazırlama

Vitrifiye seramiklerin üretiminde kullanılan hammaddeler iki ana gruba ayrılır: özlü hammaddeler (kil ve kaolen) ve özsüz hammaddeler (kuvars ve feldspat). Vitrifiye seramiklerin bileşimi genellikle %20-25 kil, %25-30 kaolen, %30-35 feldspat ve %15-20 kuvarstan oluşur (Kingery 1976). Bu hammaddelere katkı olarak, sinterleme süreçlerinde frit, kalsit ve dolomit gibi ergitici özelliği iyi bileşenler de kullanılabilir (Cowan 1950, Garciaten 2000, Das 2003, Mukhopadhyay 2006, Lin 2009, Oberzan 2009). Bu maddelerin miktarları, elde edilecek seramiğin özelliklerine ve hammaddelerin kimyasal içeriklerine göre değişir.

Seramik üretiminde, hammaddeler önce "masse" adı verilen karışımlara dönüştürülür. Masse hazırlama işlemi, genellikle öğütme ile başlar. Öğütme, tane boyutunu küçültme

işlemidir ve bu işlem sırasında tanelerin yüzey alanı artar. Bu sayede kurutma ve pişirme aşamalarında daha etkili sonuçlar elde edilir. Ayrıca, öğütme, farklı bileşenlerin homojen bir şekilde karışmasını sağlar ve nihai ürünün kalitesini artırır (Fortuna 2000, Vari 2002, Sarı 2012).

Öğütme işlemi, bilyalı değirmenlerde yapılır. Vitrifiye seramiklerin yapısında bulunan kil, kuvars ve feldspat gibi inorganik hammaddelerden sadece kuvars ve feldspat öğütme işlemine tabi tutulur. Kil ve kaolenler, özlü hammaddeler olduklarından, tane boyutları özsüz hammaddelerden daha küçüktür (Sarı 2012). Öğütme işleminde, genellikle yaş öğütme tercih edilir ki, bu sayede massenin hem tane boyutu küçültülür hem de homojenliğini arttırılır. Ancak, ham mamullerin kalıptan çıkarılması ve kurutma aşamaları için, massedeki su içeriğinin mümkün olduğunca düşük tutulması istenir. Su içeriği genellikle %25-30 seviyelerine düşürülür ve bu çok düşük miktarda deflokulant eklenerek sağlanır (Rado 1988). Öğütme işlemi tamamlandıktan sonra, elde edilen massenin litre ağırlığı, sıcaklığı, viskozitesi, tiksotropisi ve kalınlık alma süresi kontrol edilir ve döküme hazır hale getirilir (Sarı 2012).

2.3.2 Döküm Prosesi

Vitrifiye seramikler, genellikle büyük ve kompleks şekillere sahip, içi boş ürünlerdir. Bu tür ürünlerin şekilleri karmaşık olabilir; cidarları ince ve bazı bölgeleri boşluklu olabilir. Bu özellikler, diğer şekillendirme yöntemleriyle üretimlerini zorlaştırabilir. Bu nedenle, döküm yöntemi tercih edilir (Sarı 2012).

Döküm yöntemi, akıcı kıvamdaki döküm çamurunun genellikle alçıdan yapılmış tek veya çok parçalı kalıplara dökülmesiyle gerçekleştirilen bir şekillendirme tekniğidir. Döküm çamuru nihai ürünün şekline uygun alçı veya plastik kalıplara dökülür ya da pompalanır (Tunçel 2012). Eğer çamur, boş döküm için kullanılıyorsa, istenilen kalınlığa ulaşıldığında çamur kalıptan boşaltılır. Masif döküm yapılacaksa, çamur kalıp duvarındaki döküm sertleşene kadar kalıpta bekletilir (Dinger ve Funk 1994).

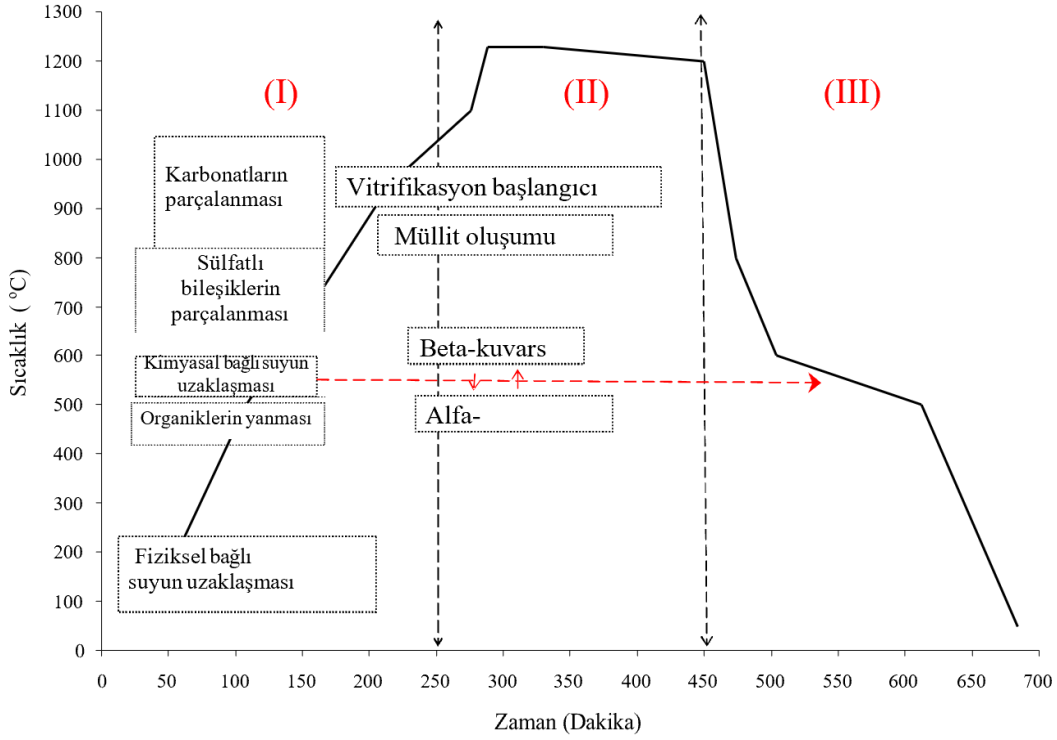
2.3.3 Kurutma Prosesi

Seramik üretiminde kurutma, kritik bir aşamadır. Döküm işlemi sonrası ham mamuller genellikle %15 oranında su içerir ve bu suyun tamamen giderilmesi gerekmektedir. Kurutma süreci, pişirim sırasında ürünün çatlamasını önlemek için de önemlidir. Kurutmanın başarısı, sıcaklık, nem oranı ve ürün kalınlığı gibi faktörlere bağlıdır (Ricciardiello 2005).

Döküm yoluyla şekillendirilen ham mamullerde, kurutma işlemi şekillendirme sonrası nemin kontrol altında tutulmasıyla yapılır. Kalıptan çıkarılan ham mamuller, 33-36 °C sıcaklık ve %40-60 bağıl nem oranına sahip bir ortamda bir gün bekletilir. Ardından, % 10-15 nem içeren ham ürünler, yaklaşık 100 °C sıcaklığa sahip kurutma fırınlarında 10-13 saat kurutulur. Bu süreçte, yüzeydeki ısı konveksiyon yoluyla, iç kısımlarda ise temas yoluyla yayılır. Isı iletim hızı, kurutucudaki hava sıcaklığı ve akış hızına göre ayarlanır. Kurutma işleminin etkinliği, suyun kapiler kanallardaki difüzyonu ve buharlaşma hızlarına bağlıdır. Difüzyon hızı; ürünün sıcaklığı, mineralojik içeriği, tane boyutu ve şekli ile kurutma havası ve kurutulan mamul arasındaki nem farkına bağlı olarak değişir. Buharlaşma hızı ise hava sıcaklığı, akış hızı, ürünün yüzey alanı, havanın su emme kapasitesi ve ürünlerdeki difüzyon hızına bağlı olarak farklılık gösterir (Reed 1995, Sarı 2012).

2.3.4 Pişirme Prosesi

Vitrifiye seramik bünyeleri, birçok bileşenden oluştuğu için sinterleme aşaması karmaşık bir süreçtir. Hammaddelerin eş zamanlı olarak çözünmesi ve birbirleriyle reaksiyona girmesi, cam ve kristal fazların oluşmasına neden olur ve bu da sistemin yoğunlaşmasını sağlar (Reed 1995). Nihai özellikler mikroyapı tarafından belirlenir ve mikroyapı da üretim süreçleri tarafından kontrol edilir. Sinterleme, pişirim aşamasının sonuncusu olarak bu süreçlerin kontrol mekanizmasını oluşturur (Sarı, 2012). Vitrifiye seramik ürünlerin pişirim sürecinde meydana gelen reaksiyonları gösteren pişirim eğrisi grafiği Şekil 2.2’de sunulmuştur.



Şekil 2.2 Vitriye seramiklerin pişirim eğrisi (Remmey 1997).

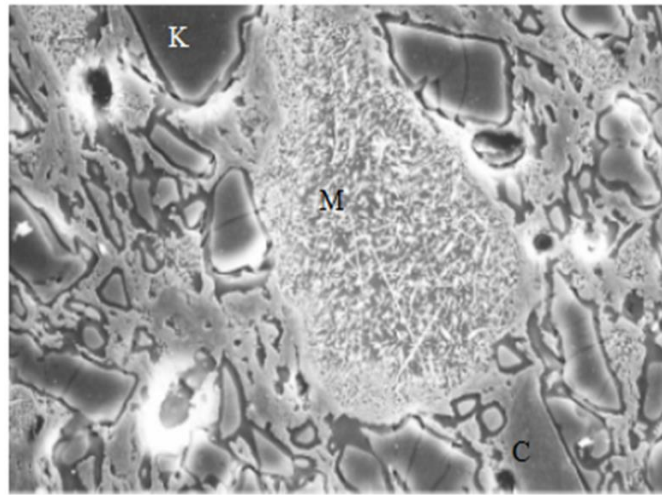
Pişirim sürecinde gerçekleşen reaksiyonlar, kimyasal difüzyon ve viskoz akışla kontrol edilir. Özellikle yüksek silikat içeriğine sahip seramiklerde, viskoz sinterleme adı verilen bir süreç görülür. Bu süreçte, vitrifikasyon olarak bilinen olay meydana gelir; burada viskoz haldeki camsı faz, malzemedeki gözenekler arasında hareket ederek yoğunlaşmayı sağlar. Aynı zamanda, yüksek ergime noktasına sahip diğer bileşenlerle de tepkimeye girer. Viskoz sinterleme davranışında, silikat bileşenleri içindeki alkali ve toprak alkali oksitler önemli rol oynar (Sarı 2012).

Vitrifikasyon, çoğu silikat sistemi için temel pişirim prosesidir. Bu süreçte, pişirim sıcaklığında viskoz bir sıvı faz oluşur ve bu faz, bünye için bağlayıcı bir rol üstlenir. İyi bir pişirim işlemi için sıvı fazın miktarı ve viskozitesi, yoğunlaşma süresinin doğru ayarlanmasını gerektirir. Bu sürede, yer çekiminin etkisiyle çökme veya deformasyon gibi sorunlar yaşanmamalıdır. Sinterlemenin iki evresi, yani küçülme ve deformasyon, uygun sıcaklık ve kompozisyonlarla birbirine bağlı olarak yönetilmelidir (Kingery 1976).

Sinterleme, üç aşamadan oluşur: başlangıç, ara ve son evre. Başlangıç evresinde, taneler

arasında hızlı bir boyun büyümesi gerçekleşir. Bu boyun büyümesi, difüzyon, buhar transferi, plastik akış veya viskoz akış yoluyla oluşur. İlk aşamada, yüzey eğrilikleri azalır ve yoğunlaşma ile boyun büyümesi eş zamanlı ilerler; bu aşamada genellikle % 3-5 oranında bir yoğunluk artışı gözlemlenir. Ara evrede, porlar yüzey ve ara yüzey gerilimleri nedeniyle denge şekillerine ulaşır. Bu evrede, porlar yapı içinde sürekliliğini korur ve porların kesit alanları azalacak şekilde yoğunlaşma meydana gelir. Son evrede, porlar kararsız hale gelir ve kapalı izole porlar oluşturur. Ara evre sinterlemenin en uzun bölümü olup, yoğunlaşmanın büyük kısmı bu aşamada gerçekleşir. Son evrede, tane sınırlarında kapalı porlar oluşur ve bu porlar sürekli küçülür (Rahaman 2003).

Pişirim sürecinde oluşan müllit ve kuvars gibi kristal fazlar, camsı faz ile birlikte seramiğin nihai mikroyapısını (Şekil 2.3) oluşturur (Iqbal ve Lee 2000). Saf kil ve kaolenden oluşan birincil müllitler ile feldspat içeren kil bölgelerinde veya kil-feldspat-kuvars karışımlarında oluşan iğnemsî müllit kristalleri, seramiklerin mukavemetini etkiler. Kuvarsın kaynağı doğrudan kuvars olabilir veya kil ve kaolen safsızlıkları yoluyla bünyeye dahil olabilir (Lee vd. 2001). Kuvarsın pişirim sürecindeki dönüşüm reaksiyonları, camsı fazın viskozitesini ve miktarını etkiler, bu da sinterleme hızını belirler (Kingery vd. 1976). Bu parametrelerin belirlenmesi, pişmiş bünyedeki camsı faz bileşiminin analiziyle mümkündür (Carty ve Pinto 2002). Hem camsı fazın miktarı ve kompozisyonu hem de kristal fazların niceliği, son ürünün teknik özelliklerini belirler.



Şekil 2.3 Vitriye seramik bünyelerin genel mikroyapısı, K (kuvars), M (müllit), C (camsı faz) (Iqbal ve Lee, 2000).

2.4 Vitrifiye Seramikler Üzerine Literatür Taraması

Vitrifiye seramikler üzerinde ürün özelliklerini geliştirirken üretim maliyetlerini azaltmaya yönelik olarak uzun yıllardır çeşitli çalışmalar yapılmaktadır. Literatür taramalarına göre, vitrifiye seramik ürünlerin pişirim sıcaklıklarını düşürmeye yönelik yaklaşımlar arasında plastik olmayan hammaddelerin tane boyutunun küçültülmesi, alkali oranının değiştirilmesi ve alternatif ergitici maddelerin kullanılması yer almaktadır. Bu yaklaşımlar hem üretim maliyetlerini azaltmayı hem de nihai ürün kalitesini artırmayı hedeflemektedir. Özellikle enerji maliyetlerinin yüksek olduğu günümüzde, pişirim sıcaklıklarını düşürmek enerji verimliliği açısından büyük bir önem taşımaktadır.

2.4.1 Hammadde Tane Boyutu Küçültmesine Yönelik Çalışmaların Özeti

Richerson (1992), Reed (1995), German (1996) ve Villegas vd. (1996) araştırmalarında, hammadde karışımının tane boyutu ve dağılımının sinterlenebilirlik üzerinde belirgin bir etkisi olduğunu ortaya koymuşlardır. İnce tanelerin yüksek enerjiye sahip olduklarını ve bu nedenle sinterleme hızlarını artırdıklarını belirtmişlerdir. Kingery (1976) ve Sanchez vd. (2004) ise, feldspat tane boyutunun küçültülmesiyle yüzey alanının arttığını ve bu durumun sinterleme özelliklerini iyileştirerek camsı faz oranını artırdığını tespit etmişlerdir. Özel vd. (2011), farklı sürelerde öğütülen kuvars ve feldspat karışımlarıyla hazırlanan reçetelerin, 1210 °C'de %0,38 su emme değeri sağladığını göstermiştir. Tunçel (2012) ise, özgül hammadde tane boyutunun küçültülmesiyle sinterleme sıcaklığının 30 °C kadar düşürülebileceğini belirtmiştir.

2.4.2 Alkali Oranlarının Değiştirilmesine Yönelik Çalışmaların Özeti

Dağ (2009), sinterleme sıcaklığını azaltmak amacıyla toprak alkalileri (CaO ve MgO) kullanarak Na₂O/K₂O oranının optimum seviyede belirlenmesi gerektiğini göstermiştir. Çalışmasında, sinterleme sıcaklığının ve deformasyon oranının düşürülebilmesi için ince tane boyutlu hammaddeler kullanıldığında daha belirgin bir azalma elde edilmiştir. Nefelin siyenit, lityum ve talk ile hazırlanan reçeteye sinterlemeyi 1100 °C'de gerçekleştiren Dağ, bu sıcaklık düşüşünün %30'luk enerji tasarrufu sağladığını belirlemiştir.

Tayçu (2009) ise, kil oranını deęiřtirmeden sadece sodyum feldspat oranını artırarak sinterleme sıcaklıęını yaklaşık 20 °C dūřūrebilmiřtir. Sarı (2012), alıřmasında Na₂O/K₂O, Na₂O+K₂O, SiO₂/Al₂O₃, CaO/MgO ve SiO₂+Al₂O₃ parametrelerini inceleyerek daha dūřūk yumuřama sıcaklıkları ve viskozite deęerlerine sahip yeni camsı faz kompozisyonları geliřtirmiřtir. Parametre optimizasyonu ile standart camsı faz kompozisyonunun yumuřama sıcaklıęı 1242 °C'den 1150 °C'ye indirilmiřtir. Ayrıca, kimyasal kompozisyon ve tane boyutu çalıřmaları ile standart reçeteye göre 80-100 °C daha dūřūk sıcaklıklarda sinterlenebilen reçeteler geliřtirilmiřtir. Endūstriyel denemelerde ise 50 °C daha dūřūk sıcaklıkta piřirilebilen ūrūnler elde edilmiřtir. Sarı (2012) toprak alkali ilavesinin sinterleme sıcaklıęını dūřūrdūęūnū ve CaO/MgO oranının optimize edilmesi gerektięini belirtmiřtir; ūnkū oranın artıřı sinterleme sıcaklıęını tekrar yūkseltebilmektedir. Ayrıca, toplam alkali miktarı ve SiO₂+Al₂O₃ deęerleri ile optimum Na₂O/K₂O ve CaO/MgO oranlarının optimize edilmesiyle dūřūk yumuřama sıcaklıęı ve viskoziteye sahip camsı faz kompozisyonları oluřturulmuř ve sinterleme hızı artırılmıřtır. Geliřtirilen reçetelerle standart reçeteye göre yaklaşık 80 °C daha dūřūk sıcaklıkta sinterleme saęlanabilmiřtir.

Sokolar vd. (2017), sinterleme sıcaklıęını dūřūrmek amacıyla potasyum feldspat ve sodyum-potasyum feldspat ilaveleri yaparak reçete kompozisyonları oluřturmuřlardır. %20 potasyum feldspat katkılı būnyelerin 1285 °C'de, %40 potasyum feldspat katkılı būnyelerin ise 1250 °C'de sinterlendięi gözlemlenmiřtir. %20 sodyum-potasyum feldspat katkılı būnyeler 1315 °C'de, %40 sodyum-potasyum feldspat katkılı būnyeler ise 1285 °C'de sinterlenmiřtir.

Kunduracı vd. (2019) alıřmasında, potasyum feldspat oranını artırarak K₂O/Na₂O oranını deęiřtirmenin sinterleme sıcaklıkları ūzerindeki etkisini ve maliyet ūzerindeki sonuçları deęerlendirmiřtir. Sonuç olarak, potasyum feldspat ilavesi ile sinterleme sıcaklıkları 1232 °C'den 1200 °C'ye dūřūrūlebilmiřtir.

2.4.3 Alternatif Ergitici Kullanımına Yönelik çalışmaların zeti

Seramik ūretiminde feldspatlar, killerden sonra en önemli hammaddelerdir. Bu maddeler,

seramiklerin pişirim sürecinde önemli bir rol oynar çünkü ergitici özellikleri sayesinde sıvı faz oluşturur ve bu da reaksiyonların daha düşük sıcaklıklarda gerçekleşmesini sağlar. Sonuç olarak, pişirim sıcaklıkları düşürülür. Feldspatlar, seramiklerin bileşimlerinde değişik oranlarda kullanılır ve feldspatın türü ile miktarı, pişirme sırasında seramiklerin sinterlenme derecesini belirler. Feldspatların ergitici özellikleri, bünye bileşimi, silika içeriği, toplam alkali içeriği (Na_2O , K_2O , Li_2O gibi) ve oranları tarafından etkilenir. En yaygın olarak kullanılan feldspatlar sodyum feldspat ($\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2$) ve potasyum feldspattır ($\text{K}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2$). Potasyum feldspat, sodyum feldspata göre daha düşük ergiticiliğe sahiptir, ancak peritektik reaksiyonla ergidiği ve seramik bünyelerin vitrifikasyon aralığını genişlettiği için tercih edilmektedir (Villegas-Palacio ve Dinger 1996, Carty ve Senapati 1998).

Vitrifiye seramiklerde, sodyum ve potasyum feldspat yerine alternatif ergiticiler kullanılarak daha düşük sıcaklıklarda ve sürelerde pişirilebilen bünyeler geliştirilmiştir. Yapılan çalışmalarda, alkali (Li_2O , Na_2O , K_2O) ve toprak alkali oksitlerin (CaO , MgO) seramik bünyelerin pişirim sıcaklığı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Spodümen ($\text{Li}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2$), talk ($3\text{MgO} \cdot 4\text{SiO}_2$), manyezit (MgCO_3), dolomit ($\text{MgCO}_3 \cdot \text{CaCO}_3$) ve nefelinli siyanit ($\text{K}_2\text{O} \cdot 3\text{Na}_2\text{O} \cdot 4\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 9\text{SiO}_2$) gibi alternatif ergiticilerin $>\%5$ oranında kullanımıyla, teknik özellikleri olumsuz etkilemeden pişirim sıcaklığı düşürülmüştür (Mukhopadhyay vd. 2003, Mukhopadhyay vd. 2006, Tulyaganov vd. 2006).

Cowan vd. (1950) tarafından yapılan bir çalışmada, vitrifiye seramiklerde ergitici olarak spodümen kullanılmış ve bu bünyelerin, normal feldspat içeren bünyeler kadar kararlı olduğu ve daha düşük sıcaklıkta pişirilebildiği belirtilmiştir.

Lynch ve Allen (1950) ise nefelin siyanit-talk karışımını kullanarak, $\%85$ nefelin siyanit oranında $1080\text{ }^\circ\text{C}$ 'de pişirildiğinde su emmenin $\%0$ olduğunu ve diğer bileşimlere göre $60\text{ }^\circ\text{C}$ daha düşük sıcaklıkta pişirilebildiği vurgulamıştır.

Koenig (1939) tarafından yapılan çalışmada, $\%50$ nefelin siyanit $\%50$ talk karışımı ile $1140\text{ }^\circ\text{C}$ 'de pişirilen bünyelerin $\%0$ su emme değerine ulaştığı bildirilmiştir. Garciaten vd. (2000) çalışmasında, sodyum feldspat yerine $\%4$ spodümen kullanımıyla pişirme

sıcaklığında 50 °C düşüş ve maksimum pişirme sıcaklığındaki bekleme süresinde % 33 azalma gözlenmiştir. Mukhopadhyay vd. (2006) ise % 3 talk ilavesiyle pişirme sıcaklığında 50 °C azalma tespit etmiştir. Tulyaganov vd. (2006) %1-5 spodümen ilavesiyle pişirme sıcaklığında 100 °C düşüş sağladıklarını bildirmiştir. Kunduracı vd. (2015) çalışmasında ise, %40 nefelin siyenit ilavesiyle sinterleme sıcaklığının 1220 °C'den 1190 °C'ye düştüğü belirlenmiştir.

Aydın vd. (2018) çalışmasında, maksimum %30 nefelin siyenit ilavesiyle viskozitede azalma sağlanmış ve sinterleme sıcaklığında 13 °C'ye kadar düşüş gözlemlenmiştir. Esposito vd. (2005) ise potasyum feldspat yerine nefelinli siyenit kullanarak toplam alkali miktarını artırmış ve pişirme sıcaklığını düşürmüştür. Bunun yanı sıra sistemdeki kapalı gözenek miktarının azalması ile mukavemet artırılmıştır.

Başka bir çalışmada, vitrifiye bünyesinde geri dönüşüm camlarının ergitici olarak kullanımı ile sinterleme sıcaklığının 50 °C düşürüldüğü rapor edilmiştir. %8 nefelin siyenit ve %8 geri dönüşüm camı içeren bünyeler, %15 nefelin siyenit kullanılan bünyelere göre 50 °C daha düşük sıcaklıkta pişirilebilmiştir (Hancock 2005).

2.5 Vermikülit

Vermikülit, benzersiz özellikleri nedeniyle çok çeşitli uygulamalara sahip çok yönlü bir mineraldir. Değişen miktarlarda demir, magnezyum, potasyum ve alüminyum içeren hidratlı bir silikat mineralidir (Aguilar vd. 2021). Vermikülit, hafif agrega ve ısı yalıtımı uygulamaları için mükemmel bir malzeme haline getiren düşük yoğunluklu, ince ısı ve yalıtım özellikleri ile bilinir (Ngayakamo ve Park 2019). Isıtıldığında, vermikülit katmanları arasında ani su salınımı nedeniyle hacim olarak birçok kez genişleyebilir ve çeşitli endüstriyel kullanımlar için değerli hale getirir (Silva vd. 2021).

Vermikülitin önemli özelliklerinden biri ısıya maruz kaldığında hızla genişlemesidir (Syahril 2023). Bu genişleme, katmanlı bir dokuya ve yüksek gözenekliliğe sahip hafif, yanıcı olmayan bir malzemeyle sonuçlanır ve pul pul pullanmış vermiküliti inşaat ve kompozit malzemelerdeki uygulamalar için oldukça arzu edilir hale getirir (Gündülüs ve

Kalkan 2022, Muiambo vd. 2010). Düşük yoğunluklu, yüksek katyon değişim kapasitesi ve mükemmel adsorpsiyon yeteneği gibi doğal vermikülitin fiziksel ve kimyasal özellikleri, onu yapı malzemeleri, kimya endüstrisi için tercih edilen bir seçenek haline getirir (Rama vd. 2019).

Vermikülitin adsorpsiyon yetenekleri, yüzey özellikleri nedeniyle ağır metalleri adsorbe etmek için kullanılabileceğinden dikkat çekicidir. Çalışmalar, vermikülitin ağır metaller için etkili bir doğal emici olduğunu ve toprak iyileştirme ve su arıtımındaki uygulamalar için uygun olduğunu göstermiştir (Abollino vd. 2006). Ek olarak, vermikülit üreaz gibi enzimlerin immobilizasyonunda kullanılmıştır ve biyoproses uygulamalarında çok yönlülüğünü göstermektedir (Anita vd. 1997).

Yapı alanında vermikülit, düşük yığın yoğunluğu, yüksek refrakterliği, düşük ısı iletkenliği ve iyi kimyasal inertliği nedeniyle dolgu malzemesi olarak kullanılabilmektedir. Çimento bazlı ortamlarda bitki büyümesi için gerekli olan su emme kapasitelerini ve su/gübre tutma özelliklerini geliştirmek için çimentolu malzemelere dahil edilmiştir (Li vd. 2017).

Vermikülit kullanım alanı, fide büyümesi ve bitki yetiştiriciliği için bir alt tabaka olarak kullanıldığı tarıma kadar uzanmaktadır (Alves vd. 2017). Fidelerin ortaya çıkışını ve erken büyümesini arttırmadaki rolü, zirai uygulamalardaki önemini vurgulamaktadır. Ayrıca, vermikülit su bazlı sondaj çamurlarındaki potansiyeli nedeniyle araştırılmış ve jeoteknik mühendislik uygulamalarındaki çok yönlülüğünü sergilemiştir (Kök vd. 2018).

Sonuç olarak, vermikülit çeşitli endüstrilerde geniş bir uygulama yelpazesine sahip değerli bir mineraldir. Düşük yoğunluklu, ısı yalıtım özellikleri, adsorpsiyon özellikleri ve kimyasal inertlik dahil olmak üzere benzersiz özellikleri, inşaat ve tarımdan çevre iyileştirme ve biyoişlem mühendisliğine kadar çok yönlü kullanımlar için çok yönlü bir malzeme haline getirmektedir. Vermikülit üzerinde yapılan kapsamlı araştırma, çeşitli uygulamalar için muazzam potansiyele sahip çok yönlü bir mineral olarak önemini vurgulamaktadır.

2.5.1 Vermikülitin Mineralojik Yapısı

Fillosilikat grubuna ait bir mineral olan vermikülit, katmanlı doğası ile karakterize edilen bir mikroyapı sergiler. Vermikülit 1-1,5 arasında değişen bir mohs sertliğine ve 2,4 ila 2,7 g/cm³ arasında bir yoğunluğa sahiptir (Murzagaliyeva 2024). Yapısal olarak, vermikülit iki tetrahedral levha arasında sıkıştırılmış bir oktahedral tabakanın düzenlenmesiyle oluşan bir T-O-T biriminden oluşan 2:1 kil minerali olarak sınıflandırılır (Dzene vd. 2017). Vermikülitin ara katman uzayı, genellikle Mg²⁺ iyonları olan hidratlı katyonlarla doldurulur. Bu düzenleme, vermikülitte eşsiz özelliklerini kazandırır ve özellikle çevresel iyileştirme ve endüstriyel süreçlerde çeşitli uygulamalarda değerli bir malzeme haline getirir (Argüelles vd. 2009).

2.5.2 Vermikülitin Endüstriyel Kullanım Alanları

Vermikülit, çok yönlü bir mineral olup birçok endüstride önemli bir rol oynamaktadır. Vermikülitin başlıca kullanım alanları; İnşaat endüstrisi (Lahchich 2024, Eom vd. 2011, Ahn ve Hu, 2015), Tarım ve ziraat (Graham-Weiss vd. 1987, Duman vd. 2015, Rama vd. 2019, Aguilar vd. 2021, Muiambo ve Focke 2012, El-Radaideh vd. 2014, Zhao vd. 2022, Yu 2024), Çevre koruma (Muiambo ve Focke, 2012), Gıda endüstrisi (Borowik 2024) ve Malzeme bilimi (Qian vd. 2011, Patro vd. 2008) alanlarıdır. Vermikülit bu alanlarda aşağıda özetlenen özellikleri sayesinde kullanım potansiyeline sahiptir.

İnşaat Endüstrisi:

- Yalıtım: Hafifliği ve iyi yalıtım özellikleri sayesinde beton, sıva, render ve termal şaplarda kullanılır.
- Yanmazlık: Termal kararlılığı, düşük ısı iletkenliği, yanmazlık sağlamak için ideal özelliklerdir.

Tarım ve Ziraat:

- Substrat ve Tohum Çimlendirici: Bitki yetiştirme ve tohum çimlendirmede kullanılır. Yüksek katyon değişim kapasitesi ve su emme özellikleri ile toprak iyileştirici etkisi vardır.

- Taşıyıcı: Gübreler ve hayvan yemlerinde taşıyıcı olarak işlev görür.

Çevre Koruma:

- Adsorpsiyon: Kirli topraklardan ağır metallerin çıkarılmasında etkilidir.
- Toprak Değiştirme: Mikro besin maddelerinin mevcudiyetini artırarak toprak kalitesini iyileştirir.

Gıda Endüstrisi:

- Filtreleme: Filtreleme malzemesi olarak kullanılır.
- Hayvan Yemleri: Yemlerde taşıyıcı olarak işlev görür.

Malzeme Bilimi:

- Nanokompozitler: Makroskopik kristalleri sayesinde yüksek aspekt oranlı nanofillerin üretiminde kullanılabilir.
- Dolgu Malzemeleri: Hafif beton ve ambalaj malzemelerinde dolgu maddesi olarak kullanılır.

2.5.3 Vermikülit Üzerine Literatür Taraması

Benzersiz özelliklere sahip çok yönlü bir mineral olan vermiculit, seramik, inşaat malzemeleri ve kompozitler gibi çeşitli alanlarda katkı maddesi olarak uygulamaları için kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. Kök vd. (2018), vermiculitin su bazlı sondaj çamurlarında katkı maddesi olarak kullanımını araştırmış ve jeoteknik mühendisliği uygulamalarındaki potansiyelini vurgulamıştır. Benzer şekilde, Abeid (2018), vermiculit ve pirinç kabuğu külünün seramik karo üretiminde uygunluğu araştırmış ve bu katkıların küçülme ve eğilme mukavemeti gibi özellikleri nasıl etkilediği gösterilmiştir.

Liv vd. (2017), kompozit malzemeler alanında vermiculitin, termal stabilite ve alev direnci gibi özelliklerin geliştirilmesinde umut vaat ettiğini göstermiştir. Qian vd. (2011), poliüretan köpüklerin ve nanokompozitlerin vermiculit ile güçlendirilmesi üzerine yapılan çalışmalar, termal stabilite ve mekanik mukavemette iyileşmeler olduğunu göstermiştir. Xiong vd. (2019), genleştirilmiş vermiculit ilavesiyle poliüretan-imid

köpüklerin mekanik ve termal özelliklerinin geliştirilmesi araştırmış ve vermikülitin kompozit malzemelerdeki faydalı etkilerinin altını çizmiştir.

Vermikülit, sert poliüretanlar ve seramikler gibi malzemelerin içyapısı ve özellikleri üzerindeki etkisi açısından incelenmiştir. Kirbaş (2020), vermikülitin sert poliüretan malzemelerde kullanımını araştırarak yanmaya karşı koruma ve termal dirençteki rolünü vurgulamıştır. Xing vd. (2014), gelişmiş fotokatalitik performansa sahip hiyerarşik gözenekli TiO₂ seramikleri sentezleyerek vermikülitin gelişmiş özelliklere sahip gelişmiş malzemeler oluşturma potansiyelini ortaya koymuştur. Bu çalışmalar, çeşitli malzemelerin yapısal ve işlevsel özelliklerinin geliştirilmesinde vermikülitin çeşitli uygulamalarını toplu olarak vurgulamaktadır.

Vermikülitin farklı matrislere dahil edilmesinin termal iletkenlik ve mekanik mukavemet gibi özellikleri etkilediği gösterilmiştir. Sütçü (2015), genleştirilmiş vermikülitin kil tuğlaların fiziksel özellikleri ve termal iletkenliği üzerindeki etkisini değerlendirmiş ve vermikülitin seramik üretiminde gözenek yapıcı olarak potansiyeline işaret etmiştir. Zhang vd. (2015), poliüretan/organik vermikülit kompozitlerde mekanik özelliklerin geliştirildiğini göstererek vermikülitin kompozit malzemelerin mekanik performansını artırmadaki rolünün altını çizmiştir.

Valaskove vd. (2015), vermikülitin seramik ürünlerin yapısı ve özellikleri üzerindeki etkisi araştırmıştır. Vermikülit, talk ve kaolin kullanılarak kordiyerit seramiklerin üretimi için araştırılmış ve benzersiz gözenek yapılarına ve özelliklerine sahip seramiklerin geliştirilmesine yol açmıştır. Tapik vd. (2019), vermikülit (Yıldızeli/ Sivas) katkısının seramik porselenin özellikleri üzerinde etkisini araştırmıştır. Gündüz ve Kalkan (2022) tarafından yapılan çalışma vermikülit agregalarının çimentolu harcın termal ve konfor özellikleri üzerindeki etkilerine odaklanmış ve vermikülitin harç malzemelerinin performansını artırmadaki önemini vurgulamıştır. Bu çalışmalar, vermikülitin belirli özellikleri ve işlevleri uyarlamak için seramik üretiminde bir katkı maddesi olarak öneminin altını çizmektedir.

Vermikülit termal stabilite, alev direnci ve yapısal güçlendirme gibi benzersiz özellikleri nedeniyle seramiklerden kompozit malzemelere kadar çeşitli uygulamalarda değerli bir katkı maddesi olarak ortaya çıkmaktadır. İncelenen çalışmalar, vermikülitin malzeme özelliklerini geliştirmek için kullanılabileceği çeşitli yolları göstermekte ve farklı endüstrilerde yaygın kullanım potansiyeline işaret etmektedir.

Alternatif ergitici katkılar perspektifinde değerlendirildiğinde, ülkemiz yerel hammadde kaynaklarından birisi olan ergitici özellikteki vermikülitin, seramik ürünlerin pişirim sıcaklığını dolayısıyla da enerji maliyetlerini azaltmaya yönelik pişirim yardımcı katkı maddesi olarak kullanılabilirliğinin araştırılması ve vermikülit katkısının nihai ürün teknik özellikleri ve pişirim davranışları üzerindeki etkilerinin ortaya konulması amacıyla bu çalışma planlanmıştır.

Bu çalışmada, vermikülit katkısının vitrifiye massesine değişen oranlarda ilavesi sonrasında şekillendirilen bünyelerden endüstriyel koşullarda pişirilmesi ile elde edilen ürünlerin teknik özellikleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Bu çerçevede, ticari vitrifiye malzemesi ile mukayese edildiğinde daha iyi özellikler sunan vermikülit katkı oranının belirlenmesi amaçlanmıştır. Örnekler üzerinde standartlar dahilinde yapılan analiz ve testler ile vitrifiye ürün pişme davranışı ve teknik özellikleri üzerinde vermikülit katkılarının etkileri incelenmiş ve literatür temelinde tartışılıp yorumlanmıştır.

3. MATERYAL ve METOT

3.1 Hammadde Hazırlama

Bu çalışmada yerel bir hammadde olan Sivas-Yıldızeli vermikülit kullanılmıştır. Literatürde de bahsedildiği gibi vermikülitin gözenekli doğası gereği bünyesinde su tutmaya elverişli bir hammadde olmasından dolayı yapılan ön çalışmalarda yüksek oranda vermikülit katkısı hem döküm aşamasında süspansiyon reolojisini olumsuz etkilemiş hem de pişirim esnasında fazla deformasyona sebebiyet verdiği gözlemlenmiştir. Vermikülit katkısının neden olduğu deformasyon görüntüleri Resim 3.1’de verilmiştir.



Resim 3.1 Vermikülit katkısının neden olduğu deformasyon görüntüleri.

Bu nedenle vermikülitin gözenekli yapısının elemine edilmesi, yapısındaki organik safsızlıklarından arındırılması için ilk olarak yüksek sıcaklık fırınında $>1250\text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklıkta pota içerisinde eritilmiş, hızla soğutulularak sonrasında vitrifiye massesindeki diğer hammaddeler ile eş boyutta olması için bilyalı değirmende 100 mikron altına öğütülmüştür. Vermikülitin ergitme işlemi sonrası katkı maddesi olarak hazırlanma süreci Resim 3.2’de verilmiştir.



Resim 3.2 Vermikülitin ergitme işlemi sonrası katkı maddesi olarak hazırlanma süreci.

3.2 Reçete Oluşturma

Reçete oluşturma aşamasında vermikülit katkı oranı %5-10-15-20 olarak belirlenmiş fakat ön çalışmalarda yüksek katkı miktarlarındaki başarısız sonuçlardan dolayı %5 ve %10 miktarlarında katkı olarak kullanılmasına karar verilmiştir. Katkısız (referans), %5 vermikülit katkılı ve %10 vermikülit katkılı olmak üzere üç farklı reçete oluşturulmuştur.

3.3 Süspansiyon Hazırlama

Yoğunluğu 1827 gr/L (%73,56 katı madde) olan ticari bir vitrifiye massesinden (Çizelge 3.1) 3130 gr yaş miktarda tartılarak alınmıştır. Masse içerisindeki katı madde miktarı 2302,3 gr olarak hesaplanmış ve ısıtıl işlem görüp öğütülmüş vermikülit katkısı katı madde bazında %5 (115,12 gr) ve %10 (230,23 gr) oranlarında ilave edilmiştir. Hazırlanan reçetelerin homojen hale gelmesi için karıştırma işlemi yapılmıştır.

Çizelge 3.1 Vitrifiye massesinin reçetesi.

Mineral	Yüzde Bileşim (%)
Albit	30
Kuvars	10
Kaolen	25
Kil	35

3.3 Döküm ve Pişirme

Karıştırma sonrası hazırlanan masselerin alçı kalıplara döküm işlemi yapılmıştır ve sinterleme öncesinde Elektromag M3025P marka etüv içerisinde 110 °C’de 1 gün süre ile kurutulması amacı ile bekletilmiştir. Etüvden alındıktan sonra kuru halde boyutları ölçülen numuneler mekik fırında 1210 °C’de 1 saat pişirme işlemine tabii tutulmuştur. Pişirme işlemi sonrası numunelerin makro görüntüleri Resim 3.3’te verilmiştir.



Resim 3.3 Vermikülit katkılı pişmiş vitrifiye örnekleri.

Vermikülit katkılı vitrifiye örnekleri pişirim işlemi sonrasında pişme küçülmesi, su emme, renk indekslerinin ölçümü ve eğilme mukavemeti gibi çeşitli testlere tabi tutularak, vermikülit katkısının vitrifiye seramik özelliklerine etkileri irdelenmiştir.

3.4 Karakterizasyon

3.4.1 Kuru ve Pişme Küçülmesi Ölçümü

Pişirim öncesi ve sonrası numunelerdeki % küçülme oranlarının tespiti için numunelerin boyutları dijital kumpas kullanılarak ölçülmüş ve denklem 3.1’e göre hesaplamaları yapılmıştır. Beş numuneden elde edilen kuru ve pişme küçülmesi değerlerinin ortalaması alınmıştır.

$$Küçülme (\%): \left[\frac{(L_0 - L_p)}{L_0} \right] \times 100 \quad (3.1)$$

L_0 : Kurutma/Sinterleme öncesi numune uzunluğu (mm)

L_p : Kurutma/Sinterleme sonrası numune uzunluğu (mm)

3.4.2 Su Emme Tayini

Pişmiş numunelerdeki % su emme oranı, test numunelerinin sabit kütleye (K) kadar kurutulmasını, 5 saat boyunca damıtılmış suda kaynatılmasını ve ortam sıcaklığında 24 saat daha bekletilmesini içeren Arşimet prensibine (ASTM C373-88) göre geleneksel sıvı yer değiştirme yöntemi kullanılarak ölçülmüştür. Su emdirme işleminden sonra, her bir numunenin suya doymuş kütlesi (Y) belirlenmiştir. Denklem (3.2)'e göre numunelerin % su emme miktarları hesaplanmıştır. Test beş temsili numune üzerinde gerçekleştirilmiştir.

$$\% Su Emme = \frac{(Y-K)}{K} \times 100 \quad (3.2)$$

Y= Emilen su kütlesi (gr)

K= Kuru numune kütlesi (gr)

3.4.3 Üç Nokta Eğme Mukavemet Ölçümü

Ham ve pişmiş haldeki numunelerin mukavemet değeri ölçümleri 1 N yük hassasiyetli ve 5 kN gücündeki 3 Nokta Eğme Test Cihazı ile yapılmıştır. Her bir reçeteyi temsilen 5 adet numune üzerinden ölçüm alınmış ve ortalaması alınan sonuçlar numunenin mukavemet değeri olarak belirlenmiştir.

Numunelerin mukavemeti TS EN ISO 10545-4 standardına göre Denklem 3.2'de verilen formül kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\sigma = \frac{3xPxL}{2xbxh^2} \times 100 \quad (3.2)$$

P: Kırılma yükü (N)

L: Mesnetler arası uzaklık (mm)

b: Numunenin kırılan yüzeyinin eni (mm)

h: Numunenin kırılan yüzeyinin yüksekliği (mm)

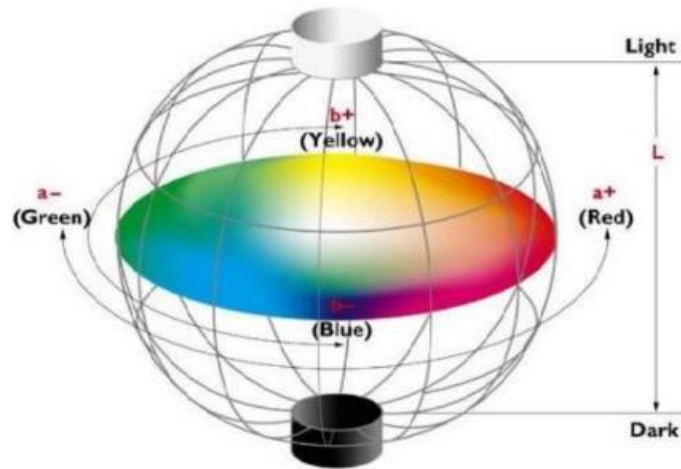
3.4.4 Renk İndeksi Ölçümü

Sinterlenmiş numunelere renk testi X-Rite marka spektrofotometre (Resim 3.4) ile yapılmıştır. Renk ölçümleri sonucunda L^* , a^* , b^* renk değerleri tespit edilmiştir.



Resim 3.4 X-Rite marka spektrofotometre.

Şekil 3.1 renk ölçümlerinin anlamsal dağılımını göstermektedir. L^* değeri, bir rengin ne kadar açık veya koyu olduğunu gösterir (0-100 aralığında), 0 siyahı ve 100 beyazı temsil eder. a^* değeri, kırmızı-yeşil eksenindeki konumu ifade eder; pozitif değerler kırmızımsı, negatif değerler yeşilimsi tonları gösterir. b^* değeri ise sarı-mavi eksenindeki konumu belirtir; pozitif değerler sarımsı, negatif değerler mavimsi tonları ifade eder. Bu sistem, renklerin hassas bir şekilde ölçülmesi ve tanımlanmasını sağlar.

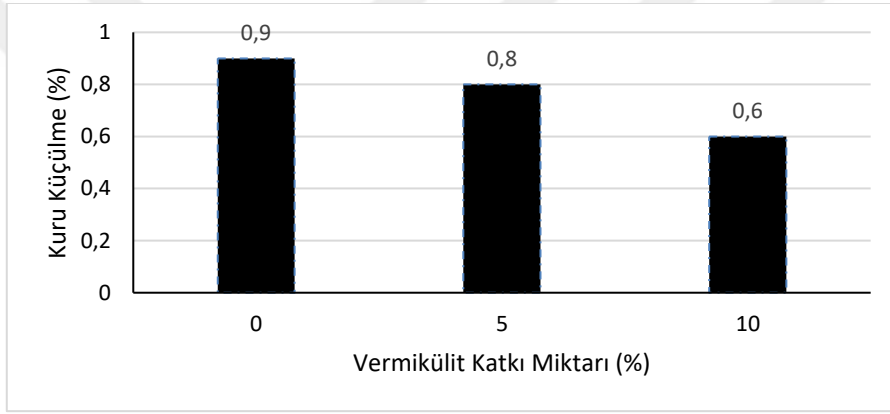


Şekil 3.1 Renk ölçüm değerlerinin anlamsal dağılımı (Çolakgil 2022).

4. BULGULAR

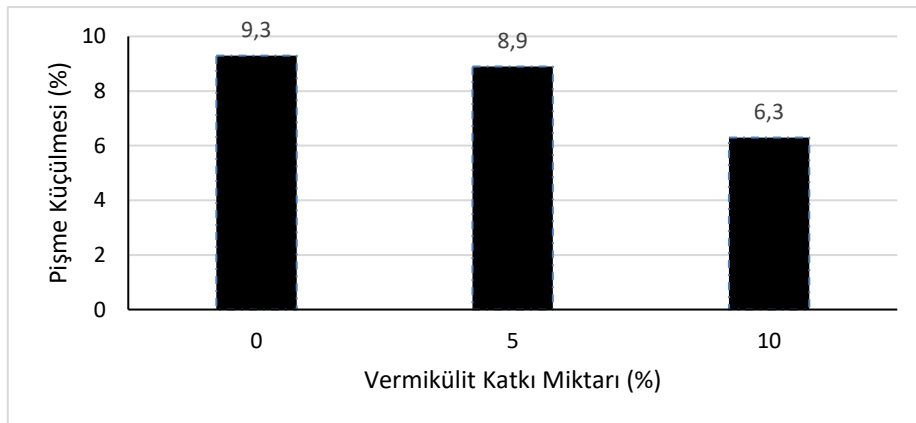
4.1 Kuru ve Pişme Küçülmesi Sonuçları

Şekil 4.1’de pişmemiş numuneler üzerinde gerçekleştirilen ölçüm sonuçları ile hesaplanan % kuru küçülme değerleri verilmiştir. Katkısız numunenin %0,9, %5 vermikülit katkılı numunenin % 0,8, % 10 vermikülit katkılı numunenin ise %0,6 kuru küçülmeye uğradığı görülmektedir. Vermikülit katkısı arttıkça kuru küçülme oranı azalmaktadır. Bu durum, vermikülitin ham bünyenin kuruma sırasında büzülmesini azaltıcı bir etki yarattığını göstermektedir.



Şekil 4.1 Kuru küçülme sonuçları.

Şekil 4.2’de ise pişmiş numuneler üzerinde gerçekleştirilen ölçüm sonuçları ile hesaplanan % pişme küçülme değerleri verilmiştir.



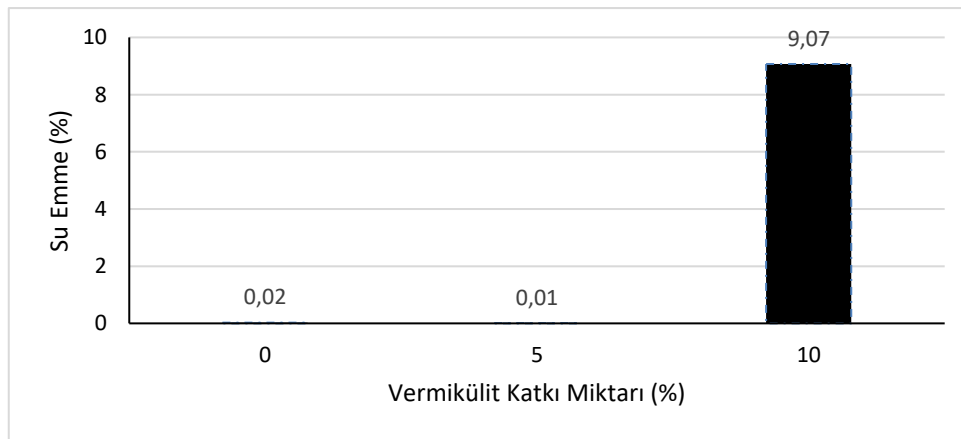
Şekil 4.2 Pişme küçülmesi sonuçları.

Grafik incelendiğinde katkısız numunenin % 9,3, % 5 vermikülit katkılı numunenin % 8,9, % 10 vermikülit katkılı numunenin ise % 6,3 pişme küçülmesine uğradığı görülmüştür. Pişme küçülmesindeki değişim trendinin, kuru küçülme değerlerindeki değişim ile benzerlik arz ettiği görülmektedir.

Tapik vd. (2019)'nin vermikülit katkısının seramik porselenin özellikleri üzerinde etkilerini araştırdığı çalışmasında % 10 vermikülit katkılı 1100 °C'de pişmiş numunelerde % 4,6 pişme küçülmesi, 1150 °C'de pişmiş numunelerde ise % 7,9 pişme küçülmesi tespit etmişlerdir. Elde edilen bulgular literatür sonuçları ile uyumluluk göstermektedir.

4.2 Su Emme Tayini Sonuçları

Şekil 4.3'de vermikülit katkılı vitrifiye örneklerinin su emme sonuçları verilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde katkısız numunenin % 0,02, % 5 katkılı numunenin % 0,02 ve % 10 katkılı numunenin ise % 9,07 su emme değerine sahip olduğu görülmektedir. Su emme oranları % 0 ve % 5 vermikülit katkısında oldukça düşük ve benzer seviyelerde iken, % 10 vermikülit katkısında ciddi bir artış göstermektedir. Yüksek oranda vermikülit katkısı, malzemenin gözenekliliğini artırarak su emme oranını yükseltmektedir.



Şekil 4.3 Su emme tayini sonuçları.

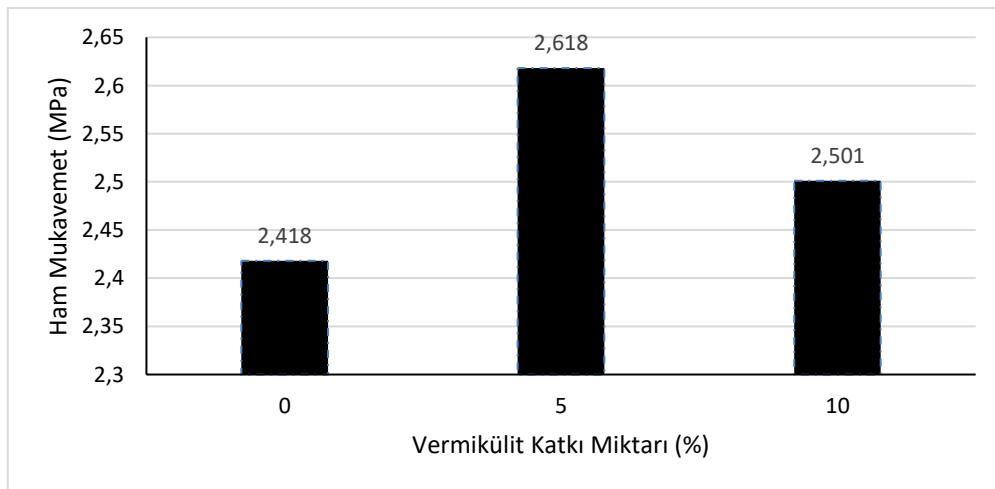
Bu durum, yüksek oranda vermikülit katkısının, ön çalışma bulgularında bahsedilen deformasyon sorunlarında olduğu gibi, cam faz oranını arttırmasından kaynaklı olduğu

şeklinde değerlendirilmiştir. Artan camsı faz oranı ile birlikte aşırı sinterleme gerçekleşerek, camsı fazın kaynama etkisi (bloating) yaratması ile yeni gözenekler oluşturduğu, bunun sonucu olarak da su emme değerinin arttığı düşünülmüştür.

Sütçü (2015), geliştirilmiş vermikülitin kil tuğlaların özellikleri üzerindeki etkisini araştırdığı çalışmasında vermikülit katkı oranının artmasıyla tuğla örneklerinin su emme değerinde artış gözlemlenmiştir. 1000 °C’de pişirme işlemi uyguladığı katkısız kil tuğlalarında su emme değeri ortalama % 16 iken aynı sıcaklıkta pişirme işlemi uygulanan % 10 vermikülit katkılı kil tuğlasında su emme değeri yaklaşık % 30’a kadar yükselmiştir. Vermikülit katkı miktarının artmasıyla su emme değerinde tespit edilen artış, bu çalışmadaki sonuçlar ile uyumluluk göstermektedir.

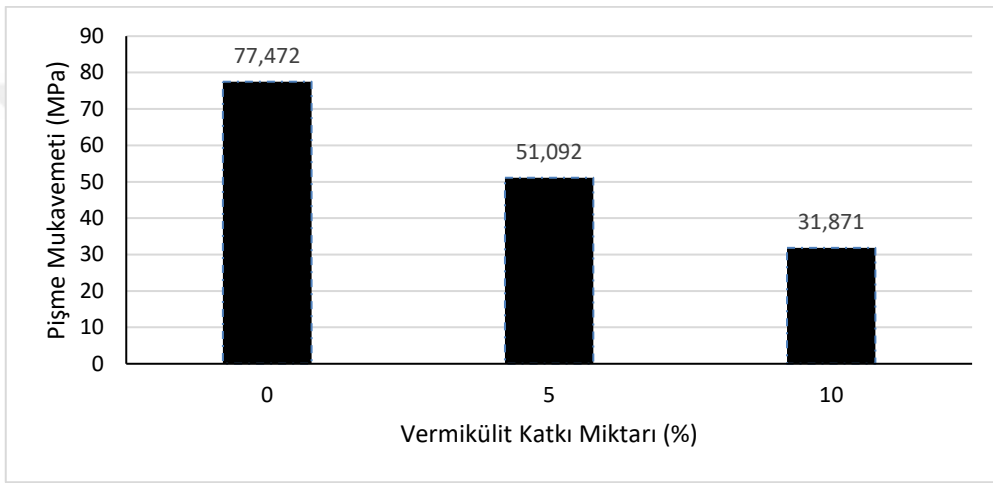
4.3 Üç Nokta Eğme Mukavemet Ölçüm Sonuçları

Şekil 4.4’te pişmemiş numuneler üzerinde gerçekleştirilen ham mukavemet ölçüm sonuçları verilmiştir. Katkısız numunenin ham mukavemet değeri 2,418 MPa, % 5 vermikülit katkılı numunenin ham mukavemet değeri 2,618 MPa, % 10 vermikülit katkılı numunenin ise ham mukavemet değeri 2,501 MPa bulunmuştur. Numunelerde birbirlerine yakın ham mukavemet değerleri elde edilmekle birlikte, vermikülitin % 5 katkısında 0,2 MPa, % 10 katkısında ise 0,083 MPa’lık bir mukavemet artışını sağladığı görülmüştür.



Şekil 4.4 Ham mukavemet ölçüm sonuçları.

Şekil 4.5'te pişmiş numuneler üzerinde gerçekleştirilen pişme mukavemeti ölçüm sonuçları verilmiştir. Mukavemet değerleri; katkısız numune için 77,472 MPa, % 5 vermikülit katkılı numunede 51,092 MPa, % 10 vermikülit katkılı numunede ise 31,871 MPa olarak ölçülmüştür. Pişme mukavemeti değerleri vermikülit katkısı arttıkça azalmaktadır. Bu, yüksek oranlarda vermikülit katkısının malzemenin dayanıklılığını olumsuz etkilediğini göstermektedir. Su emme sonuçlarında bahsedildiği gibi, artan oranda vermikülit katkısı mikro yapıdaki camsı fazın artışına neden olmuş, bu da yeni gözenekler oluşturarak, vitrifiye örneklerin mekanik dayanımlarını azaltmıştır.



Şekil 4.5 Pişme mukavemeti ölçüm sonuçları.

Abeid (2018)'in yüksek lisans tez çalışmasında seramik karo üretiminde yapıda katkı olarak kullandığı vermikülit katkısı arttıkça mukavemet değerlerinde azalma tespit etmiştir. Katkısız seramik karo eğilme mukavemet değeri 28,86 MPa iken % 35 vermikülit katkısına ulaştığında bu değer 4,40 MPa'a kadar düşmüştür. Bu da mukavemet ölçüm sonuçlarının literatür bulguları ile uyumlu olduğunu göstermektedir.

4.4 Renk İndeksi Ölçüm Sonuçları

Çizelge 4.1'de pişmiş numuneler üzerinde gerçekleştirilen renk indeksi ölçüm sonuçları verilmiştir. Sonuçlar, numunelerin renk özelliklerini belirlemek için kullanılan L^* , a^* , ve b^* renk koordinatlarını içermektedir. L^* değeri, malzemenin açıklık veya karanlık seviyesini gösterir. Katkısız numuneler en yüksek L^* değerine sahip olup, en açık renge sahiptir. Vermikülit katkısı arttıkça L^* değeri düşmektedir, yani numuneler daha koyu

hale gelmektedir. Bu durum, vermikülitin malzemenin rengini daha koyu hale getirme eğiliminde olduğunu göstermektedir. a^* değeri, pozitif olduğunda kırmızı, negatif olduğunda yeşil rengi ifade eder. Katkısız numuneler en yüksek a^* değerine sahip olup, en kırmızı renge sahiptir. Vermikülit katkısı arttıkça a^* değeri düşmektedir, yani numuneler daha az kırmızı hale gelmektedir. Bu, vermikülitin kırmızı tonunu azaltıcı bir etkisi olduğunu göstermektedir. b^* değeri, pozitif olduğunda sarı, negatif olduğunda mavi rengi ifade eder. Katkısız numuneler en düşük b^* değerine sahip olup, en az sarı renge sahiptir. Vermikülit katkısı arttıkça b^* değeri yükselmekte, yani numuneler daha sarı hale gelmektedir. Bu, vermikülitin sarı tonunu artırıcı bir etkisi olduğunu göstermektedir.

Çizelge 4.1 Renk indeksi ölçüm sonuçları.

	Katkısız (Referans)	%5 Vermikülit Katkılı	%10 Vermikülit Katkılı
L^*	80,25	70,00	64,60
a^*	1,27	0,82	0,76
b^*	10,10	12,64	13,60

Sonuç olarak, vermikülit katkısının, vitrifiye örneklerin parlaklık (L) değerlerini azalttığı, a ve b değerlerini ise arttırdığı görülmüştür. Bu sonucun, vermikülitin kimyasal bileşimindeki renklendirici safsızlıklardan kaynakları olduğu düşünülmüştür.

5. TARTIŞMA ve SONUÇ

Bu çalışmada, ticari bir vitrifiye massesine yerel bir hammadde olan vermikülit eklenerek elde edilen ürünlerin teknik ve estetik özellikleri incelenmiştir. Vermikülitin farklı oranlarda (% 0, 5, 10) katkı olarak ilave edilmesi ile üretilen numuneler üzerinde küçülme, su emme, mukavemet ve renk indeksi gibi özellikler analiz edilmiştir. Elde edilen bulgular, vermikülitin vitrifiye seramiklerin özelliklerine olan etkilerini detaylı olarak ortaya koymuştur.

Vermikülit katkısının artmasıyla, kuru ve pişme küçülmesi oranlarında azalma gözlenmiştir. Özellikle % 10 vermikülit katkılı numunede, kuru küçülme % 0,6 ve pişme küçülmesi % 6,3 olarak ölçülmüştür. Bu durum, vermikülitin üretim sürecinde gözenekliliği artırıcı bir etki yapabileceğini göstermektedir. Vermikülit katkısı ham mukavemeti artırırken, pişme mukavemetini düşürmektedir. % 5 vermikülit katkılı numunede ham mukavemet 2,618 MPa iken, pişme mukavemeti 51,09 MPa ölçülmüştür. % 10 vermikülit katkısında ise ham mukavemet değeri 2,501 MPa ve pişme mukavemeti değeri 31,871 MPa'a düşmüştür. Bu durum, yüksek oranda vermikülit katkısının seramiklerin yapısal bütünlüğünü olumsuz etkileyebileceğini göstermektedir.

Vermikülit katkısının su emme oranını artırdığı gözlenmiştir. %10 vermikülit katkılı numunede su emme oranı %9,07 olarak belirlenmiştir. Vermikülit katkı oranındaki artış ile birlikte, artan camsı faz oranı aşırı sinterlemeye neden olarak, camsı fazın kaynama etkisi (bloating) yaratması ile yeni gözenekler oluşturduğu, bunun sonucu olarak da su emme değerinin arttığı düşünülmüştür.

Renk analizleri, vermikülit katkısının seramik numunelerin renk özelliklerini önemli ölçüde etkilediğini ortaya koymuştur. L* değerleri, vermikülit katkısının artmasıyla düşmüş, yani numuneler daha koyu hale gelmiştir. a* değerleri düşerken b* değerleri yükselmiştir, bu da numunelerin daha az kırmızı ve daha sarı hale geldiğini göstermektedir. Bu değişiklikler, vermikülitin kimyasal yapısı ve pişirme sırasında meydana gelen reaksiyonlarla açıklanabilir.

Bu alışma, vermikülit katkısının vitrifiye seramiklerin teknik ve estetik özellikleri üzerindeki etkilerini kapsamlı bir şekilde ortaya koymuştur. Vermikülit katkısı, seramiklerin pişirme sıcaklığını düşürerek enerji tasarrufu sağlamasının yanı sıra, su emme oranı ve gözeneklilik gibi bazı özellikleri olumsuz yönde etkileyebilmektedir. Bu nedenle, vermikülit katkısının oranı dikkatlice belirlenmeli ve istenilen özelliklerin elde edilmesi için uygun üretim koşulları sağlanmalıdır. Bu bulgular, vitrifiye seramik üretiminde vermikülit katkısının potansiyelini ve sınırlamalarını anlamada önemli bir katkı sağlamaktadır.



6. KAYNAKLAR

- Abeid S, 2018, Suitability Of Vermiculite And Rice Husk Ash as Raw Materials for Production of Ceramic Tiles, *International Journal of Materials Science and Applications*, 7(2), 39.
- Abollino O, Giacomino A, Malandrino M, Mentasti E, 2006, The Efficiency of Vermiculite as Natural Sorbent for Heavy Metals. Application to a Contaminated Soil, *Water Air & Soil Pollution*, 181(1-4), 149-160.
- Aguilar A, Vasque H, Cardoso A, Bardivieso E, Pelvine R, Bezerra S, Lemes E, 2021, Beet Production Using Vermiculite Incorporated with Dystrophic Red Latosol (Oxisol), *Research Society and Development*, 10(1).
- Ahn C, Hu J, 2015, Investigation of Key Parameters of Rock Cracking Using the Expansion of Vermiculite Material, *Materials*, 8(10), 6950-6961.
- Alves M, Alves E, Araújo L, Lima M, 2017, Substrate in the Emergence and Initial Growth of Seedlings of *Caesalpinia Pulcherrima*, *Ciência Rural*, 47(3).
- Anita A, Sastry C, Hashim M, 1997, Immobilization of Urease on Vermiculite, *Bioprocess and Biosystems Engineering*, 16(6), 375.
- Argüelles A, Leoni M, Blanco J, Marcos C, 2009, Structure and Microstructure of Mg-Vermiculite, *Zeitschrift Für Kristallographie Supplements*, 2009(30), 429-434.
- Atılğan M, 2006, Vitrifiye Ürünlerin Endüstride Gerçekleştirilme Süreçleri ve Kişisel Öneri, Marmara Üniversitesi, Güzel Sanatlar Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.
- Aydın T, Kunduracı N, Akbay A, 2018, The Effect of Nepheline Syenite Addition on Pyroplastic Deformation of Sanitarywares, *Science of Sintering*, 50 (1).
- Borowik A, 2024, Soil Enzyme Response and Calorific Value of Zea Mays Used for The Phytoremediation of Soils Contaminated with Diesel Oil, *Energies*, 17(11), 2552.
- Carty W M, Pinto B M, 2002, Observations on the Glass Phase Composition in Porcelains, *Ceramic Engineering Science and Proceedings*, 23, 79-94.

- Carty W M, Senepati U, 1998, Porcelain-Raw Materials, Processing, Phase Evolution and Mechanical Behaviour, *Journal of the American Ceramic Society*, 81: 3-20.
- Cowan C A, Bole G A, Stone R L, 1950, Spodumene as a Flux Component in Sanitary Chinaware Bodies, *Journal of the American Ceramic Society*, 33, 193- 197.
- Çolakgil D, 2022, Uçucu Külün Kriyolit Esaslı Elektroliz Hücre Atıklarıyla Sinterlenebilirliğinin Araştırılması, *Metalurji Malzeme Mühendisliği, Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi*, 71s, Afyonkarahisar.
- Daday T M, 2012, Seramik Sağlık Gereçlerinde Damar Hatalarının Giderilmesi, *Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi*, Eskişehir.
- Dağ P, 2009, Sağlık Gereçlerinde Kompozisyon Değişimlerinin Sinterleme Üzerine Etkileri, *Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*, Eskişehir.
- Das S K, Dana K, 2003, Differences in Densification Behavior of K and Na Feldspar Containing Porcelain Bodies, *Thermochimica Acta*, 406, 199- 206.
- Dinger D R, Funk J E, 1994, Predictive Process Control of Crowded Particulate Suspensions Applied to Ceramic Manufacturing, 1st Edition, Kluwer Academic Publishers, Boston, A.B.D., 765 pp.
- Duman O, Tunç S, Polat T, 2015, Determination of Adsorptive Properties of Expanded Vermiculite for the Removal of Basic Red 9 from Aqueous Solution: Kinetic, Isotherm And Thermodynamic Studies, *Applied Clay Science*, 109-110, 22-32.
- Dzene L, Ferrage E, Viennet J, Tertre E, Hubert F, 2017, Crystal Structure Control of Aluminized Clay Minerals on the Mobility of Caesium in Contaminated Soil Environments, *Scientific Reports*, 7(1).
- El-Radaideh N, Al-Taani A, Al-Momani T, Tarawneh K, Batayneh A, Taani A, 2014, Evaluating the Potential of Sediments in Ziqlab Reservoir (Northwest Jordan) for Soil Replacement and Amendment, *Lake And Reservoir Management*, 30(1), 32-45.

- Eom J, Kim Y, Jeong D, Lee S, 2011, Thermal Conductivity and Compressive Strength Anisotropy in Vermiculite-Ceramic Composites with Layered Structure, Journal Of The Ceramic Society Of Japan, 119(1388), 319-321.
- Escócio V, Visconte L, Nazareth A, Sousa A, Pacheco É, 2018, Permeability, Melt Flow Index, Mechanical and Morphological Properties of Green Hdpe Composites: Effect Of Mineral Fillers, Macromolecular Symposia, 381(1).
- Esposito L, Salem A, Tucci A, Gualtieri A, Jazayer, S H, 2005, The Use of Nepheline-Syenite in a Body Mix for Porcelain Stoneware Tiles, Ceramic International, 31, 233–240.
- Fortuna D, 2000, Sanitaryware, Gruppo Editoriale Faenza Editrice S.P.A.
- Garciaten J, Sanchez E, 2000, Use of Spodumene as a Flux in Porcelain Tile Compositions, Qualicer, 139.
- German R M, 1996, Fundemantals of Sintering, Engineered Materials Handbook: Ceramic and Glasses, 4.
- Graham-Weiss, L, Bennett M, Paau A, 1987, Production of Bacterial Inoculants By Direct Fermentation on Nutrient-Supplemented Vermiculite, Applied and Environmental Microbiology, 53(9), 2138-2141.
- Gündüz L, Kalkan Ş, 2022, Effects of Exfoliation Temperature for Vermiculate Aggregates Modified By Sodium Ions on Thermal and Comfort Properties of a New Generation Cementitious Mortar, Journal of Sustainable Construction Materials and Technologies, 7(4), 266-281.
- Hancock P, 2005, Use of Recycled Glass as a Flux in Vitreous China Sanitaryware, The Waste & Resources Action Programme.
- Iqbal Y, Lee W E, 2000, Microstructural Evolution in Triaxial Porcelain, Journal of the American Ceramic Society, 83.
- Karataş B, 2023, Seramik Sağlık Gereçleri Üretiminde Bünye Hatalarının Tamirinde Kullanılan Reçine Bazlı Malzemenin İyileştirilmesi, Eskişehir Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir.

- Kingery W D, Bowen H K, Uhlmann D R, 1976, Introduction to Ceramics, 2nd Edition, John Wiley and Sons, New York.
- Kirbaş İ, 2020, Investigation of The Internal Structure, Combustion and Thermal Resistance of the Rigid Polyurethane Materials Reinforced with Vermiculite, Journal of Thermoplastic Composite Materials, 35(10), 1561-1575.
- Koenig C J, 1939, Nepheline Syenite in Ceramic Ware, Ohio State Univ. Eng. Expt. Sta. Bull., 103.
- Kök O, Tanrıverdi İ, Erdoğan Y, 2018, Usage of Vermiculite as Additive Material in Water-Based Drilling Muds, Natural and Engineering Sciences, 3(2), 179-186.
- Kunduracı N, Aydın T, 2015, The Effect of Nepheline Syenite Addition in the Sanitaryware Bodies, Dergipark, 7 (2).
- Kunduracı N, Tarhan B, Sarısakal C, 2019, Seramik Sağlık Gereçleri Ürünlerinde Piroplastik Deformasyon Azaltılmasına Bağlı Olarak Geliştirilen Kompozisyonların Üretim Maliyeti Açısından Değerlendirilmesi, Uluslararası Mühendislik ve Geliştirme Dergisi, 11 (2): 474-480.
- Lahchich A, 2024, Heat Treatment at 1000 °C Under Reducing Atmosphere of Commercial Vermiculites, Minerals, 14(3), 232.
- Lee W E, Iqbal Y, 2001, Influence of Mixing on Mullite Formation in Porcelain, Journal of the European Ceramic Society, 21.
- Lynch E D, Allen A W, 1950, Nepheline Syenite-Talc Mixtures as a Flux in Low-Temperature Vitrified Bodies, Journal of the American Ceramic Society, 33.
- Muiambo H, Focke W, 2012, Ion Exchanged Vermiculites with Lower Expansion Onset Temperatures, Molecular Crystals and Liquid Crystals, 555(1), 65-75.
- Muiambo H, Focke W, Atanasova M, Westhuizen I, Tiedt L, 2010, Thermal Properties of Sodium-Exchanged Palabora Vermiculite, Applied Clay Science, 50(1), 51-57.
- Mukhopadhy T K, Ghosh S, Ghatak S, 2003, Microstructure and Thermo Mechanical Properties of a Talc Doped Stoneware Composition Containing Illitic Clay, Ceramics International, 20.

- Mukhopadhy T K, Ghosh S, Ghatak S, Maiti H S, 2006, Effect of Pyrophyllite on Vitrification and on Physical Properties of Triaxial Porcelain, *Ceramic International*, 32, 871-876.
- Murzagaliyeva M, 2024, Physico–Chemical Study of The Adsorption Properties of Natural Minerals for Sorption Treatment of Wastewater from Pb⁺², Ni⁺², Zn⁺² Ions. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1(10 (127)), 27-35.
- Ngayakamo B, Park S, 2019, Evaluation of Kalalani Vermiculite for Production of High Strength Porcelain Insulators, *Science of Sintering*, 51(2), 223-232.
- Oberzan M, Hole J, Bug M, Kuscer D, Lavrac I, Kosec M, 2009, High Alumina Porcelain with the Addition of A LiO₂-Bearing Fluxing Agent, *Journal of the European Ceramic Society*, 29, 2143-2152.
- Özdemir B, 2005, Döküm Çamuru Optimizasyonu, Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yayınlanmamış Doktora Tezi, Eskişehir.
- Özel E, Tunçel D Y, Kara M K, 2011, Sert Hammadde Tane Boyutunun Sağlık Gereçleri Porseleninin Fiziksel Özelliklerine Etkisi, *Gazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 26-2, 299-306.
- Patro T, Harikrishnan G, Misra A, Khakhar D, 2008, Formation and Characterization of Polyurethane-Vermiculite Clay Nanocomposite Foams, *Polymer Engineering & Science*, 48(9), 1778-1784.
- Qian Y, Lindsay C, Macosko C, Stein A, 2011, Synthesis and Properties of Vermiculite-Reinforced Polyurethane Nanocomposites, *Acs Applied Materials & Interfaces*, 3(9), 3709-3717.
- Rado P, 1988, An Introduction to the Technology of Pottery, *Institute of Ceramics, Great Britain*, 208-209.
- Rahaman M N, 2003, *Ceramic Processing and Sintering*, Taylor and Francis Group, A.B.D.
- Rama M, Eklund O, Fröjdö S, Smått J, Lastusaari M, Laiho T, 2019, Characterization of Altered Mica from Sokli, *Clays and Clay Minerals*, 67(5), 428-438.
- Reed J S, 1995, *Principles of Ceramics Processing*, John Wiley & Sons, Inc., New York.

- Remmey G B, 1997, Firing Cycles Firing Ceramic, World Scientific Publishing Company, 27-36.
- Ricciardiello F G, Minchelli D, Battistella F, 2005, An Investigation into the Drying Process of Sanitary Bodies, *Interceram*, 54 (3).
- Richerson D W, 1992, Modern Ceramic Engineering, Marcel Dekker Inc, New York, 22-181.
- Sanchez E C, Torres E M, Diaz C, Saito F, 2004, Effects of Grinding of Feldspar in the Sintering Using a Planetary Ball Mill, *Journal of Materials Processing Technology*, 152 (3).
- Sarı H, 2012, Seramik Sağlık Gereçlerinde Pişirim Sıcaklık ve Sürelerinin Azaltılması, Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Eskişehir.
- Silva F, Barros T, Barbosa T, Lima E, Barbosa T, Rodrigues M, 2021, Expansibility of Vermiculite (Santa luzia, Brazil) Irradiated with Microwave, *Cerâmica*, 67(382), 230-235.
- Singer F, Singer S, 1963, Industrial Ceramics, Chapman and Hall Ltd., New York.
- Sokolar R, Kersnerova L, Sveda M, 2017, The Effect of Different Fluxing Agents on The Sintering of Dry Pressed Porcelain Bodies, *Journal of Asian Ceramic Societies*.
- Stawiński W, Węgrzyn A, Dańko T, Freitas O, Figueiredo S, Chmielarz L, 2017, Acid-Base Treated Vermiculite as High Performance Adsorbent: Insights into the Mechanism of Cationic Dyes Adsorption, Regeneration, Recyclability And Stability Studies, *Chemosphere*, 173, 107-115.
- Sütçü M, 2015, Influence of Expanded Vermiculite on Physical Properties and Thermal Conductivity of Clay Bricks, *Ceramics International*, 41(2), 2819-2827.
- Syahril S, 2023, The Effect of Additional Vermiculite on Compressive and Flexural Strength of Concrete, *Journal of Science and Applied Engineering*, 6(2), 58.
- Tayçu A, 2009, Seramik Sağlık Gereçleri Pişirim Koşullarının İncelenmesi, Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir.

- Tulyaganov D U, Agathopoulos S, Fernandez H R, Ferreifa F M F, 2006, Influence of Lithium Oxide Auxiliary Flux on the Properties of Triaxial Porcelain Bodies, *Journal of The American Ceramic Society*, 26.
- Tunçel D Y, 2012, Seramik Sağlık Gereçleri Bünyelerinin Piroplastik Deformasyonunun Azaltılması, Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Eskişehir.
- Valáškové M, Kočí K, Kupková J, 2015, Cordierite/Steatite/ CeO_2 Porous Materials – Preparation, Structural Characterization and Their Photocatalytic Activity, *Microporous and Mesoporous Materials*, 207, 120-125.
- Vari A, 2002, Raw Material Preparation and Forming of Ceramic Tiles (Ed: Zucchi, C.), S.A.L.A srl., Modena, İtalya.
- Villegas-Palacio S, Dinger D R, 1996, PSD Effects on Firing Properties of Porcelains, *Journal of American Ceramic Society*, 75.
- Xing Z, Zhou W, Du F, Zhang L, Li Z, Zhang H, Li W, 2014, Facile Synthesis of Hierarchical Porous TiO_2 Ceramics with Enhanced Photocatalytic Performance for Micropolluted Pesticide Degradation, *ACS Applied Materials & Interfaces*, 6(19), 16653-16660.
- Xiong W, Wu J, Tian H, Wang C, Wu Q, 2019, Enhanced Mechanical and Thermal Properties of Polyurethane-Imide Foams with the Addition of Expanded Vermiculite, *Polymer Composites*, 41(3), 886-892.
- Yu Z, 2024, Exploration of the Vermiculite-Induced Bacterial Community and Co-Network Successions During Sludge–Waste Mushroom Co-Composting, *Microorganisms*, 12(3), 585.
- Zhang T, Zhang F, Dai S, Li Z, Wang B, Quan H, Huang Z, 2015, Polyurethane/Organic Vermiculite Composites with Enhanced Mechanical Properties, *Journal of Applied Polymer Science*, 133(13).
- Zhao P, Xing J, Hu C, Guo W, Wang L, He X, Wang X, 2022, Feasibility of Near-Infrared Spectroscopy for Rapid Detection of Available Nitrogen in Vermiculite Substrates in Desert Facility Agriculture, *Agriculture*, 12(3), 411.