



**DÜŞÜK ŞAMOT İÇERİKLİ FFC SERAMİK
SAĞLIK GEREÇLERİ REÇETELERİNİN
GELİŞTİRİLMESİ**

Yüksek Lisans Tezi

Ekin Naz BAŞAKINCI

Eskişehir 2025

**DÜŞÜK ŞAMOT İÇERİKLİ FFC SERAMİK SAĞLIK GEREÇLERİ
REÇETELERİNİN GELİŞTİRİLMESİ**

Ekin Naz BAŞAKINCI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Alpagut KARA

Eskişehir

Eskişehir Teknik Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Ağustos 2025

JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI

Ekin Naz BAŞAKINCI'nın DÜŞÜK ŞAMOT İÇERİKLİ FFC SERAMİK SAĞLIK GEREÇLERİ REÇETELERİNİN GELİŞTİRİLMESİ başlıklı çalışması 11/08/2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından değerlendirilerek "Eskişehir Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliği"nin ilgili maddeleri uyarınca, Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Anabilim dalında Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Unvan Adı Soyadı

İmza

Üye	: Prof. Dr. Alpagut KARA
Üye	: Prof. Dr. Ferhat KARA
Üye	: Prof. Dr. Veli UZ

Prof. Dr. Harun BÖCÜK

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

11/08/2025

DANIşMAN ONAYI

Danişmanlığını yürüttüğüm Yüksek Lisans ğrencisi Ekin Naz BAşAKINCI, DüşüK şAMOT İÇERİKLİ FFC SERAMİK SAğLIK GEREÇLERİ REÇETELERİNİN GELİşTİRİLMESİ başlıklı tez çalışmasını tamamlamıştır. Hazırlamış olduğu tez tarafımca incelenmiş ve öğrencinin tez savunma sınavına alınması bilimsel ve etik açıdan uygun görülmüştür.

Tez Danişmanı

Prof. Dr. Alpabut KARA

ÖZET
DÜŞÜK ŞAMOT İÇERİKLİ FFC SERAMİK SAĞLIK GEREÇLERİ
REÇETELERİNİN GELİŞTİRİLMESİ

Ekin Naz BAŞAKINCI

Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Anabilim Dalı

Eskişehir Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Ağustos 2025

Danışman: Prof. Dr. Alpagut KARA

Seramik sağlık gereçleri; inorganik-metalik olmayan hammaddelerin belirli oranlarda karıştırılarak akışkan bir çamur haline getirilmesi, daha sonra da alçı ve/veya sentetik reçine kalıplarda şekillendirilerek 1200–1250°C civarında pişirilen ürünlerdir. Fine Fire Clay (FFC) bünyeler, vitrifiye (VC) bünyelere kıyasla daha düşük deformasyon eğilimine sahip olmakla birlikte su emme oranları daha yüksektir. Düşük deformasyon gereksinimi nedeniyle bu bünyelerin kompozisyonlarında %30-%40 oranında şamot hammaddesi kullanılmaktadır. FFC ürünlerde üretim maliyetlerinde önemli bir etken olan şamot, yüksek sıcaklıkta gerçekleştirilen ısı işlemler sonucu üretilen maliyetli bir yarı mamul olup, üretim sürecinde ortaya çıkan CO₂, karbon ayak izi açısından da olumsuz bir etkidir. Bu çalışmanın amacı, FFC reçetelerinden şamotun çıkarılması ve/veya reçete kullanım oranının düşürülmesiyle standart FFC reçetesinin teknik özelliklerine paralel ve reolojik olarak SSG üretimine uygun, düşük maliyetli reçete kompozisyonları geliştirmektir. Bu doğrultuda, sistematik bir şekilde kompozisyonlarda feldispat kullanımı kaldırılmış, şamot yerine özlü hammadde oranları artırılmış ve reçetelere wollastonit ilavesi gerçekleştirilmiştir. Yapılan kompozisyonel değişiklikler sonucunda mikroyapıda anortit ve kristobalit fazlarının oluşumu gözlemlenmiş, ayrıca malzemenin piropplastik indeks değeri düşürülmüştür. Çalışma sonucunda, şamot içermeyen ancak endüstriyel standartlara uygun FFC reçeteleri geliştirilmiştir.

Anahtar Sözcükler: Şamot, FFC, Seramik sağlık gereçleri, Reoloji

ABSTRACT

DEVELOPMENT OF FFC CERAMIC SANITARYWARE BODIES WITH REDUCED CHAMMOTTE CONTENT

Ekin Naz BAŞAKINCI

Department of Material Science and Engineering

Eskişehir Technical University, Institute of Graduate Programs, August 2025

Supervisor: Prof. Dr. Alpagut KARA

Sanitaryware ceramics are products manufactured by mixing inorganic, non-metallic raw materials in specific proportions to form a casting slip. This slip is then shaped in plaster and/or synthetic resin molds and subsequently fired at temperatures around 1200–1250°C. Fine Fire Clay (FFC) bodies are characterized by higher water absorption and lower deformation ratio compared to vitreous china bodies. Due to the low deformation requirement, 30-40% chamotte is used in the composition of these bodies. Chamotte, which is a significant factor in the production costs of FFC products, is an expensive semi-finished product produced as a result of thermal processes carried out at high temperatures and is also a negative factor in terms of CO₂ emissions and carbon footprint during the production process. The aim of this study is to develop low-cost recipe compositions that are parallel to the technical properties of the standard FFC recipe and suitable for CSW production in terms of rheology by removing chamotte from FFC recipes and/or reducing the recipe usage rate. In this regard, feldspar use was systematically eliminated from the compositions, the proportion of plastic raw materials was increased instead of chamotte, and wollastonite was added to the recipes. As a result of the compositional changes made, the formation of anorthite and cristobalite phases in the microstructure was observed, and the pyroplastic index value of the material was reduced. As a result of the study, FFC recipes that do not contain chamotte but comply according to industrial standards have been developed.

Keywords: Chamotte, FFC, Ceramic sanitary ware, Rheology.

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam süresince öncelikle akademik bilgi birikimi ve sektörel deneyimiyle bana her zaman rehberlik eden, desteğini daima yanımda hissettiren, kıymetli danışmanım Prof. Dr. Alpagut KARA 'ya en içten teşekkürlerimi sunarım.

Yenilik odaklı bakış açısıyla, bireysel gelişimin sürekliliğine inanan ve bunu hem kendi kariyerinde hem de çevresindekilere ilham vererek hayata geçiren bu tezin gerçekleştirilmesine katkı sağlayan Kaleseramik Çanakkale Kalebodur Seramik SAN. A.Ş. Ar-Ge Merkezi Direktörü Doç. Dr. Kağan KAYACI ve Proje ve Fikri Haklar müdürü M. Uğur TAŞKIRAN 'a teşekkür ederim.

Tez çalışmamın tüm aşamalarında bilgi birikiminden çok şey öğrendiğim, bu çalışmanın ortaya çıkmasında çok emeği olan ve beni lisans, yüksek lisans eğitimimde tüm süreç boyunca destekleyen, Seramik Araştırma Merkezi Ar-Ge ve Teknoloji Geliştirme Müdürü Pervin DAĞ GENÇOĞLU 'na en içten teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmam süresince her an desteğini ve katkısını hissettiren, bilgi ve tecrübeleriyle bana ilham kaynağı olan Kaleseramik Ar-Ge Merkezi'nden değerli çalışma arkadaşlarım Sayın Berkay YAZIRLI ve Sayın Ulaş ÜLKÜ 'ye en içten teşekkürlerimi sunarım. Aynı zamanda, 2022-2025 yılları arasında Kaleseramik Ar-Ge Merkezi bünyesinde birlikte çalışma fırsatı bulduğum, bilgi paylaşımı, iş birliği ve destekleriyle bu süreci daha anlamlı ve verimli kılan tüm mühendis ve çalışma arkadaşlarıma da ayrıca teşekkür ederim. Bu yolculuk boyunca göstermiş oldukları samimiyet, motivasyon ve teknik katkı, tezimin şekillenmesinde büyük rol oynamıştır.

Tüm yaşamımda olduğu gibi yüksek lisans eğitimim boyunca da yanımda olan ve daima beni destekleyen kardeşim Kardelen BAŞAKINCI 'ya, annem Gönül BAŞAKINCI ve babam Çetin BAŞAKINCI 'ya sonsuz teşekkür ederim.

Ekin Naz BAŞAKINCI

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Bu tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalarında bilimsel etik ve kurallara uygun davrandığımı; bu çalışma kapsamında elde edilen tüm veri ve bilgiler için kaynak gösterdiğimi ve bu kaynaklara kaynakçada yer verdiğimi; bu çalışmanın Eskişehir Teknik Üniversitesi tarafından kullanılan “bilimsel intihal tespit programı”yla tarandığını ve hiçbir şekilde “intihal içermediğini” beyan ederim. Herhangi bir zamanda, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçları kabul ettiğimi bildiririm.

Ekin Naz BAŞAKINCI

İÇİNDEKİLER

Sayfa

BAŞLIK SAYFASI	I
JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI.....	II
DANIŞMAN ONAYI	III
ÖZET	IV
ABSTRACT.....	V
TEŞEKKÜR	VI
ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ.....	VII
İÇİNDEKİLER.....	VIII
TABLolar DİZİNİ.....	X
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	XII
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	XIV
1. GİRİŞ	1
1.1. Vitreous China (VC)	2
1.2. Fine Fire Clay (FFC).....	2
2. ÇALIŞMANIN AMACI VE KAPSAMI.....	4
2.1. Seramik Malzemelerde Anortit ve Müllit Oluşumunun Yapısal Etkileri.....	9
3. KULLANILAN HAMMADDELER VE ÖZELLİKLERİ	12
3.1. Kil-Kaolen Grubu	13
3.2. Kuvars	16
3.3. Feldispat.....	18
3.4. Şamot.....	19
3.5. Wollastonit.....	21
3.6. Kullanılan Yardımcı Malzemeler	22
4. SERAMİK SAĞLIK GEREÇLERİ ÜRETİM PROSESİ	24

5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	29
5.1. Seramik Sağlık Gereçlerine Yönelik Laboratuvar Ölçekli Çamur ve Sır Hazırlama Yöntemi.....	29
5.2. Geliştirilen Bünyelerde Kullanılan Hammaddelerin Kimyasal Analizleri.....	31
5.3. Geliştirilen Bünyelerde Kullanılan Hammaddelerin Mineralojik Analizleri.....	33
5.4. Geliştirilen Bünyelerde Kullanılan Hammaddelerin Fiziksel Analizleri	33
5.5. Standart FFC İşletme Reçetesi ve Karakterizasyon Çalışmaları.....	34
5.6. Çamur Reçetelerine Uygulanan Testler.....	36
5.6.1. Kuru küçülme ve pişme küçülme analizi (%)	36
5.6.2. Su emme testi (%)	37
5.6.3. Isıl genleşme analizi	37
5.6.4. Kuru ve pişmiş mukavemet testi.....	38
5.6.5. Brookfield ve Gallenkamp viskozimetreleri.....	38
5.7. Geliştirilen Bünye Çalışmaları (1. Faz).....	39
5.8. D-22 ve AD-22 Reçete Geliştirme Çalışmaları	46
5.8.1. Kimyasal ve tane boyut özellikleri.....	46
5.8.2. Deneme çamurlarının reolojik özellikleri	49
5.8.3. Deneme çamurlarının faz analizi.....	56
5.8.4. Deneme çamurlarının fiziksel ve mekanik özellikleri.....	57
5.8.5. Deneme çamurlarının sinterleme dilatometresi sonuçları	59
5.8.6. Isıl şokuna dayanıklılık testleri.....	61
5.8.7. D-22 reçetesinin diğer analiz sonuçları	61
6. SONUÇLAR VE TARTIŞMA.....	70
7. GELECEK ÇALIŞMALAR	73
KAYNAKÇA.....	75
ÖZGEÇMİŞ	

TABLÖLAR DİZİNİ

Sayfa

Tablo 1.1. FFC ve VC çamur özellikleri.....	3
Tablo 3.1. Özlü ve özsüz seramik hammaddeleri	12
Tablo 3.2. Reçetede kullanılan hammadde oranları (% ağırlıkça).....	12
Tablo 3.3. Killerin kristal yapılarına göre sınıflandırılması [33]	14
Tablo 5.1. Kullanılan hammaddelerin kimyasal analiz sonuçları (% ağırlıkça)	32
Tablo 5.2. Kullanılan hammaddelerin minerolojik analiz sonuçları.....	33
Tablo 5.3. Kullanılan hammaddelerin fiziksel özellikleri.....	34
Tablo 5.4. Standart FFC bünyesine ait reçete bilgileri.....	34
Tablo 5.5. Standart FFC çamuruna ait lazer tane boyut sonucu (µm)	35
Tablo 5.6. Standart FFC çamurunun karakteristik reolojik ve fiziksel özellikleri.....	35
Tablo 5.7. Standart FFC çamurunun fiziksel özellikleri	36
Tablo 5.8. Reçete oluşturma çalışmaları (%ağırlıkça)-1	40
Tablo 5.9. Reçete oluşturma çalışmaları (%ağırlıkça)-2.....	41
Tablo 5.10. Deneme reçetelerinin STD FFC reçetesi ile karşılaştırılmalı fiziksel özellikler sonucu-1	42
Tablo 5.11. Deneme reçetelerinin STD FFC reçetesi ile karşılaştırılmalı fiziksel özellikler sonucu-2	42
Tablo 5.12. Deneme reçetelerinin STD FFC reçetesi ile karşılaştırılmalı fiziksel özellikler sonucu-3	43
Tablo 5.13. Sinterleme dilatometresi ölçüm sonucu hesaplanan PI, E ve su emme değerleri	46
Tablo 5.14. Standart FFC, D-22 ve AD-22 reçetelerinin kimyasal analizleri (%ağırlıkça).....	46
Tablo 5.15. Standart FFC ve D-22 reçetelerinin elek bakiye analiz sonuçları	47
Tablo 5.16. Reçetelerin karşılaştırmalı tane boyut değerleri	48
Tablo 5.17. Standart FFC, D-22 ve AD-22 reçetelerinin fiziksel özellikleri.....	58
Tablo 5.18. Standart FFC, D-22 ve AD-22 reçetelerinin mekanik özellikleri.....	59

Tablo 5.19. Sinterleme dilatometresi ölçüm sonucu hesaplanan PI, E ve su emme değerleri	60
Tablo 5.20. Numunelerin Harkot test sonuçları	61
Tablo 5.21. Standart FFC ve D-22 çamurlarının lazer tane boyut sonuçları	61
Tablo 5.22. D-22 çamurlarının döküm özellikleri	62
Tablo 5.23. D-22 kodlu numunenin fiziksel ve mekanik özellikleri.....	63
Tablo 5.24. Numunelerin otoklav testi sonuçları	63
Tablo 5.25. Numunelerin otoklav öncesi ve sonrası ısı genleşme katsayı değerleri ($\times 10^{-7}$).....	65



ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1. CaO-Al ₂ O ₃ -SiO ₂ faz diyagramı [19]	10
Şekil 3.1. Kil ve kaolen oluşum aşamaları	15
Şekil 3.2. Kaolinitin pişme sırasındaki faz dönüşümleri [34]	16
Şekil 3.3. Silikanın polimorfik formları [6].....	17
Şekil 3.4. Bir kuvars örneğinde ısıtma sırasında endotermik, soğutma sırasında ekzotermik etkileri [31]	18
Şekil 4.1. Seramik sağlık gereçleri proses akışı [41].....	25
Şekil 5.1. Çamur hazırlama süreci.....	31
Şekil 5.2. R21-R24 ve Standart FFC reçetelerinin sinterleme dilatometresi sonuçları	45
Şekil 5.3. Standart FFC reçetesinin tane boyut dağılımı	47
Şekil 5.4. D-22 reçetesinin tane boyut dağılımı	48
Şekil 5.5. AD-22 reçetesinin tane boyut dağılımı	48
Şekil 5.6. Numunelerin reometre ile alınan viskozite ölçümleri	50
Şekil 5.7. Numunelerin reometre ile toparlanma ölçümleri	51
Şekil 5.8. Numunelerin reometre ile sabit frekans ölçümleri (amplitude testi).....	52
Şekil 5.9. Numunelerin reometre ile farklı frekans ölçümleri	53
Şekil 5.10. Numunelerin reometre ile osilasyon-rotasyon-osilasyon ölçümleri.....	53
Şekil 5.11. Numunelerin sabit kayma hızında ölçülen süzülme davranışları	54
Şekil 5.12. Numunelerin reometre ile artan sıcaklıktaki visko-elastik ölçümleri (T _{ramp})	55
Şekil 5.13. Standart FFC ve D-22 reçetesinin XRD grafikleri (q: Kuvars, c: Kristobalit, m: Müllit, a: Anortit)	57
Şekil 5.14. Standart FFC, D-22 ve AD-22 reçetelerinin ölçülen ısı genleşme özellikleri	58
Şekil 5.15. Standart FFC ve D-22 reçetelerinin sinterleme dilatometresi sonuçları	59
Şekil 5.16. D-22 kodlu çamurun plastisite eğrisi.....	62

Şekil 5.17. Standart FFC numunesi otoklav öncesi ve sonrası dilatometre sonucu	64
Şekil 5.18. D-22 numunesi otoklav öncesi ve sonrası dilatometre sonucu	64
Şekil 5.19. Standart FFC bünyesine ait ikincil elektron görüntüsü (q:Kuvars, p:Por, m:Müllit)	66
Şekil 5.20. D-22 kodlu geliştirilen bünyeye ait ikincil elektron görüntüsü (q: Kuvars, p:Por, m:Müllit,a:Anortit)	67
Şekil 5.21. Standart FFC bünyesine ait ikincil elektron görüntüsü (q:Kuvars, p:Por, m:Müllit)	67
Şekil 5.22. D-22 kodlu geliştirilen bünyeye ait ikincil elektron görüntüsü (q:Kuvars, p:Por, m:Müllit)	68
Şekil 5.23. D-22 kodlu bünyeye ait anortit kristalleri	68
Şekil 5.24. D-22 kodlu bünyeye ait müllit kristalleri	69
Şekil 5.25. Standart FFC bünyesine ait kuvars kristalleri	69
Şekil 5.26. Standart FFC bünyesine ait müllit kristalleri	69

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

VC	: Vitreous China
FFC	: Fine Fire Clay
α	: Alfa
β	: Beta
γ	: Gamma
°C	: Santigrat derece (Celsius derece)
XRD	: X-Işınları Difraksiyon Cihazı
XRF	: X-Işınları Floresans Spektrometresi
SEM	: SEM Taramalı Elektron Mikroskobu
mm	: Milimetre
β	: Beta
γ	: Gamma
m	: Metre
cm	: Santimetre
mm	: Milimetre
μm	: Mikrometre
kg	: Kilogram
g	: Gram
g/l	: Yoğunluk
%	: Yüzde işareti
D10	: %10 elek altı tane boyutu
D50	: %50 elek altı tane boyutu
D90	: %90 elek altı tane boyutu
L	: Malzemenin içerdiği beyazlık değeri
a	: Malzemenin içerdiği kırmızı-yeşil değeri
b	: Malzemenin içerdiği mavi-sarı değeri
cc	: Santimetreküp
rpm	: Dakıkada 1000 devir (revolutions per minute)
Cp	: Centipoise
STD	: Standart

D-22	:	İşletme denemesi
AD-22	:	Laboratuvar denemesi
s-1	:	Kayma hızı
η , Pa.s	:	Dinamik viskozite, Pascal-saniye
GPa.s	:	Giga pascal-saniye
(OT. Ö)	:	Otoklav öncesi
(OT. S)	:	Otoklav sonrası
D.K.	:	Duvar Karosu



1. GİRİŞ

Seramik sektörü, kaplama malzemeleri, vitrifiye ürünleri, sofr ve mutfak eşyaları, porselen bazlı kullanım araçları, yüksek sıcaklık dayanımı gerektiren refrakter ürünler, dekoratif seramik objeler, yapı sektöründe yoğun olarak kullanılan tuğla ve kiremitler ile çeşitli teknik ve sanatsal seramikleri kapsayan geniş bir alt sektör yelpazesine sahiptir. Bu sektörde üretilen ürünler, özellikle inşaat ve yapı malzemeleri endüstrisine doğrudan girdi sağlayarak ülke ekonomisinde stratejik bir rol oynamaktadır. Türkiye, tarihsel kökenleri oldukça eskilere dayanan seramik üretim kültürü ve hızla gelişen sanayi altyapısıyla, bu alanda köklü ve dinamik büyüme gösteren ülkelerden biri konumundadır [1].

Ülkemiz, küresel ölçekte seramik sektöründe önemli bir üretim merkezi olarak öne çıkmakta ve dünya genelindeki toplam üretimin dikkate değer bir bölümünü karşılamaktadır. Ülkedeki seramik sanayisinin ihracat performansına bakıldığında, seramik kaplama malzemeleri ürün grubunun en yüksek ihracat payına sahip olduğu görölmektedir. Bu ürün grubunu, ihracat hacmi bakımından ikinci sırada yer alan seramik sağlık gereçleri takip etmektedir. Seramik sağlık gereçlerinin üretimi hem ihracattaki yüksek payı hem de yapı ve inşaat sektörüne olan katkısı nedeniyle Türkiye ekonomisi açısından stratejik bir öneme sahiptir. Nitekim bu ürün grubunun ihracatı son beş yıllık dönemde %31 oranında artış göstererek 339 milyon ABD doları seviyesine ulaşmıştır [2]. Son yıllarda seramik sektöründe hem artan rekabet hem de enerji ve hammadde fiyatlarındaki hızlı yükseliş üretim maliyetlerinin düşürölmesi için itici güç olmuştur. Bu şartlar altında üretim maliyetlerini azaltmak için yapılacak her türlü çalışma büyük öneme sahiptir.

İnsanlık tarihinin en eski üretim alanlarından biri olan seramik, yüzyıllar boyunca işlevsellik ve estetik arasında bir denge kurarak gelişimini sürdürmüştür. Günümüzde seramik sağlık gereçleri sektörü, yalnızca hijyen ve dayanıklılık gibi temel gereksinimlere yanıt vermekle kalmayıp, aynı zamanda kullanıcı deneyimini artıran tasarım odaklı yaklaşımlarla şekillenmektedir. Bu üretim sürecinin temelinde; doğadan elde edilen kil, kaolin, kuvars ve feldispat gibi hammaddeler yer almakta, geleneksel olarak uygulanan döküm teknikleriyle biçim verilmektedir. Alçı kalıplara dökülen sulu çamurun, kalıp yüzeyinden itibaren kalınlaşarak şekil alması ve ardından fazla kısmının boşaltılması gibi yöntemler, uzun yıllar sektörün temel biçimlendirme teknolojisi olmuştur. Ancak son yıllarda değişen kullanıcı ihtiyaçları, küresel tasarım trendleri ve dijitalleşen üretim

teknolojileri sayesinde seramik sağlık gereçleri üretimi; geçmişin sınırlarını aşan, daha özgün, ergonomik ve fonksiyonel çözümler sunan çağdaş bir sanayi koluna dönüşmüştür.

Seramik sağlık gereçleri, inorganik-metalik olmayan hammaddelerin belirli oranlarda karıştırılması, akışkan bir çamur haline getirilerek alçı ve/veya sentetik reçine kalıplarda şekillendirilmesi; sonrasında 1200°C -1250°C civarında pişirilmesiyle elde edilen seramik ürünlerdir. Seramik sağlık gereçleri ürün yelpazesi; lavabo, ayak, klozet, rezervuar, bide, hela taşı, pisuar ve duş teknesi gibi beyaz ve renkli ürünlerden oluşmaktadır [3,4].

Seramik sağlık gereçlerinde kullanılan döküm çamuru için iki farklı bünye kompozisyonu bulunmaktadır. Bu kompozisyonlar; Vitreous China (VC) ve Fine Fire Clay (FFC)'dir. VC bünyeye sahip ürünler genellikle küçük şekillere sahip, su emme oranı ve porozite oranı FFC'ye göre düşük hela taşı, klozet, bide benzeri ürünlerdir. FFC ürünler ise daha çok büyük, kompleks şekillere sahip lavabo, duş teknesi gibi deformasyon oranı düşük, yüksek su emme ve poroziteye sahip ürün grubunu teşkil etmektedir. VC ve FFC bünyeleri fiziksel, kimyasal ve üretim yöntemleri bakımından birbirinden ayrılmaktadır.

1.1. Vitreous China (VC)

Kil, kaolen, kuvars ve feldispat gibi hammaddelerin belirli oranlarda karıştırılarak ve istenen tane boyutuna getirilerek döküm için uygun reolojide hazırlanan çamur türüdür. İçerisinde bulunan feldispat hammaddesi sayesinde düşük su emme (<%0,5) ve FFC bünyelere göre az porozite oranına sahiptir. VC bünye yapısı ağırlıkça %50-70 oranında camsı faz içermektedir. Bünye içerisinde bulunan camsı faz yüksek sıcaklıklarda viskoz bir sıvı olarak davranmaktadır. Bu durum piroplastik deformasyona neden olmaktadır. Piroplastik deformasyon, seramik ürünlerin yüksek sıcaklıkta pişirilmesi sırasında camsı fazın akışkanlaşması nedeniyle, ürünün kendi ağırlığı etkisiyle şeklini kaybetmesi durumudur [5]. VC bünye yapısında bulunan camsı fazın bünyeye kattığı deformasyon oranı yüzünden basit ve küçük şekilli ürünler üretilmektedir. Bu ürünlere örnek olarak hela taşı, bide ve klozet verilebilir.

1.2. Fine Fire Clay (FFC)

FFC ürünlerinin genel kullanım amacı VC ürünleri ile dökülemeyen büyük ebatlı tezgâh lavaboları, duş teknesi, eviyeler gibi ürünleri seramik sağlık gereçleri üretiminde

olanak sağlıyor olmasıdır. Bu ürünün hammaddeleri arasında kil, kaolen, kuvars ve feldispat bulunmakta olup, VC ürünlerinden farklı olarak kalsine edilmiş kaolen (şamot) de içeriğe dahil edilmektedir. FFC ürünlerinin camsı faz oranı %20-30 civarındadır. FFC ürünleri, deformasyon oranı daha az, su emme oranı yüksek (<%12) ve yüksek poroziteye sahiptirler. SSG üretiminde, FFC bünyelerde şamot kullanım oranı yaklaşık %30-%40'a kadar çıkmaktadır. Aynı zamanda FFC reçete kompozisyonunda bulunan ve ithal olarak alınan şamot hammaddesi FFC reçete maliyetinin büyük bir kısmını oluşturmaktadır. Bir FFC bünyeli ürün ile vitrifiye bünyeli ürün arasında maliyet anlamında önemli farklılıklar bulunmaktadır.

Bu tez çalışmasının amacı, FFC reçetesi içerisinde bulunan şamot hammaddesinin kullanım oranını azaltarak, şamotun FFC bünyeye kazandırdığı yapısal kararlılık, ısıl dayanım, düşük deformasyon gibi özelliklerini koruyacak şekilde, wollastonit ve alternatif kil, kaolen gibi hammaddeleri kullanılarak bir formülasyon oluşturulması hedeflenmiştir. Oluşturulacak FFC bünye çamurunun fiziksel özelliklerini ve üretim sürecinde gerçekleşen kurutma, sırlama ve pişirme gibi aşamaları değiştirmeden, FFC ürün standartlarına uygun düşük şamotlu reçetelerle aynı ve/veya daha düşük deformasyona sahip reçeteler geliştirilmesi planlanmıştır. Çalışmalar kapsamında farklı şamot miktarları ile denemeler yapılarak daha düşük deformasyona sahip FFC bünyeler geliştirilmesi amaçlanmıştır. Bunun için deformasyonu düşürecek, mukavemeti arttıracak ve sinterleme hızını azaltarak camsı faz viskozitesini arttıracak alternatif hammadde arayışları ve denemeleri planlanmıştır. Vitrifiye sektöründe kullanılan VC ve FFC çamurunun özellikleri ve farklılıkları Tablo 1.1'de özetlenmiştir.

Tablo 1.1. FFC ve VC çamur özellikleri

SSG Çamurları ve Özellikleri	
Vitreous China (VC)	Fine Fired Clay (FFC)
<%0,5 Su Emme oranı	<%12 Su Emme Oranı
Düşük porozite	Yüksek porozite
Yüksek deformasyon oranı	Düşük deformasyon oranı
Yüksek küçülme oranı	Düşük küçülme oranı
Basit şekiller	Büyük, karmaşık şekiller
Kil, kaolen, kuvars, feldispat	Kil, kaolen, kuvars, feldispat, şamot
Pişmiş mukavemet >550-600 kgf/cm ²	Pişmiş mukavemet> 300-350 kgf/cm ²

2. ÇALIŞMANIN AMACI VE KAPSAMI

Seramik sağlık gereçleri üretimi öğütme, karıştırma, döküm ile şekillendirme, kurutma, sırlama ve pişirme işlemlerinden oluşmaktadır. Günümüzde yüksek hacimli ve geniş geometrilere sahip seramik sağlık gereçlerinin üretimindeki artışla birlikte, geleneksel FFC çamur reçetesi kullanılarak hazırlanan döküm çamurlarının tercih edilme oranı da artmaktadır. SSG üretiminde geleneksel FFC çamurunun tercih edilmesinin sebebi, FFC çamur reçetesinde bulunan kalsine kaolen (şamot) sayesinde FFC çamurunun pişme deformasyonunun ve küçülmesinin geleneksel vitrifiye çamur reçetesine göre düşük olmasıdır. Dolayısıyla büyük boyutlu ürünlerde pişme deformasyonu çözümüne yönelik olarak FFC bünyeleri tercih edilmektedir.

Bahsedilen kalsine kaolen plastik olmayan bir malzeme olup, FFC çamur içeriğinde kullanılmakta ve seramik bünyelerde ısıya dayanıklılığı arttırmakta ve deformasyona karşı koymaktadır. Kalsine kaolenler, içerdikleri silika miktarlarına göre farklı ısı genleşme katsayısına sahiptirler. Silika miktarı arttıkça kalsine kaolenin ısı genleşme katsayısı da artmaktadır. FFC çamur reçetesinde kuvars yerine kalsine kaolen kullanmak, kalsine kaolen mineralojisinden kaynaklanan farklılıklardan dolayı vitreous china bünyeye göre fiziksel özelliklerde farklılık yaratmaktadır. Şamot kullanmanın avantajı ise kalsine kaolenin minerolojik yapısında bulunan serbest kuvars yüzdesinin düşük olmasından kaynaklanmaktadır. Bu durum, pişirimin soğuma bölümünde yapıdaki kuvarsın β 'dan α 'ya dönüşümünden kaynaklanan çatlak oluşma riskini önemli ölçüde azaltmaktadır. Kalsine kaolen, kaolenin ısı işlemi tabi tutulmasından dolayı refrakter özellik kazanan bir üründür. Refrakter özelliğinden dolayı Fine Fire Clay bünyelerde kullanıldığında pişme sıcaklığı, kalsine kaolenin reaksiyon sıcaklığından daha düşük olduğu için ürünün deformasyonu da düşük seviyede gerçekleşmekte ve bu nedenden dolayı FFC ürününün VC ürünlere göre su emme değerleri de daha yüksek gerçekleşmektedir. Kalsine kaolenin ısı işlem sonrası yapısındaki serbest kalan ince kuvarslar soğuma sırasında dönüşüme uğrayarak kristobalit oluştururlar. Kristobalit oluşumu, artan sıcaklıktan kaynaklı olarak ürünün hacimce stabil olduğu sıcaklık aralığını ve ürünün mukavemetini artırır. Fakat kristobalit fazının yüksek ısı genleşme katsayısı bünyenin ısı genleşme katsayısını artırarak, ürününün ısı şok direncini olumsuz etkileyebilmektedir.

Kullanılan şamotun, tane boyut dağılımı, su absorpsiyonu ve mineralojik bileşimi de kalsine kaolenlerin farklılık göstermesine sebep olmaktadır. Ancak kalsine kaolen, ithal olarak temin edilen bir ara mamul olması sebebiyle FFC reçetelerinde maliyeti arttıran bir etken olarak da karşımıza çıkmaktadır. Şamotun FFC bünye reçetesine kazandırmış olduğu bu fiziksel özelliklerin, kalsine kaolen yerine farklı hammaddelerin kullanıldığı reçeteler ile daha az maliyetli olarak elde edilmesini sağlayan alternatif çamur reçeteleri gerekmektedir. Bu çalışmanın amacı, maliyeti yüksek kalsine kaolen yerine kullanılabilecek, geleneksel FFC çamurunun fiziksel özelliklerini koruyan, düşük küçülme ve deformasyon değerlerine sahip alternatif bir FFC çamur kompozisyonu geliştirmektir.

FFC (Fine Fire Clay) bileşimi, VC (Vitreous China) ile benzer sıcaklık aralıklarında pişirilmekte olup, üretim süreçlerinde benzer ısı koşullara ihtiyaç duymaktadır. Ancak pişirim sonrası elde edilen ürünlerin yapısal özellikleri açısından iki bileşim arasında belirgin farklar bulunmaktadır. FFC esaslı ürünlerde pişirim sonrasında yüksek su emme kapasitesi, malzeme içerisinde mikroskobik düzeyde gözenekli bir yapı oluşmasına neden olmakta ve aynı zamanda yüksek porozite oranı ürünlerin darbe dayanımını önemli ölçüde azaltmaktadır. Dolayısıyla, FFC ile üretilen ürünler kullanım esnasında mekanik zorlanmalara karşı daha az direnç gösterebilmekte ve bu da ürünlerin hizmet ömrünü olumsuz etkilemektedir. Bu bileşimin uygulama alanlarını kısıtlayan bir diğer önemli faktör ise, klozet gibi ürünlerin üretimine uygun olmamasıdır. Klozetler, hijyen açısından kritik olan ve sürekli olarak içerisinde su barındıran ürünler olduğundan, düşük su geçirgenliği ve yüksek mekanik dayanım gerektiren özel seramik yapılar arasında yer almaktadır. FFC'nin yüksek su emme özelliği, bu tür ürünlerin üretiminde ciddi teknik sorunlara yol açmakta ve kullanım güvenliği açısından yetersiz kalmaktadır. Ayrıca mikrobiyolojik açıdan yoğun temasın yaşandığı bu tip ürünlerde, gözenekli yapı nedeniyle mikrobiyal üremeye zemin hazırlanması söz konusu olabilmektedir. Öte yandan, FFC bileşiminin bazı avantajları da bulunmaktadır. Bu bileşim, VC bünyeye kıyasla daha düşük piroplastik deformasyon gösterdiğinden, özellikle ince duvarlı, karmaşık geometrili ve estetik açıdan özel tasarım gerektiren yüksek katma değerli ürünlerin üretiminde tercih edilmektedir. Ancak bu avantaj, su emme oranı ve darbe dayanımı gibi temel teknik performans parametreleri açısından dezavantajları telafi edememektedir. Ayrıca FFC bileşiminin üretim sürecindeki hammadde ve enerji gereksinimleri, VC bünyeye kıyasla daha yüksek maliyetli bir yapı ortaya koymaktadır.

Sonuç olarak, FFC bileşimi belirli tasarım avantajları sunsa da teknik özellikleri ve üretim ekonomisi bakımından sınırlayıcı faktörlere sahip bir seramik formülasyonu olarak değerlendirilmektedir.

Bu ürünlerde gözenek miktarının fazla olması ve amorf fazın olmasından dolayı nem genleşmesi problemi yaşanabilmektedir. Aynı zamanda kullanılan kalsine kaolenin kristobalit fazı içermesi ısı genleşme katsayısını yükselteceğinden dolayı çatlama riski taşınması önemli bir problem teşkil edebilmektedir [6]. Bununla birlikte, bünyeye uygulanan sır ve FFC bünye arasında ısı genleşme farkının vitrifiye bünyelere göre daha fazla olması üretimde kısıtlayıcı problemlerden biri olarak değerlendirilmektedir.

Kompozisyonda bulunan hammaddelerin belirli oranlarda bir araya gelerek karıştırılmasıyla oluşan bünye, ürünün son özelliklerini belirleyen mikroyapısal bir düzen ortaya koymaktadır. Yüksek sıcaklıklarda sinterleme sonrası faz dönüşümleri sonucunda elde edilen mikroyapıda, genellikle kuvars tanelerini çevreleyen müllit ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$) kristalleri ile camsı fazın bir arada bulunduğu tespit edilmektedir. Bu yapı içerisindeki oluşan faz oranları ise pişirim sıcaklığı, pişirim süresi ve soğuma hızına bağlı olarak değişkenlik göstermektedir [7].

Sağlık gereçlerinde en yaygın olarak gözlemlenen kristal fazlar müllit ve kuvarstır. Bunlardan kuvars, yapıda daha geniş bir dağılım göstermekte olup, müllite göre daha homojen bir şekilde camsı matris içerisinde yer almaktadır. Yapının mekanik özellikleri, özellikle bünye içerisindeki bu iki ana kristalin miktarı ve dağılımı ile yakından ilişkilidir. Bu doğrultuda, müllit kristallerinin birbirleriyle bağlantılı ve kenetlenmiş bir yapı oluşturması, mukavemeti olumlu yönde etkilemektedir. Literatürde yapılan birçok çalışma, yapıda müllit oranının artırılmasıyla bünyenin mekanik dayanımının da arttığını göstermektedir [8]. Müllit camsı faz ile bünyede pişirim sırasında sıcaklığın artmasıyla birlikte, miktar ve boyut olarak artar, küçük taneleri absorbe eder. Bu nedenle, numune mukavemetindeki değişimin, tane boyutu ve müllit tane boyutu dağılımı gibi mikroyapıdaki değişimlerden de kaynaklandığı düşünülmektedir [9]. Müllit iğne şeklinde kristallere sahip olup çok sert, kimyasal etkilere dayanıklı, mekanik mukavemeti oldukça yüksek bir malzemedir. Bu durum, müllitin yüksek sıcaklık stabilitesi ve sertlik gibi özelliklerinden kaynaklanmaktadır.

Bununla birlikte, SSG ürünlerinde kullanılan kuvarsin yapısal özelliklere olan katkısı da önemli bir faktör olarak değerlendirilmektedir. Bir teoriye göre, kuvars taneleri ile çevresindeki camsı faz arasında mevcut olan ısı genleşme katsayısı farkı (kuvars:

$\sim 23 \times 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$; camsı faz: $\sim 3 \times 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$) nedeniyle pişirim sonrası soğuma esnasında matriste kalıntı gerilmeler oluşmaktadır. Bu gerilmeler, kuvars çevresinde mikroskobik düzeyde basma gerilmesi yaratarak çatlak ilerlemesini baskılamakta ve dolayısıyla mukavemeti artırmaktadır [10]. Ancak bazı çalışmalarda, bu durumun ters etkiler de yaratabileceği, yani kalıntı kuvars miktarının artmasının belirli bir seviyeden sonra yapıda içsel çatlaklara neden olarak dayanımı düşürebileceği bildirilmektedir [11].

Kuvars tanelerinin tane boyutunun, bünyenin mukavemeti üzerinde doğrudan etkili olduğu bilinmektedir. Mattyasovzky-Zsolnay'ın çalışmasına göre, kuvars tanelerinin ideal boyutu yaklaşık 10–30 mikron aralığında olduğu görülmektedir. Bu aralık dışında kalan boyutlar, örneğin çok ince taneler, camsı faz içerisinde kolayca çözünerek kristalin mukavemet katkısını azaltırken; çok iri taneler ise çatlak oluşumuna neden olarak ürün güvenliğini tehdit edebilmektedir [12]. Bu nedenle yapılan kompozisyon çalışmalarında kullanılan kuvarsın miktarı kadar tane boyutunun da optimize edilmesi gerekmektedir.

Camsı faz miktarı da yapının mekanik özelliklerini etkileyen bir başka önemli faktördür. Camsı faz oranı arttıkça yapı daha amorf bir hale gelmekte, bu da yapının kırılma tokluğunun düşmesine neden olmaktadır. Literatürde, camsı faz oranındaki artışla birlikte hem Young modülü hem de mekanik mukavemetin azaldığına dair bulgular mevcuttur [13]. Bu nedenle camsı faz oranının kontrollü tutulması, seramik ürünlerin hem dayanımı hem de uzun ömürlü kullanımı açısından kritik bir parametre olarak değerlendirilmektedir. Ayrıca, porozite de mukavemet üzerinde doğrudan bir etkiye sahiptir. Porozitenin artması, özellikle elastik özellikleri ifade eden Young modülünde azalmaya neden olmaktadır. Ancak aynı porozite oranına sahip yapılar arasında, daha küçük çaplı ve homojen dağılmış gözenekler, mekanik özellikleri olumlu yönde etkileyebilmektedir. Bu durum, iç gözenek yapısının ve dağılımının mekanik davranışlar üzerindeki önemini vurgulamaktadır [14].

Sonuç olarak, sağlık gereçleri üretiminde kullanılan seramik bünyelerin mekanik performansı; müllit ve kuvars fazlarının miktarı, dağılımı ve morfolojisi, camsı faz oranı ve porozite gibi birçok mikroyapısal parametreye bağlıdır. Bu bileşenlerin oranlarının dikkatle optimize edilmesi hem üretim verimliliği hem de nihai ürün kalitesi açısından büyük önem arz etmektedir. Deformasyon açısından bakıldığında ise; tam vitrifiye olmuş bir bünye ağırlıkça %50-70 civarında, FFC ürünlerde ise %20-30 oranında yüksek sıcaklıklarda viskoz bir sıvı olan cam fazı içermektedir. Piroplastik deformasyon, vitrifiye seramiklerin pişirim aşamasında, yüksek sıcaklıklarda oluşan viskoz cam fazının akışı ile

numune üzerine etki eden gerilimlerin birleşimi sonucu ortaya çıkan karmaşık bir olgudur. Bu süreçte, cam fazının yüksek sıcaklıktaki hareketi hem şekil kontrolü hem de ürün kalitesi açısından kritik bir öneme sahiptir. Öncelikle, düz formu ürünlerin refrakter kalıp yüzeyine uygun şekilde biçimlenmesini sağlarken; aynı zamanda desteksiz pişirimlerde istenmeyen sürünme davranışlarına neden olmaktadır. Bu nedenle, piroplastik deformasyonun kontrol altına alınabilmesi için sürünme hızını etkileyen kompozisyon, mikroyapı ve diğer yapısal parametrelerin ayrıntılı şekilde tanımlanması büyük önem taşımaktadır. Zira vitrifiye seramik üretiminde sıklıkla karşılaşılan bu deformasyon türü, yüksek oranlarda ürün kaybına yol açarak üretim verimliliğini olumsuz yönde etkileyebilmektedir.

Piroplastik deformasyonu minimuma indirmek için birçok çalışma yapılmış ve vitrifiye seramik bünyelerin piroplastik deformasyonunun kompozisyon ve yapı ile ilişkilendirilmesi için birçok ölçümden faydalanılmıştır. Yüksek sıcaklıklarda istenmeyen şekil değişimlerine karşı elde edilen direnç, malzemenin mikroyapısı ile ilişkilendirilmektedir. Piroplastik deformasyonda bünyede oluşan amorf fazın minimize edilmesi gerekmektedir. Ancak amorf fazların kristalin fazları iyi ısıtılmasından dolayı, bu tip tane sınırlarının yüzey enerjisi genellikle kristal/kristal sınırına göre daha düşüktür. Bu nedenle amorf faz çok küçük miktarlarda olsa bile, tüm mikroyapıda süreklilik göstermektedir. Bu da tanelerin kolayca kaymasına müsaade ederek piroplastik deformasyonu ortaya çıkarmaktadır. Deformasyonun önemli bir bölümü, seramik malzemenin olgunlaşma sıcaklığının altında gerçekleştirilen pişirim sürecinde, kararsız hal bölgesinde meydana gelmektedir. Ortaya çıkan bu durumun, pişirim esnasında mikroyapıda meydana gelen gelişmelerle birlikte oluşan yapısal heterojenliklere bağlı olduğu düşünülmektedir. İkinci bir deformasyon süreci ise, malzemenin olgunlaşma sıcaklığına ulaştığı ve kararlı hale geçtiği koşullarda gözlemlenmektedir; bu süreç genellikle kararlı hal sürünmesi olarak tanımlanmaktadır. Bu sıcaklık aralığında, kristalin fazlardan özellikle müllit miktarının sabit kaldığı belirlenmiştir. Bu da mikroyapının olgunlaşma sıcaklığına ulaşıldığında yapının tamamlandığını ve yapısal stabilitenin sağlandığını göstermektedir [5,15].

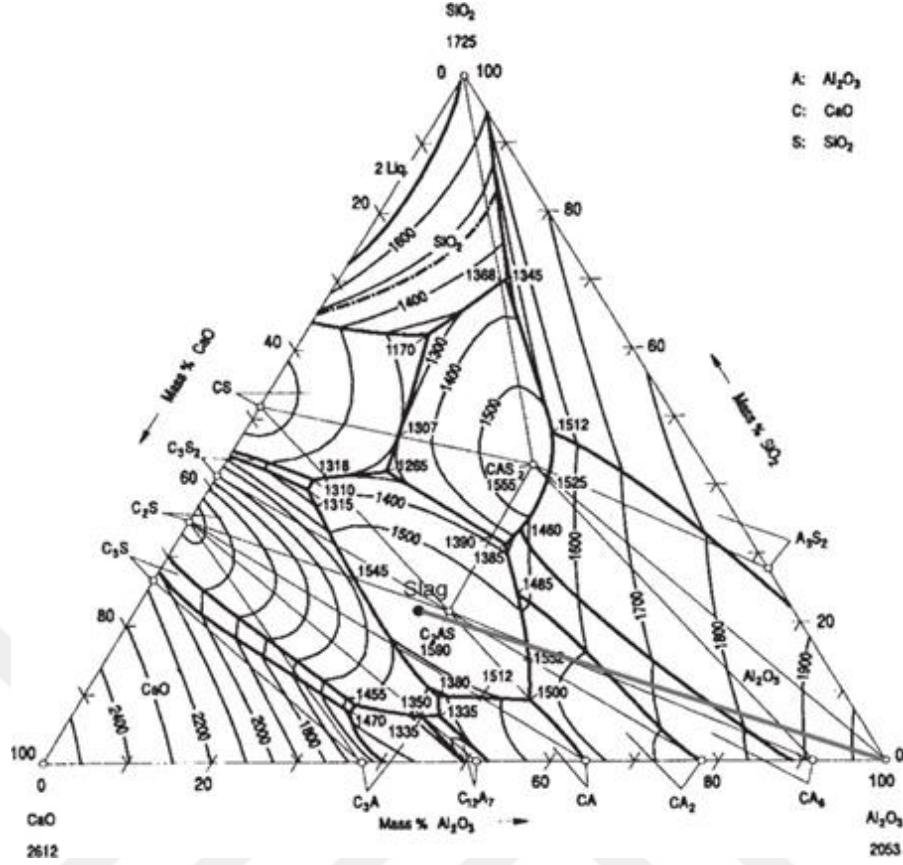
Sağlık gereçlerinde bünyede pişme sırasında cam yapıcı hammaddelerin kullanılmasından dolayı, camsı yapı ve kristal yapı oluşmaktadır. Bu camsı faz ürünün pişmesini ve yoğunlaşmasını sağlayarak, kristal yapı ise mukavemet ve deformasyonu ayarlayarak yapının ayakta kalmasını sağlar. Bu nedenle yapıda deformasyonu önleyecek

kristallerin olması ve ürün kalınlığının bu deformasyonu önleyecek şekilde kalın olması gerekmektedir. Ayrıca büyük ürünlerin deforme olmadan pişebilmesi için belirli bir kalınlıkta tutulması gerekmektedir. Kalınlığın düşürülmesi şu anda sağlık gereçleri firmalarında kullanılan standart reçetelerde belirli limitler içerisinde kalmaktadır. Standart bir FFC reçetesinde kuvars ve şamot belirli oranlarda ve yalnızca küçük farklılıklarla kullanılmaktadır. Ancak hammadde oranlarında yapılacak değişiklikler, ürün özelliklerini doğrudan etkilemektedir. Ürünlerin deforme olmadan pişirilebilmesi için sinterleme kinetiklerinin kontrol altında tutulması gerekmektedir. Bununla birlikte, standart hammaddelere ek olarak farklı katkı malzemelerinin ilavesiyle deformasyonun azaltılması mümkün olabilmektedir. Fakat bu ilavelerin ürünün sinterlenme sıcaklığını, reolojisini, kuru ve pişme mukavemetini ve diğer fiziksel özelliklerini değiştirmeyecek şekilde ayarlanması gerekmektedir. Dolayısıyla oldukça karmaşık bir işlemdir ve her bir parametrenin kontrol altında tutulması gerekmektedir.

Bu tez çalışmasında, standart FFC bünyeye göre daha düşük şamotlu veya şamotsuz reçeteler geliştirilmesi hedeflenmiştir. Çalışmalar kapsamında farklı şamot miktarı ile denemeler yapılarak daha düşük ve/veya aynı deformasyona sahip FFC bünyeler geliştirilmesi amaçlanmıştır.

2.1. Seramik Malzemelerde Anortit ve Müllit Oluşumunun Yapısal Etkileri

Anortit, kalsiyum-sodyumlu (plajiyoklaz) feldispat grubunun en değerli bileşenlerinden biridir. Doğal anortitin endüstriyel talepleri karşılamak için yüksek hacimlerde çıkarılması mümkün olmadığından anortit, sentetik olarak üretilmektedir. Anortitin sentezlenmesi için sol-gel, reaktif sinterleme gibi çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Saf anortitin ergime noktası $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ faz diyagramından da görülebileceği gibi $1553\text{ }^\circ\text{C}$ 'dir. Şekil 2.1'de yer alan faz diyagramında gösterildiği üzere anortit bu kadar yüksek derecelerde eridiğinden, anortitin düşük sıcaklıklarda üretilmesinde bazı zorluklar yaşanmaktadır [16,17,18].



Şekil 2.1. $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ faz diyagramı [19]

Anortitin kırılma indisi yaklaşık 1,57'dir. Bu kırılma indisi değeri, camı fazın kırılma indisine yakın bir değerdir [20]. Bu durum bünye ve sırda homojen bir görüntü elde edilmesine yardımcı olabilmektedir. Yapılan çalışmalarda anortit, su emmesi <0,5 olan porselen karo bünye geliştirme çalışmalarında wollastonit, alümina, kuvars, magnezyum hammaddeleri ile 1225°C de sinterlenmiştir. Geliştirilen pişmiş kompozisyonda kuvars, anortit, kristobalit, korundum ve camı faza rastlanılmıştır. Yapılan ilaveler ile bünyenin beyazlığı, transparanlığı ve mukavemetinde artış gözlemlenmiştir [21,22].

Müllit ise doğada nadir bulunmakla birlikte, adını Birleşik Krallık'taki Mull Adası'nda bilinen birkaç yataktan birinden almıştır. Bu nedenle, müllit seramiklerin sentezi için çeşitli üretim yöntemleri ve başlangıç malzemeleri kullanılmaktadır [23-25].

Müllit kristalleri, oluşum gösterdikleri mikro bölgelere bağlı olarak pişmiş mikroyapı içerisinde çeşitli boyut ve şekillerde bulunur [26]. Tip 1, Tip 2 ve Tip 3 olmak üzere üç çeşit müllit tanımlanmaktadır. Tip-1'de aspekt oranı düşük (1-3:1), kübik birincil müllit, Tip-2'de yüksek aspekt oranlı (3-10:1) ikincil müllit kristallerini oluşturken, Tip-

3 yüksek aspekt oranlı (30-40:1) ikincil müllit kristalleridir. Tip-3 müllitleri sıvı matriste Tip-2 üzerinden gelişmektedir. Dolayısıyla sıvı matrisin viskozitesi, sıcaklık ve ergitici kompozisyonuyla ilgilidir [27].

Müllit, vitrifiye seramiklerde kilden ve onun mikroyapının diğer bileşenleriyle etkileşiminden oluşmaktadır ve birbirine kenetlenen, dikensi morfolojisi ve oluşum mekanizmasının genişleyen doğası nedeniyle camsı matriste oluşan stres ile mekanik özellikler üzerinde önemli etkilere sahiptir [28-29]. Müllit genellikle $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ (ağırlıkça %71,83 Al_2O_3) bileşimi ile tanımlanmaktadır. Ancak, ticari olarak temin edilebilen müllit, katı çözelti yapısına sahip olup ağırlıkça %71-76 Al_2O_3 , %23-24 SiO_2 ve az miktarda TiO_2 , Fe_2O_3 , CaO ile MgO içermektedir [23].

Beyaz seramik bünyelerdeki kil bileşeninin pişirilmesinden elde edilen müllit, ilk oluşan müllit olduğu için birincil müllit olarak adlandırılırken, kil bileşeni ve herhangi bir akışkanın (tipik olarak alkali bakımından zengin feldispatların) etkileşiminden oluşan müllit ikincil olarak ifade edilir [28]. 2:1 (Primer) müllitin killerin ayrışmasından, 3:2 (sekonder) müllitin ise kilin flakslar ile etkileşiminden oluştuğuna inanılmaktadır [30]. Oluşan müllitlerin şekilleri arasında oluşan farklılık, bir zamanlar kil açısından zengin olan bölgede birincil müllit oluşumu ve potasyum kaynağı olan ve pişirim sırasında sıvı oluşumunu kolaylaştırmak için eritken görevi görerek daha uzun kristallerin kristalleşmesini sağlayan muskovit ve K-feldispat gibi safsızlıklar içeren bölgede çubuğumsu müllit oluşumu ile ilgilidir [28]. Müllit içeriği, morfolojisi ve yapısı sıcaklık ve zamanı kontrol ederek değişiklik gösterebilmektedir.

3. KULLANILAN HAMMADDELER VE ÖZELLİKLERİ

Seramik sağlık gereçlerinde kullanılan hammaddeler özlü ve özsüz olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Özlü hammaddeler su ile yoğrulabilen, dağılmadan kolaylıkla şekil verilebilen, kurutulduklarında verilen şekli muhafaza eden hammaddelerdir. Özlü seramik hammaddeleri kendi aralarında özlülük derecesine göre sıralanmaktadır. Bu sıralamaya etken olarak, hammaddelerin oluşum koşullarına göre içerdikleri tane irilikleri ve yoğrulmaları için alabildikleri su miktarı gösterilebilir [31]. Plastik hammadde örneklerinden biri olarak bentonit, yüksek su alma kapasitesi nedeniyle öne çıkmaktadır. Daha sonra özlü hammaddelere kil ve kaolenler örnek verilebilir.

Özsüz hammaddeler ise su ile şekillendirilemeyen sert hammaddelere verilen isimdir. Bunlara da kuvars, feldispat hammaddeleri örnek verilebilir. Seramik sağlık gereçlerine yönelik vitrifiye bünyeler, kil, feldispat ve kuvarsın bir araya getirilmesiyle hazırlanmakta ve genellikle üç bileşenli bünyeler olarak adlandırılmaktadır. Aşağıdaki Tablo 3.1’de özlü ve özsüz hammaddelere örnekler verilmiştir.

Tablo 3.1. Özlü ve özsüz seramik hammaddeleri

Özlü Hammaddeler	Özsüz Hammaddeler
Kil	Feldispat
Kaolen	Kuvars
Bentonit	Wollastonit
	Şamot

Seramik sağlık gereci bünyelerinin kompozisyonlarında yer alan hammadde oranlarına ilişkin yaklaşık değerler aşağıdaki Tablo 3.2’de sunulmaktadır.

Tablo 3.2. Reçetede kullanılan hammadde oranları (% ağırlıkça)

	VC Bünye	FFC Bünye
Kil (%)	20-37	20-30
Kaolen (%)	27-33	10-30
Kuvars (%)	20-38	0-7
Feldispat (%)	20-25	0-18
Şamot (%)	-	30-50

3.1. Kil-Kaolen Grubu

Seramik sağlık gereçleri üretiminde, genellikle “döküm çamuru” olarak adlandırılan sulu seramik süspansiyonları kullanılmaktadır. Bu üretim yöntemi, sıvı haldeki çamurun alçı kalıplara dökülmesi esasına dayanmaktadır. Üretim verimliliği ve ürün kalitesi açısından, döküm çamurunun sulu ortamda kolay çözünebilen ve yüksek yoğunlukta akışkanlık gösteren bir yapıya sahip olması büyük önem taşımaktadır. Bu nedenle, seramik sağlık gereçlerinde (SSG) uygun reolojik özelliklere sahip plastik hammaddelerin tercih edilmesi kritik bir gerekliliktir. Özellikle kaolinit, sahip olduğu fiziksel ve kimyasal özellikler nedeniyle SSG üretiminde en yaygın kullanılan killi mineral konumundadır. Döküm çamurunun ve yarı mamulün kalitesini, kullanılan kil ve kaolen grubu hammaddeleri tayin etmektedir.

Killer, dünya genelinde farklı coğrafi bölgelerde, oldukça değişken fiziksel ve kimyasal özellikler gösteren yataklar halinde oluşmaktadır. Bu oluşum, başta granit, feldispat ve pegmatit gibi birincil volkanik kökenli kayaçların, uzun jeolojik süreçler boyunca çeşitli dönüşümlere uğrayarak bozunması sonucunda meydana gelmektedir. Söz konusu bozunma; suyun mekanik hareketleri, rüzgârın aşındırıcı etkisi, buzul faaliyetleri ve yer kabuğındaki tektonik hareketlerin yanı sıra, hümitik asitler ve atmosfer kökenli bazı gazların kimyasal etkileriyle hızlanarak gerçekleşmektedir.

Kil kavramı; sedimantolojik olarak ana kayacın aşınması ve ayrışması sonucu ya yerinde ya da çökeltme havzalarında birikerek oluşan, 2 mikrondan daha küçük tane boyutuna sahip sulu alüminyum silikat bileşimli minerallerin karışımını ifade etmektedir. Seramik sağlık gereçlerinde kullanılan killer döküm özellikleri açısından genelde saflaştırılmış ve bir veya birkaç cins kilin birleştirilmesiyle oluşturulmuştur [32]. Kil SSG çamuruna genel olarak plastiklik, yaş ve kuru mukavemet sağlamaktadır. Killerin tane boyutu düştükçe plastiklik özelliği artmaktadır. Buda kuruma sırasında büyük ürünlerin içerisindeki nemi yavaş atmasına ve ani nem kaybından dolayı oluşabilecek kurutma çatlaklarına engel olmaktadır. Aynı zamanda üretimde şekillendirme aşamasındaki plastisiteyi sağlarken, döküm işlemi sonrasında kurutma sürecindeki ham mukavemeti ve bünyenin pişmiş rengini de önemli bir şekilde etkilemektedir.

Kil minerallerin kristal yapısı SiO_4 tetrahedralarından oluşan $(\text{Si}_2\text{O}_5)_n$ tabakasının alüminyum oktahedralarından oluşan $\text{AlO}(\text{OH})_2$ tabakası ile köşelerde birleşmesine dayanmaktadır. Kil minerali olan kaolinitte Si_2O_5 ve $\text{AlO}(\text{OH})_2$ tabakaları üst üste gelerek

aradaki oksijen iyonlarıyla $\text{Al}_2(\text{Si}_2\text{O}_5)(\text{OH})_4$ kompozisyonunu verecek şekilde birleşir. Alt yarısında Al-O, OH oktahedraları, üst yarısında Si-O tetrahedralarından oluşur [32].

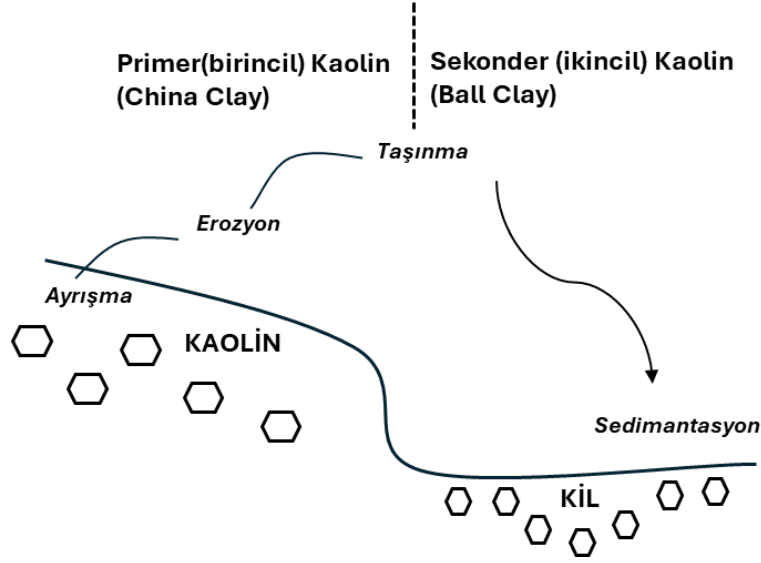
Killer kristal yapılarına göre sınıflandırılması aşağıdaki Tablo 3.3'te verilmiştir.

Tablo 3.3. *Killerin kristal yapılarına göre sınıflandırılması [33]*

Tabaka	Grup	Mineroloji
İki tabakalı olanlar	Kaolinit Grubu	Kaolinit, Dikit, Halloysit
Üç tabakalı olanlar	Smektit Grubu	Montmorillonit, Bedielhit, Vermiküllit
Dört tabakalı olanlar	Klorit Grubu	Klorit
Zincir yapısı olanlar	Sepiyolit	Sepiyolit, Atapulgit, Paligorsgit

Kil kitlelerini oluşturan mineral tanelerini çevreleyen ve taneler arasındaki boşlukları dolduran suya gözenek suyu, absorpsiyon suyu veya serbest su adı verilir. Kil 100–110°C sıcaklıklara ulaştığında bu su ortamdan uzaklaşır. Killer 400–700°C sıcaklık aralığında ısıtıldıklarında, kimyasal formüllerinde yer alan kristal suyu kaybederler ve bunun sonucunda kristal yapılarında önemli değişimler meydana gelmektedir. Kristal suyun uzaklaşmasıyla gerçekleşen endotermik ve ekzotermik reaksiyonlar oluşur. 900°C ve daha yüksek sıcaklıklarda ise, killer kristal yapılarını tamamen kaybederek amorf bir yapıya dönüşür. Isıtma süreci boyunca su kaybı nedeniyle killerde hacim ve yoğunlukta azalma gözlemlenmektedir.

Kaolinit kullanım alanı en geniş olan kil mineralidir. Kaolin, kil mineralleri sınıflandırması içinde bir grup kil mineraline verilen isimdir. En önemli minerali Kaolinit ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$) olan grubun diğer mineralleri dikit, nakrit ve halloysiddir [34]. Oluşumlarına göre kaolenler birincil havzalardan, killer ise ikincil havzalardan gelmektedir. Kaolenler ve killer doğal yapısından dolayı farklı tane boyutlarına sahiptirler. Killer aşınma, taşınma, bozunma gibi doğal olaylarla taşınırken daha ince taneli yapıya sahip olurken, kaolenler primer havzalardan oluştuğu için tane boyutları daha iri bir yapıya sahiptir. Aşağıdaki Şekil 3.1.'de kil ve kaolenlerin oluşumları gösterilmiştir.



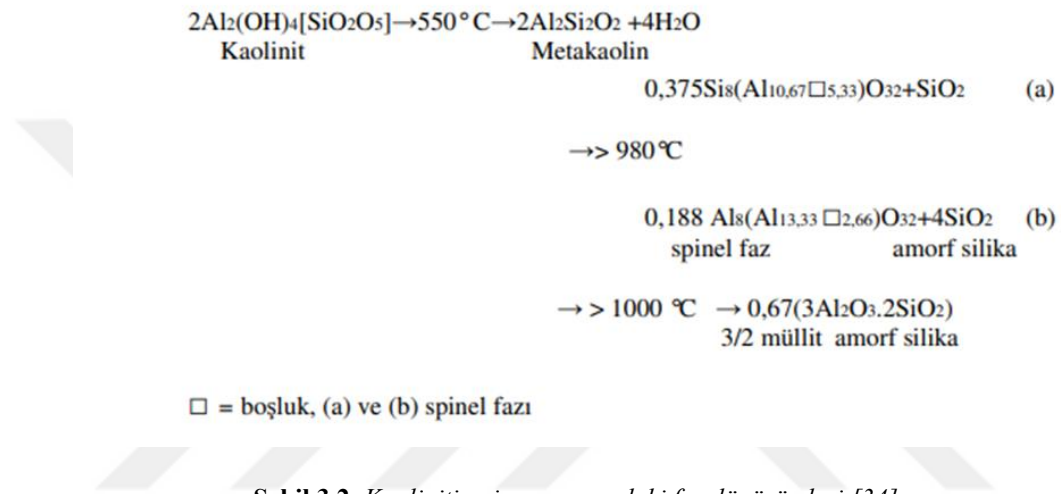
Şekil 3.1. Kil ve kaolen oluşum aşamaları

Kaolenin erozyonu, doğal süreçlerin bir sonucu olarak minerallerin fiziksel ve kimyasal değişimlerine yol açmaktadır. Kaolen, alüminyum silikat içeren bir mineraldir ve özellikle asidik koşullar altında ve suyun etkisiyle zamanla kimyasal ayrışma süreçlerine tabi tutulmaktadır. Bu ayrışma süreci, kaolenin yapısındaki silika (SiO_2) ve alümina (Al_2O_3) bileşiklerinin serbestleşmesine ve daha küçük boyutlu partiküllerin oluşmasına neden olmaktadır. Aşındırılan kaolen, mineral yapısındaki kalsiyum, magnezyum ve potasyum gibi elementlerin çözünmesiyle yeni minerallerin, özellikle kil minerallerinin oluşumuna zemin hazırlar. Montmorillonit, illit ve kaolinit, kil minerallerinin başlıca bileşenleri arasında yer alırken, bu minerallerin oluşumu, kaolenin aşındığı ortamda suyun, asidik maddelerin ve oksijenin etkisiyle gerçekleşmektedir. Bu fiziksel, kimyasal ve çevresel etkiler de kilin mineralojik ve reolojik özelliklerini etkileyen temel faktörlerdendir.

SSG çamurunda kaolenler iri taneli yapılarından dolayı killere göre daha az plastiklik özelliği vermektedir. Kaolenler SSG çamuru için ana alümina kaynağıdır ve bu alümina sayesinde çamurdaki deformasyon oranı azalmaktadır. Yapısal olarak killerden daha yüksek saflık içerdiklerinden, ateşe dayanımları killere göre daha yüksektir. Çamurun kalınlık kazanması, bünyedeki kaolen miktarının artmasıyla birlikte artış göstermektedir. Kaolenin yüksek sıcaklıkta oluşturduğu en önemli faz müllit ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$)'dir. Müllit fazı, 950°C 'nin üzerinde başlayıp, 1400°C 'ye kadar devam etmektedir ve silikanın alümina ile tepkimesi ile oluşmaktadır. Müllit genel olarak geniş

ve kristalleşmiş kaolinitin yaklaşık 1000°C 'nin üzerindeki sıcaklıklarda reaksiyonları sonucunda oluşur [34]. Ayrıcı müllitik yapının, bünyedeki pişmiş mukavemet üzerinde büyük bir etkisi bulunmaktadır.

Kaolenler SSG çamurunun şekillendirilmesi sırasında optimum kalınlık almayı ve SSG çamurunun pişmesi sırasında meydana gelen vitrifikasyonda (camlaşma), minimum genleşmeye yardımcı olmaktadır. Aşağıda yer alan Şekil 3.2, kaolenin pişme esnasında geçirdiği faz dönüşümlerini göstermektedir.



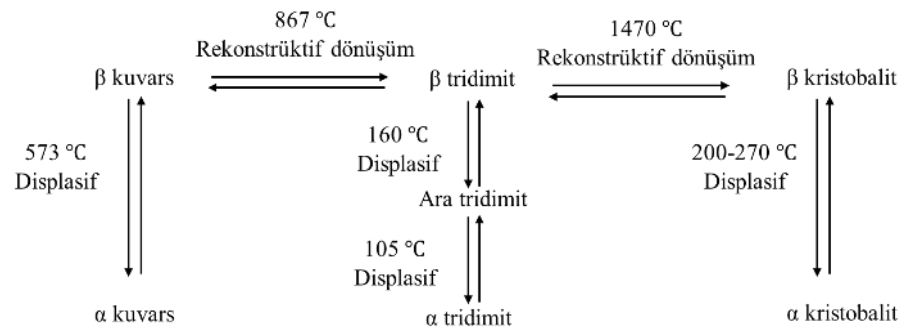
Şekil 3.2. Kaolinitin pişme sırasındaki faz dönüşümleri [34]

3.2. Kuvars

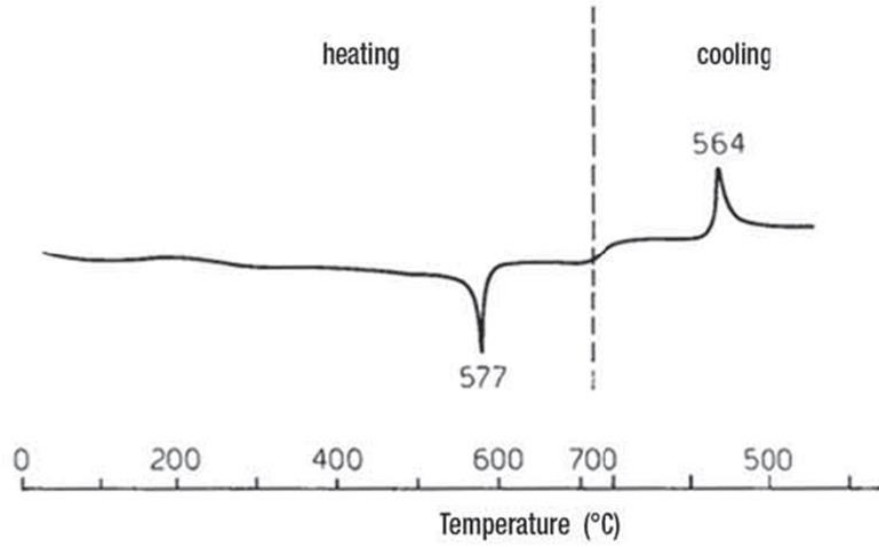
Kuvars seramik bünyelerinde dolgu hammadresi olarak da tanımlanmaktadır. SiO₂ bileşimiyle tanımlanan kuvars minerali, yer kabuğunda doğal olarak en yaygın şekilde bulunan silikatlardan biridir ve küresel kabuk yapısının yaklaşık %28'ini oluşturmaktadır. Seramik çamurunda ise kuvars, bünyenin içerisine belirli oranlarda ilave edildiğinde sert yapısının verdiği özellik sayesinde iskelet görevi görerek yapıyı ayakta tutmaktadır. Ayrıca çamurun plastikliğini azaltıcı etkisi de bulunmaktadır. Reçetede oranı arttıkça çamurun bağlayıcılığı ve kuru direnci de azalmaktadır. Vitrifiye sektöründe kuvars genel olarak öğütülmüş olarak kullanılır ve genellikle 63 mikron altı ve düşük demir oksit (Fe₂O₃) içerikli olarak tercih edilmektedir. Bazı endüstriyel işletmelerde öğütme işlemini değirmenlerde yapmamak için mikronize kuvars kullanımı da yaygın olarak tercih edilmektedir. Kullanılan kuvars hammadresinin tane boyutu dağılımı çamurun özelliklerini etkilemektedir. Seramik Sağlık Gereci üretiminde kuvars kullanımında dikkat edilmesi gereken unsurlardan en önemlisi kuvarsın mineralojik

olarak içerdği safsızlıklar ve SiO₂ oranıdır. Döküm çamuru hazırlarken seçilerek kullanılacak olan kuvars hammaddesi, en az %96 kuvars (SiO₂) ve en fazla %0,2 Fe₂O₃ ve TiO₂ bulundurulmalıdır. Bünye içerisinde yer alan silika, kurutma sürecinde suyun dışarı atılabilmesi için boşluk oluşturarak kuruma sürecini de kolaylaştırır ve bu sayede bünyenin kuruma esnasındaki küçülme oranını ve plastiklik özelliklerini düzenlemektedir. Ayrıca, pişirme sonrası elde edilen ürünün beyazlık derecesinin kontrol edilmesinde de önemli bir rol üstlenmektedir. Ancak, silikanın en kritik işlevlerinden biri, bünyenin ısı genleşme davranışını dengeleyerek, yüksek sıcaklıklara karşı boyutsal kararlılığı sağlamasıdır.

Saf kuvars pişirmede çeşitli faz dönüşümlerinde bulunmaktadır. Kuvarsın oda sıcaklığındaki kararlı hali α -kuvarstır. α -kuvars 573°C de β -kuvarsa dönüşmektedir. Dönüşüm tersinir olup %1,6 hacimce büyüme ile sonuçlanır. Bu geçiş sıcaklığı pişme sırasında hacimsel genleşme ve soğuma sırasında büzüşmeye neden olduğu için yavaş geçilmelidir. 867°C de ise kuvars tridimite dönüşür. Bu faz dönüşümü, geri dönüşümü olmayan bir reaksiyondur. Bu reaksiyon ile kimyasal bağlar kırılır ve yeni kimyasal bağlarla bir yapı oluşmaktadır. 1470°C de ise yapı kuvarsın yüksek sıcaklık formlarından biri olan kristobalite dönüşür. Kuvarsın sıcaklık ile meydana gelen geri dönüşümlü ve dönüşümsüz reaksiyon aşamaları seramik pişirim sürecinde çok önemlidir. Dönüşüm sıcaklıklarında hacim değişimi olacağından, pişirim sırasında kuvarsın faz dönüşümleri gerçekleştirdiği bu bölgelerde ani sıcaklık değişimlerinden kaçınılmalıdır [35]. Aşağıdaki Şekil 3.3'te silikanın polimorfik formları ve Şekil 3.4'te kuvarsın ısıtma sırasındaki endotermik ve ekzotermik reaksiyonları gösterilmektedir.



Şekil 3.3. Silikanın polimorfik formları [6]



Şekil 3.4. Bir kuvars örneğinde ısıtma sırasında endotermik, soğutma sırasında ekzotermik etkileri [31]

Dilatometre ile ısıtma sırasında yaklaşık 573 °C’de gözlenen keskin genleşme, α -kuvars $\rightarrow$ β -kuvars allotropik dönüşümüne karşılık gelir. Benzer biçimde, yaklaşık 220 °C civarında α -kristobalit $\rightarrow$ β -kristobalit dönüşümü belirgin bir boyutsal değişime yol açar. Vitrifiye seramik gövdelerde matrise dağılmış serbest kuvars taneleri, bu faz dönüşümleri ve kuvarsın yüksek/anizotropik ısı genleşme davranışı nedeniyle cam fazı ile genleşme uyumsuzluğu oluşturur; bunun sonucu olarak özellikle soğuma evresinde artık çekme gerilmeleri birikir ve çatlak oluşumu tetiklenir. Çatlak şiddeti başlıca kuvars tane boyutuna ve soğutma hızına bağlıdır. Endüstriyel uygulamada, pişirim ve soğutma rejimleri, bu kritik dönüşüm sıcaklık aralıklarının yavaş ve kontrollü geçilecek şekilde tasarlanarak, gerilmeler en aza indirilir ve çatlama riski sınırlandırılır [31].

3.3. Feldispat

Feldispatlar teknik olarak sodyum, potasyum, kalsiyum ve baryumun alümina silikatları olarak tanımlanmaktadırlar. En yaygın olarak, feldispatlar, sırasıyla soda feldispat, potas feldispat ve kireç feldispat olarak bilinen üç sınırlayıcı bileşiğin, $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$, KAlSi_3O_8 ve $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ ’in, katı çözeltileri olarak kabul edilir [36]. Alkalili hammaddeler olarak da adlandırabildiğimiz feldispatlar, doğada saf halde bulunmazlar, kimyasal olarak Na-K-Ca elementlerini içeren ve farklı minerallerle bir arada bulunarak seramik bünyelerin ihtiyaçlarını karşılamaktadırlar.

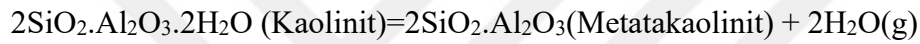
Seramik bünyelerinde feldispat, pişme öncesinde bünye plastikliğini düşürdüğünden dolayı sert plastik olmayan hammaddeler arasına girmektedir. Seramik bünyelerin pişmesi sırasında ise yapıda eriyerek gözeneklerin arasına dolar ve poroziteyi azaltır. Bünyenin su emme değerini düşürürken, pişme küçülme ve deformasyonunu arttırmaktadır. Çamurluk hammadde olarak kullanıldığında içeriğindeki Na_2O ve/veya K_2O oranının yüksek, Fe_2O_3 ve TiO_2 gibi safsızlık oranının ise düşük olması istenilmektedir. Feldispat, düşük erime sıcaklığına sahip bir mineral olarak pişirim sürecinde akı görevi görür ve seramik malzemelerin yoğunlaşmasında kritik bir rol oynar. Sinterleme sırasında oluşan sıvı faz, anortit ve müllit gibi kristallerin büyümesini destekler ve bu kristallerin gövde yapısı içindeki dağılımını iyileştirir. Özellikle müllit kristalleri, seramiğin mekanik dayanımını artırırken, sıvı faz anortit oluşumuna katkıda bulunarak gözeneklerin kapanmasını ve gövdenin yoğun bir yapı kazanmasını sağlar [26]. FFC bünyelerde deformasyonun minimum düzeyde tutulması hedeflendiğinden, bu hammaddenin reçetede kullanım oranı diğer bileşenlere kıyasla daha düşüktür. Feldispat, sert ve özgül bir yapıya sahip olması nedeniyle, üretim sürecinde öğütme işlemine tabi tutularak kullanımı sağlanmaktadır.

3.4. Şamot

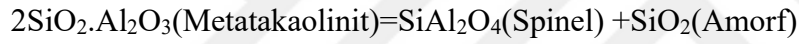
"Grog", "ateş kumu" veya "ateş kili" olarak da bilinen şamot, içeriğindeki yüksek oranda alümina içeren kalsine kil veya kaolendir. Belirli partikül boyutlarına göre öğütülmeden ve elekten geçirilmeden önce, seçilen ateş killerinin döner bir fırında 1400°C ile 1600°C arasındaki sıcaklıklarda pişirilmesiyle üretilir [http-1]. Şamot üretiminin yüksek sıcaklıkta gerçekleşmesi aynı zamanda fazla enerji harcanmasına ve yüksek karbon emisyonuna neden olmaktadır. Kalsine kaolen, kaolenin ısıl işleme tabi tutulmasından dolayı refrakter özellik kazanan bir üründür. Refrakter özelliğinden dolayı FFC bünyelerde kullanıldığında pişme sıcaklığı kalsine kaolenin reaksiyon sıcaklığı için düşük olduğundan deformasyon oranı düşük kalmaktadır. Farklı tane boyutlarında ticari olarak bulunan şamot, ön pişirilmiş kil esaslı bir agrega olup tane boyut aralığı kütlege $\geq 90\%$ 'ı 3,15 mm elek altıdır. Kil/kaolenlerin döner fırında pişirilmesi sırasında hammaddenin içerisinde bulunan sülfat ve karbon bileşikler uzaklaşmaktadır. Kimyasal reaksiyonlar sonucunda müllit, kuvars, kristobalit ve camsı faz oluşmaktadır [37]. Bu oluşan fazlardan en önemlisi müllit fazıdır. Müllit fazı, kimyasal ve ısıl stabilite, düşük ısıl genleşme, düşük dielektrik sabiti gibi mükemmel yüksek sıcaklık özelliklerine sahip

bir alüminosilikat refrakter mineraldir [40]. Müllitin yapı ve işlev özellikleri, kullanılan hammaddelere ve sentez metotlarına bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Kaolin, genellikle kaolinitten türetilen ve düşük maliyetli bir başlangıç malzemesi olarak ısıyla işlenerek müllite dönüştürülebilir. Genel olarak, kaolinitin 450-600 °C arasında hidroksil gruplarını kaybederek düzensiz bir yapı olan metakaolinit oluşturduğu kabul edilir. Metakaolinit, 980 °C'de kristalin müllit ile birlikte spinel fazına dönüşür. Kristalin müllit ise genellikle 1250 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda oluşmaktadır. Başlangıçta müllit oluşum sırasında alümina bakımından zengindir, artan sıcaklıklarda $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ kompozisyonuna yaklaşmak için giderek yapısındaki silika miktarı artar [34]. Şamotun yüksek sıcaklıklarda pişirilerek elde edilmesiyle bir takım faz dönüşümleri gerçekleşmektedir:

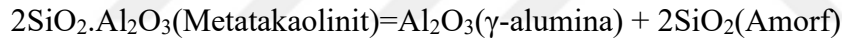
Sıcaklık (°C) = 400-500 °C'ye ulaşıldığı zaman;



Sıcaklık (°C) = 980 °C'de;



ya da



Sıcaklık (°C) > 1100 °C'de;

$\text{SiAl}_2\text{O}_4(\text{Spinel}) + \text{SiO}_2(\text{Amorf}) = 1/3(3\text{Al}_2\text{O}_3.2\text{SiO}_2)(\text{Müllit}) + 4/3 \text{SiO}_2 (\text{Amorf})$ faz dönüşümleri gerçekleşir [34].

Seramikler için tipik şamot, minimum %40 alümina, minimum %30 silika, maksimum %4 demir oksit ve %2'ye kadar kalsiyum oksit ve magnezyum oksit kombinasyonu içermektedir. Partikül boyutu dağılımı, sağlık gereçleri hazırlamak için kullanılan diğer hammaddelerden genellikle daha kabadır [http-1]. Çamura ve ürüne bağlı olarak kullanılan şamotun tane boyutu değişiklik göstermektedir [38]. Vitrifiye ürünlerin 1200°C-1250 °C civarındaki sıcaklıklarda pişirimi gerçekleştirildiğinden, şamot SSG pişiriminde ateşleme aşamasında inettir ve daha düşük büzülme, daha iyi çatlama direnci ve daha düşük deformasyona sahip ürün üretmek için bir iskelet gibi davranır. Kuvars yerine şamot hammaddesi kullanılan bünyelerde ısıl genişleme katsayısı düşerek, sır-bünye arasında oluşabilecek uyumsuzluklardan doğan çatlakların önlenmesi mümkündür.

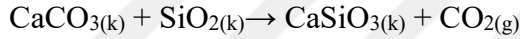
Şamot aynı zamanda opak sır ve fritlerde çeşitli amaçlarda kullanılmaktadır. Sırda kullanımı; iyi bir alümina kaynağı olmasından dolayı, yüzeyde oluşan pinhol (iğne deliği)

hatasını azaltmak, pişirim öncesi ham sırda kuru küçülmeyi düşürerek toplama hatasını azaltmak, ham sırn bünye kaplama özelliklerini geliştirmek, kimyasal ve aşınma dirençlerini iyileştirmek şeklinde özetlenebilir [39]. Aynı zamanda yapısındaki müllit sayesinde yüksek sıcaklıklarda kararlı yapısıyla sırda opaklığı da olumlu yönden etkilemektedir [28].

3.5. Wollastonit

Wollastonit $\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ bileşimindedir ve içeriğinin bileşimi %48,25 CaO ve %51,75 SiO_2 'dir. Seramik çamur ve sırlarda kullanılabilen wollastonit çamurda eriticilik özelliği göstererek pişme sıcaklığını düşürür. Karbonat içeren minerallere karşın wollastonit pişme sırasında gaz çıkarmadığından tek pişirim çamurlarında düşük sıcaklıklarda başarı ile kullanılmaktadır. Ayrıca wollastonit çamurları, sıcaklık değişimlerine karşı dirençlidir [40].

Wollastonit, 1700'lerin sonuna doğru İngiliz kimyager olan William Hyde Wollaston tarafından keşfedilmiştir. Wollastonit, kireçtaşı ve kuvars arasında oluşan, aşağıda gösterilen, metamorfoz reaksiyonu sonucu oluşur [40].



Wollastonit, yüksek sıcaklıklarda CaO (kalsiyum oksit) kaynağı olarak işlev görür ve diğer geleneksel CaO kaynaklarının aksine pişirim sırasında gaz çıkışına neden olmaz. Ayrıca, yapısında bulunan SiO_2 nedeniyle etkin bir silika kaynağıdır. Genel olarak SSG çamurunda kalsiyum oksit ve silika kaynağı olarak katıldığında çatlamayı, sıkışmayı, kırılmayı önlemektedir. Bünyeye, genel olarak mukavemet kazandırmakla birlikte, iğnemsî kristal yapısı sayesinde özellikle kuru mukavemet üzerinde katkı sağlamaktadır. Bu katkı, bünyenin çatlama direncini yükseltmektedir. Ayrıca reçetede kullanım miktarı arttıkça fırın süresinde kısaltmalar da gözlenmektedir.

Reçetede yüksek oranlarda kullanıldığında, kuvars miktarında azaltıma gidilerek toplam silika dengesi sağlanabilir. Pişirim sürecinde, wollastonit içerisindeki CaO ve SiO_2 bileşenleri reaksiyona girerek kalsiyum silikat (CaSiO_3) gibi stabil fazların oluşumuna katkıda bulunur; bu durum, seramik bünyede hem faz dengesi hem de mekanik performans açısından önemli avantajlar sağlamaktadır.

3.6. Kullanılan Yardımcı Malzemeler

Döküm çamurlarının hazırlanması yalnızca öğütülmüş hammaddelerin su ile karıştırılmasıyla sınırlı değildir. Seramik sağlık gereçleri döküm çamurlarında şekillendirme esnasında akış ve diğer gerekli reolojik özellikleri elde etmek için farklı ilaveler kullanılmaktadır. Bunlar; sıvı/solvent ortam, deflokülan, ıslatıcılar, flokülanlar, plastikleştiriciler ve bakteri önleyici bazı katkılardır. Eğer çamur yalnızca su kullanılarak hazırlanırsa, çamurun istenilen şekle gelmesi için gerekli olan kıvamı elde edebilmek gerekir ve bunun içinde çamurun kütlece yaklaşık %50 oranında su içermesi gerekmektedir. Bu kadar yüksek oranda su ile hazırlanan döküm çamurunda ise şekillendirmede alçı kalıp problemleri ortaya çıkabilir. Bu nedenlerle, döküm çamurunun su içeriğinin mümkün olduğunca düşük tutulması tercih edilmektedir. Ağırlıkça %25–30 seviyelerine düşürülen su oranı, düşük miktarlarda deflokülan (genellikle ağırlıkça %0,2'yi aşmayacak düzeyde) ilavesiyle sağlanabilmektedir.

Kil minerallerinin reolojik özelliklerini kontrol etmenin en basit yolu, kullanılan katkı maddelerinin tanecikleri süspansiyonda çözündürme veya floküle etme eğilimlerine göre seçimidir. Bu bağlamda, vitrifiye üretim tesislerinde kil bazlı çamurların reolojik davranışını düzenlemek amacıyla en sık tercih edilen çözülme önleyici katkılar sodyum silikat ve/veya sodyum karbonattır.

Bu katkı malzemeleri genellikle çok küçük oranlarda kullanılmasına rağmen, proses açısından gerekli ilavelerdir ve genelde nihai üründe etkileri gözlemlenmemektedir. Döküm çamurunda kullanılan deflokulanlar; sodyum silikat, sodyum karbonat(soda), kalsiyum klorür, baryum karbonat gibi çeşitli elektrolitlerdir.

Genel olarak sodyum silikat, seramik sağlık gereci çamuruna ilave edildiğinde, çamuru döküme uygun akışkanlığa getirmektedir. Fazla ilave edilmesi durumunda ise, çamurun akışkanlığı çok fazla artacağı için çamurun kalıp içerisinde daha az kalınlık almasına neden olmaktadır. Az ilave edilmesi halinde ise, çamur istenilen akışkanlığa gelmeyeceği için çamurun kalıptan boşalmasında problemler yaşanabilmektedir.

Sodyum karbonat ise genel olarak SSG çamurlarında bulunan kil hammaddeleri içerisindeki karbonu harekete geçirdiğinden dolayı kilin plastik özelliklerini geliştirir. Soda ilavesiyle daha yumuşak bir döküm çamuru elde edilmektedir. Soda silikata göre daha uzun bir reaksiyon süresine sahiptir. Çamura daha fazla alkalilik sağladığından dolayı döküm çamurunda toplam kullanılması gereken deflokülan miktarını azaltabilmektedir.

Baryum karbonat ise, döküm çamuru içerisinde bulunan kil ve kaolenlerin yapısında bulunan sülfat ve klor tuzlarını etkilemektedir. Sülfat iyonları, yarı mamül kururken su ile birlikte yüzeye taşınır ve yüzeyde birikir. Bu da sır da toplama hatasına yol açabilmektedir. Sülfat tuzlarını yüzeye taşınmasını önlemek için çamura yaklaşık %0,1 kadar az bir miktar baryum karbonat ilave edilebilmektedir.

Kalsiyum klorür ise, çamurun dökümden sonra kuruma aşamasında ölçülen iç-dış sertliğini dengelemek için kullanılmaktadır. Döküm çamurunun iç-dış sertlik arasındaki optimum aralık her fabrikaya ve üretim şekline göre değişebilmektedir. İç-dış sertlik arasındaki mesafeyi yaklaştırmak için kalsiyum klorür ilavesi yapılabilir ve bu ilave çamura yumuşaklık vermektedir. Kalsiyum klorür bünye kompozisyonlarında fazla kullanıldığında çamurun çökmesine neden olabilmektedir.

4. SERAMİK SAĞLIK GEREÇLERİ ÜRETİM PROSESİ

Seramik bilimi, organik olmayan (inorganik) malzemelerden oluşan bileşimlerin çeşitli yöntemlerle şekillendirildikten sonra sırlanarak veya sırlanmadan, yüksek sıcaklıklarda pişirilerek sertleştirilmesi ve dayanıklılık kazandırılması sürecini kapsamaktadır. Geleneksel seramik anlayışı, temel olarak doğal hammaddelerin belirli işlemlerden geçirilmesiyle dayanıklı ürünler elde edilmesine dayanırken, günümüz teknoloji seramiklerinde üretim süreçleri bu klasik tanımdan önemli ölçüde farklılaşmıştır. Seramik ürünlerin üretiminde temel olarak kullanılan hammaddeler, doğada kayaların dış etkiler altında parçalanması sonucu oluşan kil, kaolen ve benzeri minerallerdir. Bu hammaddeler, yüksek sıcaklıklarda pişirilerek seramik ürünlere dönüştürülmektedir. Bu sebeple, seramikler halk arasında "toprak esaslı malzemeler" olarak da bilinmektedir. Geleneksel seramikler, doğrudan doğadan elde edilen hammaddelerin belirli bir tane boyutuna indirgenmesinin ardından uygun kompozisyonda karıştırılması, şekillendirilmesi ve daha sonra pişirilerek belirli bir mukavemet ve sertlik kazandırılması suretiyle üretilir. İhtiyaca bağlı olarak ürünlere sırlama ve dekorlama işlemleri de uygulanabilmektedir.

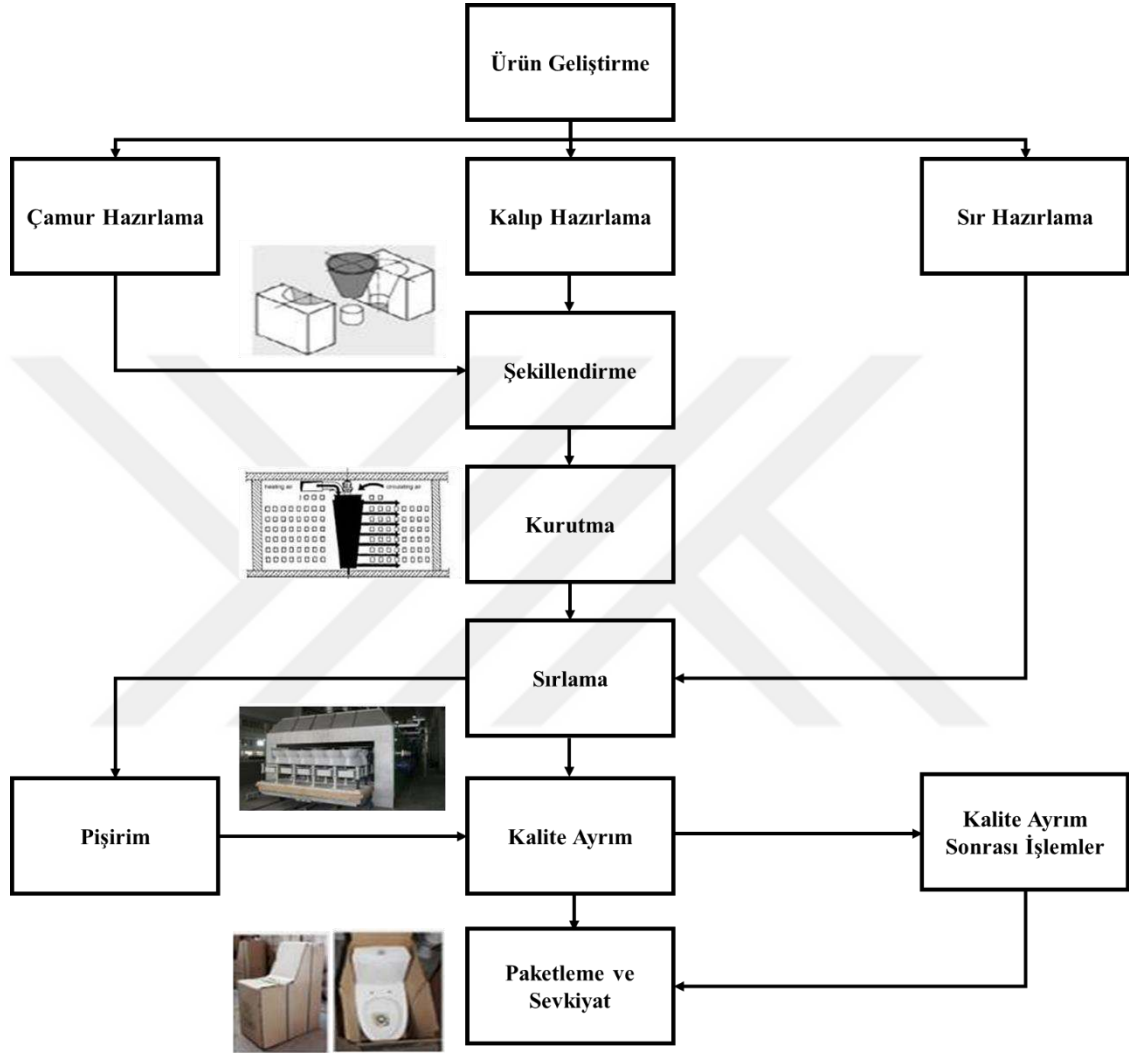
Vitrifiye seramikler (Seramik Sağlık Gereçleri – SSG), ısıtılma işlemi sonrası ince taneli, yüksek yoğunluklu ve düşük poroziteli bir yapı geliştiren, genellikle beyaz renkli, opak veya yarı saydam seramik türleridir. Yaklaşık 1250°C civarında gerçekleştirilen pişirme işlemi sonucunda ürünlerin yüzeyleri cam fazı içeren bir sır tabakası ile kaplanır. Seramik sağlık gereçlerinde kullanılan sır kil, feldispat, zirkon, kuvars gibi hammaddeler ile oluşturulurken bu sırnın sahip olması istenilen özellikler mevcuttur. Seramik sağlık gereçlerinin sahip olması gereken temel teknik özellikler şunlardır:

- Yüzeyin parlak, pürüzsüz ve gözeneksiz bir yapıda olması,
- Kir tutmaması ve kolay temizlenebilir özellik göstermesi,
- Düşük poroziteye bağlı olarak su emme oranının çok düşük olması,
- Koku yapmaması ve bakteri vb. organizmalarını barındırmaması,
- Aşınmaması ve uzun ömürlü olmasıdır.

Üretimde göz önüne alınan kriterler ise:

- Fonksiyonel olması,
- Standartlara uygun olması,
- Ergonomik ve estetik olmasıdır.

Bu özellikler, ürünlerin uzun ömürlü kullanımını, hijyenik koşullarda performans göstermesini ve estetik bir görünüm sunmasını sağlamaktadır. Seramik sağlık gereçleri üretim aşamaları Şekil 4.1’de gösterilmiştir.



Şekil 4.1. Seramik sağlık gereçleri proses akışı [41]

Seramik sağlık gereçleri üretiminde, ürün geliştirme süreci üretim prosesinin ilk adımlarından biridir. Bu süreçte yeni ürün tasarımı, ürün geliştirme birimi tarafından; müşteri talepleri, hedef pazar beklentileri ve güncel sektör trendleri göz önünde bulundurularak yürütölür. Geliştirilen ürünlerin hem fonksiyonel hem de estetik açıdan beklentileri karşılaması hedeflenirken, aynı zamanda üretim hattına teknik olarak uygun olması da temel gerekliliklerden biridir. Bu aşamadan sonra çamur hazırlama (FFC ve VC) aşamasına geçilmektedir. Çamur hazırlama işlemi ilk olarak hammadde stoklama ile başlamaktadır. Sevkiyatları tamamlanan hammaddeler büyük torba (big bag) halinde ya da depolarda rutubetleri bakıldıktan sonra depolanmaktadır. Rutubetleri bakılan hammaddeler reçetede ki oranlarına göre tartım bantlarıyla taşınarak değirmenlere ya da açıcılara aktarılır. Özsüz hammaddeler değirmenlerde öğütölür ya da mikronize olarak alınan özsüz hammaddeler açıcılara kil ve kaolenlerin ilavesinden sonra eklenir. Kil ve kaolenlerin açılması tamamlandıktan sonra her açıcıdan numune alınarak litre ağırlığı ve viskozite ölçümü yapılır. Reolojik olarak hazır hale gelmesi istenilen çamurda, öncelikle litre ağırlığı ayarlaması yapılmaktadır. Açıcıdan alınan numunenin litre ağırlığı ölçöldükten sonra istenen litre ağırlığı değeri ne getirmek için hesaplanan miktarda su ilavesi ve silikat ilavesi yapılmaktadır. İstenilen tiksotropi seviyesine ulaşan çamur eleklerden geçerek tanklara alınmaktadır.

Öğütölmüş ve uygun bileşimdeki seramik hammaddelerden hazırlanan karışımların, yüksek sıcaklıkta gerçekleştirilen pişirme işlemi sonucunda seramik bünyenin yüzeyinde cam benzeri bir yapı oluşturmasıyla ‘sır’ adı verilen kaplama meydana gelir. Seramik ürünlerin sırlanmasının temelinde iki ana amaç bulunmaktadır. Bunlardan ilki, genellikle gözenekli ve mikroskobik düzeyde pürüzlü bir yapıya sahip olan seramik bünyenin, gözeneksiz ve düzgün bir cam tabakası ile kaplanarak daha hijyenik, kolay temizlenebilir ve kullanım açısından daha elverişli hale getirilmesidir. Sır hazırlamada genellikle, kuvars, feldispat, çinko oksit, zirkon, dolomit gibi hammaddeler kullanılmaktadır. Daha sonra, reçetede belirtilen oranlarda hassas tartımı yapılan hammaddeler mikser e veya açıcılara alınarak işlenir. Elde edilen sır kompozisyonu, öğütme ve eleme işlemlerinden geçirilerek homojen bir yapıya kavuşturulur. Genellikle bakteri önleyiciler sır hazırlama işlemi sırasında sır kompozisyonuna eklenmektedir. Değirmenlerde öğütme işlemi karıştırılan malzemenin şarjlanması ile başlar. Öğütme işlemi üretilen sırn özelliğine göre ve reçetede ki hammaddelerin çeşitlerine ve miktarlarına göre farklı sürelerde olabilmektedir. Öğütme işlemi bittiğinde

değirmenlerden numune alınır ve elek analizi ve yüzey özellikleri için teste verilmektedir. Uygun olan sır kompozisyonu üretim için hazır olarak kullanılmaktadır.

Seramik sağlık gereçlerinde kalıp hazırlama bölümünde ise üç farklı tip kalıp bulunmaktadır. Bu kalıp türleri; teksir kalıp, alçı kalıp ve reçine kalıptır. Teksir kalıp üretimde kullanılan alçı ve reçine kalıpları üretmek için kullanılır. Ana kalıp olarak da adlandırılmaktadır. Alçı kalıplar, geleneksel şekillendirme hatlarında kullanılan ve görece düşük üretim kapasitesine sahip kalıplardır. Bu tür kalıplar, ortalama olarak 80 ila 100 çevrimlik bir kullanım ömrüne sahiptir. Alçı kalıp ile şekillendirme de kapiler etki ile çamurun içerisindeki su alçı tarafından çekilir. Kapiler etki; çamur süspansiyonundaki sıvı fazın, alçı kalıbın gözenekli yapısı tarafından yüzey gerilimi etkisiyle emilmesini sağlayan fiziksel bir olaydır. Üst üste yığılan çamur kompozisyonu suyun çekilmesiyle ürünü oluşturur. Ürün çıkarıldıktan sonra kalıpların kurutulması gerekmektedir. Bundan dolayı bir günde genellikle alçı kalıplarda maksimum 1-2 döküm yapılabilir. Polimer esaslı kalıplar (reçine kalıp) ise basınçlı şekillendirme hatlarında kullanılmaktadır. Yüksek üretim hacmine sahiptirler ve günde 10-18 çevrime kadar kullanılabilirler. Çamurun içindeki su, kalıp içine basınçlı hava verilerek uzaklaştırılır. Basınç ile suyun uzaklaştırılmasından dolayı reçine kalıpların kurutulması gerekmemektedir. Bu özelliklerinden dolayı, yüksek hacimli seri üretilecek olan ürünlerde basınçlı kalıplar tercih edilmektedir.

Şekillendirme işlemi sonrasında ürün 12-13 mm'lik kalınlık aldığında yaş kütle kalıptan alınmaktadır. Bu aşamada ürün içerisinde yaklaşık %18 oranında nem bulunmaktadır. Ürünlerin pişirim esnasında yüksek nem içeriğinden dolayı fırında hasara uğramaması için nemin %1'in altına düşürülmesi gerekmektedir. Bu nedenle de ürünler yaklaşık 70°C-90°C'de kurutma işlemine tabi tutulmaktadır. Kurutma süreci; regalde bekletme, taşıma, ortamda bekletme ve kurutma fırınında bekletme olmak üzere dört ana aşamada gerçekleştirilmektedir. İlk üç aşama toplamda yaklaşık üç gün sürerken, kurutma fırınında bekletme işlemi ise yaklaşık 12 saat devam etmekte ve 70°C-90°C sıcaklık aralığında gerçekleştirilmektedir.

Daha sonra ürün çeşidine ve istenilen siparişe uygun olarak ürünlerde, sırlama işlemi yapılmaktadır. Daldırma, püskürtme(spreyleme), akıtma ve elektrostatik sırlama gibi farklı sırlama yöntemleri bulunmaktadır.

Pişirme işlemi ise tünel tipi fırınlarda yapılır. Tünel fırınlar yaklaşık 90 m ile 120 m olan uzunluğunda olabilen, kapalı ve açık alevli olmak üzere iki farklı çeşittir. SSG

pişirim süresi yaklaşık 16-18 saat ve 1200°C-1250°C sıcaklıklarında gerçekleşmektedir. Ürünün pişirim eğrisi, pişirme çevrimi süresince sıcaklığın zamana göre değişimini yansıtmaktadır. Pişirim işlemi üç aşamadan oluşmaktadır; ön ısıtma, pişirme ve soğutma aşamalarıdır. Ön ısıtma evresi sırasında, hammaddeler arasındaki reaksiyonlar ilerleyerek kristal ve amorf fazların oluşumu için uygun termodinamik ve yapısal koşullar sağlanır. Sinterleme işlemi yaklaşık 1200°C sıcaklıklarda tamamlanmakta olup, maksimum sıcaklıkta bekletme süresi ise hammaddelerin özelliklerine ve farklı bünye bileşenlerinin parçacık boyutuna bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Soğutma, ürünün ömrü boyunca koruyacağı mineralojik bileşime ulaşması açısından temel önem taşımaktadır. Bu aşamada, pişirme sırasında tam olarak kristalleşmeyen veya ergimiş halde kalan fazların mineralizasyonu ve cam faza dönüşümü (vitrifikasyon) gerçekleşir. Bu dönüşümler, seramik ürünün nihai mekanik, fiziksel ve kimyasal özelliklerini doğrudan etkilemektedirler. Soğutma, sırn vitrifiye edilmesini önleyecek kadar hızlı olmalıdır, ancak mineralojik transformasyonların neden olduğu hacim değişikliklerine yardımcı olması için belirli bölgelerde ise hızlı olmamalıdır. SSG sektöründe pişirim işlemi oluşan son ürünün mineralojik ve fiziksel özelliklerini etkilediğinden dolayı çok önemlidir. Pişirim işleminin sonrasında oluşan ürünler kalite ayırım sürecine gelir.

Kalite ayırım sürecinde ürünler standart olarak, kalite kontrol kriterleri dahilinde tek tek ve dikkatle incelenmektedirler. Kalite ayırma gelen mamul; kaliteli, tamir ve ıskarta olmak üzere üçe ayrılmaktadır. Pinhol (iğne deliği) hatası gibi tamiri yapılabilecek ürünler tamir yapılmak üzere ayrılır ve tamir fırınına girerler. Tamir edilemeyecek durumda ise ıskartaya ayrılmaktadır. Nihai ürün, kalite ayırım sonrasındaki işlemlerden geçerek müşteriye ulaştırılır.

5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu bölümde, standart FFC reçetesi ve alternatif oluşturulan SSG FFC kompozisyon çalışmalarına yer verilmiştir. Sağlık gereçleri kompozisyonları laboratuvar koşullarında hazırlanmıştır. Çalışmada, Kale Seramik sağlık gereçleri üretiminde kullanılan standart FFC çamuru referans alınmıştır. Denemelerde kullanılan referans FFC reçetesi çamuruna STD FFC kodu verilmiştir.

5.1. Seramik Sağlık Gereçlerine Yönelik Laboratuvar Ölçekli Çamur ve Sır Hazırlama Yöntemi

Kaleseramik Ar-Ge Merkezi laboratuvarında kullanılan seramik sağlık gereçleri çamur hazırlama sürecinin ilk adımı, hammaddelerin reçetede belirtilen oranlara uygun şekilde ve mevcut nem içerikleri dikkate alınarak tartılmasıdır. Plastik karakterdeki hammaddelerden olan kil ve kaolinin nem tayini, her bir hammadde için ayrı ayrı 10 gramlık numuneler alınarak nem tayin cihazında gerçekleştirilir. Hammaddeler, nem tayin cihazında 110°C - 120°C'de 25 dakika kurutulur ve tekrar tartılarak içerisindeki nem oranı bulunur. Hammaddelerin tartımı, nem içerikleri dikkate alınarak kuru bazda gerçekleştirilir.

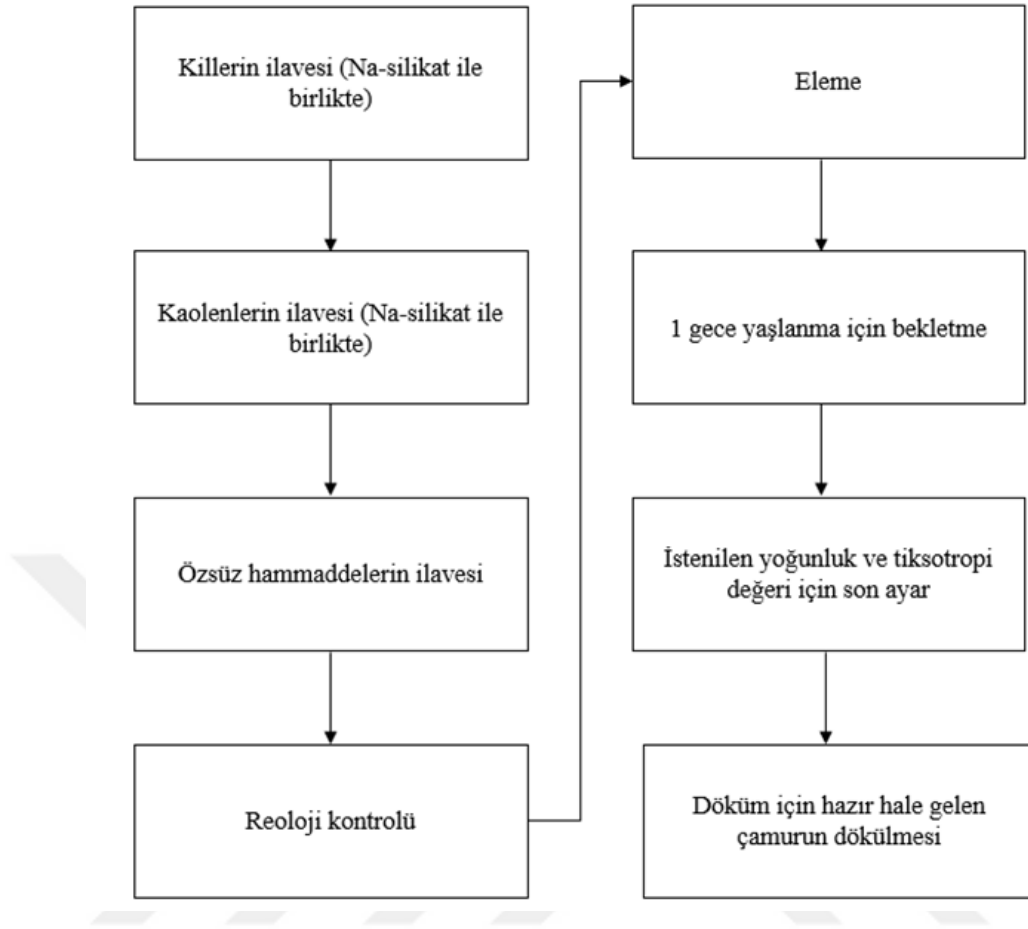
FFC çamurunun standart litre ağırlık değerleri Kaleseramik bünyesinde 1860-1870 g/l olacak şekilde ayarlanmaktadır. Katı madde oranı %75 olarak hesaplanmaktadır. İstenilen litre ağırlığına göre açıcıya ilave edilmesi gereken su miktarı katı madde oranına göre hesaplanır.

Döküm çamuru hazırlarken ilk olarak plastik olan hammaddeler (kil, kaolen) açıcıya eklenerek gerekli ilaveler ile birlikte açılır. Daha sonra plastik olmayan hammaddeler mikronize boyutta ise döküm çamuruna açıcıda ilave edilir. Mikronize boyutta olmayan kuvars veya feldispat gibi hammaddeler alümina bilyeli değirmenlerde öğütülür ve öğütüldükten sonra döküm çamuruna ilave edilir. Kil eklenirken, çamurun yoğunlaştığı noktada silikat ilavesiyle açılma işlemi takip edilir. Tüm killere aynı işlem uygulanır. Daha sonra kaolenler teker teker aynı şekilde eklenir. Kil ve kaolen ekleme fazı yaklaşık 90 dakika sürer. FFC standartlarına göre hazırlanan çamurun tiksotropi aralığı 70-80 bandı arasında istenmektedir. İstenilen reolojik özelliklere ulaşmak için hazırlanan çamurun içerisine yaklaşık %0,15-%0,22 oranlarında silikat-cam suyu ilave edilir.

Mikronize olmayan özsüz hammaddeler (kuvars, feldispat, wollastonit, şamot) nem oranları bakıldıktan sonra teker teker çamura son aşamada ilave edilir. Özsüz

Hazırlanan çamurun ilk olarak litre ağırlığına piknometre ile bakılır. Tikсотropi değerin belirlenmesinde Gallenkamp tipi viskozimetre kullanılır. Ölçüm, 0. dakikadaki başlangıç viskozitesi ile 6. dakikadaki viskozite değeri arasındaki fark esas alınarak gerçekleştirilir. Sistemin istenilen tiksotropik davranışı göstermesi amacıyla, gerektiğinde reçeteye uygun oranda sodyum silikat ilavesi yapılır. Reolojik olarak onaylanan çamur 325 mikron elekten elenir ve döküm için 6-8 saat ortamda bekletilir.

30



Şekil 5.1. Çamur hazırlama süreci

Bu tez çalışmasında bünye üzerine standart FFC üretim sır reçetesi ile deneme çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Standart sır reçetesindeki oranlara göre değirmene ilave edilen hammaddeler ile oluşturulan sır reçetesinin standart litre ağırlığı 1720-1740 g/l olacak şekilde su ilave edilir. 6 mm'lik piknometre ile litre ağırlığı ölçülen sır 45 mikronluk elekten geçirilerek 33-38 sn süzülme süresi olacak şekilde hazırlanır. Daha sonra 10cmx10cm ham FFC plakanın üzerine püskürtme yöntemi ile 23-28 g sır ile plaka sırlanır ve daha sonra sırlanan plakaları pişirme işlemi gerçekleştirilir. Pişirme işlemi gerçekleşen plakalara yüzey, renk ve diğer fiziksel testler ile kontrolü sağlanır.

5.2. Geliştirilen Bünyelerde Kullanılan Hammaddelerin Kimyasal Analizleri

Çalışmada kullanılan tüm hammaddelerin kimyasal analizleri X-Işınları Floresans Spektrometre cihazı (XRF) ile gerçekleştirilmiştir. Cihaz Panalytical Marka AXIOS

MAX modelidir. Reçetelerde kullanılan hammaddelerin kimyasal analiz sonuçları Tablo 5.1’de verilmiştir.

Tablo 5.1. *Kullanılan hammaddelerin kimyasal analiz sonuçları (% ağırlıkça)*

Hammaddeler	A.Z.	SiO ₂	Al ₂ O ₃	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SrO
Kil-1	10,24	58,11	26,41	1,5	0,95	0,13	0,32	0,3	1,87	
Kil-2	9,08	57,1	26,67	1,36	2,15	0,35	0,56	0,14	2,3	
Kaolen-1	11,09	49,12	35,15	0,08	0,97	0,04	0,43	0,05	2,9	
Kaolen-2	11,93	52,16	33,73	0,38	0,83	0,13	0,16	0,06	0,53	
Kaolen-3	12,52	52,16	33,28	0,5	0,55	ESER	ESER	ESER	0,2	0,25
Alternatif Kaolen-1	8,97	67,4	22,0	0,4	0,3	ESER	0,01	ESER	0,25	
Şamot	0,01	58,03	38,76	0,28	1,45	0,08	0,2	ESER	1,09	
Wollastonit	1,52	51,85	0,36	0,12	0,15	45,18	0,61	0,06	0,08	
Kuvars	0,06	99,14	0,42	0,15	0,02	0,01	0,02	0,01		
Sodyum	0,38	71,91	16,9	0,18	0,09	0,53	0,16	9,35	0,25	
Feldispat										
D.K. Kırığı	0,51	63,61	19,38	0,91	2,02	7,97	0,9	1,05	2,28	

5.3. Geliştirilen Bünyelerde Kullanılan Hammaddelerin Mineralojik Analizleri

Reçetelerde kullanılan hammaddelerin ve reçetelerin mineralojik yapısının incelenmesinde Panalytical Marka X'PERT PRO MPD Difraktometre kullanılmıştır. Kullanılan hammaddelerin mineralojik analiz sonuçları Tablo 5.2'de verilmiştir.

Tablo 5.2. Kullanılan hammaddelerin minerolojik analiz sonuçları

Faz Analizi	Kil- 1	Kil- 2	Kaolen- 1	Kaolen- 2	Kaolen- 3	Alternatif Kaolen-1	Şamot	D.K. Kırık	Wollastonit
Kuvars	√	√	√	√	√	√	√	√	√
Kaolinit	√	√	√	√	√	√			
Rutile		√							
Muscovite		√							
İllit	√		√	√					
Ortoklaz			√						
Alunit					√	√			
Cam Faz							√	√	
Anortit								√	
								√	
Diopsit									
Sanidin								√	
Gahlenit								√	
Müllit							√		
Kristobalit							√		
Albit									
Wollastonit									√

5.4. Geliştirilen Bünyelerde Kullanılan Hammaddelerin Fiziksel Analizleri

Hammaddeler tablet küçülme ve renk ölçümleri için, Heraus Marka T16 Model etüv de 105 ± 10 °C'de 3 saat kurutulduktan sonra, 500 µ elekten elenip ağırlıkça %6-%8 nem verilerek 25 g tartılır. Daha sonra manuel hidrolik laboratuvar presinde 50 mm çapında 44 bar basınçla basılarak, etüvde 110 °C'de 30 dk kurutulur. Kurtulan hammaddeler yaklaşık 1230 °C 'de 16 saatlik SSG tünel fırınında sinterlenir. Basılan tabletlerin pişirildikten sonra L*, a*, b* değeri renk ölçümü CR-400/Minolta renk ölçüm

cihazı ile gerçekleştirilir. $L^*a^*b^*$ renk değerleri her bir rengin tek bir nokta ile temsil edildiği koordinat sistemidir. Minolta marka renk ölçüm cihazında ölçülen L değeri 0 noktasında siyahlık, 100 noktasında beyazlık değerini göstermektedir. a değerinde ise, +a değeri kırmızılık, -a değeri ise yeşillik değerini belirtir. b değerinde ise, +b değeri sarılık değerini -b değeri ise mavilik değerini göstermektedir. Tablo 5.3'te kullanılan hammaddelerin pişmiş tablet küçülme değerleri ve renk değerleri gösterilmektedir.

Tablo 5.3. Kullanılan hammaddelerin fiziksel özellikleri

Hammaddeler	Tablet Küçülme	L	a	b
Kil-1	9,64	76,34	0,73	14,04
Kil-2	7,61	69,42	0,94	22,63
Kaolen-1	12,43	84,43	-0,58	8,71
Kaolen-2	8,76	94,95	-0,14	5,94
Kaolen-3	6,49	94,29	0,22	4,54
Alternatif Kaolen-1	0	93,18	0,26	3,74
Şamot	-0,36	93,62	-0,84	8,5
Wollastonit	-0,95	91,28	-1,14	11,78
Kuvars	-0,67	95,5	0,42	4,36

5.5. Standart FFC İşletme Reçetesi ve Karakterizasyon Çalışmaları

Standart FFC üretiminde kullanılan hammaddeler ve kullanılan reçete aşağıdaki Tablo 5.4'te verilmiştir. Yapılan tane boyut ölçüm analizleri Malvern Instruments Hydro 2000G marka cihazıyla gerçekleştirilmiştir.

Tablo 5.4. Standart FFC bünyesine ait reçete bilgileri

Hammadde	Standart FFC (% ağırlıkça)
Sodyum Feldispat	1
Kuvars-1	14
Kil-1	7
Kil-2	14,5
Kaolen-1	6
Kaolen-2	19
Kaolen-3	2,5
Şamot	36

İşletmede kullanılan reçetenin ağırlıkça %36'sını şamot hammaddesinin oluşturduğu görülmektedir. Hazırlanan standart FFC çamuruna ait tane boyut dağılım ve reolojik karakterizasyon sonuçları Tablo 5.5 ve Tablo 5.6 'da verilmiştir.

Tablo 5.5. Standart FFC çamuruna ait lazer tane boyut sonucu (μm)

Numune	D(10)	D(50)	D(90)
STD FFC	2,49	12,6	91,8

Standart FFC çamurunun reolojik analizleri Anton Paar marka, Modular Compact Rheometer MCR102 model reometre cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Aşağıdaki Tablo 5.6'da standart FFC çamurunun reolojik ve fiziksel özellikleri verilmiştir.

Tablo 5.6. Standart FFC çamurunun karakteristik reolojik ve fiziksel özellikleri

Numune	STD FFC
Reolojik Özellikler	20.sn toparlanma (%)
	68,4
	Y farkı
	0,75
	Viskozite 0,1 (1/s)
	1200
	Viskozite 1 (1/s)
	400
	Viskozite 10 (1/s)
	280
	Viskozite 100 (1/s)
Fiziksel Özellikler	250
	Viskozite (G)
	315
	1.' Viskozite
	305
	6.' Viskozite
	232
	LVE (Pa)
	5
	Deformasyon (%)
	4
	Yoğunluk (g/l)
	1865
	Silikat Miktarı (% ağı.)
	0,2

Standart FFC işletme çamurunun nihai fiziksel ve ısı özellikleri Tablo 5.7'de verilmiştir.

Tablo 5.7. *Standart FFC çamurunun fiziksel özellikleri*

Numune		STD FFC
Fiziksel Özellikler	Kuru Küçülme (%)	2,2
	Toplam Küçülme (%)	5,5
	Kuru Mukavemet (kgf/cm ²)	19,53
	Pişmiş Mukavemet (kgf/cm ²)	348
	Deformasyon(mm)	6,5
	Su Emme (%)	10,5
	Otoklav Testi	+
	Isıl Şok Testi	+
	L*	91,14
	a*	-0,78
	b*	12,25
Isıl Özellikler (Isıl genleşme katsayısı/dilatometre)	$\alpha\ 200\ (\times 10^{-7})$	84,96
	$\alpha 300\ (\times 10^{-7})$	81,22
	$\alpha 400\ (\times 10^{-7})$	75,47
	$\alpha 500\ (\times 10^{-7})$	72,66
	$\alpha 600\ (\times 10^{-7})$	73,64

5.6. Çamur Reçetelerine Uygulanan Testler

5.6.1. Kuru küçülme ve pişme küçülme analizi (%)

Seramik ürünlerde karşılaşılan önemli problemlerden biri, parçalar arasında boyut tutarsızlıklarının ortaya çıkması ve her bir ürünün farklı oranda küçülme göstermesidir. Bu bağlamda, kuruma ve pişme küçülmeleri, seramik bünyelerde dikkatle kontrol edilmesi gereken temel parametreler arasında yer almaktadır. Birçok seramik ürün, kuruma ya da pişirim aşamalarında yüksek küçülme oranları nedeniyle deformasyona uğrayarak zarar görebilmektedir. Bu sebeple, şekillendirme aşamasında numuneler üzerine 100 mm referans uzunlukta işaretleme yapılarak, kurutma ve pişirme sonrası boyutsal değişimler karşılaştırmalı olarak değerlendirilmektedir. Hammaddelere ve çamurlara yapılan kuru ve pişmiş küçülme testleri alçı kalıplar yardımıyla yapılır. Dökümü tamamlanan çamurlar alçı kalıptan çıkartılarak kumpas ile işaretleme yapılır. Plakalar ilk olarak ortamda daha sonra 105 °C’de bir gün etüvde bekletilir ve % kuru küçülme hesabı yapılır. Kurutma işlemi tamamlanan plakalar pişirim için fırına verilir. Fırından çıkan plakalara % pişmiş küçülme hesabı yapılır. Kalıptan çıkarıldıktan sonra

plakanın yaş uzunluğu(L1), kuru uzunluğu (L2) ve pişmiş uzunluğu (L3) olarak ölçülmektedir.

$$\% \text{ Kuru Küçülme} = \frac{L1 - L2}{L1} \times 100 \quad (5.1)$$

$$\% \text{ Pişmiş Küçülme} = \frac{L1 - L3}{L1} \times 100 \quad (5.2)$$

5.6.2. Su emme testi (%)

Su emme, pişirilmiş seramik ürünün açık gözenek yapısında tutabildiği su miktarı olarak tanımlanmaktadır. Su emme üzerinde etkili olan faktörler arasında; kullanılan hammaddelerin plastik özellikleri, plastik ve plastik olmayan malzeme oranları, uygulanan şekillendirme yöntemi, kurutma sıcaklığı, pişirme sıcaklığı ve izlenen pişirme rejimi yer almaktadır. Su emme testi, seramik malzemenin farklı bölgelerinden kırılarak elde edilen ya da sırlı seramikten hazırlanmış 10 cm × 10 cm boyutlarındaki üç adet numune üzerinden de gerçekleştirilmektedir. Numunelerin ve/veya seramik ürün parçalarının ilk ağırlıkları tartılır (m1). Tartılan numuneler, su emme testine tabi tutulmak üzere 2 saat süreyle kaynar su kazanında bekletilir. Kaynama süresi tamamlandıktan sonra, numunelerin kazan içerisinde yaklaşık 20 saat boyunca soğumaya bırakılarak ortam sıcaklığına gelmeleri sağlanır. Kazandan çıkarılan numuneler tekrar tartılır (m2). Ortalama 3 parça için yapılan su emme testi aşağıdaki formülden hesaplanır ve daha sonra aritmetik ortalaması alınır.

$$\% \text{ Su emme} = \frac{m2 - m1}{m1} \times 100 \quad (5.3)$$

5.6.3. Isıl genleşme analizi

Bünye, engop ve sır uyumunun değerlendirilmesinde doğrudan ısısal genleşme katsayılarının ölçülmesi temel bir yöntem olarak kullanılmaktadır. Bu ölçümler; genleşme katsayısı önceden bilinen referans bir numune, sıcaklık algılayıcısı, elektrikle ısıtılan fırın, iki silindirik hazne ve ölçüm verilerini analiz etmeye yarayan bir sistemden oluşan düzenek ile gerçekleştirilmektedir.

Analizlerde kullanılacak çamur numuneleri için örnek hazırlama süreci şu şekilde yürütülmektedir: Numuneler, öncelikle 90°C sıcaklıktaki etüvde 24 saat kurutulmuş, ardından otomatik havanda öğütülerek 1 mm'lik elekten geçirilir. Homojen karışım elde etmek amacıyla, spre y yöntemi ile %6 nem oranına ayarlanmış karışımlar tekrar elenir ve

homojenliği sağlanır. Elde edilen numuneler, 65 gramlık miktarda alınarak 5,5 cm x 11 cm boyutlarında preslerde 105 bar basınç altında şekillendirilmektedir.

Şekillendirilen numuneler, endüstriyel fırınlarda pişirilmiş ve daha sonra dilatometre analizine uygun olacak şekilde 0,5 cm x 0,5 cm x 4,5 cm boyutlarında kesilmektedir. Isıl genleşme ölçümleri, Netzsch marka DIL 402 CD model dilatometrede, 10°C/dakika ısıtma hızında gerçekleştirilmektedir.

5.6.4. Kuru ve pişmiş mukavemet testi

Kuru ve pişmiş mukavemet testi TS EN ISO 10545/4 Kırılma ve Eğilme Dayanımı standartlarına göre Gabrielli Crometro CR5/650 marka model cihaz ile otomatik olarak yapılmaktadır. Dökümü yapılan mukavemet çubuklarının boy, en ve derinlik ölçümleri yapıldıktan sonra cihaza yerleştirilir. Kırılma dayanımı ve ortalama eğilme mukavemeti hesaplamalarında yalnızca, test numunesinin destek çubukları arasındaki mesafenin üçte biri kadar olan orta bölgede kırılan örneklerden elde edilen sonuçlar dikkate alınır. FFC bünyelerin gözenek yapısının fazla olmasından dolayı pişme mukavemeti minimum 300-350 kgf/cm², VC bünyelerin ise 600 kgf/cm² civarında olması beklenmektedir. Döküm çubuklarında 3-nokta eğme mukavemeti aşağıdaki formüle göre hesaplanmaktadır:

$$\sigma = \frac{3.P.L}{2.b.h^2} \text{ (N/mm}^2\text{, MPa)} \quad (5.4)$$

P = Uygulanan yük (N)

L = Mesnetler arası uzaklık (mm)

b = Dörtgen kesitli numunenin eni (mm)

h = Dörtgen kesitli numunenin yüksekliği (mm)

5.6.5. Brookfield ve Gallenkamp viskozimetreleri

Seramik çamur veya sırt akışkanlığını tespit edilebilmesi için viskozimetreler kullanılmaktadır. Gallenkamp viskozimetresi, akışkanların dönmeye karşı gösterdiği viskoz kuvvetlerin tespitine göre çalışır. Gabrielli marka, G10888 model Gallenkamp viskozimetresinin dairesel skalası 360 dereceliktir. Gallenkamp ibresi çamur ölçümüne başlarken sıfır noktasında olmalıdır. Sıfır noktasında olan viskozimetreyi saat yönünde bir tur çevrilir ve pimi sabitlenir. Pim açıldıktan sonra gösterdiği ilk değer 1. viskozite olarak isimlendirilir. Tekrar saat yönünde ibre bir tur döndürülerek pimle sabitlenir ve 6

dk beklenir. 6 dakika sonunda pim çekilerek 2. viskozite değeri okunur. Aşağıdaki formüle göre tiksotropi hesaplanır:

$$Tiksotropi = 1.viskozite - 2.viskozite \quad (5.5)$$

Brookfield viskozimetresi, akışkanların dönmeye karşı gösterdiği viskoz dirençleri ölçme prensibine dayalı olarak çalışmaktadır. Cihazın skalası, viskozite birimi olan centipoise (cP) cinsinden derecelendirilmiştir. Brookfield marka LVT model viskozimetrede, ölçüm işlemi sırasında farklı geometriye sahip ölçüm ayakları (spindle) kullanılmakta olup, her bir ayağın kendine özgü bir düzeltme katsayısı bulunmaktadır.

Analiz öncesinde, 1250 devir/dakika (rpm) sabit hızda çalışan karıştırıcıda numune 3 dakika boyunca karıştırılır. Karıştırma işlemi tamamlandıktan hemen sonra, uygun ölçüm ayağı viskozimetreye takılır ve seviye çizgisine kadar, kabın merkezine denk gelecek şekilde numune içerisine daldırılır. Cihazın sağ tarafında bulunan düğme ile skalanın dönmesi sağlanır. Skala beş tam tur döndükten sonra, ortadaki mandal yardımıyla ibre sabitlenir ve skalanın dönmesi durdurulur. İbrenin gösterdiği değer, kullanılan ayağa ait katsayı ile çarpılarak numunenin centipoise cinsinden viskozite değeri saptanır.

5.7. Geliştirilen Bünye Çalışmaları (1. Faz)

Standart FFC işletme reçetesinin fiziksel, kimyasal, ısı analizleri tamamlandıktan sonra şamotu azaltılmış veya şamotsuz bünye reçetelerine "ilk deneme" reçetesi ile başlanmıştır. Deneysel çalışmalarda sodyum feldispat, kuvars, 2 farklı kil hammaddesi, 4 farklı kaolen hammaddesi, Kaleseramik duvar karosu kırığı, wollastonit ve şamot hammaddeleri kullanılmıştır. Mevcut kalsine kaolen içeren reçetenin küçülme ve deformasyon değerlerine uygun çamur elde edebilmek için; 1. Faz reçete çalışmalarında feldispat kullanımı kaldırılmıştır. Şamot hammaddesi reçeteden ilk olarak kademeli olarak azaltılmıştır. Şamotun yerine kil, kaolen toplamı artırılmış, daha refrakter bir kaolen eklenmiş (alternatif kaolen 1) ve ayrıca şamotun yapısında bulunan iğnemsli müllit kristalleri yerine alternatif olabileceği düşünülen wollastonit hammaddesi eklenmiştir. Bunun yanı sıra, yapılan ilk deneme çalışmalarında, şamot yerine Kale Seramik'te bulunan pişmiş duvar karosu reçetelerde kullanılmıştır. Duvar karoları, genellikle iç cephe uygulamalarında tercih edilen tek veya çift pişirim ile üretilen yüksek gözeneklilik ve su emmeye sahip seramik ürünlerdir. Endüstriyel uygulamalarda pişirim işlemi yaygın

olarak, 45-55 dakika 1140-1150°C sıcaklıklarında gerçekleştirilmektedir. Bu tez çalışmasında duvar karosu kırığı, atık malzemenin değerlendirilmesi amacıyla bünyeye ilave edilmiş; içeriğinde bulunan anortit fazı sayesinde kalsiyum kaynağı olarak kullanılarak hem mukavemetin hem de mikroyapı yoğunluğunun artırılması hedeflenmiştir. Alternatif olarak oluşturulan reçete çalışmaları Tablo 5.8 ve Tablo 5.9’da gösterilmiştir.

Tablo 5.8. *Reçete oluşturma çalışmaları (%ağırlıkça)-1*

Hammadde	Standart FFC	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10	R11	R12
Kuvars-1	14	17,5	14	20	17,5	17,5	12	12	12	12	20	20	25
Kil-1	7	8	8	8	4,4	4,4	13	13	13	13	13	13	13
Kil-2	14,5	14,5	15	15	21,1	19,3	18	18	13	13	18	18	18
Kaolen-1	6	5	8	8	7,9	7,9	10	10	10	10	10	10	10
Kaolen-2	19	19	19	19	17,5	17,5	16	17	16	17	17	18	16
Kaolen-3	2,5												
Alternatif Kaolen-1		24	24	20	21,1	17,5							
Wollastonit		12				5,3	3	2	3	2	2	1	3
D.K. Kırık			12	10			8	8	8	8			
Şamot	36				10,5	10,5	20	20	25	25	20	20	15
Sodyum Feldispat	1												
Toplam	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Toplam Kil	21,5	22,5	23	23	25,4	23,7	31	31	26	26	31	31	31
Toplam Kaolen	27,5	48	51	47	46,5	43	27	27	26	27	27	28	26
Özlü Hammaddeler	49	70,5	74	70	71,9	66,7	58	58	52	53	58	59	57
Özsüz Hammaddeler	51	29,5	26	30	28,1	33,3	42	42	48	47	42	41	43

Tablo 5.9. Reçete oluşturma çalışmaları (%ağırlıkça)-2

Hammadde	Standart FFC	R13	R14	R15	R16	R17	R18	R19	R20	R21	R22	R23	R24
Kuvars-1	14	27	20	20	28	22	22	28	20	28	28	22	22
Kil-1	7	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
Kil-2	14,5	15	15	17	15	15	17	15	15	17	15	14	17
Kaolen-1	6	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Kaolen-2	19	20	14	17	20	14	17	20	12	20	20	14	17
Kaolen-3	2,5												
Alternatif Kaolen-1		15	10	10	16	10	10	12	10	16	15	10	9
Wollastonit		5	3	3	3	1	1	7	6	1	4	2	2
D.K. Kırık													
Şamot	36	0	20	15	0	20	15	0	19	0	0	20	15
Potasyum Feldispat	1												
Toplam	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Toplam Kil	21,5	23	23	25	23	23	25	23	23	25	23	22	25
Toplam Kaolen	27,5	45	34	37	46	34	37	42	32	46	45	34	36
Özlü Hammaddeler	49	68	57	62	69	57	62	65	55	71	68	56	61
Özsüz Hammaddeler	51	32	43	38	31	43	38	35	45	29	32	44	39

Hazırlanan alternatif deneme çamur reçeteleri, Kaleseramik Ar-Ge merkezinde 1860-1870 g/l 70-85 tiksotropi değerinde dökülerek 1230 °C fırın sıcaklığında yaklaşık 20 saat tünel fırında pişirilmiştir. İlk reçete kompozisyonlarında, ısı genleşme, deformasyon ve küçülme üçgeninde değerlendirmeler yapılmıştır. Standart reçete ile yapılan çalışmalar çerçevesinde küçülme %4,5-5,5, ısı genleşme katsayısı 400°'de $72-76 \times 10^{-7}$, deformasyon 5,5-6,5 mm aralıkları en uygun değerler olarak belirlenmiştir. Kullanılan sırn ısı genleşme katsayısı 400°'de $62-66 \times 10^{-7}$ arasında değişmektedir. Standart FFC bünye reçetesi ve oluşturulan reçete çalışmalarının karakterizasyon sonuçları Tablo 5.10, Tablo 5.11 ve Tablo 5.12'de verilmiştir.

Tablo 5.10. Deneme reçetelerinin STD FFC reçetesi ile karşılaştırılmalı fiziksel özellikler sonucu-1

	STD FFC	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10	R11	R12
Pişme Küçülme (%)	5,5	4,6	6,1	8,8	7,0	5,8	8,2	8,3	7,6	7,1	7,9	6,5	6,3
Deformasyon (mm)	6,5	7	11	10	6	5	7	11	10	6	6,5	6	7
Isıl Genleşme (400 °C E-6)	7,5	7,3	6,6	7,1	8	6,9	7,3	6,6	7,1	8	6,9	6,7	7,0
Kuru Mukavemet (kgf/cm ²)	19,5	-	-	-	-	-	27,0	31,0	26,2	20,6	29,0	32,1	30,8
Pişmiş Mukavemet (kgf/cm ²)	348,0	-	-	-	-	-	486,3	445,2	446,6	456,9	341,0	298,0	323,0
Su Emme(%)	10,5	-	-	-	-	-	2,4	3,3	4,7	6,0	8,4	9,0	8,0
Kalınlık Alma Hızı (mm)	7,0	-	-	-	-	-	6,7	6,7	7	7,0	6,8	6,9	6,7

Tablo 5.11. Deneme reçetelerinin STD FFC reçetesi ile karşılaştırılmalı fiziksel özellikler sonucu-2

	STD FFC	R13 (63μ)	R13 (45μ)	R14 (63μ)	R14 (45μ)	R15 (63μ)	R15 (45μ)
Pişme Küçülme (%)	5,5	6,0	6,1	5,5	5,4	6,1	6,2
Deformasyon (mm)	6,5	7	11	9,5	9,5	9,5	9,5
Isıl Genleşme(400 °C E-6)	7,5	7,2	7,0	7,3	7,1	7,0	7,0
Kuru Mukavemet (kgf/cm ²)	19,5	18,9	21,7	18,1	17,3	18,3	21,1
Pişmiş Mukavemet (kgf/cm ²)	348,0	479,9	399,8	489,1	500,1	481,0	519,1
Su Emme (%)	10,5	10	8,8	10,0	10,0	9,9	9,0
Kalınlık Alma Hızı (mm)	7	7,5	7,5	7,16	7,14	7,1	7,1

Tablo 5.12. Deneme reçetelerinin STD FFC reçetesi ile karşılaştırılmalı fiziksel özellikler sonucu-3

	STD FFC	R16	R17	R18	R19	R20	R21	R22	R23	R24
Pişme Küçülme (%)	5,5	5,1	4,8	5,96	5,33	4,98	6,3	5,16	5,38	5,72
Deformasyon (mm)	6,5	6,5	6	5,5	7,0	8,0	6,5	6,5	7,0	7,0
Isıl Genleşme (400 °C E-6)	7,5	7,3	7,5	7,5	7,0	6,7	8,0	7,5	7,5	7,2
Kuru Mukavemet (kgf/cm ²)	19,5	37,9	31,0	24,9	26,6	30,0	28,3	30,5	29,8	32,3
Pişmiş Mukavemet (kgf/cm ²)	348,0	268,6	317,0	318,9	315,5	357,6	357,4	334,7	361,5	393,6
Su Emme (%)	10,5	8,6	10,4	10,2	9,4	9,0	10,4	8,9	10,3	8,6
Kalınlık Alma Hızı (mm)	7	7,3	7,0	7,0	7,2	6,9	7,1	7,1	7,0	6,9

Yapılan reçete çalışmaları sonucunda duvar karosu kırığı kullanıldığında (R2 ve R3) küçülme ve deformasyon değerlerinin arttığı, ısı genleşme katsayısının düştüğü görülmüştür. Wollastonit kullanılan reçetelerde ise (R1 ve R5) toplam küçülmenin azaldığı görülmektedir.

Isıl genleşme, deformasyon ve küçülme üçgeninde yapılan değerlendirmeler sonucu, R5 reçetesinin modifikasyonlar ile denemelere devam edilmeye karar verilmiştir.

R6-R9 reçeteleri %8 duvar karosu kırığı, %12 kuvars ve %13 kil-1 içeriği ile hazırlanmış, şamot %20-25, toplam kaolen %26-27, kil-2 %13-18 ve wollastonit %2-3 aralığında tutulmuştur. Oluşturulan reçetelerin fiziksel ölçümlerde toplam küçülme (%), kuru ve pişme mukavemeti (kg/cm²), deformasyon (mm), ısı genleşme katsayısı 400°C ($\times 10^{-7}$), su emme (%), kalınlık hızı (kalınlık alma 60' (mm) gerçekleşmiştir. Duvar karosu kırığının kullanılması ile deformasyonun arttığı, su emme değerlerinin azaldığı ve dolayısıyla mukavemetin arttığı görülmüştür. Diğer yandan kompozisyonlarda duvar karosu kullanımı, pişmiş küçülme değerlerini arttırdığı gözlemlenmiştir.

R10-R12 reçetelerinde bir önceki seriye kıyasen duvar karosu kırığı kullanılmamıştır. Bu seri %18 kil-2 ve %13 kil-1 içeriği ile hazırlanmış, şamot %15-20, toplam kaolen %26-28, kuvars %20-25 ve wollastonit %1-%3 aralığında tutulmuştur. Bu denemeler sonucu özellikle R10-R12 reçetelerinde deformasyon STD reçetesine kıyasen iyileşme gösterirken toplam küçülme miktarı artış göstermiştir. Bu nedenle küçülme oranlarını düşürmek için R13-R15 reçeteleri hazırlanmıştır.

R13-R15 reçeteleri iki farklı tane boyuta sahip kuvars (-63 μ m ve -45 μ m kuvars) ile hazırlanmıştır. Bu reçetelerde de bir önceki seride olduğu gibi duvar karosu kırığı kullanılmamıştır. Bu seri ağırlıkça %15-17 kil-2 ve %8 kil-1 içeriği ile hazırlanmış, şamot %0-20, alternatif kaolen hammaddesi pişme küçülme değerinin düşük olması nedeniyle reçetelere eklenmiş ve toplam kaolen %34-45, kuvars %20-27 ve wollastonit %3-%5 aralığında tutulmuştur. Bu seride reçetelerin fiziksel özellikleri STD reçetesi ile karşılaştırılması dışında kuvars tane boyutunun etkisi de fiziksel özelliklerde gözlemlenmiştir. Bu denemeler sonucu R13-R15 reçetelerinin deformasyon oranı standart reçeteden yüksek çıktığı için standart FFC reçetesine alternatif olamayacağı tespit edilmiştir. R13 reçetesi, 63 mikron kuvars kullanıldığında kalıntı kuvars miktarı arttığından ısı genleşme katsayısında artış olduğu düşünülmektedir. Aynı zamanda kalıntı kuvarsın inert biçimde yapıda kalmasıyla pişme küçülme değerinin de daha düşük olduğu tespit edilmiştir. R14 reçetesinde şamot oranı yüksek olduğundan dolayı küçülme davranışı ve su emme değeri standart reçete ile paralellik göstermiştir. Bunun dışında kuvars tane boyutunun etkisi toplam küçülme, su emme davranışında görülmektedir. Kuvars tane boyutu arttıkça su emme oranı da artmaktadır.

R16-R20 reçetelerinde %15-17 kil-2 ve %8 kil-1 içeriği ile hazırlanmış, şamot %0-20, kuvars %20-28 ve wollastonit %1-%7 ve diğer serilerden farklı olarak alternatif kaolen-1 reçeteye ekleyerek toplam kaolen miktarı %32-46'ya kadar yükseltilmiştir. Bu denemeler sonucu özellikle R16, R17 ve R18 kodlu denemeler oldukça iyi fiziksel özellikler sergiledikleri tespit edilmiştir. Reçetelerin kalınlık alma hızı kıyaslandığında toplam kaolen oranı %40'ın üzerinde olan reçetelerde kalınlık alma hızının daha yüksek olduğu görülmüştür. Toplam küçülme değerleri 4,8-6 aralığında iken kuru ve pişme mukavemet değerleri standart reçeteden çok farklılık göstermemiştir. Elde edilen deformasyon değerlerinin, 5,5-6,5 aralığında kalarak belirlenen sınırlar içerisinde olduğu ve ısı genleşme katsayısının da referans (standart) reçeteye oldukça yakın sonuçlar verdiği tespit edilmiştir. Buna ek olarak, incelenen alternatif reçetelerin su emme oranlarının, standart reçeteye kıyasla daha düşük seviyelerde gerçekleştiği gözlemlenmiştir.

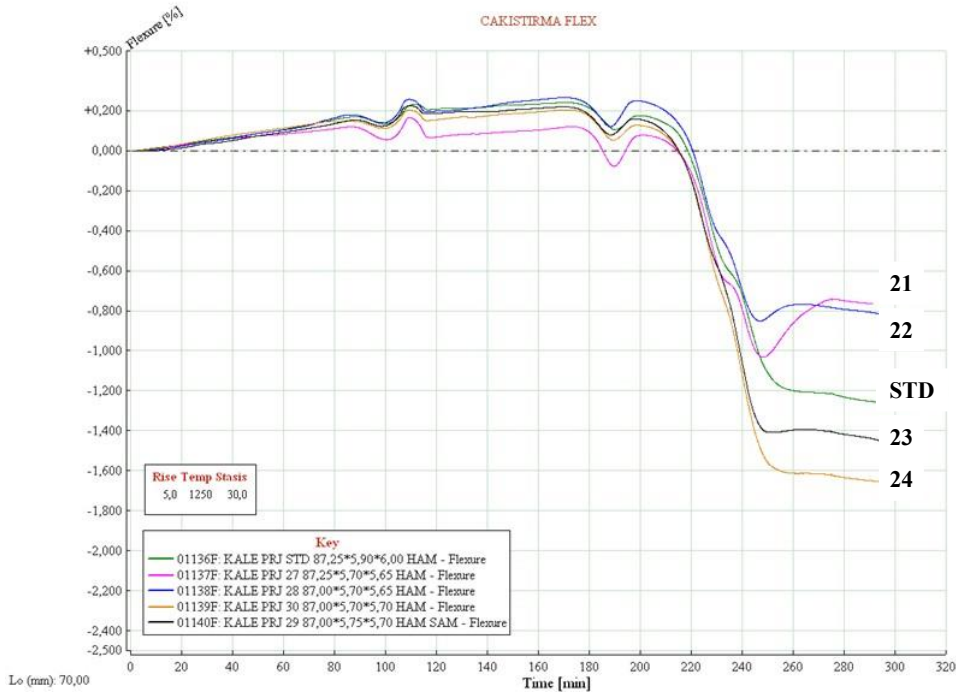
R21-R24 reçetelerinde alternatif kaolen-1 hammaddesinin nihai ürün özelliklerine olan etkisini göz önünde bulundurarak 2 şamotsuz ve 2 şamotlu reçete olarak hazırlanmıştır. Bu seri %14-17 kil-2 ve %8 kil-1 içeriği, şamot %0-20 (iki reçetede %0, diğer iki reçetede ise sırasıyla %20 ve %15), kuvars %20-28 (şamotsuz reçetelerde %28,

şamotlu reçetelerde %22), wollastonit %1-4 ve toplam kaolen miktarı ise %34-46 (şamotsuz reçetelerde %45-46, şamotlu reçetelerde %34-36) ile hazırlanmıştır.

R22 reçetesi şamotsuz reçete için döküm özellikleri ve fiziksel-kimyasal sonuçları uygun bulunmuş olup, işletme denemesi yapılmasına karar verilmiştir. R23 ve R24 reçeteleri ise şamotlu reçeteler kapsamında denemeye alınabilecek kademeli geçiş reçeteleri olarak belirlenmiştir.

Yapılan kompozisyon çalışmalarında öncelikli olarak sinterleme dilatometresi cihazı ile piropplastik indeks (PI) ve elastik modül (E) değerleri belirlenmiştir. Bunun temel nedeni, özellikle FFC ürünlerinde üretim süreci boyunca karşılaşılan şekil bozulması (deformasyon), çökme ve çatlama gibi yapısal problemleri daha üretimin başında öngörebilme ihtiyacıdır. FFC bileşimi, yapısı gereği daha gözenekli ve deformasyona yatkın olduğundan, elastikiyet ve plastiklik özelliklerinin erken aşamada tespit edilmesi, sonraki proseslerin sağlıklı planlanabilmesi açısından kritik önem taşımaktadır.

Sinterleme dilatometresi ölçümleri Seramik Araştırma Merkezi bünyesinde bulunan Misura ODLT Flex-1400-30 model sinterleme dilatometresi cihazı tarafından gerçekleştirilmiştir. R21-R24 ve STD FFC reçetesinin sinterleme dilatometresi sonuçları karşılaştırmalı olarak aşağıdaki Şekil 5.2’de verilmiştir.



Şekil 5.2. R21-R24 ve Standart FFC reçetelerinin sinterleme dilatometresi sonuçları

Sinterleme dilatometresi ölçüm sonucu, numunelerin piroplastik deformasyon indeksi (PI), camsı faz viskozitesi (E) ve su emme değerleri hesaplanmış aşağıdaki Tablo 5.13'te verilmiştir.

Tablo 5.13. Sinterleme dilatometresi ölçüm sonucu hesaplanan PI, E ve su emme değerleri

Numune	PI (1/cm)x10 ⁻⁵	E (GPa.s)	Su Emme (%)
STD	1,24	10,88	11,47
R21	0,71	19,79	10,67
R22	0,74	15,79	7,91
R23	1,36	10,86	10,04
R24	1,54	8,81	8,86

Bu denemeler sonucu tüm fiziksel özellikleri göz önünde bulundurarak R22 reçetesi oldukça iyi performans göstererek ve standart reçeteye yakın ısıl genleşme katsayısına sahip olarak diğer reçetelere kıyasen işletme denemelerinde daha avantajlı olacağı düşünülmüştür. Sonuç olarak yapılan denemeler arasından R22 kodlu reçete işletme denemesine alınmıştır.

5.8. D-22 ve AD-22 Reçete Geliştirme Çalışmaları

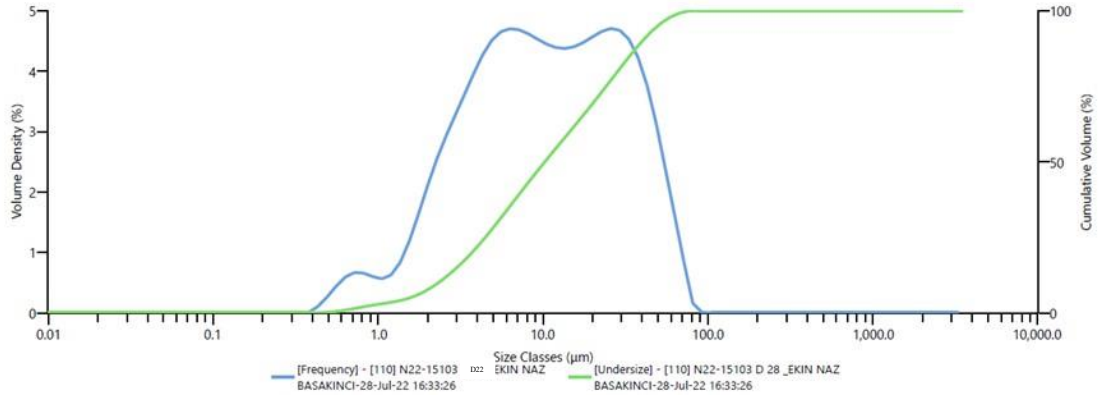
R22 kodlu reçete için Kale seramikte pilot çaplı işletme denemesi (D-22) ve laboratuvar ölçekli (AD-22) döküm yapılp, sonuçlar standartlar ile karşılaştırılmıştır.

5.8.1. Kimyasal ve tane boyut özellikleri

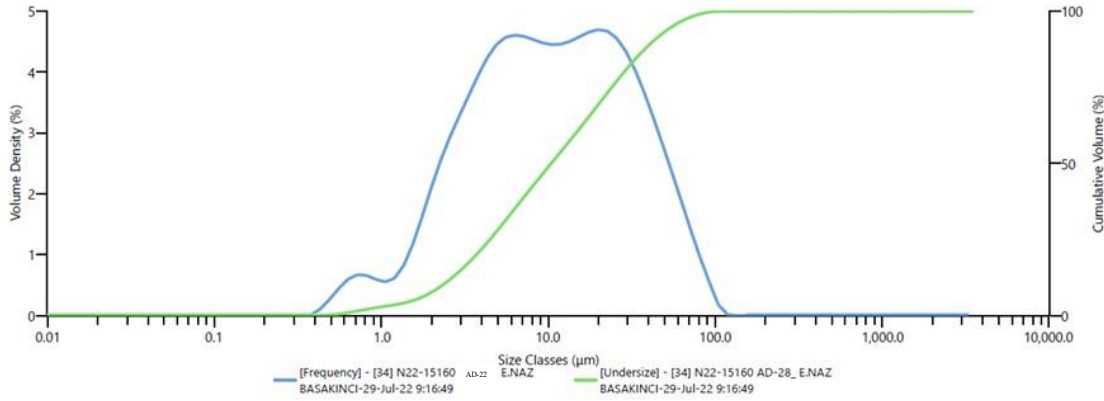
Standart ile D-22 ve AD-22 kodlu reçetelerin kimyasal analizi aşağıdaki Tablo 5.14'te verilmiştir.

Tablo 5.14. Standart FFC, D-22 ve AD-22 reçetelerinin kimyasal analizleri (%ağırlıkça)

Numune	A. Z.	SiO ₂	Al ₂ O ₃	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O
STD FFC	5,24	61,78	29,7	0,45	1,1	0,06	0,2	0,11	1,17
D-22	7,06	69,08	19,6	0,43	0,74	1,68	0,22	0,05	0,94
AD-22	7,01	69,09	19,61	0,43	0,75	1,67	0,22	0,04	0,95



Şekil 5.4. D-22 reçetesinin tane boyut dağılımı



Şekil 5.5. AD-22 reçetesinin tane boyut dağılımı

STD FFC, D-22 ve AD-22 reçetelerine ait tane boyut sonuçları Tablo 5.16’da özetlenmiştir.

Tablo 5.16. Reçetelerin karşılaştırmalı tane boyut değerleri

	STD FFC	D-22	AD-22
d [3,2] (µm)	5,61	5,23	5,25
d [4,3] (µm)	24,2	16,3	17,2
d10 (µm)	2,42	2,32	2,33
d50 (µm)	12,3	10,3	10,4
d90 (µm)	66,6	40	42,3
63 µm üstü (%hacimce)	11,09	1,45	3,29
45 µm üstü (%hacimce)	17,94	7,1	8,69
10 µm altı (%hacimce)	44,51	49,23	48,77
2 µm altı (%hacimce)	7,29	7,68	7,64

Çamurda şamotun çıkarılmasından dolayı deneme çamurları standart çamura göre daha ince bir tane dağılımı elde edilmiştir.

5.8.2. Deneme çamurlarının reolojik özellikleri

Reoloji, malzemelerin uygulanan dış kuvvetler altındaki akış ve deformasyon davranışlarını inceleyen çok disiplinli bir bilim dalıdır. Bu bilim dalı, özellikle yarı-katı ve sıvı fazlarda bulunan sistemlerin davranışlarının anlaşılmasında temel bir role sahiptir. Reolojik özellikler, bir malzemenin uygulanan kayma gerilmesi altında zaman içerisindeki deformasyon miktarını belirleyen parametrelerdir ve bu nedenle seramik çamurlarının işlenebilirliği, kalıba dökülebilirliği ve üretim sürecinde gösterdiği performans doğrudan reolojik karakteristiklerine bağlıdır. Özellikle seramik endüstrisinde, döküm yöntemiyle şekillendirilen ürünlerin üretim kalitesini belirlemede çamur reolojisinin optimize edilmesi büyük önem arz etmektedir. Döküm çamurlarının viskozite, tiksotropi ve akma davranışları; kalıplama sürecindeki hız, ürün yüzey kalitesi ve çatlak oluşumu gibi pek çok çıktıyı doğrudan etkilemektedir.

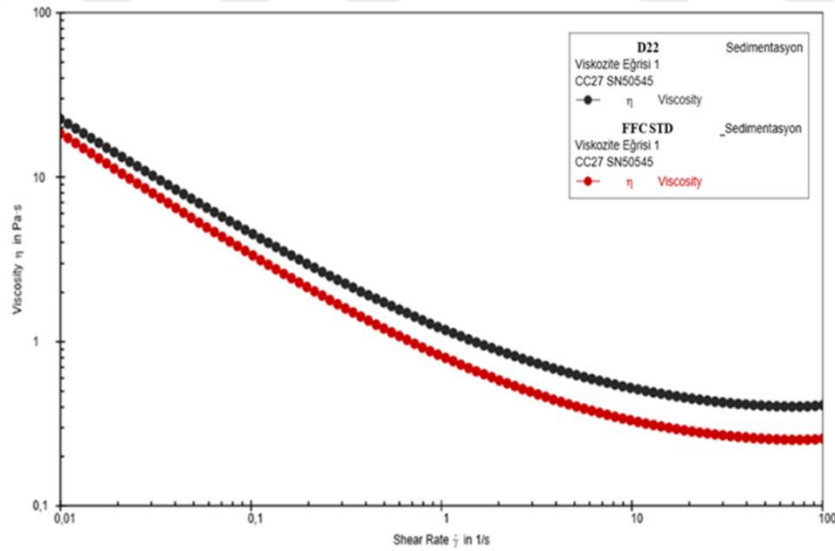
Kolloidal sistemlerde gözlemlenen reolojik davranışlar, birçok fiziksel ve kimyasal faktöre bağlı olarak değişkenlik gösterir. Bunlar arasında partikül boyutu ve morfolojisi, katı madde oranı, sıvı fazın viskozitesi, sistemdeki elektrokimyasal etkileşimler (örneğin; zeta potansiyeli) ve partikül-partikül ile partikül-disperse ortam arasındaki etkileşim kuvvetleri sayılabilir. Bu parametrelerin değişimi, sistemin akışkanlık özelliklerini hem mikroskobik hem de makroskobik ölçekte etkileyerek reolojik davranışın karmaşık bir yapıya bürünmesine neden olur.

Reolojik modeller, sistemlerin zamana karşı tepkisine göre iki ana başlık altında sınıflandırılabilir: zamandan bağımsız (zamana duyarız) ve zamana bağımlı (zamana duyarlı) modellerdir. Zamandan bağımsız reolojik davranış sergileyen akışkanlar, uygulanan kayma gerilmesine karşı anında ve sabit bir tepki verirler. Başka bir deyişle, aynı büyüklükteki bir kayma gerilmesi uygulandığında sistemin gösterdiği kayma hızı, uygulama süresinden etkilenmeksizin sabit kalır. Newtonian ve bazı Newtonian olmayan akışkanlar bu sınıfa girer. Örneğin, zamandan bağımsız bir sistemde, belirli bir anda uygulanan gerilmenin 10 dakika sonra uygulanması hâlinde bile viskozite değişmeden kalır; bu sistemler yalnızca uygulanan kayma oranının büyüklüğüne göre tepki verirler.

Buna karşın, zamana bağımlı reolojik özellik gösteren sistemlerde, kayma gerilmesinin uygulanma süresi boyunca sistemin viskozitesi ve kayma oranı zamanla

değişim gösterebilir. Bu davranışlar genellikle tiksotropik (zamanla viskozitenin azalması) veya reopektik (zamanla viskozitenin artması) karakterde olabilir. Seramik çamurlarının büyük bir kısmı, özellikle yüksek katı madde içeriğine ve kompleks parçacık etkileşimlerine sahip olanlar, zamana bağlı reolojik davranışlar sergilemektedir. Bu nedenle, seramik çamurlarının reolojik karakterizasyonu yapılırken hem zamansal hem de yapısal değişkenlerin dikkate alınması gerekmektedir.

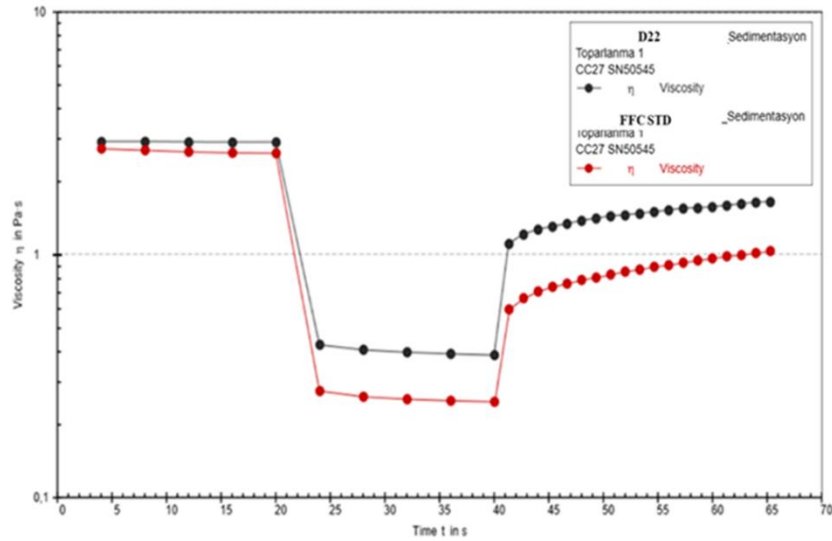
Sonuç olarak, seramik çamurlarının reolojik davranışlarının kapsamlı bir şekilde anlaşılması ve modellenmesi, üretim süreçlerinde kalite kontrolünün sağlanabilmesi ve ürün performansının artırılması açısından büyük önem taşımaktadır. Bu bağlamda reolojik analizlerin, çamur formülasyonunun optimize edilmesinden nihai ürün performansının tahmin edilmesine kadar çok yönlü bir kullanım alanı bulunmaktadır. Geliştirilen çamurların reolojik ölçümleri Seramik Araştırma Merkezinde Anton Paar MCR 102 reometre cihazını kullanarak gerçekleştirilmiştir. Ölçümlerde Dinamik viskozite, Toparlanma, Amplitude, Frekans, Os.Ro.Os, Süzülme, T_ramp teknikleri kullanarak çamurların 7 farklı özelliklerine bakılmıştır. Reoloji ölçüm sonuçları aşağıdaki şekillerde verilmiştir.



Şekil 5.6. Numunelerin reometre ile alınan viskozite ölçümleri

Şekil 5.6'da süspansiyona $0,01 \text{ s}^{-1}$ kayma hızında 100 s^{-1} kayma hızına kadar bir güç uygulanmış, 100 s^{-1} 'den $0,01 \text{ s}^{-1}$ 'e kadar da uygulanan kuvvet sürekli düşürülerek viskozite ölçümleri gerçekleştirilmiştir.

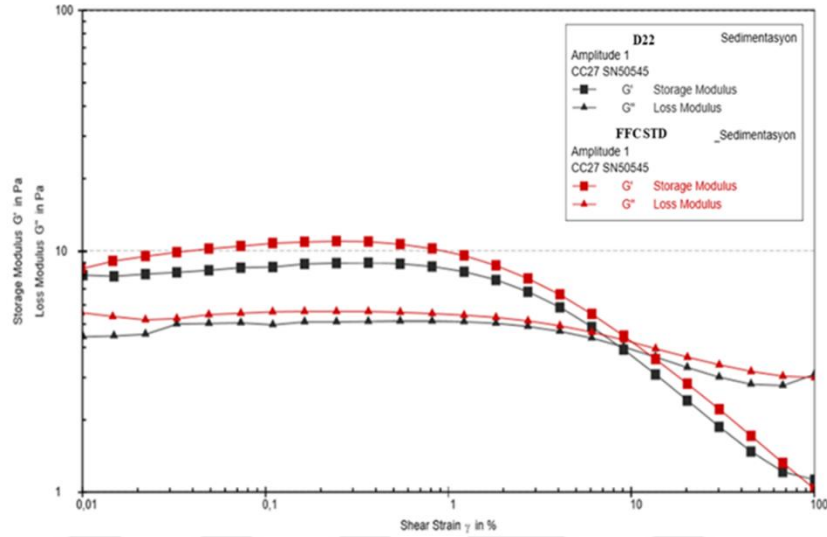
Grafikte, her iki seramik çamurunun viskozite (η , Pa·s) değerleri farklı kayma hızları (shear rate, 1/s) altında ölçülmüş ve logaritmik eksenlerde sunulmuştur. Siyah çizgi D-22 reçetesine, kırmızı çizgi ise STD FFC reçetesine aittir. Her iki çamur reçetesi de kayma hızı arttıkça viskozitenin azaldığı bir reolojik davranış sergilemektedir. Bu, seramik çamurlarında beklenen ve istenen bir durum olan psödoplastik (shear-thinning) akış türüdür. Bu tür davranış, çamurun düşük kayma hızlarında yüksek viskoziteyle stabil kalmasını sağlarken, yüksek kayma hızlarında (örneğin döküm veya karıştırma sırasında) akışkanlığının artmasına olanak tanır. Bu özellik, üretim süreçlerinde hem kalıba kolay dolum hem de şekil stabilitesi açısından avantaj sağlar. D-22 kompozisyonu düşük kayma hızlarında benzer viskoziteler gösterirken, yüksek kayma hızlarında daha yüksek viskoziteye sahiptir. Bu etkileşimler, D-22'nin sahip olduğu daha ince tane dağılımından olduğu düşünülmektedir.



Şekil 5.7. Numunelerin reometre ile toparlanma ölçümleri

Şekil 5.7'de 3 farklı bölüm bulunmaktadır. 1. Bölüm: Belirli bir zaman Süspansiyona hemen hemen hiçbir kuvvetin uygulanmadığı bölümdür. 2. Bölüm: Süspansiyona sabit bir zaman dilimi içerisinde yüksek bir kuvvetin (100 s^{-1} kayma hızı) uygulandığı bölümdür. 3. Bölüm: 1. bölümdeki gibi süspansiyona kuvvetin uygulanmadığı bölümdür. Bu ölçümdeki amaç, süspansiyonun 2. bölümde bozulan yapısının 3. bölümde tekrar kurulup kurulmadığını gözlemlemek, yapının tekrar kurulması durumunda 10. ve 20. saniye sonunda yapının yüzde kaçının tekrar kurulabildiği ve yapının sabit bir viskozite değerine ulaşip ulaşmadığını gözlemlemek için yapılan bir ölçümdür.

Yukarıdaki grafikte de görüldüğü üzere D-22 reçetesi, viskoziteyi neredeyse başlangıç seviyesine kadar geri kazanmıştır. Bu, D-22'nin yüksek tiksotropik toparlanma kapasitesine sahip olduğunu gösterir. STD FFC reçetesi ise, toparlanma aşamasında daha yavaş ve daha az bir geri kazanım göstermiştir.



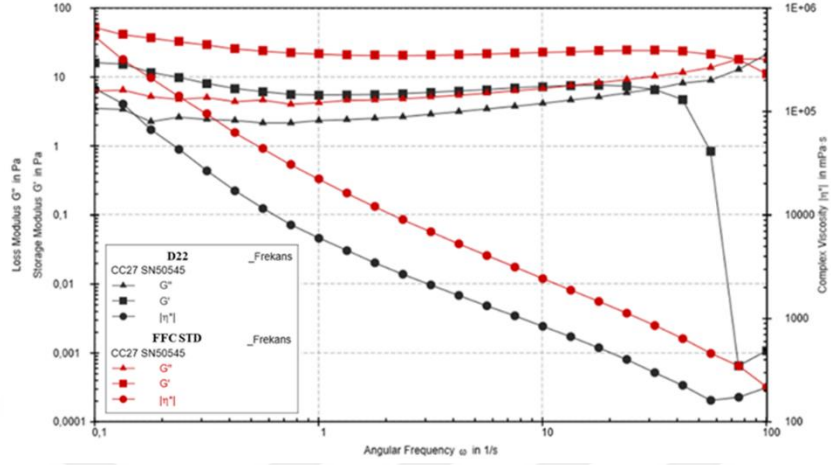
Şekil 5.8. Numunelerin reometre ile sabit frekans ölçümleri (amplitude testi)

Şekil 5.8’de hazırlanan süspansiyonlara sabit bir frekans da sürekli artış gösteren deformasyon uygulanmıştır. Bu ölçüm sonucu süspansiyonda bulunan iki farklı modülün, yani depolama modülü G' (elastik davranışı) ve kayıp modülü G'' (viskoz davranışı), sabit bir frekans eşliğinde davranışları değerlendirilir. Numunelerin hepsinde kayıp modülü G'' yani viskoz davranışının daha baskın olduğu görülmektedir.

D-22 ve STD FFC reçetelerine ait çamurların sabit frekans altında gerçekleştirilen amplitüd tarama testi sonuçları, her iki sistemin de viskoelastik davranış sergilediğini ortaya koymuştur. Özellikle düşük deformasyon seviyelerinde, her iki numunede de depolama modülü (G') kayıp modülünden (G'') yüksek bulunmuş, bu da çamurların katı-benzeri (jelimsi) yapı gösterdiğini teyit etmiştir. Ancak, D-22 reçetesi, STD FFC reçetesine kıyasla daha yüksek G' ve G'' değerleri sergileyerek yapısal olarak daha dirençli bir karakter ortaya koymuştur.

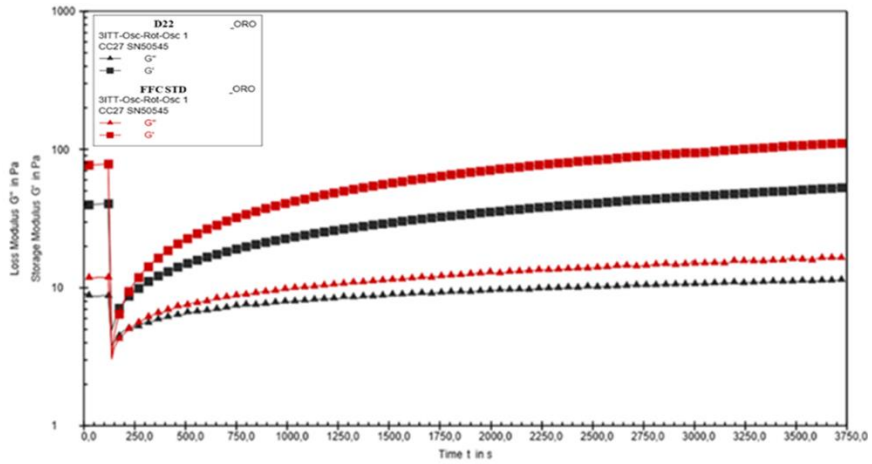
Deformasyon oranı arttıkça her iki çamurda da modül değerlerinde düşüş gözlemlenmiş, bu da yapının bozulduğunu ve akışkan davranışın baskın hale geldiğini göstermiştir. D-22 reçetesi, bu yapısal çözülmeye daha geç tepki vererek daha geniş bir lineer viskoelastik bölgeye sahip olduğunu ortaya koymuştur. Bu durum, D-22 reçetesinin

yüksek şekil stabilitesi, form tutma kabiliyeti ve çökelmeye karşı daha dirençli bir yapıya sahip olduğunu göstermektedir.



Şekil 5.9. Numunelerin reometre ile farklı frekans ölçümleri

Şekil 5.9'da numunelerin reometre ile farklı frekansta ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Yukarıda gerçekleştirilen ölçüm Osilasyon (Salınım) ile gerçekleştirilmiştir. Ancak, bir önceki ölçümün aksine, süspansiyona sabit bir deformasyon kuvveti altında sürekli artış gösteren bir frekans kuvveti uygulanmıştır. Bu ölçüm ile, süspansiyonun küçük frekans değerlerinde sedimentasyona uğrayıp uğramayacağını gözlemlemektir. Her iki çamurunda viskoelastik davranış gösterdiği $G'' > G'$ anlaşılmaktadır.

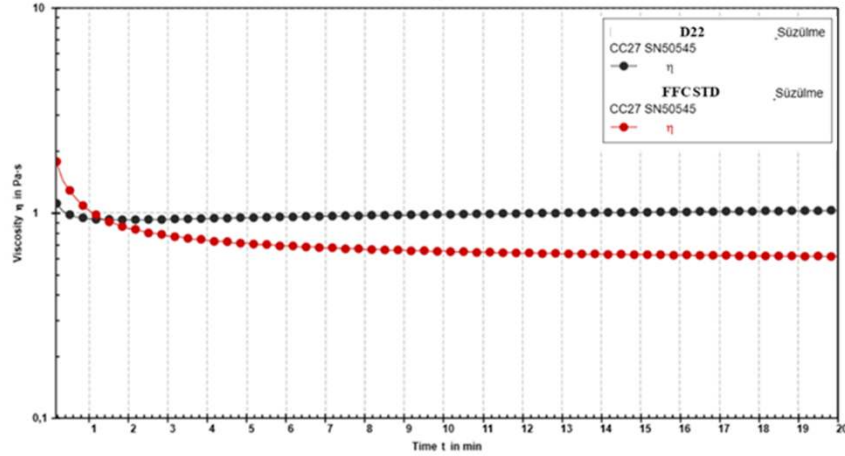


Şekil 5.10. Numunelerin reometre ile osilasyon-rotasyon-osilasyon ölçümleri

Şekil 5.10'da reometre cihazının her iki özelliği a.) Rotasyon b.) Osilasyon (salınım) kullanılmıştır. Buradaki amaç özellikle 3. bölgede yapının tekrar kurulması sırasında çamur taneciklerinin nasıl paketlenmelerinin gözlemlenmesi-simüle edilmesidir. Birinci bölümde osilasyon yöntemi ile malzemeye çok düşük bir kuvvet uygulanarak depolama enerjisi (G') ve kayıp enerji (G'') modüllerine ait değerler ayrı ayrı grafiğe yansıtılır. İkinci bölümde cihaz ani olarak rotasyona geçerek süspansiyonda var olan yapı tamamen bozulur. 3. bölümde tekrar osilasyona geçilerek özellikle yapının viskoelastik özelliği ile ilgili bilgiyi verecek olarak G' değeri gözlenir.

Her iki çamur da yüksek kayma kuvveti sonrası yapısal bozulma yaşamış ve bunu takiben zamana bağlı olarak elastik özelliklerini kısmen yeniden kazanmıştır. Ancak D-22 reçetesi, daha yüksek G' ve G'' değerleriyle toparlanma süreci boyunca yapısal bütünlüğünü daha etkin şekilde yeniden oluşturarak STD FFC reçetesine göre daha güçlü bir reolojik hafızaya sahip olduğunu göstermiştir.

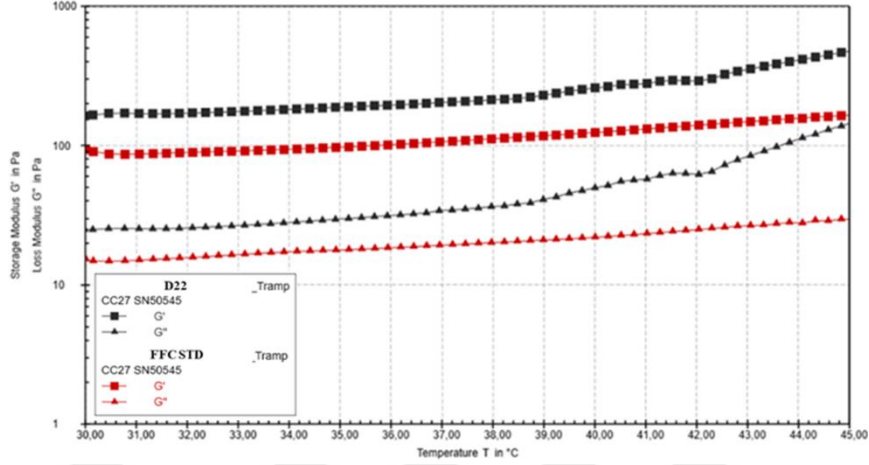
Özellikle G' (depolama modülü) eğrileri karşılaştırıldığında, D-22 reçetesinin elastik davranışını zamanla daha fazla geri kazandığı görülmektedir. D-22 reçetesi yapısını daha çabuk toparlanmasına rağmen, STD FFC reçetesine göre viskoelastik davranışı daha azdır.



Şekil 5.11. Numunelerin sabit kayma hızında ölçülen süzülme davranışları

Şekil 5.11'de numunelerin sabit kayma hızında viskozitesindeki zamana bağlı değişimi gözlemlenmiştir. Bu ölçümde 20 dakikalık bir süre içinde çamur sabit bir kayma hızına (10 s^{-1}) maruz bırakılarak, çamurun süzülme davranışı gözlemlenmektedir. D-22,

sabit kayma hızında viskozitesini zamana karşı hızlıca plato yaparak korurken, STD FFC numunesi belirgin bir zamanda viskozitede düşüş görülmüştür.



Şekil 5.12. Numunelerin reometre ile artan sıcaklıktaki visko-elastik ölçümleri (T_{ramp})

Şekil 5.12’de çamur sabit frekans (10ω) ve sabit deformasyon (1γ) da 30°C ile 45°C sıcaklık aralığında çamurun yüksek sıcaklıklarda bozulup bozulmayacağı gözlemlenmektedir.

D-22 reçetesi 40°C ‘den sonra yüksek viskoelastik özellik göstermektedir. Standart FFC reçetesi şamotun kararlı ve iri tane boyutta olmasından dolayı sıcaklık ile değişim D-22 reçetesine göre daha azdır.

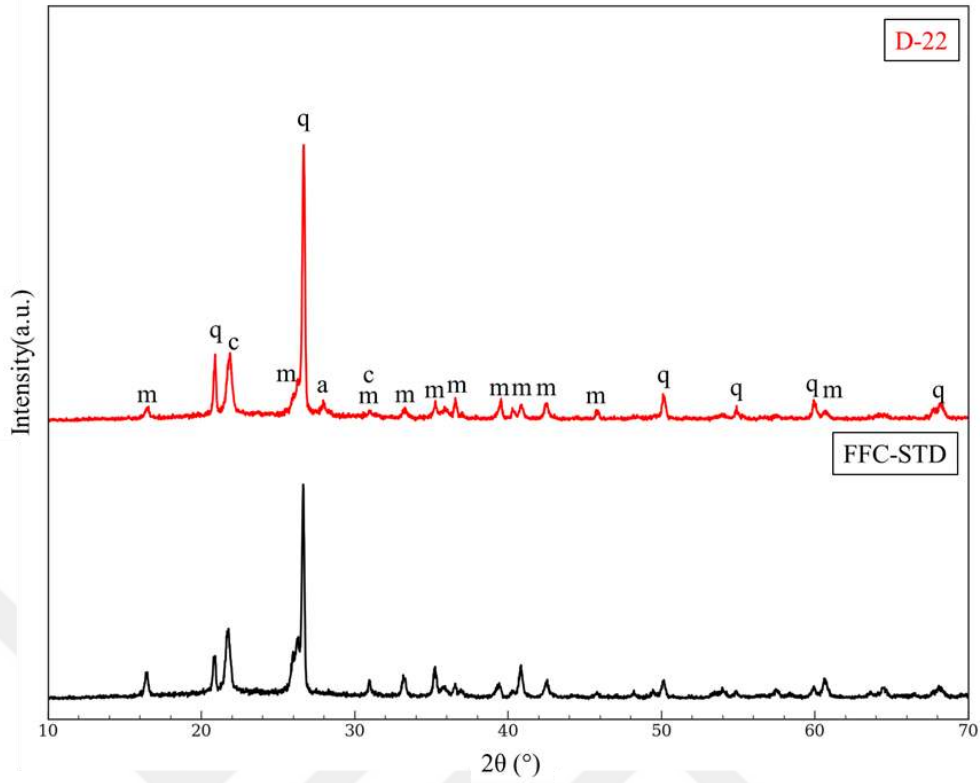
D-22 reçetesi, süzülme testinde yüksek viskozite kararlılığı göstererek sedimentasyona karşı daha dayanıklı ve daha stabil bir sistem olduğunu kanıtlamıştır. STD FFC reçetesi ise daha düşük başlangıç viskozitesi ve zamanla düşen eğrisi ile çökelme ve faz ayrışması açısından daha riskli bir yapı sunmaktadır. Bu sonuçlar, D-22 reçetesinin üretim sırasında bekleme, taşıma ve döküm süreçlerinde daha güvenilir bir performans sergileyeceğini göstermektedir.

Ölçümlerden görüldüğü üzere şamot çamurun viskozitesini ve elastiklik özelliğini düşürmektedir. Şamotun reçeteden çıkarılması ile çamurun viskoelastik özelliği artmaktadır. İşletme ölçeğinde gerçekleştirilen denemeler sonucunda, ürünlerde herhangi bir süzülme problemine rastlanmamıştır. Bu nedenle, çamur reolojisini iyileştirmeye yönelik ilave katkı malzemesi kullanımına gerek duyulmamıştır.

5.8.3. Deneme çamurlarının faz analizi

Kompozisyonların XRD analizine dayalı faz içeriği incelendiğinde hem standart FFC reçetesi hem de D-22 reçetesinde ortak olarak kuvars, müllit, kristobalit ve camı fazların bulunduğu gözlemlenmiştir. STD FFC reçetesinin kantitatif minerolojik analizi sonucunda, %17±3.0 kuvars, %54±3.0 müllit, %10,93±3.0 kristobalit, %17,96±9,0 amorf faz elde edilmiştir. D-22 reçetesinin kantitatif minerolojik analizi sonucunda %31,9±3.0 kuvars, %27,1±3.0 müllit, %11,9±3.0 kristobalit, %4,6±1.0 anortit ve %24,5±9.0 amorf faz içerdiği tespit edilmiştir. Bununla birlikte, D-22 kompozisyonunda, FFC'ye göre farklı olarak anortit ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$) fazına ait belirgin difraksiyon piklerinin varlığı bileşimin kimyasal içeriğinden kaynaklanan farklılıklarla açıklanabilir. Nitekim Tablo 5.14'te yer alan kimyasal analiz verileri incelendiğinde, D-22 reçetesinde Al_2O_3 içeriğinin FFC'ye kıyasla daha düşük, buna karşılık SiO_2 oranının daha yüksek olduğu görülmektedir. Anortit fazı aynı zamanda alüminyum içeren bir silikat yapıda olduğundan, sistemdeki mevcut Al_2O_3 'ün bir kısmının müllit yerine anortit formasyonunda yer aldığı anlaşılmaktadır. Bu faz dönüşümü, D-22 numunesinde müllit oranının azalmasına neden olmuş, bu da XRD deseninde müllite ait piklerin şiddetinin FFC reçetesine göre daha zayıf olmasına yol açmıştır. Aynı şekilde, yüksek SiO_2 içeriği ile uyumlu olarak D-22 reçetesinde kuvars fazına ait piklerin daha belirgin olduğu görülmektedir.

D-22 reçetesinde şamot olmamasına rağmen kristobalit fazının oluşumu ise, yüksek silika içeren seramik bünyelerde, kuvarsın çözünme-yeniden çökelme süreçleriyle oluşan katı hâl polimorfik dönüşüm kinetiğinin bir sonucudur [42]. Pişirim sırasında, kuvarsın kristobalite dönüşüm hızı, mevcut cam fazı veya alkali bileşenleri içinde gerçekleşen kuvars çözünme hızını aştığı koşullarda belirginleştiği düşünülmektedir [42]. STD FFC ve D-22 reçetelerinin faz içerikleri Şekil 5.13'te verilmiştir.



Şekil 5.13. Standart FFC ve D-22 reçetesinin XRD grafikleri (q: Kuvars, c: Kristobalit, m: Müllit, a: Anortit)

5.8.4. Deneme çamurlarının fiziksel ve mekanik özellikleri

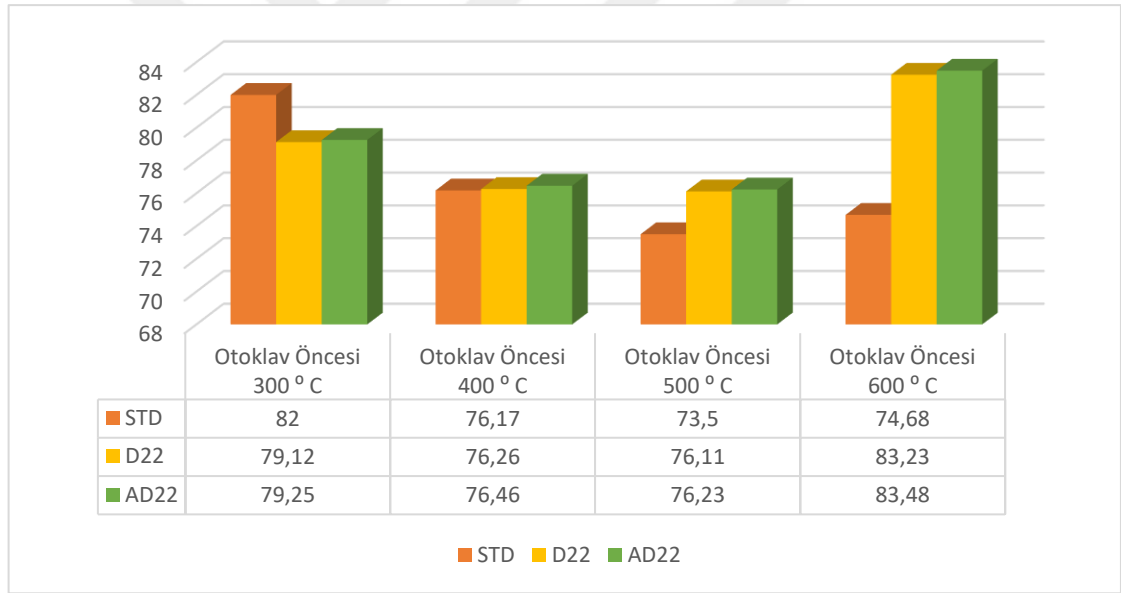
Reçetelerin fiziksel ve mekanik özellikleri için cıva yoğunluk, su emme, Brookfield viskozite, farklı sıcaklıktaki ısı genleşme katsayısı ve kuru ve pişme mukavemet değerleri ölçülmüş, değerler fiziksel, ısı genleşme ve mekanik özellikler olmak üzere 3 farklı kategoride birbiri ile karşılaştırılmıştır.

Reçetelerin fiziksel özellikleri karşılaştırıldığında, standart reçete şamottan kaynaklı olarak yoğunluğunun daha yüksek ve genel olarak tane boyutunun daha büyük olduğundan dolayı viskozitesinin daha düşük olduğu gözlemlenmektedir. Su emme değerlerine bakıldığında ise, D-22 reçetesinin standart reçete ile karşılaştırdığımızda daha iyi bir sonuç verdiğini gözlemlemek mümkündür. Reçetelerin fiziksel özellikler karşılaştırması aşağıdaki Tablo 5.17’de verilmiştir.

Tablo 5.17. Standart FFC, D-22 ve AD-22 reçetelerinin fiziksel özellikleri

	STD FFC	D-22	AD-22
Civa Yoğunluğu (g/cm ³)	1,98	1,96	1,95
Su Emme (%)	10,14	9	8,75
Viskozite (Cp)	800	1910	1210

Reçetelerin dilatometre ile yapılan ısı genleşme katsayısı analizi Şekil 5.14'te verilmiştir. Reçetelerin ısı genleşme katsayısı farkı değerlendirildiğinde standart FFC reçetesinin düşük sıcaklıklarda (~ 300°C) daha yüksek bir α değerine sahipken, yüksek sıcaklıklarda (~ 600°C) bu mekanizmanın tam tersini gözlemlemek mümkündür. Numunelerin 400-500°C' deki sıcaklıklarda ısı genleşme katsayıları birbirine yakın olduğu görülmektedir.



Şekil 5.14. Standart FFC, D-22 ve AD-22 reçetelerinin ölçülen ısı genleşme özellikleri

Mukavemet testleri, üç adet ham ve üç adet pişmiş mukavemet numunesi üzerinde gerçekleştirilmiş ve elde edilen değerlerin ortalaması alınmıştır. Reçetelerin mekanik özellikleri Tablo 5.18'de verilmiştir.

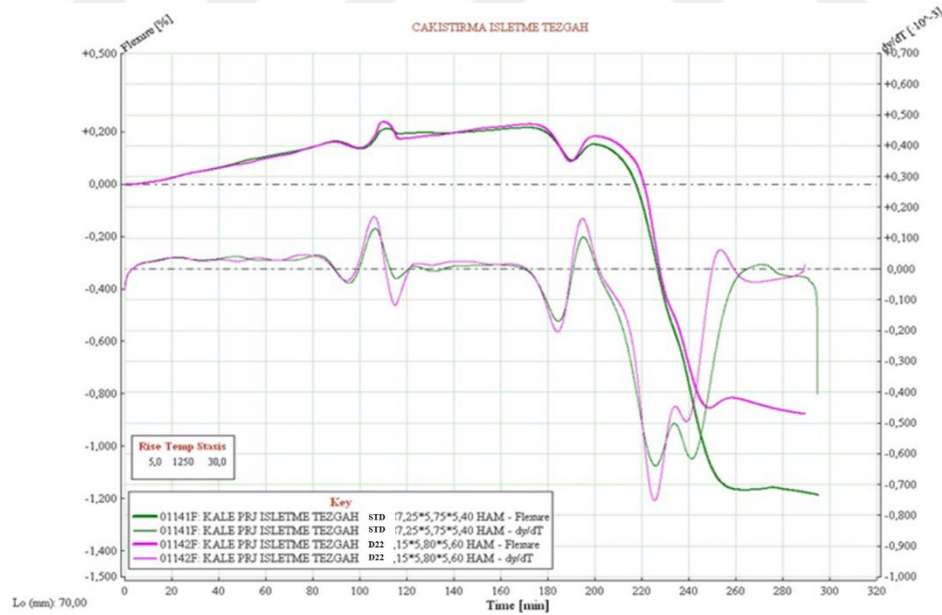
Tablo 5.18. Standart FFC, D-22 ve AD-22 reçetelerinin mekanik  zellikleri

	STD FFC	D-22	AD-22
Kuru Mukavemet (kgf/cm ²)	19,5	35,5	30,5
Pi�mi� Mukavemet (kgf/cm ²)	475,6	430,9	443,1

Tablo 5.18'de sunulan mekanik özellikler değerlendirildiğinde, kuru mukavemet açısından D-22 reçetesi, içerdiği wollastonit nedeniyle standart reçeteye kıyasla daha yüksek bir değer sergilemiş ve yarı mamul aşamasında üstün performans göstermiştir. Bu durum, wollastonitin özellikle kuruma aşamasında yapısal katkı sağlamasıyla birlikte, çamur bünyesinin mukavemetini artıran i nemsiz morfolojisi sayesinde daha homojen bir yapı olu turdu unu göstermektedir.

5.8.5. Deneme  amurlarının sinterleme dilatometresi sonuçları

D-22 ve FFC STD reçetelerinin sinterleme dilatometresi sonuçları karşılaştırmalı olarak aşağıdaki  ekil 5.15'te verilmiştir.



Şekil 5.15. Standart FFC ve D-22 reçetelerinin sinterleme dilatometresi sonuçları

FFC ve D-22 bünyelerin porozite, elastik modül ve nem genle mesi arasındaki beklenen korelasyon net biçimde görülmektedir: FFC'nin daha yüksek su emmesi (%10,7) daha geniş gözenek hacmine işaret ederek neme karşı   meye daha duyarlı bir

cam-matris davranışı yaratarak elastik modülün 12,12 GPa seviyesinde kalmasıyla sonuçlanmıştır; buna karşılık D-22’de daha düşük su emmesi (%8,20) ve CaO’nun anortit oluşumunu desteklemesi sayesinde kurulan daha sağlam taneler arası iskelet, suyun cam fazına erişimini sınırlayıp nem genleşmesini azaltırken elastik modülü 14,07 GPa’a yükseltir. Dolayısıyla porozite arttıkça E’nin azaldığı, nem genleşmesi riskinin de artacağı düşünülmektedir. Sinterleme dilatometresi ölçüm sonucu, numunelerin piroplastik deformasyon indeksi (PI), camsı faz viskozitesi (E) ve su emme değerleri hesaplanmış aşağıdaki Tablo 5.19’da verilmiştir.

Tablo 5.19. Sinterleme dilatometresi ölçüm sonucu hesaplanan PI, E ve su emme değerleri

	PI (1/cm)x10 ⁻⁵	E GPa.s)	Su Emme (%)
STD FFC İŞLETME	1,1	12,1	10,7
D-22 İŞLETME	0,8	14,1	8,2

Reçetelerin sinterleme dilatometresi sonuçları incelendiğinde piroplastik indeks, çamurun şekil alma kapasitesini yani plastik davranışını temsil etmektedir. STD FFC reçetesinde PI değeri $1,1 \times 10^{-5}$ (1/cm) iken, D-22 reçetesinde bu değer $0,8 \times 10^{-5}$ (1/cm) olarak belirlenmiştir. FFC reçetesinin daha yüksek bir piroplastik deformasyon yeteneğine sahip olduğunu, yani daha kolay şekillenebilir bir yapıda olduğunu göstermektedir. Aynı zamanda yüksek PI değerleri bazı durumlarda kuruma ve pişirme aşamasında şekil bozulmalarına da neden olabilir.

Elastik Modül (E) değerleri karşılaştırıldığında, D-22 reçetesinde 14,07 GPa.s ile daha yüksek bir camsı faz viskozite değeri elde edilmiştir. Bu durum, D-22 reçetesinin deformasyona karşı daha fazla direnç gösterdiğini ve daha rijit bir yapı sergilediğini ortaya koymaktadır. Buna karşın STD FFC reçetesi 12,12 GPa.s değeriyle daha düşük elastik modüle sahiptir, bu da daha düşük rijit yapıya sahip ve mekanik dayanımı daha az olduğunu göstermektedir. Su emme oranları da reçetelerin mikroyapı özelliklerini destekleyici niteliktedir. D-22 reçetesi %8,20 su emme değeri ile daha düşük poroziteye sahip olduğunu ortaya koyarken, STD FFC reçetesi %10,7’lik su emme oranıyla daha gözenekli bir yapıdadır. Bu fark, faz kompozisyonu ve camsı faz oranıyla doğrudan ilişkilidir. Daha düşük su emme oranı ise genellikle daha yüksek camsı faz içeriği veya daha yoğun sinterlenmiş bir yapının oluştuğunu göstermektedir.

5.8.6. Isıl şokuna dayanıklılık testleri

Isıl şokuna dayanıklılık (Harkot) testinde, 210 °C etüvde bekletilen sırlı ürün parçalarının soğuk suya atılması ile sır-bünye genleşme uyumu kontrol edilir. Uyum olmayan parçalarda çatlama görülürken, uyumlu bünyelerde bununla karşılaşmamaktadır. Çatlakların varlığı boyar madde ile kontrol edilmektedir. Numunelerin Harkot test sonuçları Tablo 5.20’de verilmiştir.

Tablo 5.20. *Numunelerin Harkot test sonuçları*

	Ebat	Numune Sayısı	Sağlam
STD FFC İŞLETME	10cm*10cm	1	1
D-22 İŞLETME	10cm*10cm	1	1

Oluşturulan D-22 reçetesi ve FFC reçetesinin harkot sonucu iki numune içinde olumludur. Bu durum, sırn bünyeye iyi adapte olduğunu ve çatlak ya da gerilme oluşturmadığını göstermektedir.

5.8.7. D-22 reçetesinin diğer analiz sonuçları

D-22 kodlu numune çamur halinde hazırlandıktan sonra, hazırlanan çamurun tane boyut dağılımı lazer yöntemi ile ölçülmüş, sonucu STD FFC numunesi ile karşılaştırmalı olarak aşağıda verilmiştir.

Tablo 5.21. *Standart FFC ve D-22 çamurlarının lazer tane boyut sonuçları*

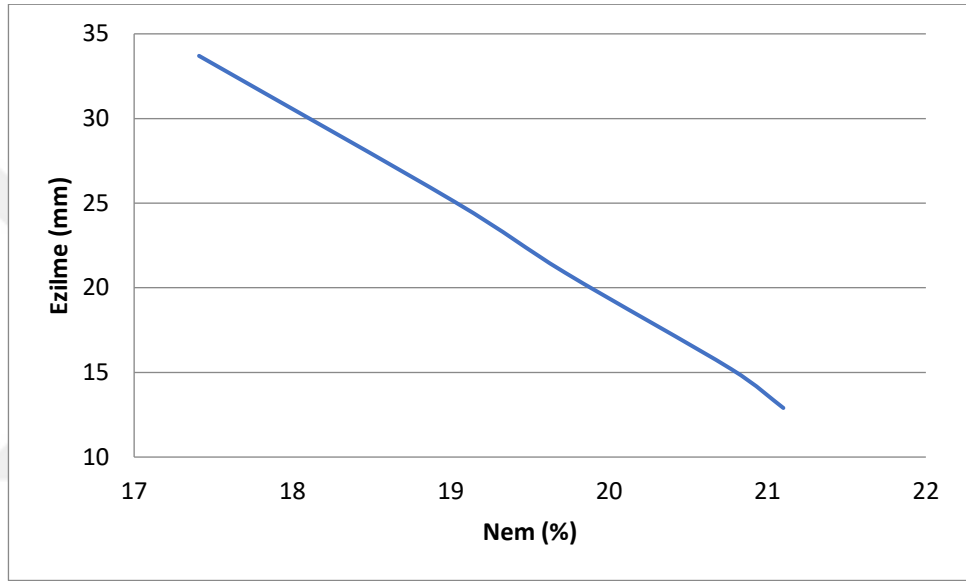
Numune	D(10)	D(50)	D(90)	D(97)	D(99)
D-22 İŞLETME	1,5	9,2	39,5	56,2	77,4
STD FFC	1,8	13,0	116,3	271,1	393,9

Tane boyut ölçüm sonuçlarında şamottan kaynaklı farklılık görülmektedir. Kullanılan şamotun tane boyutunun diğer hammaddelerin tane boyutundan büyük olmasından dolayı, şamotun reçetede kullanılması ile standart reçetenin tane boyut değerleri yüksek çıkmaktadır. D-22 çamurunun diğer döküm özellikleri Tablo 5.22’de verilmiştir.

Tablo 5.22. D-22 çamurlarının döküm özellikleri

Numune	Çamur yoğunluğu (g/l)	Kuru küçülme (%)	Toplu küçülme (%)	Deformasyon (mm)
D-22	1858	3,0	6,6	6,6

D-22 çamurunun plastisitesi Pfefferkorn yöntemi ile belirlenmiştir. Plastisite ölçüm sonucu aşağıda Şekil 5.16’da verilmiştir.



Şekil 5.16. D-22 kodlu çamurun plastisite eğrisi

Plastisite ölçümüne göre çamurun 24 mm ezilmesi %19,17 nem oranında gerçekleşmiştir. D-22 kodlu numunenin fiziksel ve mekanik özellikleri Tablo 5.23’te verilmiştir.

Tablo 5.23. D-22 kodlu numunenin fiziksel ve mekanik özellikleri

Numune	Su Emme (%)	Yoğunluk (g/cm ³)	Kuru Mukavemet (kg/cm ²)	Pişme Mukavemet (kg/cm ²)	L	a	b
D-22 -1	8,49	1,99	29,7	350,8	89,7	1,1	9,5
D-22-2	8,87	1,98	31,1	363,5			
D-22-3	8,86	1,98	33,5	379,8			
Ortalama	8,74	1,98	31,43	364,7			

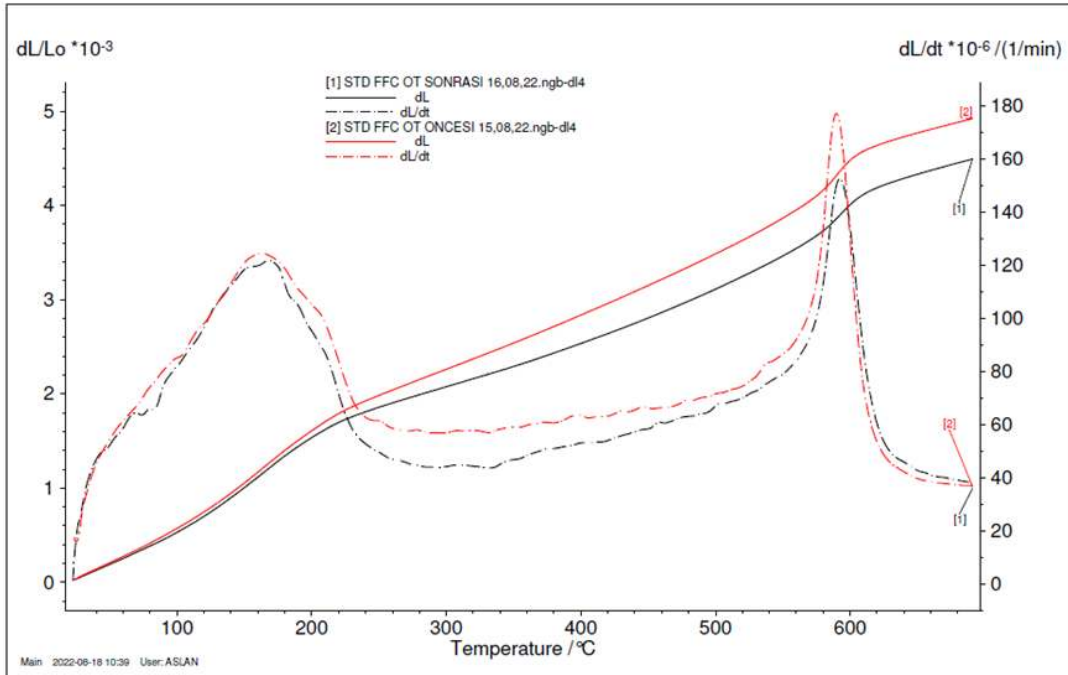
D-22 ve STD FFC çamurunun FFC standart sırlı ile sırlı plakaların otoklav sonuçları aşağıda verilmiştir. Otoklav testi için, numunelerin yüzeyi test öncesinde herhangi bir kir, toz ya da nem olmamasına dikkat edilir ve otoklav cihazına yerleştirilir ve burada belirlenen standart test koşulları altında işlem görür. Test sürecinde numuneler, 2 bar $\pm$ 0.2 bar basınç altında ve 120 $\pm$ 2 °C sıcaklıkta, her biri bir saat süren toplam on buhar döngüsüne tabi tutulur. Her bir çevrim sonrasında numunelerin ortam sıcaklığına kadar soğumasına izin verilir. Bu işlem, seramik ürünlerin ısı şoklarına ve buhar basıncına karşı dayanımını değerlendirmek amacıyla gerçekleştirilir. Bu koşullar, sırlı ve bünye arasındaki ısı genleşme farklılıklarından doğabilecek olası gerilmeleri simüle ederek, sırlı tabakasının yüzeyde çatlama, soyulma ya da bozulma gösterip göstermediğini ortaya koyar. Test süreci sonunda numuneler gözle ve gerekirse mikroskopik yöntemlerle incelenerek, yüzey deformasyonlarının varlığı kontrol edilir. Deneme reçetesinin ve Standart FFC reçetesinin otoklav testi sonucunda herhangi bir çatlak oluşumu görülmemiştir.

Tablo 5.24. Numunelerin otoklav testi sonuçları

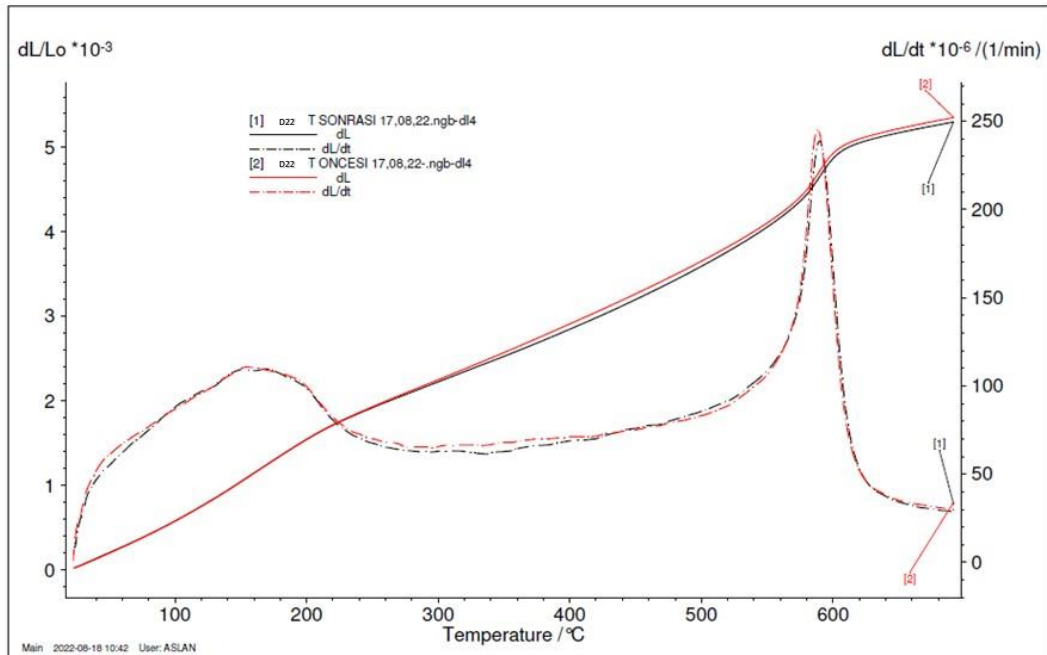
Numune	Otoklav Sonucu
D-22	Hasarsız
STD FFC	Hasarsız

Numunelerin otoklav öncesi ve otoklav sonrası ısı genleşme özellikleri incelenmiştir. STD FFC ve D-22 reçetelerinin dilatometre sonuçları incelendiğinde α -kristobalit $\rightarrow\beta$ -kristobalit faz dönüşümünün 250–260 °C’de gerçekleştiği ve dönüşüm sırasında doğrusal genleşmenin olduğu belirlenmiştir [44]. Yapıda oluşan bu hacim

değişimi numunelerde mikroçatlaklara yol açabilmektedir [45]. Ancak yapılan otoklav ve Harkot testleri sonucunda numunelerin her ikisinde de çatlak oluşumu gözlemlenmemiştir. Standart FFC ve D-22 numunelerinin dilatometre sonuçları aşağıda Şekil 5.17 ve 5.18’de verilmiştir.



Şekil 5.17. Standart FFC numunesi otoklav öncesi ve sonrası dilatometre sonucu



Şekil 5.18. D-22 numunesi otoklav öncesi ve sonrası dilatometre sonucu

Dilatometre sonucu ile ilgili detaylı bilgiler aşağıda Tablo 5.25’te verilmiştir.

Tablo 5.25. Numunelerin otoklav öncesi ve sonrası ısı genleşme katsayı değerleri ($\times 10^{-7}$)

Numune	300 °C	400 °C	500 °C	600 °C
STD (OT. Ö)	80,96	74,65	72,58	77,27
STD (OT. S)	74,43	66,75	64,81	69,17
D-22 (OT. Ö)	80,96	76,94	76,36	85,31
D-22 (OT. S)	80,04	75,24	75,07	84,25

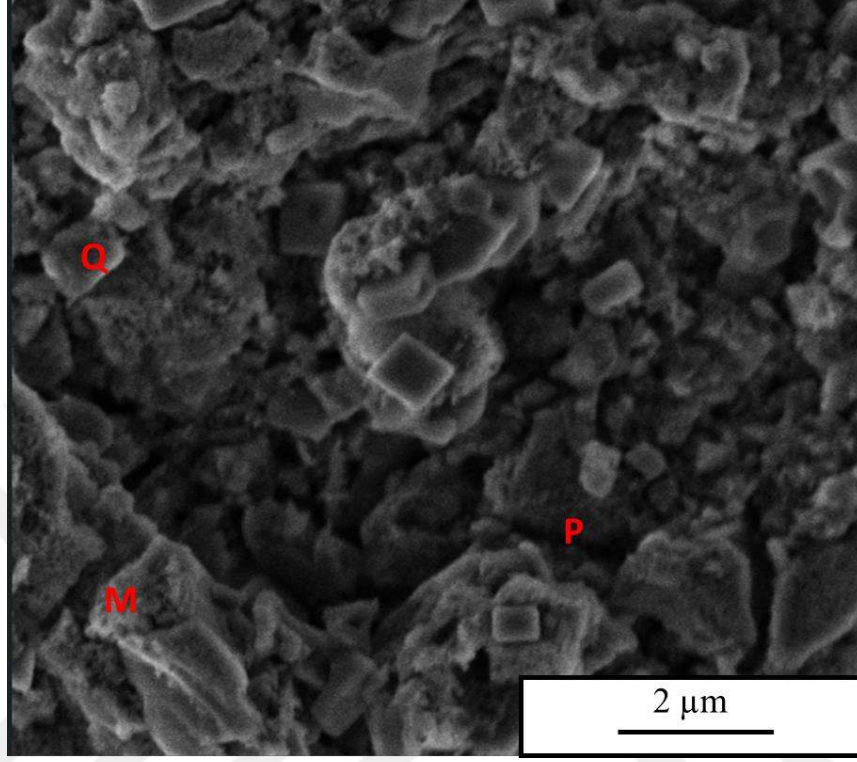
Otoklav sonrası dilatometre verileri, nem kaynaklı gecikmeli genişlemenin yüksek $\Delta\alpha_{400}$ ’e sahip sistemlerde sır-bünye gerilme dengesini çekme yönüne taşıyarak çatlama eğilimini artırdığını göstermektedir. Deneme reçetesinin nem genişmesi sonuçlarına göre yapıda yoğun kristal oluşumu olduğu için genişleme katsayısı değişmemektedir ve ısı genleşme anlamında daha kararlı bir yapıya sahiptir. FFC reçetesinin ise daha fazla yapısal değişim içerisinde olduğu görülmektedir. Bu da D-22 reçetesi ile üretilen ürünün uzun yıllar boyunca nem genişmesine karşı daha düşük risk taşımasını sağlamaktadır.

5.8.8. Mikroyapısal Analiz

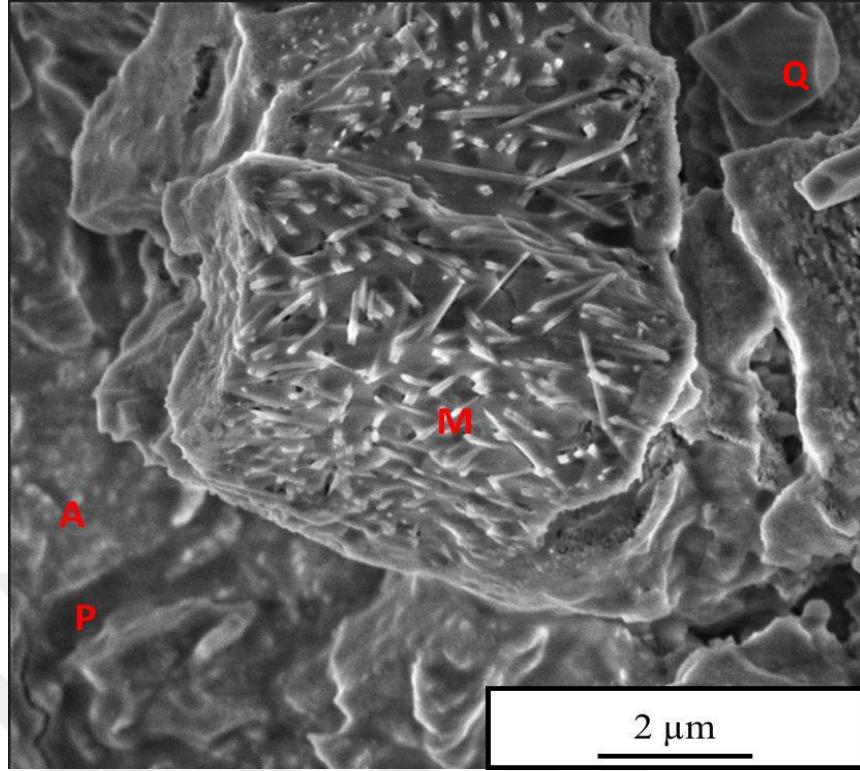
İşletmede tünel fırında 1230 °C’de 20 saatte pişirilen standart FFC bünye ile D-22 kodlu geliştirilen deneme bünyenin taramalı elektron mikroskobu ile mikroyapısal analizleri yapılmıştır. Mikroyapısal analizler Kaleseramik fabrikasında bulunan SEM Tescan Vega marka model cihaz ile ikincil elektron modunda 5 keV hızlandırma voltajı kullanılarak yapılmıştır. Geliştirilen bünye kompozisyonlarının EDX analizleri ise Eskişehir Teknik Üniversitesinde bulunan Seramik Araştırma Merkezi’nde ZEISS SUPRA 50VP marka model Taramalı Elektron Mikroskobu ile 20 keV hızlandırma voltajında gerçekleştirilmiştir.

Şekil 5.19 ve Şekil 5.20’de FFC standart bünye ile D-22 kodlu deneme bünyeye ait elektron görüntüleri verilmiştir. Şekil 5.19’da FFC standart bünyeye ait elektron görüntüsüne baktığımızda; ergimeden kalmış kalıntı kuvars ve albit fazları Şekil 5.20’de D-22 kodlu geliştirilen bünyenin elektron görüntüsüne baktığımızda; yapıda kalıntı kuvars, albit ve müllit fazlarının yanında bir miktar anortit fazıda görülmektedir. Ayrıca camsı fazdaki artış ve porların küçülmesi de en belirgin farklardandır. Anortit

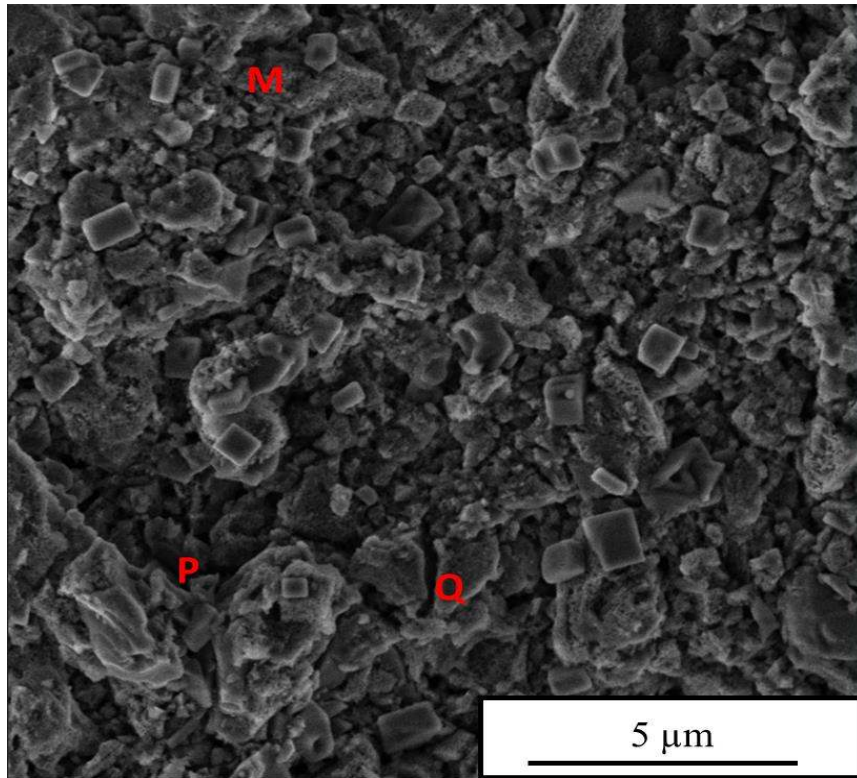
kristallerinin yapıda görülmesinin en önemli sebebi wollostanit kullanımının olması ve sinterlenme davranışının hızlanmasıdır.



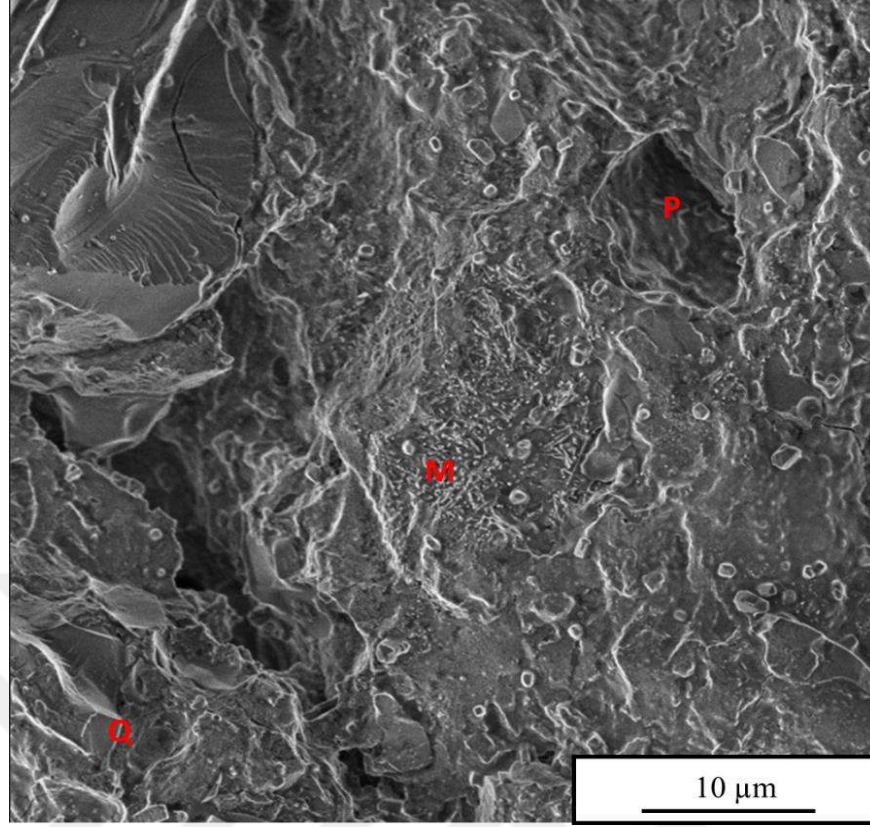
Şekil 5.19. Standart FFC bünyesine ait ikincil elektron görüntüsü (q:Kuvars, p:Por, m:Müllit)



Şekil 5.20. D-22 kodlu geliştirilen bünyeye ait ikincil elektron görüntüsü (q: Kuvars, p:Por, m:Müllit, a:Anortit)

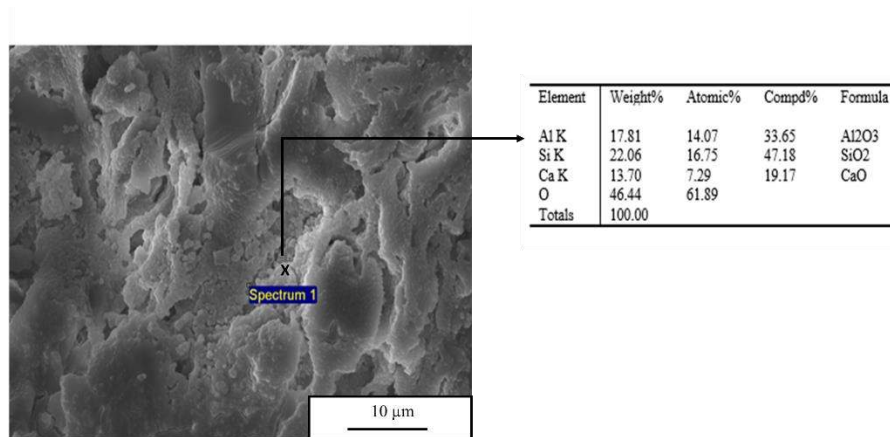


Şekil 5.21. Standart FFC bünyesine ait ikincil elektron görüntüsü (q:Kuvars, p:Por, m:Müllit)

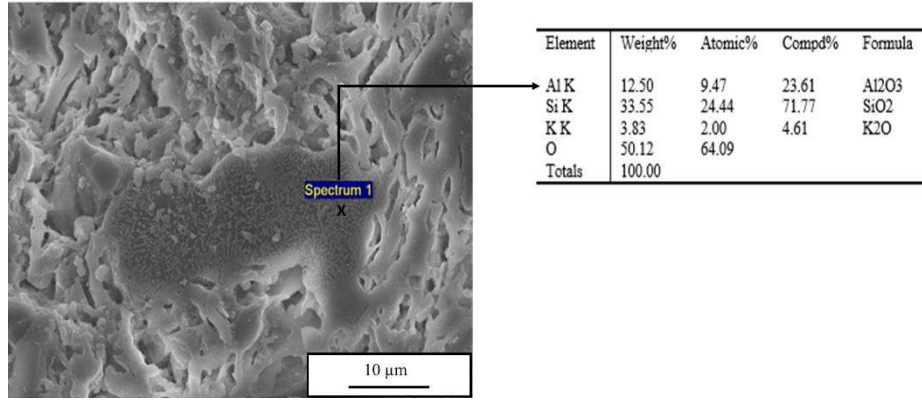


Şekil 5.22. D-22 kodlu geliştirilen bünyeye ait ikincil elektron görüntüsü (q:Kuars, p:Por, m:Müllit,)

Şekil 5.23'te görülen ikincil elektron görüntüsünde D-22 kodlu bünyede kristallerin varlığı gözlemlenmektedir. Kristaller üzerine yapılan EDX analizlerinden de yapının anortit olduğu görülmektedir. Yine D-22 kodlu bünyeye ait yapının ikincil elektron görüntüsünde müllit kristalleri görülmüş ve bu kristallerinin varlığı EDX analizleri ile desteklenmiştir.

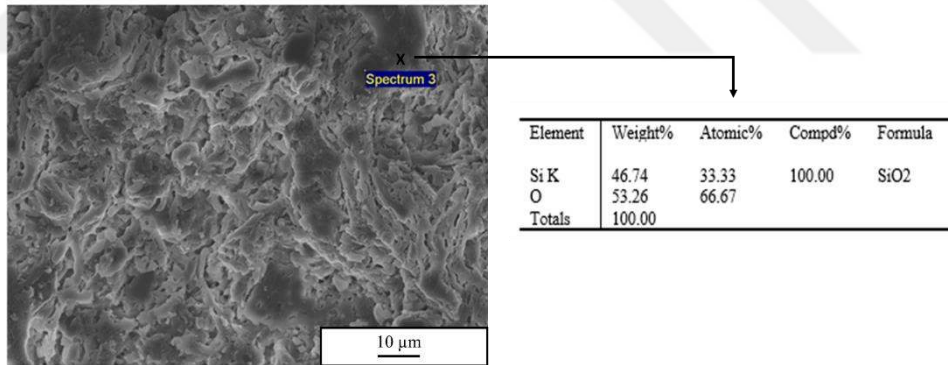


Şekil 5.23. D-22 kodlu bünyeye ait anortit kristalleri

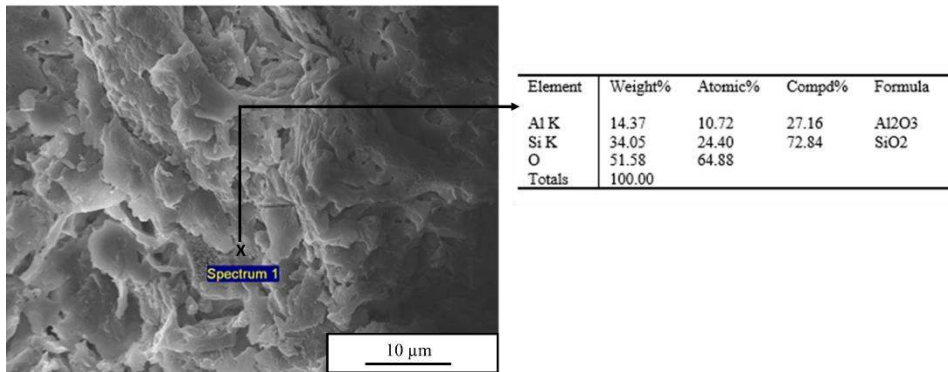


Şekil 5.24. D-22 kodlu bünyeye ait müllit kristalleri

Şekil 5.25'te görülen ikincil elektron görüntüsünde standart FFC bünyede kuvars kristallerinin varlığı gözlemlenmektedir. Yine standart FFC bünyeye yapılan ikincil elektron görüntüsünde müllit kristalleri görülmüş ve bu kristallerinin varlığı EDX ile desteklenmiştir.



Şekil 5.25. Standart FFC bünyesine ait kuvars kristalleri



Şekil 5.26. Standart FFC bünyesine ait müllit kristalleri

6. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada FFC bünye geliştirilmesinde kullanılan ithal şamot malzemesinin yerine yerli kil, kaolen ve wollastonit gibi hammaddeler kullanılarak üretilmesi ve geliştirilmesi amaçlanmıştır.

Kimyasal, minerolojik ve faz analizleri yapılarak ithal şamotlu standart FFC bünye kompozisyonunda feldispat kullanımı kaldırılmış ve kil-kaolen ve wollastonit hammaddeleri kullanılarak benzer FFC bünyeler geliştirilmeye çalışılmıştır. Oluşturulan alternatif FFC bünyelerin fiziksel testleri standart bünye ile mukayese edilmiştir. Şamotlu ve şamotsuz olmak üzere toplam dört adet alternatif reçete çalışması yapılmış, fiziksel, kimyasal analiz ve döküm özellikleri değerlendirildiğinde standart FFC reçetesine en yakın özellikleri gösteren D-22 reçetesiyle çalışmalara devam edilmiştir.

Samot, bilindiği üzere kil-kaolen hammaddesinin yüksek sıcaklıkta kalsine edilerek (1400-1450°C) elde edilen endüstriyel bir hammaddedir. FFC bünyelerinde kullanılmasının nedeni bünyeye kattığı düşük deformasyon ve yüksek alümina içeriğidir [37]. Bu sayede FFC bünyelerde müllit, kuvars, kristobalit ve cam fazlarına dönüşerek FFC bünye oluşumuna destek olmaktadır.

Geliştirilen bünyelerde standart FFC bünyeye en yakın değerler D-22 kodlu reçete ile ulaşılmıştır. % Küçülme (5,16), % su emme (8,2), ısı genleşme değerleri ($\alpha_{400x} (\times 10^{-7} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}) = 75,135$) ve deformasyon (6,6 mm) değerleri, standart bünyeye en yakın bünyenin belirlenmesine imkân tanımaktadır. D-22 reçetesine ve standart FFC reçetesine uygulanan otoklav ve Harkot testleri sonucunda her iki reçeteden de olumlu sonuç elde edilmiştir. Bu durum sır ile bünye arasındaki uyumun sağlandığını ve herhangi bir çatlak oluşumunun gerçekleşmediğini göstermektedir.

Yapılan reçete denemelerinde, pişmiş duvar karosu kırığının kullanılması ile deformasyonun arttığı, su emme değerlerinin azaldığı ve dolayısıyla mukavemetin arttığı görülmüştür. STD FFC reçetesi ve D-22 reçetesinin kuru mukavemet değerleri kıyaslandığında D-22 reçetesinin içerisinde bulunan %4 wollastonit ilavesi ile kuru mukavemet değerlerinin standart reçeteye göre daha yüksek olduğu görülmektedir. Wollastonit ilavesi, mikroyapıda iğnemi kristal oluşturarak parçacıklar arasındaki bağlanmayı artırarak kuruma sırasında çatlak oluşumunu azaltmakta ve kuru mukavemeti arttırmaktadır.

Karşılaştırılmalı yapılan XRD analizlerinde standart FFC bünyeden farklı olarak ayrıca anortit kristallerinin varlığı da camsı fazın artışında su emmenin düşük kalmasını

destekleyen sonuçlardır. Kompozisyonların XRD analizine dayalı faz içeriği karşılaştırıldığında, STD FFC ve D-22 reçetelerinde ortak olarak kuvars, müllit, kristobalit ve camsı fazların bulunduğu belirlenmiştir. Ancak D-22 reçetesinde, FFC'ye kıyasla anortit ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$) fazına ait belirgin difraksiyon pikleri tespit edilmiştir. Bu farklılık, her iki reçetenin kimyasal bileşimlerdeki değişimlerle ilişkilendirilmiştir. Özellikle D-22 reçetesinde Al_2O_3 içeriği daha düşük, SiO_2 oranı ise daha yüksek olup; mevcut Al_2O_3 'un bir kısmının müllit yerine anortit fazında yer aldığı anlaşılmaktadır. Bu durum, D-22 kompozisyonunda müllit oranının azalmasına ve XRD deseninde müllite ait piklerin daha zayıf gözlemlenmesine neden olmuştur. Ayrıca, yüksek silika içeriğiyle uyumlu şekilde D-22 reçetesinde kuvars fazına ait piklerin daha belirgin olduğu gözlemlenmiştir.

Tez kapsamında yapılan reolojik değerlendirmeler, D-22 çamuru, yüksek tiksotropik toparlanma kapasitesiyle deformasyon sonrası yapısal bütünlüğünü hızlı şekilde yeniden kazanmış, bu yönüyle döküm ve bekleme süreçlerinde şekil kararlılığını daha iyi korumuştur. Psödoplastik akış davranışı her iki reçetede gözlemlenmiş olmakla birlikte, D-22 reçetesi daha yüksek iç yapısal direnç sergileyerek partikül etkileşiminin güçlü olduğunu ortaya koymuştur. Yapılan amplitüd ve frekans testleri, D-22 reçetesinin viskoelastik davranışını daha geniş bir deformasyon aralığında koruyabildiğini ortaya koymuştur. Ayrıca D-22 çamuru, sabit kayma hızında yapılan süzülme testlerinde viskozite kararlılığını yüksek oranda sürdürebilmiş ve sedimentasyona karşı daha dirençli bir yapı sunmuştur. Reolojik hafızanın güçlü olması, bu çamurun üretim sırasında oluşabilecek mekanik ve termal zorlanmalara karşı daha stabil kalmasını sağlamaktadır. Sonuç olarak, D-22 reçetesi şekillendirilebilirlik, süzülme dengesi ve akış davranışı açısından üretim koşullarına uygun bir reolojik profil sergilemiştir. Ayrıca reometre ölçümleri, D-22 reçetesinin yüksek tiksotropik toparlanma kapasitesi sergilediğini ve şekillendirme sonrası viskozitenin yeniden kazanıldığını ortaya koymuştur. Bu durum, endüstriyel döküm prosesleri için uygun bir reolojik davranışa işaret etmektedir.

SEM ile yapılan mikroyapı analizlerinde de geliştirilen D-22 kodlu reçete de müllit kristallerinin dışında anortit kristallerinin varlığı desteklenmiştir. Ayrıca camsı faz miktarındaki artış ve müllit ile anortit kristallerinin varlığındaki artış bünyedeki pişmiş mukavemet artışını da desteklemektedir. Mikroyapı içerisinde müllit ve kuvarsın yanı sıra anortit kristallerinin varlığını doğrulamış, camsı faz ile bu kristallerin pişmiş mukavemeti artırdığı gözlemlenmiştir. Literatürde de belirtildiği üzere, bu tür kristal–cam faz

dengeleri seramik ürünlerin kırılma dayanımı, darbe direnci ve termal kararlılığı üzerinde önemli rol oynamaktadır [7, 8, 9].

D-22 reçetesinde oluşan kristobalit fazı, kuvarsın ve tridimitin 1470 °C’de kararlı hâle gelmesiyle oluşabildiği gibi, daha düşük sıcaklıklarda kuvars içeriği yüksek olan yapılarda yarı kararlı hâl şeklinde de kristallenme davranışı gösterebilmektedir [42]. Pişirim esnasında 870 °C civarında α -kuvars, belirgin bir hacim değişimi eşliğinde ve geri dönüşümsüz olarak α -tridimite dönüşür. Sıcaklık 1250 °C’lere ulaşıldığında dönüşüm kinetiği yavaş olmakla birlikte, safsızlıkların da etkisiyle α -kuvars, yine geri dönüşümsüz ve belirgin hacimsel değişimle α -kristobalite evrilebilir. 1470 °C’de α -tridimit, hacimde kayda değer bir değişim olmadan geri dönüşümsüz biçimde α -kristobalite dönüşür. Soğuma sırasında α -kristobalit yaklaşık 260 °C’de %0,2–%2,8 aralığında hacimsel genleşme/daralma ile tersinir olarak β -kristobalite geçebilir. Buna göre, yüksek sıcaklıklarda α -kuvarsın kristobalit fazına dönüştüğü ve soğuma sırasında fazın β -kristobalite evrildiği düşünülmektedir [43, 44, 45].

Seramik bünyelerde sınırlı miktarda kristobalit bulunması yapının genleşme katsayılarını dengeleyerek, gerilme dayanımını daha dengeli bir hale getirmektedir. Pişirim sırasında uygun koşullarda oluşan kristobalit boyutsal kararlılığa katkı sağlayarak gövdenin daha yoğun bir yapıya ulaşmasına destek verebilir [45]. Aynı zamanda faz dönüşümlerine bağlı olarak hacimsel genleşme nedeniyle iç gerilmeler oluşturarak termal şok dayanımını olumsuz yönde etkileyebilir.

Standart reçete ile geliştirilen D-22 kodlu reçetenin deneme sonuçlarında deformasyon ve mukavemet değerleri açısından çok büyük farklılık görülmemiştir. Bu sonuçta geliştirilen bünyenin standart bünyeye yakın özellikler göstermesini destekleyen en önemli bulgulardan birisidir. Standart FFC reçetesinde %36 oranında kullanılan şamotun, yerli kaynaklı alternatif kaolen ve wollastonit ile ikame edilmesi sonucunda, reçete bazında yaklaşık %50’ye varan maliyet avantajı sağlanmıştır.

Sonuç olarak alternatif olarak kullanılan kil-kaolen ve wollastonit gibi hammaddeler doğru oranlarda kullanılarak hedeflenen standart FFC bünye özelliklerine yakın teknolojik ve ısı özellikler ulaşılmıştır. Doğru hammadde seçimi ve uygun karışımlarda ithal şamot hammadde oranı azaltılarak FFC bünyelerin geliştirilebileceği ispatlanmıştır.

7. GELECEK ÇALIŞMALAR

Bu çalışmada, ithal şamot yerine yerli kaynaklardan elde edilen kil, kaolen ve wollastonit kullanılarak standart FFC bünyelerin özelliklerine paralel alternatif bünye reçeteleri geliştirilmesi hedeflenmiş ve çalışmalar sonucunda olumlu sonuçlara ulaşılmıştır. Ancak bilimsel araştırmalar değerlendirildiğinde, yalnızca elde edilen verilerle sınırlı kalmak yerine gelecekte yapılacak çalışmalarla da geniş bir bakış açısı elde edilmelidir. Bu kapsamda, aşağıda sıralanan yaklaşımlar, çalışmanın geliştirilmesine katkı sağlayabilecek potansiyel araştırma alanları olarak değerlendirilebilir.

Öncelikle, bu tez çalışmasında geliştirilen D-22 reçetesiyle elde edilen olumlu sonuçlar farklı ürün kodları üzerinde de test edilmelidir. Böylece kullanılan hammaddelerin yalnızca belirli bir ürün grubuna özgü değil, daha geniş bir üretim yelpazesinde de başarılı sonuçlar verip veremeyeceği anlaşılabacaktır. Farklı ürün kodlarında yapılacak denemeler, deformasyon davranışları, mukavemet özellikleri ve boyutsal kararlılık açısından kapsamlı değerlendirme imkânı sunacaktır.

Ek olarak, FFC bünyelerdeki deformasyon davranışlarının daha ayrıntılı bir şekilde incelenmesi gerekmektedir. Özellikle yüksek sıcaklık deformasyonu ve pişme küçülmesi gibi parametrelerin farklı fırın rejim ve pişirim eğrileri altında test edilmesi, deformasyon mekanizmalarının daha anlaşılır hale getirilmesini sağlayacaktır. Bu tür çalışmalar, üretim sırasında karşılaşılabilecek boyutsal değişimlerin öngörülmesine katkıda bulunarak endüstriyel ölçekte kalite kontrol süreçlerine önemli veriler sunacaktır.

D-22 reçetesinin reolojik açıdan sunduğu avantajlar dikkate alındığında, gelecek çalışmalarda daha hızlı döküm uygulamaları da araştırılmalıdır. Büyük ölçekli üretim koşullarında üretim hızının önem taşıdığı dikkate alındığında, geliştirilen reçetenin hızlı döküm süreçlerinde şekil kararlılığını, süzülme dengesini ve reolojik olarak akış davranışını nasıl koruduğu değerlendirilmelidir. Bu kapsamda yapılacak çalışmalar ile elde edilen laboratuvar ölçekli sonuçların endüstriyel üretim hatlarına uygulanabilirliğini güçlendirecektir.

Bir diğer araştırma alanı ise wollastonit yerine farklı kalsiyum kaynaklarının kullanılmasıdır. Kalsit, anhidrit veya diğer CaO bileşikler gibi alternatif hammaddelerin kullanımı, faz oluşumu üzerinde farklı etkiler yaratabilir. Bu tür alternatif hammadde kaynakları hem maliyet hem de bulunabilirlik açısından avantajlar sağlayabileceği gibi, bünyenin teknolojik ve reolojik özelliklerini de farklı yönlerde geliştirebilir. Dolayısıyla,

alternatif kalsiyum kaynaklarının sistematik olarak incelenmesi, FFC bünyelerin optimize edilmesi için önemli bir fırsat sunmaktadır.

Ayrıca, laboratuvar ölçeğinde ve pilot ölçekte elde edilen sonuçların daha büyük ölçekte doğrulanması da önem arz etmektedir. Endüstriyel ölçekte yapılacak üretim denemeleri, geliştirilen reçetenin büyük hacimli üretim koşullarında da aynı performansı gösterip göstermediğini ortaya koyacaktır. Özellikle maliyet avantajlarının ve kalite parametrelerinin büyük ölçekli üretimlerde test edilmesi, bu çalışmanın endüstriyel uygulanabilirliğini kanıtlayacaktır.

İleriye dönük çalışmalarda, kompozisyon tasarımlarında tamamen şamotsuz reçetelerin farklı hammadde kaynakları ile geliştirilmesi de öngörülmektedir.

Son olarak, kristobalit oluşumunun yapısal kararlılık ve termal şok dayanımı üzerindeki etkilerinin uzun vadeli analizlerle de değerlendirilmesi gerekmektedir. Faz dönüşümlerine bağlı olarak gerçekleşebilecek hacimsel değişimlerin zaman içerisindeki ürün üzerine etkileri, ürünlerin kullanım ömrünü ve performansını etkilemektedir. Bu nedenle, uzun süreli termal şok ve dayanıklılık testleri, geliştirilen bünyelerin farklı kullanım alanlarındaki performansını değerlendirmede önemli katkı oluşturacaktır.

Tüm bu öneriler, yalnızca mevcut çalışmanın bulgularını desteklemekle kalmayacak, aynı zamanda gelecekte alternatif üretim süreci optimize edilmiş FFC bünyelerin kullanılmasına yönelik kapsamlı bir araştırma zemini de oluşturacaktır.

KAYNAKÇA

- [1] Seramik ve Teknoloji Bakanlığı. (2022). *Seramik sektör raporu 2021*. Ankara: T.C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı Sanayi Genel Müdürlüğü.
- [2] Çimento, Cam, Seramik ve Toprak Ürünleri İhracatçıları Birliği (ÇCSİB). (2022). *2022 Yılı Faaliyet Raporu*. Ankara: Çimento, Cam, Seramik ve Toprak Ürünleri İhracatçıları Birliği.
- [3] Sarı, H. (2012). Seramik sağlık gereçlerinde pişirim sıcaklık ve sürelerinin azaltılması. Doktora Tezi. Eskişehir: Anadolu Üniversitesi.
- [4] Devlet Planlama Teşkilatı Müsteşarlığı. (2007). *Seramik sağlık gereçleri sektörü, Dokuzuncu Kalkınma Planı (2007–2013)*. Ankara: Devlet Planlama Teşkilatı Müsteşarlığı.
- [5] Tunçel, D. Y. (2012). Seramik sağlık gereçleri bünyelerinin piroplastik deformasyonunun azaltılması. Doktora Tezi. Eskişehir: Anadolu Üniversitesi.
- [6] Kingery, W. D., Böken, H. K. ve Uhlmann, D. R. (1976). *Introduction to Ceramics* (2. baskı). New York: John Wiley & Sons.
- [7] Kurama, S. ve Sarı, H. (2019). Investigation of sintering behavior of sanitaryware ceramics by controlling glassy phase. *Journal of the Australian Ceramic Society*, 55(3), 623–632.
- [8] Lee, W. E. ve Iqbal, Y. (2001). Influence of mixing on mullite formation in porcelain. *Journal of the European Ceramic Society*, 21, 2583–2586
- [9] Lima, L. K. S., Silva, K. R., Menezes, R. R., Santana, L. N. L. ve Lira, H. L. (2022). Microstructural characteristics, properties, synthesis and applications of mullite: a review. *Cerâmica*, 68(385), 126–142.
- [10] Mukhopadhyay, T. K., Ghosh, S., Ghatak, S. ve Maiti, H. S. (2006). Effect of V pyrophyllite on vitrification and on physical properties of triaxial porcelain. *Ceramics International*, 32, 871–876.
- [11] Štubňa, I., Trník, A. ve Vozár, L. (2007). Thermomechanical analysis of quartz porcelain in temperature cycles. *Ceramics International*, 33, 1287–1291.
- [12] Mattyasovszky-Zsolnay, L. (1957). Mechanical strength of porcelain. *Journal of the American Ceramic Society*, 40(9), 299–306.
- [13] Bragança, S. R., Bergmann, C. P. ve Hübner, H. (2006). Effect of quartz particle size on the strength of triaxial porcelain. *Journal of the European Ceramic Society*, 26, 3761–3768.

- [14] Kara, A., Özer, F., Kayacı, K. ve Özer, P. (2006). Development of a multipurpose tile body: Phase and microstructural development. *Journal of the European Ceramic Society*, 26, 3769–3782.
- [15] Yeşilkaya, T. (2019). Seramik sağlık gereçlerinde piropplastik davranışın ve yarı mamül mukavemetinin geliştirilmesi. Yüksek Lisans Tezi. Zonguldak: Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi.
- [16] Andreola, F., Barbieri, L., Corradi, A., Lancellotti, I. ve Manfredini, T. (2002). Utilisation of municipal incinerator grate slag for manufacturing porcelainized stoneware tiles. *Journal of the European Ceramic Society*, 22, 1457–1462.
- [17] Cheng, X., Ke, S., Wang, Q., Wang, H., Shui, A. ve Liu, P. (2012). Fabrication and characterization of anorthite-based ceramic using mineral raw materials. *Ceramics International*, 38(4), 3227–3235.
- [18] Rankin, G. A. ve Wright, F. E. (1915). The ternary system $\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$. *American Journal of Science*, s4-39(229), 1–79.
- [19] Shu, Q., Wang, Y., Li, J., Liu, Y., Li, P. ve Chou, K. (2015). Effect of Na_2O on dissolution rate of alumina in $\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{MgO}-\text{SiO}_2$ slag. *ISIJ International*, 55(11), 2297–2303.
- [20] Lide, D. R. (Ed.). (2005). *CRC Handbook of Chemistry and Physics* (internet version 2005). Boca Raton, FL: CRC Press.
- [21] Taskiran, M. U., Demirkol, N., & Capoglu, A. (2005). A new porcelainised stoneware material based on anorthite. *Journal of the European Ceramic Society*, 25, 293–300.
- [22] Capoglu, A. ve Taskiran, M. U. (2004). Processing of ultra white porcelainized stoneware based on anorthite. *Key Engineering Materials*, 264–268, 1495–1498.
- [23] Anggono, J. (2005). Mullite ceramics: its properties, structure and synthesis. *Jurnal Teknik Mesin*, 7(1), 1–10.
- [24] Bowen, N. L. ve Greig, J. W. (1924). The system: $\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$. *Journal of the American Ceramic Society*, 7(4), 238–254
- [25] Bowen, N. L., Greig, J. W. ve Zies, E. G. (1924). Mullite, a silicate of alumina. *Journal of the Washington Academy of Sciences*, 14(9), 183–191.
- [26] Martín-Márquez, J., Rincón, J. M. ve Romero, M. (2010). Mullite development on firing in porcelain stoneware bodies. *Journal of the European Ceramic Society*, 30(7), 1599–1607.
- [27] Dağ, P. (2009). Sağlık gereçlerinde kompozisyon değişimlerinin sinterleme üzerine etkileri. Yüksek Lisans Tezi. Eskişehir: Anadolu Üniversitesi.

- [28] Lee, W. E., Souza, G. P., McConville, C. J., Tarvornpanich, T. ve Iqbal, Y. (2008). Mullite formation in clays and clay-derived vitreous ceramics. *Journal of the European Ceramic Society*, 28, 465–471.
- [29] Iqbal, Y. ve Lee, W. E. (1999). Fired porcelain microstructures revisited. *Journal of the American Ceramic Society*, 82(12), 3584–3590.
- [30] Li, K., Cordeiro, E. de S. ve De Noni, A., Jr. (2023). Comparison between mullite-based and anorthite-based porcelain tiles: a review. *Eng.*, 4(3), 2153–2166.
- [31] SACMI Imola S.C. (2010). *Seramik sağlık gereçleri: seramik teknolojisi*. (ęev. M. Atalay Serin). Imola: SACMI Imola S.C.
- [32] Kayacı, K. (2007). Karaköy (Bilecik) yöresi mikrogranitinin jeolojisi ve seramik bünyelerde kullanım olanaklarının araştırılması. Doktora Tezi. İstanbul: İstanbul Teknik Üniversitesi.
- [33] Malayoğlu, U. ve Akar, A. (1995). Killerin sınıflandırmasında ve kullanım alanlarının saptanmasında aranan kriterlerin irdelenmesi. *Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu*, İzmir: Dokuz Eylül Üniversitesi, 125–126.
- [34] Elmas, E. (2009). Mullit oluşumuna mekanik aktivasyonun etkisi. Yüksek Lisans Tezi. Sakarya: Sakarya Üniversitesi.
- [35] Richerson, D. W. (1992). *Modern Ceramic Engineering: Properties, Processing, and Use in Design* (2. baskı). New York: Marcel Dekker.
- [36] Kyonka, J. C. ve Cook, R. L. (1954). *The properties of feldspars and their use in whitewares*. Urbana: University of Illinois, Engineering Experiment Station.
- [37] Köseoğlu, M. T. (2021). Seramik sağlık gereçleri sektöründe kullanılan ithal şamot malzemesinin yerli hammaddeler ile üretilmesi ve geliştirilmesi. Yüksek Lisans Tezi. Zonguldak: Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi.
- [38] Arcasoy, A. (1983). *Seramik teknolojisi*. İstanbul: Marmara Üniversitesi Güzel Sanatlar Fakóltesi Seramik Anasanat Dalı Yayınları.
- [39] Kaplan, A. E. (2017). Vitrifiye seramik beyaz opak sırlarda zirkonyum silikat miktarının kalsine kaolin kullanılarak azaltılması. Yüksek Lisans Tezi. Bartın: Bartın Üniversitesi.
- [40] Haner, S. ve uhadaroğlu, D. (2013). Vollastonit: bir gözden geçirme. *Jeoloji Mühendisliği Dergisi*, 37(1), 63–82.
- [41] Türkiye Seramik Federasyonu (TSF), Seramik Araştırma Merkezi (SAM), imento, Cam, Seramik ve Toprak Ürünleri İhracatçıları Birliği (CSİB), Makine İhracatçıları Birliği (MAİB) ve Türkiye Makine Federasyonu (MAKFED). (2020). *Türkiye seramik ve makine sektörlerinin iş birliği gelişimi durum tespit raporu*. https://ccst.org.tr/Uploads/arastirmaRaporlari_view/6d1f25ac-9eaa-4ffc-8491-58a24d554630.pdf (Erişim tarihi: 05.05.2025).

- [42] Uzun, Ö. C. (2006). Pyroplastik deformasyona dirençli sert porselen bünyeler geliştirilmesi ve karakterizasyonu. Yüksek Lisans Tezi. Gebze: Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü.
- [43] Pabst, W. ve Gregorová, E. (2013). Elastic properties of silica polymorphs – a review. *Ceramics-Silikáty*,57(3),167–184.
- [44] Cole S. S. (1935). The conversion of quartz into cristobalite below 1000°C, and some properties of the cristobalite formed. *Journal of the American Ceramic Society*,18(5), 149–154.
- [45] Aras A. ve Kristály F. (2019). α -Cristobalite formation in ceramic tile and sewage pipe bodies derived from Westerwald ball clay and its effect on elastic properties. *Applied Clay Science*,178.

http-1: <https://www.imerys.com/minerals/chamotte/> (Erişim tarihi: 24.10.2024)

ÖZGEÇMİŞ

ORCID NO: 0000-0002-3888-1048

Ad Soyad : Ekin Naz Başakıncı

Yabancı Dil : İngilizce

Eğitim ve Mesleki Geçmişi:

- 2022-2025, Eskişehir Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Malzeme Bilimi ve Mühendisliği, Yüksek Lisans
- 2012-2017, Anadolu Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Malzeme Bilimi ve Mühendisliği, Lisans
- 2016, Polonya Szczecin, West Pomerian University of Technology, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği, Lisans Erasmus+ Programı
- 2022-Devam, Proje Kıdemli Uzmanı, Çanakkale Seramik, Ar-Ge Merkezi
- 2019-2022, Malzeme ve Proses Geliştirme Uzmanı, Eczacıbaşı Vitra, Teknik Müdürlük
- 2018-2019, Üretim Uzmanı, Porland Porselen Bilecik
- 2018, Seramik Araştırma Merkezi, Araştırma ve Geliştirme Mühendisi, Proje tabanlı

Proje Faaliyetleri:

- 2023-2025, Lazer teknolojisinin Karo Parlatma Sistemlerine Etkisi, Kale Seramik Ar-Ge Merkezi, Proje Lideri
- 2022, İnce Vitrifiye Seramik Çamur Reçetelerinin Geliştirilmesi, Kale Seramik Ar-Ge Merkezi, Proje Lideri
- 2021, Cam modifiye edici ve koşullu cam oluşturucu oksit oranlarının optimize edilerek sır maliyetinin düşürülmesi, Eczacıbaşı Vitra, Proje Lideri, Eczacıbaşı İnovasyon Ödülleri/Özel Ödül