



**KOLEMANİT KATKILI YÜKSEK ORANDA TUĞLA TABAN KÜLÜ İÇEREN
JEOPOLİMERİK ISI YALITIM MALZEMESİ ÜRETİMİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Emel CENGİZ

Prof. Dr. Taner KAVAS

MALZEME BİLİMİ ve MÜHENDİSLİĞİ BÖLÜMÜ

Mayıs 2020

Bu tez çalışması 19.FEN.BİL.07 numaralı proje ile Afyon Kocatepe Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü tarafından desteklenmiştir.

AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**KOLEMANİT KATKILI YÜKSEK ORANDA TUĞLA TABAN
KÜLÜ İÇEREN JEOPOLİMERİK ISI YALITIM MALZEMESİ
ÜRETİMİ**

Emel CENGİZ

Prof. Dr. Taner KAVAS

MALZEME BİLİMİ ve MÜHENDİSLİĞİ BÖLÜMÜ

Mayıs 2020

BİLİMSEL ETİK BİLDİRİM SAYFASI
Afyon Kocatepe Üniversitesi

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

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

beyan ederim.

08 / 05 / 2020

Emel CENGİZ

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

KOLEMANİT KATKILI YÜKSEK ORANDA TUĞLA TABAN KÜLÜ İÇEREN JEOPOLİMERİK ISI YALITIM MALZEMESİ ÜRETİMİ

Emel CENGİZ

Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Taner KAVAS

Bu araştırmada, tuğla taban külü ile birlikte meta kaolin ve kolemanit katkıları, son dönemlerde trend olan jeopolimerizasyon yöntemi kullanılarak ısı yalıtımında kullanılmaya uygun malzeme üretiminde değerlendirilmiştir. Çimentosuz bir teknoloji olan jeopolimerler genel olarak alümina ve silika esaslı killerin alkali aktivatörler ile reaksiyonu sonucu oluşmaktadır. Jeopolimer tabanlı ürünler arasında jeopolimer köpükler sahip oldukları düşük termal iletkenlik değerleri ve doğa dostu ürünler olmalarından dolayı oldukça rağbet görmektedir. Jeopolimer köpük üretiminde en iyi sonuçlara alüminasilikat kaynağı olarak meta kaolin kullanılarak ulaşılmış olsa da farklı sektörlerden elde edilen atık ürünler kullanılarak da oldukça iyi özellikte jeopolimerler üretilmektedir. Bu çalışmada alüminasilikat kaynağı olarak Afyon, Kütahya ve Turgutlu civarlarında yoğun olarak üretilen tuğla üretim prosesi sonucu oluşan taban külü kullanılmıştır. Maksimum oranda tuğla taban külü minimum oranlarda meta kaolin ile karıştırılarak sodyum silikat ve sodyum hidroksitten oluşan alkali içinde çözüldürülecek ve köpük oluşumunu sağlamak için hidrojen peroksit ilave edilmiştir. Yüzey aktif madde ilavesi ile gözenek oluşumu esnasında homojenlik sağlanmaya çalışılmıştır. Kalıplara dökülen karışım 70°C ve 90°C de 6 saat küre tabi tutulacaktır. Reçetelerden bir tanesine ise farklı bir kür uygulanmıştır. Bu bağlamda harç kalıba dökülecek, kabarmasını tamamladıktan sonra bir gün kalıbın ağzı kapalı olarak bekletilmiştir. Bir gün sonrasında kalıptan çıkarılan ürün ağzı kapalı poşet içerisinde 28 gün bekletilerek kendi sıcaklık ve neminde küre tabi tutulmuştur. Kür süresini tamamlayan ürünler 28 gün boyunca oda koşullarında testlere tabi tutulmak üzere bekletilmiştir. Ayrıca kolemanit minerali katkısının nihai ürünün mikro yapısal ve mekanik özellikleri üzerindeki etkisini gözlemlemek amacı ile aynı proses ve kür

koşullarında kolemanitli reçete denemeleri yapılmıştır. Kullanılacak kolemanit için iki ayrı tane boyutu (45μ ve 75μ) kullanılmış ve bu sayede tane boyut etkisi de gözlemlenmiştir. Nihai ürüne yapılan mikro yapısal, mekanik, termal iletkenlik ve yoğunluk testlerinden elde edilen veriler ışığında ne gibi özelliklerin kazanılıp kaybedildiği teknik olarak belirlenmiş ve literatüre kazandırılmıştır.

2020, xii + 49 sayfa

Anahtar Kelimeler: Tuğla taban külü, Meta kaolin, Kolemanit, Isı yalıtımı, Jeopolimer köpük, Termal iletkenlik.



ABSTRACT
M.Sc. Thesis

**PRODUCTION OF COLEMANITE DOPED GEOPOLYMER HEAT INSULATION
MATERIAL CONTAINING HIGH PERCENTAGE OF BRICK BOTTOM ASH**

Emel CENGİZ

Afyon Kocatepe University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Material Science and Engineering

Supervisor: Prof. Taner KAVAS

In this research, metakaolin and colemanite admixtures will be evaluated together with brick base ash in the production of heat insulation material by using the recent trend geopolymerization method. Geopolymers, which are cementless technology, are generally formed by reaction of alumina and silica based clays with alkali activators.

Among the geopolymer-based products, geopolymer foams are in demand because of their low thermal conductivity and nature-friendly products. Although the best results in the production of geopolymer foam have been achieved by using Metakaolin as the source of aluminasilicate, geopolymers with very good properties are also produced by using waste products from different sectors. In this study, base ash formed as a result of the intensive brick production process in Afyon, Kütahya and Turgutlu districts will be used as the source of aluminasilicate. The brick base ash is mixed at the maximum rate with the minimum proportions of metakaolin and dissolved in alkali consisting of sodium silicate and sodium hydroxide. Hydrogen peroxide is added to provide foam formation. Homogeneity will be ensured during pore formation by addition of surfactant. The mixture poured into the molds will be cured at 70°C and 90°C for 6 hours. One of the prescriptions will have a different cure condition. In this context, the mortar would be poured into the mold, and after swelling, we would wait for one day with the mouth closed. After one day, the product, which is removed from the mold, will be kept in a sealed bag for 28 days and subjected to cure at its own temperature and humidity. The products that complete the curing period shall be kept for 28 days in room conditions for testing. In addition, in order to observe the effect of low atomic diameter colemanite mineral additive on the microstructural and mechanical properties

of the final product, colemanite prescription experiments will be carried out under the same process and curing conditions. Colemanite with two different grain sizes (45 μ and 75 μ) will be used for observing the grain size effect. The characteristics of microstructural, mechanical, thermal conductivity and density tests of the final product will be determined and given to the literature.

2020, xii + 49 pages

Keywords: Brick bottom ash, Metakaolin, Colemanite, Heat insulation, Geopolymer foam, Thermal conductivity.



TEŞEKKÜR

Tez alıŐmalarım 19.FENBİL.07 numaralı proje ile Afyon Kocatepe Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü tarafından desteklenmiştir. Üniversiteme verdiği destekten dolayı teŐekkürlerimi sunarım.

Bu araŐtırmanın konusu, deneysel çalıŐmaların yönlendirilmesi, sonuçların değerlendirilmesi ve yazımı aşamasında yapmış olduğu büyük katkılarından dolayı tez danıŐmanım Sayın Prof. Dr. Taner KAVAS'a, her konuda öneri ve eleŐtirileriyle yardımlarını gördüğüm hocalarıma ve arkadaşlarıma teŐekkürlerimi sunarım.

Bu araştırma boyunca maddi ve manevi desteklerinden dolayı aileme teşekkür ederim. Hayatımın her alanında olduğu gibi, tez çalıŐmamı hazırlarken de her aŐamada bana yardımcı olan sevgili eŐim Akın CENGİZ'e teŐekkürlerimi sunarım.

Emel CENGİZ
Afyonkarahisar, 2020

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

Sayfa

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	iii
TEŞEKKÜR.....	v
İÇİNDEKİLER DİZİNİ.....	vi
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ.....	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xi
RESİMLER DİZİNİ.....	xii
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR BİLGİLERİ.....	4
2.1 Isı.....	4
2.2 Isı Yalıtım Malzemeleri.....	5
2.2.1 Organik (Bitkisel ve Hayvansal) Kökenli Isı Yalıtım Malzemeleri.....	5
2.2.2 Mineral Kökenli Isı Yalıtım Malzemeleri.....	6
2.2.3 Sentetik Isı Yalıtım Malzemeleri.....	9
2.2.4 Yüksek Performanslı Isı Yalıtım Malzemeleri.....	10
2.3 Gözenekli Malzeme Yapıları ve Isı Yalıtımı.....	11
2.4 Jeopolimerizasyon.....	12
2.5 Jeopolimer ve Jeopolimer Köpük.....	13
2.5.1 Jeopolimer ve Jeopolimer Köpük üretiminde Kullanılan Hammaddeler..	113
2.5.1.1 Alüminasilikat Esaslı Hammaddeler.....	15
2.5.1.2 Alkali Aktivatörler.....	17
2.5.1.3 Köpük Oluşturucu Ajanlar.....	18
2.5.1.4 Sürfaktanlar.....	18
2.6 Jeopolimer Köpük Oluşumu.....	19
2.7 Jeopolimerin Avantajları.....	19
2.8 Jeopolimerin Kullanım Alanları.....	20
2.9 Kolemanit.....	22
3. MATERYAL ve METOT.....	23
3.1 Kullanılan Malzemeler.....	23
3.2 Deneysel Çalışmalar.....	24

3.2.1 Deneysel Akış Şeması	27
3.2.2 Porozite ve Yoğunluk Ölçümleri.....	28
3.2.3 Mekanik Özelliklerin İncelenmesi.....	29
3.2.4 Mikro Yapısal ve Minerolojik Analizler	30
3.2.5 Termal İletkenlik Ölçümleri	30
4. BULGULAR.....	31
4.1 Basma Mukavemeti, Yoğunluk ve Porozite Değerleri	31
4.2 Termal İletkenlik Değerleri	33
4.3 Numunelere ait SEM Görüntüleri.....	34
4.4 Numunelere ait XRD Sonuçları	39
5. TARTIŞMA ve SONUÇ	40
6. KAYNAKLAR	44
ÖZGEÇMİŞ	49

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

NaOH	Sodyum hidroksit
Na ₂ SiO ₃	Sodyum silikat
H ₂ O ₂	Hidrojen peroksit
Fe ₂ O ₃	Demir oksit
CO ₂	Karbon dioksit
KOH	Potasyum hidroksit
K ₂ SiO ₃	Potasyum silikat
H ₂ O	Su
Al	Alüminyum
Si	Silisyum
SiO ₂	Silika
K	Potasyum
Na	Sodyum
Ca	Kalsiyum
Mg	Magnezyum
OH [•]	Hidroksil radikali
°C	Santigrat
°K	Kelvin
μ	Mikron
Mm	Milimetre
Kg/m ³	Kilogram bölü metre küp
Wm/K	Watt bölü metre kelvin
Λ	Lamda

Kısaltmalar

CEN	Avrupa standartlar komitesi
EPS	Genleştirilmiş polistiren
ISO	Uluslararası standartlar örgütü
XPS	Ekstrüde polistiren
MAX.	Maksimum
MIN.	Minimum
PUR	Poliüretan köpük
PVC	Polivinil klorür
TTK	Tuğla taban külü
VB.	Ve benzeri

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1 Isı transfer mekanizmaları.....	4
Şekil 2.2 Genleştirilmiş mantar panolar.....	6
Şekil 2.3 Cam yünü.....	7
Şekil 2.4 Taş yünü.....	8
Şekil 2.5 Cam köpüğü.....	8
Şekil 2.6 EPS ve XPS.....	10
Şekil 2.7 Aerojel.....	11
Şekil 2.8 Jeopolimerizasyon reaksiyon mekanizması.....	13
Şekil 2.9 Polimer bağ yapısının oksijenli dizilişinin sıklık düzeyine ve elementlere göre jeopolimer yapıları.....	15
Şekil 2.10 Kullanım alanlarına göre jeopolimerler.....	21
Şekil 3.1 Deneysel akış şeması.....	27
Şekil 4.1 Numunelere ait yoğunluk grafiği.....	31
Şekil 4.2 Numunelere ait basma mukavemeti grafiği.....	32
Şekil 4.3 Numunelere ait % porozite grafiği.....	32
Şekil 4.4 Numunelere ait ortalama hacimsel por çapı grafiği.....	33
Şekil 4.5 Numunelere ait termal iletkenlik grafiği.....	33
Şekil 4.6 D1 numunesine ait 50X(a), 100X(b), 1000X(c) ve 2500X(d) büyütmede SEM görüntüleri.....	34
Şekil 4.7 D2 numunesine ait 50X(a), 100X(b), 1000X(c) ve 2500X(d) büyütmede SEM görüntüleri.....	35
Şekil 4.8 D3 numunesine ait 50X(a), 100X(b), 1000X(c) ve 2500X(d) büyütmede SEM görüntüleri.....	35
Şekil 4.9 D4 numunesine ait 50X(a), 100X(b), 1000X(c) ve 2500X(d) büyütmede SEM görüntüleri.....	36
Şekil 4.10 D5 numunesine ait 50X(a), 100X(b), 1000X(c) ve 2500X(d) büyütmede SEM görüntüleri.....	36
Şekil 4.11 D6 numunesine ait 50X(a), 100X(b), 1000X(c) ve 2500X(d) büyütmede SEM görüntüleri.....	37

Şekil 4.12 D7 numunesine ait 50X(a), 100X(b), 1000X(c) ve 2500X(d) büyütmede SEM görüntüleri	37
Şekil 4.13 D8 numunesine ait 50X(a), 100X(b), 1000X(c) ve 2500X(d) büyütmede SEM görüntüleri	38
Şekil 4.14 D9 numunesine ait 50X(a), 100X(b), 1000X(c) ve 2500X(d) büyütmede SEM görüntüleri	38
Şekil 4.15 TTK ve numunelere ait XRD pikleri	39



ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 3.1 Tuğla taban külü ve meta kaolin hammaddelerine ait kimyasal analiz sonuçları.	23
Çizelge 3.2 Meta kaoline ait tane dağılım analizleri	23
Çizelge 3.3 Dökülen denemelere ait reçeteler ve kür koşulları.....	26



RESİMLER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 3.1 Kalıplara dökülen numunelerin bekleme öncesi (a) ve sonrası (b) görüntüleri.	28
Çizelge 3.2 Basma dayanımı testlerinin yapıldığı cihazın görüntüsü.	29
Çizelge 3.3 Termal iletkenlik ölçümü için hazırlanan numuneler.	30



1. GİRİŞ

Ülkelerin ekonomik ve sosyal olarak gelişiminde etkili olan önemli faktörlerden biri de enerjidir. Nüfus artışına, gelişmekte olan sanayiye ve kentleşmelere bağlı olarak enerjiye duyulan talep önemli miktarda yükseliş göstermektedir (Koç vd. 2018). Artan bu enerji ihtiyacının karşılanabilmesi için yeni enerji üretmek yerine tüketimdeki israfın önlenmesi ve yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanılması bir zorunluluk haline gelmiştir (Bayraktar 2016).

Türkiye enerji ihtiyaçlarını karşılayabilmek açısından yeterli kaynaklara sahip olamadığından dolayı dışa bağımlıdır. Türkiye İstatistik Kurumu verileri Türkiye'nin enerji talebini karşılayabilmek için kömür, petrol, doğalgaz ve elektrik enerjisi ithal ettiğini göstermektedir. En önemli cari açık kalemlerinden olan enerji ithalatının Türkiye'ye maliyeti, kurdaki dalgalanmalara bağlı olarak her geçen gün ağırlaşmaktadır (Koç ve Şenel 2013).

Enerji tüketiminin sektörlere göre dağılımına bakıldığında %30'luk diliminin yapılar tarafından harcandığı görülmektedir. Tüketilen bu enerjinin ise yarısından daha fazlası ısıtma, soğutma, havalandırma amacıyla kullanılmaktadır. Türkiye'nin bu hususta önceliği yatırımdan çok, tasarruf ve enerjinin etkin kullanımı olmalıdır. Binalarda uygulanacak çeşitli tekniklerin ve alınacak çeşitli tedbirlerin büyük miktarlarda enerji tasarrufu sağlayarak enerji verimliliğinin iyileştirilebileceği görülmüştür. Bu teknik ve tedbirler arasında sayılabilecek ısı yalıtımı, verimli cihaz kullanımı ve otomatik kontrol sistemleri sayesinde enerjiden minimum % 50 tasarruf yapmak mümkündür (Altınışık 2006).

Yapı ve tesisatlar da ısı kayıp ve kazançlarının sınırlandırılması için yapılan işleme ısı yalıtımı denmektedir. Teknik olarak, ısı yalıtımı, farklı sıcaklıktaki iki ortam arasında ısı geçişini azaltmak için uygulanır. Isı yalıtımı yaparak binanın ömrünü uzatmak, kullanıcıya sağlıklı, konforlu mekânlar sunabilmek ve bina kullanım aşamasında yakıt ve soğutma giderlerinde büyük kazanım sağlamak mümkündür (Bayraktar 2016).

Isı yalıtım malzemeleri gevşek doldurma tipi, örtü tipi veya tabaka ya da rulo tipi gibi farklı formlarda yapılabilmektedir. Uygun form ve iç malzeme seçimi uygulama tipine ve ayrıca istenen malzemenin fiziksel, termal ve diğer özelliklerine bağlıdır (Al-Homoud 2005). Isı yalıtım malzemeleri kökenlerine göre, organik (bitkisel ve hayvansal) kökenli, anorganik (mineral) kökenli ve sentetik kökenli ısı yalıtım malzemeleri olarak üç sınıfa ayrılmıştır (Karadayı ve Yüksek 2016).

Jeopolimerizasyon teknolojisi ısı yalıtım sektöründe çevre dostu olması ve düşük maliyetler ile üretilebilmesi gibi avantajları sayesinde son dönemlerde rağbet görmektedir (Vaou and Panias 2010). Son zamanlarda küresel ısınmadan kaynaklanan iklim değişiklikleri dünya için büyük bir endişe haline gelmiş bulunmaktadır. Küresel ısınmaya sebep olan ana unsur ise karbon dioksit gibi sera gazlarının atmosfere salınmasıdır. Çimento endüstrisi ise zararlı karbondioksitin çevreye salınmasında en büyük paya sahiptir (Bakri vd. 2012). Üretim sırasında fosil yakıt kullanılması ve kalkerin ayrışma reaksiyonundan dolayı çimento endüstrisinin en çok karbondioksit salınımına sebebiyet veren ürünü ise Portland çimentosudur. Jeopolimer ve alkali aktif maddeler gibi diğer bağlayıcılar üretim sırasında oluşan karbondioksit salınımını minimize ettikleri için uygun alternatifler olarak büyük ilgi görmüşlerdir. Portland çimentosu yerine jeopolimer kullanımının diğer bir avantajı ise yüksek performanslı ürünlerin yüksek miktarda endüstriyel atık kullanımıyla elde edilebiliyor olmasıdır. Bu sayede atık ürünler üretimde hammadde olarak kullanılarak ülkeye çevresel ve ekonomik katkılar sağlanır (Masi vd. 2014).

Jeopolimerizasyon, alümina silikat içeren materyali, jeopolimerler veya inorganik polimerler adı verilen faydalı ürünlere dönüştürebilen yenilikçi bir teknolojidir (Razak vd. 2015). Jeopolimer tabanlı ürünler arasında jeopolimer köpükler sahip oldukları düşük termal iletkenlik değerleri sayesinde ısı yalıtımda önceliklidir. Jeopolimer köpüğü oluşturmak için, ön köpürtme ve karıştırarak köpürtme olmak üzere iki farklı yöntem kullanılmaktadır. Köpük ajanı olarak kullanılacak malzemeler arasında deterjan, hidrojen peroksit, sodyum hipoklorit, sodyum perborat, saponin ve hidrolize proteinler bulunur (Abdullah vd. 2012, Lach vd. 2016).

Gözeneklerin büyüklüğü ve miktarı, jeopolimer köpük betonun mukavemetini, yoğunluğunu ve termal özelliklerini belirleyen kritik bir konudur. Köpük oluşumunu sağlamak için kullanılacak yöntem, köpük ajanı çeşidi, karışımı oluşturan hammadde oranları ve kür koşulları nihai ürünün içerisindeki mevcut gözeneklerin boyutunu ve miktarını etkileyen önemli parametrelerden bazılarıdır (Zhang vd. 2015, Zhang and Wang 2016). Ayrıca daha iyi ısı iletkenliği elde etmek için wollastonit ve bazalt elyaf gibi bazı katkı maddeleri kullanılabilir (Kioupis vd. 2018).

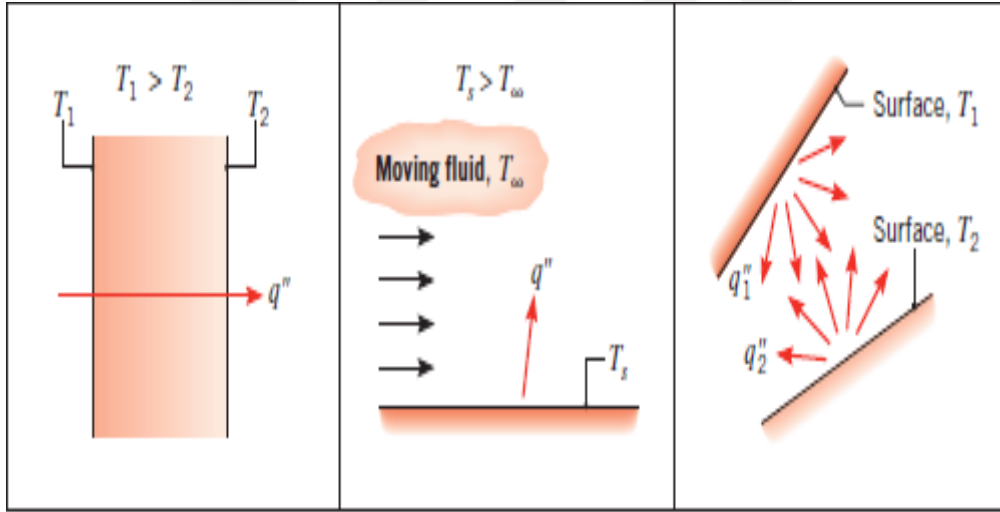


2. LİTERATÜR BİLGİLERİ

2.1 Isı

Isı oluştuğu ortamda kullanılması pek mümkün olmayan bir enerjidir. Isının bu özelliği ısı transferi terimini ortaya çıkarmaktadır. Isı transferi ancak iki sistem arasında veya bir sistemle çevresi arasında bir sıcaklık farkı bulunduğu zaman gerçekleşir (Altınışik 2006). Termodinamiğin 2.yasasına göre ısı transferi sıcaklığın yüksek olduğu yerden düşük olduğu yere doğru gerçekleşir. Isı transferi;

1. Isı İletimi: Katı cisimler, hareket etmeyen sıvı veya gaz ortamlar
 2. Isı Taşınımı: Akış halindeki sıvı veya gaz ortamlar
 3. Isı Işınımı: Elektromanyetik dalgalar
- olmak üzere üç şekilde (Şekil 2.1) gerçekleşebilir (Harding 2018).



Şekil 2.1 Isı transfer mekanizmaları.

Isı yalıtımı, ısının üretildiği ortamda yüksek ısı iletkenlik katsayısına sahip malzeme ve veya malzemeler sayesinde korunarak ortamın ısı konforunun sağlanması uygulamalarıdır. Isı iletkenliği, yapısı homojen bir malzemenin kararlı hal şartlarında birbirine paralel iki yüzeyinin sıcaklıkları arasındaki fark 1 °C (1 °K) olduğunda, birim zamanda (1 saat), malzemenin birim kalınlığında (1 m) geçen ısı miktarıdır. λ sembolü ile ifade edilen ısı iletkenlik katsayısının birimi W/mK'dir (Al-Homoud 2005).

2.2 Isı Yalıtım Malzemeleri

Bir malzemenin ısı yalıtım malzemesi olarak adlandırılabilmesi için ISO(International Organization for Standardization) ve CEN (European Committee for Standardization) standartlarına göre ısı iletkenlik katsayısı 0,065 W/mK değerinden küçük olmalıdır. Yapılarda kullanılan her malzemede olduğu gibi ısı yalıtım malzemelerinin de belirli ihtiyaçları karşılaması gerekir.

Isı yalıtım malzemelerinin seçiminde dikkat edilmesi gereken başlıca hususlar şunlardır:

1. Düşük ısı iletkenliği,
2. Belli oranda buhar geçişine izin vermeli,
3. Yanıcı olmaması,
4. Hacim ve şekil değişimlerine karşı dayanım,
5. Kimyasallara karşı dirençli olması,
6. Kokusuz olması,
7. Çürümelere dayanıklı olması,
8. Belirli basınç dayanımına sahip olması,
9. Ses yalıtımının olması,
10. Uygulanacağı yapıya uygun olması,
11. Yapıda işleme kolaylığı,
12. Ekonomik olması (Karadayı ve Yüksek 2016, Bayraktar 2016, Al-Homoud 2004).

Isı yalıtım malzemeleri üretildikleri hammaddelerin kaynağına bağlı olarak 4 gruba ayrılmaktadır.

2.2.1 Organik (Bitkisel ve Hayvansal) Kökenli Isı Yalıtım Malzemeleri

Bu grupta bulunan ısı yalıtım malzemeleri şunlardır:

- Mantar
- Ahşap
- Talaş ve lif
- Hayvansal dokumalık lifler

- Bitkisel dokumalık lifler
- Saman
- Yosunlar vb.

Mantar: Mantar meşesi olarak bilinen ağacın deri dokusu vazifesini gören kabuk kısmına verilen isimdir. Mantar granüllerin yüksek sıcaklıktaki buharda preslenmesi ve şekillendirilmesiyle mantar plaklar (Şekil 2.2) elde edilir. Mantar dokusunun %89,7'lik kısmı soluduğumuz hava kimyasına yakın bir gaz ile doludur. Avantajları; sıkıştırılabilir, elastik, neme ve suya karşı dayanıklı, ısı direnci ve titreşimi emme kabiliyeti yüksek, anti-statik, anti-bakteriyel ve toz tutmamasıdır. Dezavantajı ise yerel olarak üretiminin yapılamamasıdır (Karadayı ve Yüksek 2016, Alkaya vd. 2012).



Şekil 2.2 Genleştirilmiş mantar plaklar.

2.2.2 Mineral Kökenli Isı Yalıtım Malzemeleri

Bu grupta bulunan ısı yalıtım malzemeleri şunlardır:

- Cam yünü
- Taş yünü
- Seramik yünü
- Cam köpüğü
- Fosil silisler vb.

Cam yünü: İnorganik bir hammadde olan silis kumunun, yüksek basınç altında 1200°C - 1250°C de ergitilerek, ince eleklerden geçirilip elyaf haline getirilmesi sonucu oluşturulan açık gözenekli bir malzemedir. Değişik yoğunluklarda (14- 100 kg/m³) farklı kaplama malzemeleri ile şilte, levha veya boru formunda üretilebilirler. Isıl iletkenlik hesap değeri 0,035-0,050 W/mK'dir. A1 veya A2 sınıfı yanmaz bir malzemedir.



Şekil 2.3 Cam yünü.

Taş yünü: İnorganik bir hammadde olan bazalt ve diabez taşlarının 1350°C -1400°C sıcaklıklarda, ince eleklerden geçirilip elyaf haline getirilmesi sonucu oluşturulan açık gözenekli bir malzemedir. Değişik yoğunluklarda (30-200 kg/m³) farklı kaplama malzemeleri ile şilte, levha veya boru formunda üretilebilirler. Isıl iletkenlik hesap değeri 0,035-0,050 W/mK'dir. A1 veya A2 sınıfı yanmaz bir malzemedir. Taş yünü (Şekil 2.4) yangın durdurucu olarak kullanılan tek malzemedir. Yangın duvarı ve kapısı gibi elemanlarda bu amaçla taş yünü kullanılmaktadır (Alkaya vd. 2012, Kara ve Baran 2017).



Şekil 2.4 Taş yünü.

Cam Köpüğü: Kuvars kumu, dolomit, kalsiyum ve sodyum karbonattan oluşmaktadır. Avantajları; kapalı gözeneklere sahip olması, kemirgen ve böceklere karşı direnç ve yüksek basınç dayanımıdır. Dezavantajı ise noktasal yükler karşısında kırılabilir olmasıdır. Bu nedenle uygulanacağı yüzey düzgün olmalı, sıcak bitüm ile kaplanmalı ve malzeme yerleştirildikten sonra tüm boşluklar bitüm ile doldurulmalıdır. Cam köpüğü(Şekil 2.5) genel olarak düz çatı yalıtımında, çerçeve sistemler ile yapılan bölme duvarlarda ve özellikle ağır yüklere maruz kalacak döşeme yalıtımında kullanılır (Özer ve Özgünler 2019).



Şekil 2.5 Cam köpüğü.

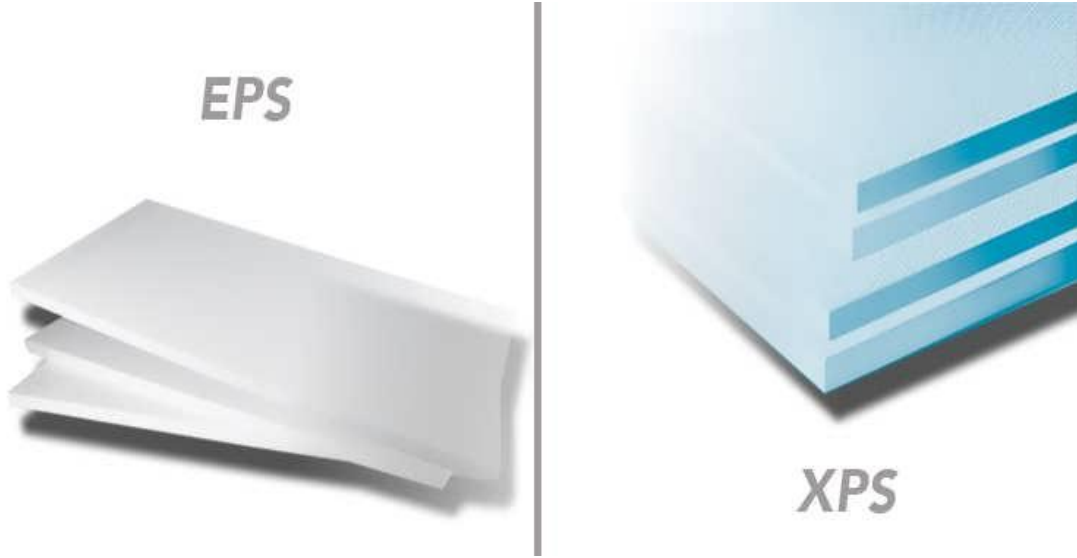
2.2.3 Sentetik Isı Yalıtım Malzemeler

Bu grupta bulunan ısı yalıtım malzemeleri şunlardır:

- Polietilen
- Polivinilklorür köpükler (PVC)
- Genleştirilmiş polistiren köpük (EPS)
- Ekstrüde polistiren köpük (XPS)
- Poliüretan köpük (PUR)
- Fenolformaldehit köpük vb.

Genleştirilmiş polistiren köpük (EPS): Polistiren taneciklerinin pentan gazı ile şişirilmesi ve birbirine kaynaşması ile elde edilmektedir. Pentan, tanecikler içinde çok sayıda küçük gözeneklerin oluşmasını sağladıktan sonra, üretim sırasında ve üretimi takiben çok kısa sürede hava ile yer değiştirir. Malzemenin % 98'i hareketsiz ve kuru havadır. Asit ve bazlara karşı dirençlidir. Ancak baca gazları, metan grubu gazları, benzin grubu, eter, ester ve amin grubu kimyasallara karşı hassastır. EPS plakaların (Şekil 2.6) yoğunlukları 10-30 kg/m³ arası değişiklik göstermektedir. Isı iletkenlik değeri ise 0,040 W/mK'dir (Şahin ve Bozkurt 2016).

Ekstrüde polistiren köpük (XPS): Polistirenden ekstrüzyon yöntemi ile üretilmektedir. %100 kapalı gözenekli homojen hücre yapısına sahiptir. Bu sayede bünyesine su almamaktadır. Kapiler emiciliği yoktur ve basma dayanımı çok yüksektir. XPS plakaların (Şekil 2.6) yoğunlukları 20-52 kg/m³ arası değişiklik göstermektedir. Isı iletkenlik değeri ise 0,035 W/mK'dir (Şahin ve Bozkurt 2016).



Şekil 2.6 EPS ve XPS.

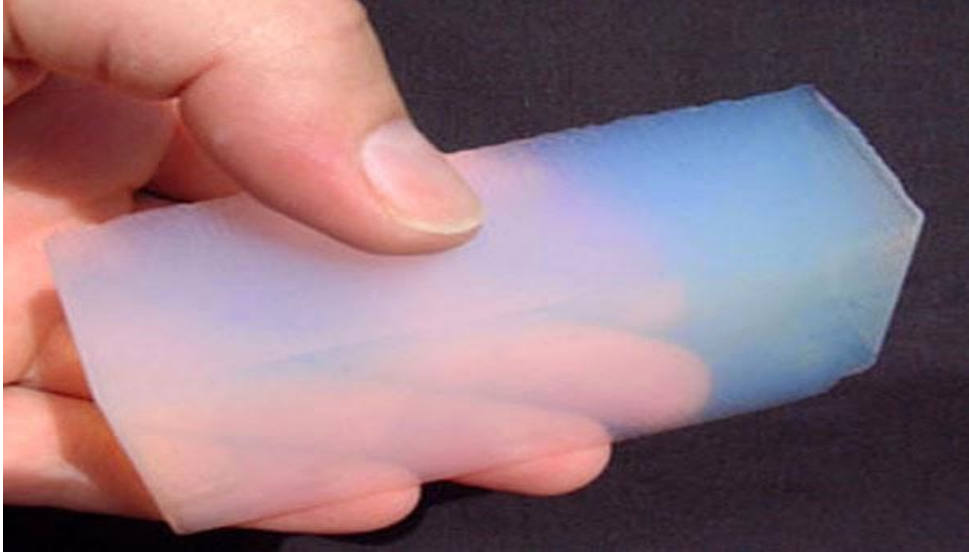
Poliüretan köpük (PUR): İki farklı kimyasal bileşenin bir araya getirilmesi ile elde edilir. Blok döküm, levha döküm, püskürtme, dökme, kalıplama gibi değişik yöntemler kullanılarak üretilmektedir. Poliüretan köpüğün kullanım sıcaklığı sınırlıdır. Daimi kullanıma uygun sıcaklık aralığı 110 – 120 °C'dir. Yoğunlukları 30-40 kg/m³ arası değişiklik göstermektedir. Isı iletkenlik değeri ise 0,035 W/mK'dir (Aydın ve Ekmekçi 2002).

2.2.4 Yüksek Performanslı Isı Yalıtım Malzemeleri

Bu grupta bulunan ısı yalıtım malzemeleri şunlardır:

- Saydam yapıli yalıtkanlar
- Vakumlanmış yalıtım panelleri
- Kompozit yalıtkanlar
- Aerojel

Aerojel: Partiküllerinin %97'si 45 mm'den büyük olan şekilsiz silislerdir. Yapısının %99'u içerisinde hava bulunan nano boyutlardaki gözeneklerden oluşmaktadır. toksiteye sahip olmaması, hidrofobik olması, kırılğan olmaması ve A sınıfı yangın güvenliğine sahip olması en önemli avantajlarındandır (Özçelik vd. 2017).



Şekil 2.7 Aerojel.

2.3 Gözenekli Malzeme Yapıları ve Isı Yalıtımı

Doğal gözenekli bir ortamda gözeneklerin şekil ve büyüklük bakımından dağılımı düzensizdir. Gözenekler açık ve kapalı gözenekler olmak üzere iki gruba ayrılır. Açık gözenekler malzemenin yüzeyine bağlanırken, kapalı gözenekler dış ortamdan tamamen bağımsızdır. Açık gözenekli malzemeler adsorpsiyon, kataliz, ayrıştırma, membran, filtrasyon vb. fonksiyonel uygulama alanlarında kullanılır. Kapalı gözenekli malzemeler ise daha çok ses ve ısı yalıtımı veya hafif yapısal uygulamalarda kullanıma uygundur. Gözenekler silindirik, küresel ve yarık gibi çeşitli morfolojilere sahiptir. Ayrıca hegzagonal yapılı daha karmaşık gözenek yapıları da mevcuttur (Bulejko 2013).

Bir gözenekli malzeme numunesinin gözenekliliği, numunedeki boşluktaki (V_a) hava hacminin, numunenin toplam hacmine oranı olarak tanımlanmaktadır (Arenas and Crocker 2010).

Gözenekli ortamda ısı transferi genel olarak katı matrisi boyunca ısı iletimi. Gözenekler boyunca termal radyasyon ve gözenekleri dolduran gazlarda ise ısıl konveksiyon şeklinde kombine bir sistemde gerçekleşir (Kang vd. 2019).

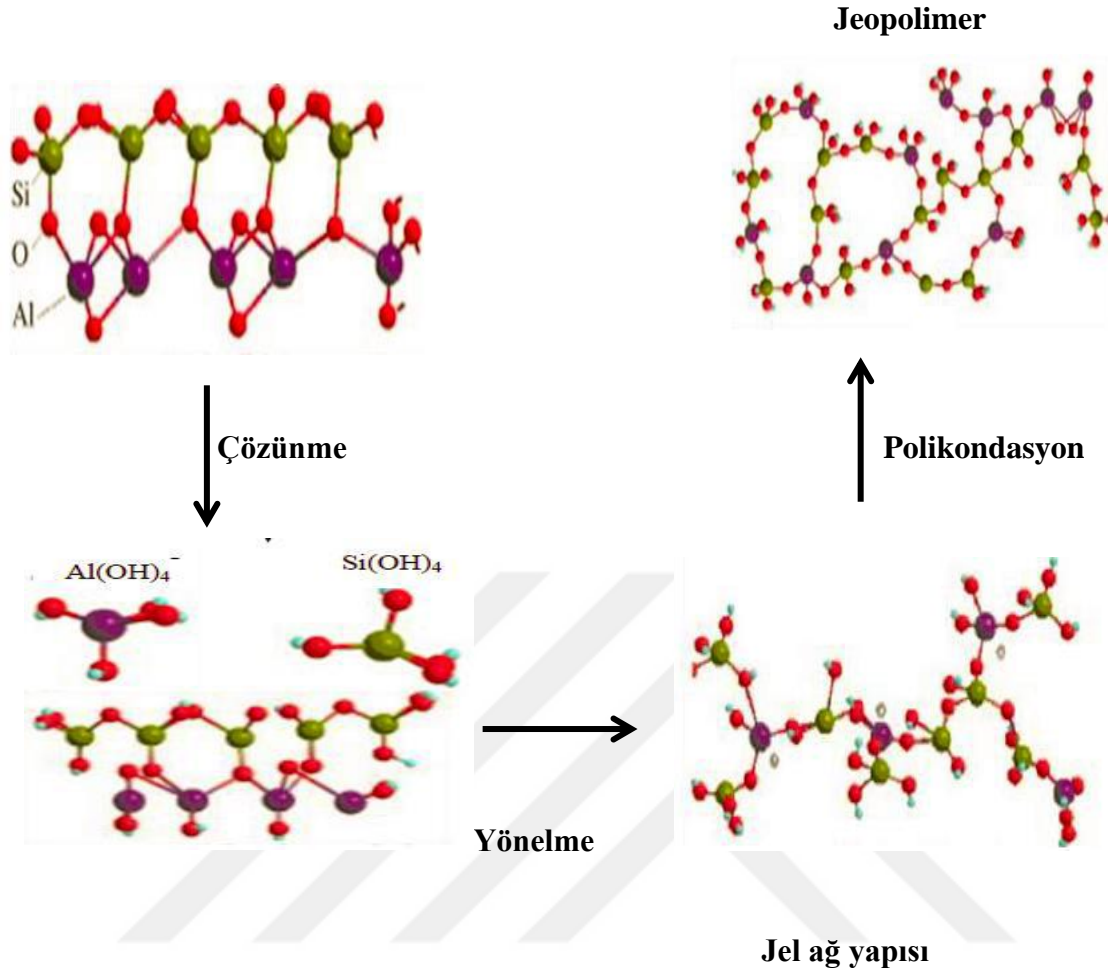
Malzemenin içerisinde gözenek miktarındaki artış ısı iletkenliğinde azalmalara sebep olmaktadır. Ancak burada asıl önemli olan fazla gözenekten ziyade gözenegin hücre yapısı, şekli, boyutu ve hacmidir (Azimi vd. 2016).

2.4 Jeopolimerizasyon

Jeopolimerizasyon prosesinin tanımlanmasında, mekanizmasının ve reaksiyon ürünlerinin yapısının incelenmesinde Davidovits, Barbosa ve diğer araştırmacılar birçok kimyasal ve fiziksel analiz teknikleri kullanmışlardır. Genel jeopolimerizasyon mekanizması 4 aşamadan oluşmaktadır (Zhang 2014, Shah's 2017).

6. Katı formdaki alüminasilikat malzemenin yüksek alkali aktivatör içerisinde çözünmesi,
7. Oligomerleri oluşturmak üzere çözülmüş Al ve Si partiküllerin aktivatör tarafından tedarik edilen herhangi bir silikat ile etkileşime girmesi,
8. Süper doymuş sistemin jel oluşturmak için çökelmeye başlaması, (jeopolimer jeli büyür ve katılaşmış bir bağlayıcı oluşturmak için artık öncül parçacıklarla bağlanır.)
9. Jellerin, genellikle zeolit benzeri fazlara doğru daha düzenli bir duruma dönüşmeye devam etmesi (Zhang 2014, Shah's 2017).

Jeopolimerizasyon Şekil 2.8de şematize edildiği gibi çözünme, taşınma, yönelme ve polikondasyon işlem basamaklarını kapsayan ekzotermik bir reaksiyondur. Reaksiyonun ekzotermik olması jeopolimer malzemelerin nihai ürün özelliklerini etkilemektedir (Novais vd. 2018, Hameed vd. 2017).



Şekil 2.8 Jeopolimerizasyon reaksiyon mekanizması.

2.5 Jeopolimer ve Jeopolimer Köpük

Jeopolimer terimi Prof. Joseph Davidovits tarafından 1978’de seramik benzeri özelliklere sahip alternatif bir malzemeyi tanımlamak için kullanılmıştır. Jeopolimer adını uygun görmesinin nedeni meydana gelen reaksiyonun termoset polimerlerin polikondansasyon reaksiyonuna benzerlik göstermesidir (Abdullah vd. 2012). Aynı terim kömür gibi jeolojik koşullar altında oluşturulmuş organik polimerleri tanımlamak içinde kullanılmıştır. Burada “jeopolimerler” olarak adlandırılan materyaller akademik literatürde mineral polimerler, inorganik polimerler, inorganik polimer camlar, alkali bağlı seramikler, alkali kül materyali, toprak çimentoları, hidro seramikler gibi çeşitli isimler ile tanımlanmıştır (Provis ve Van Deventer 2009).

Jeopolimerler inorganik polimerler sınıfında değerlendirilmektedir. Jeopolimerlerin kimyasal kompozisyonu doğal zeolitik malzemelerinkilerle benzerlik göstermektedir. Ancak onlardan farklı olarak mikro yapıları düzensizdir (Bakri vd. 2012).

Jeopolimer üretimi, genel olarak alümina ve silika esaslı killerin alkali aktivatörlerle reaksiyona girerek üç boyutlu alüminasilikat veya polimerize silikat tetrahedral bileşiklerinin oluşturulması sürecidir. Alkali ortamda Si-O-Al ve Si-O-Si kovalent bağ oluşumları ile polimerizasyon ilerler. Sialat yapısı SiO₄ ve AlO₄ molekülleri arasında tüm oksijen atomlarının tetrahedral bağlar kurması ile oluşur (Yang vd.2012, Salwa vd. 2013). Jeopolimerizasyon reaksiyonu sonucunda genel olarak aşağıdaki gibi formüle edilen üç boyutlu tekto-alüminasilikat yapılar oluşmaktadır.

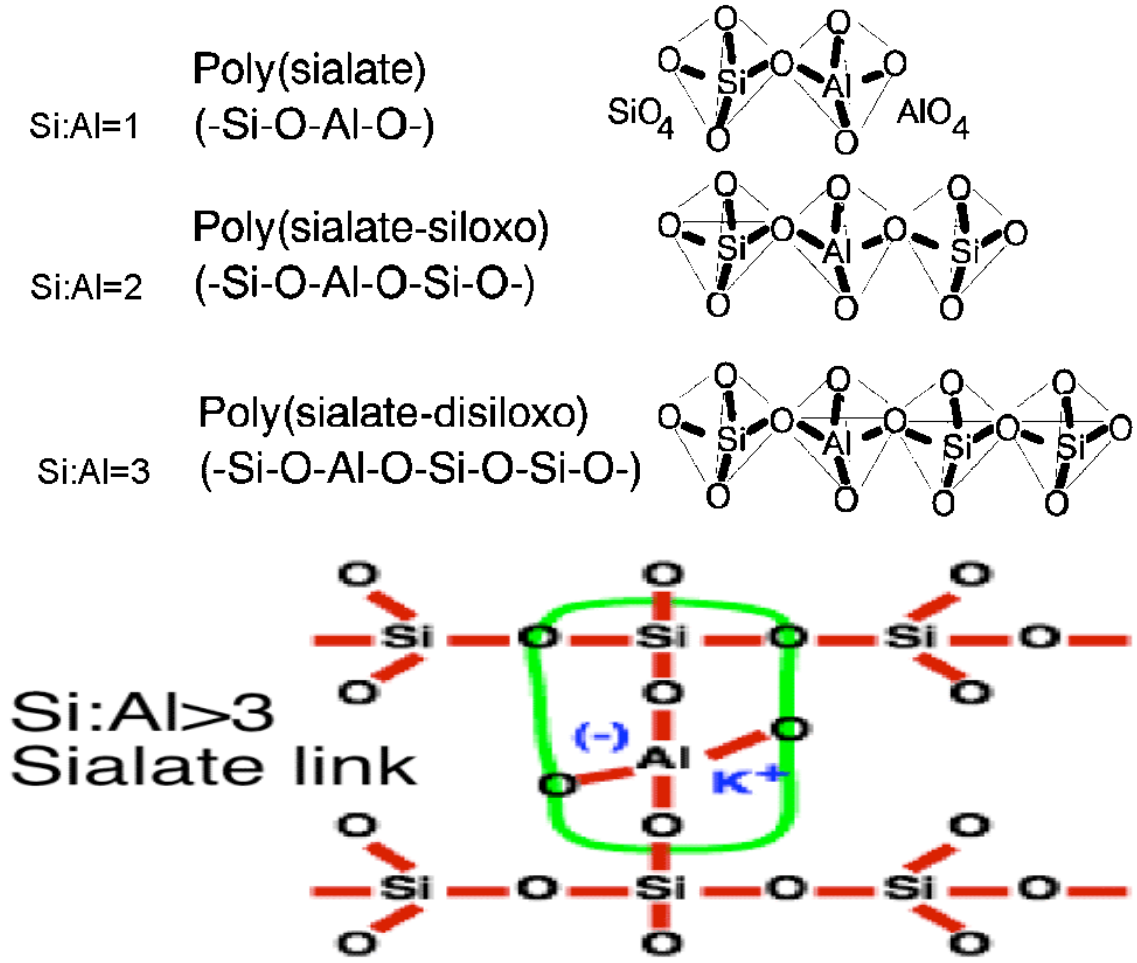


M: katyonlar(K, Na, Ca)

n: polikondansasyon derecesi

z: üç boyutlu polikondansasyon ağ yapı tekrar sayısıdır.

Polimer bağ yapısının oksijenli dizilişinin sıklık düzeyine ve elementlere göre sialat (Si-O-Al-O-), polisialat siloxo ya da polisialat disiloxo yapıları meydana gelmektedir.



Şekil 2.9 Polimer bağ yapısının oksijenli dizilişinin sıklık düzeyine ve elementlere göre jeopolimer yapıları (Davidovits 2002, 2005).

Jeopolimer köpükler birçok jeopolimer ürün arasında geleceği en parlak olanlar grubundadır. Jeopolimer köpükleri bu kadar önemli kılan özelliği ise 100 °C altında üretilabiliyor olmasına rağmen 900 °C'lerin üzerinde üretilmekte olan cam ve seramik köpüklerle benzer özelliklere sahip olmasıdır. Jeopolimer köpük hücresel yapısının elde edilmesi sodyum silikat ve alkali aktivatörlerin yanı sıra farklı köpük ajanları ve yüzey aktif madde kullanımıyla mümkün olmaktadır (Ducman and Korat 2016).

2.5.1 Jeopolimer ve Jeopolimer Köpük Üretiminde Kullanılan Hammaddeler

2.5.1.1 Alümina Silikat Esaslı Hammaddeler

Teorik olarak silika ve alüminyumdan oluşan herhangi bir malzeme jeopolimer

üretiminde kullanıma uygundur. Jeopolimer üretiminde alüminasilikat kaynağı olarak ampirik formülünde Al, Si ve O içeren kaolin, mika ve killer gibi doğal hammaddelerin yanı sıra uçucu kül, silis dumanı, kırmızı çamur, pirinç kabuğu külü gibi sanayi yan ürün malzemeleri de kullanılabilir (Riessen vd. 2017, Wallah and Rangan 2006).

Doğal hammaddeler içinde en çok tercih edileni meta kaolindir. Çoğunlukla meta kaolin kullanılmasının nedeni, homojen özelliklere sahip olarak büyük miktarlarda elde edilebilen endüstriyel bir mineral olmasıdır. Meta kaolin ayrıca Portland çimentosuna kıyasla çevre dostudur. Üretimi için çok daha düşük kalsinasyon sıcaklığı gerektirir ve Portland çimentosundan % 80-90 daha az CO₂ yayar (Rovnanik 2010, Azimi vd. 2016).

Atık malzeme olarak en çok uçucu küller kullanılmaktadır. Uçucu kül, termik santrallerde kömürün yanması sonucu meydana gelen baca gazları ile taşınarak siklon veya elektro filtrelerde toplanan bir yan üründür. Yüksek sıcaklıklarda kömürün yanma prosesi sonucu eriyen malzeme soğuyarak, gaz akışı ile kısmen veya tamamen küresel şekilli kül taneciklerine dönüşmektedir. Bu kül taneciklerine çok ince yapıda (0,5-150 mikron) olduğundan ve baca gazları ile sürüklenmelerinden dolayı uçucu kül denilmektedir (Türker vd. 2009). Uçucu küller yapılarında temel elementler olarak Si, Al, Ca ve S bulundurulur. Esas olarak alümina silikatlardan ve bunlarla birlikte bulunabilen Fe, Mg, Na, K, Ca, Ti ve nadir toprak elementlerinden oluşur. Uçucu olan veya uçucu oksitleri oluşturan As, Cd, Ga, Mo, Pb, Se ve Zn gibi elementler matrisine girme eğilimi göstermezler. Bu elementler derişimleri tane boyutu ile ters orantılı olarak uçucu küllerin yüzeylerinde toplanırlar (Güler vd. 2005).

F tipi ve C tipi olmak üzere iki çeşit uçucu kül bulunmaktadır. F tipi uçucu kül antrasit veya bitümlü kömürün yakılmasından elde edilmektedir. Bu sınıftaki uçucu küller puzolanik özelliğe sahiptir. C tipi uçucu küller ise linyit ve alt bitümlü kömürün yakılmasından elde edilmektedir. C tipi uçucu küller puzolanik özelliklerinin yanı sıra bazı çimento özelliklerini de taşımaktadır. C tipi uçucu küllerden bazıları %10'dan daha fazla kireç içermektedir (Barbour 1991).

Jeopolimer üretiminde kullanılan uçucu külün partikül büyüklüğü, kalsiyum içeriği, alkali metal içeriği, amorf içeriği ve uçucu külün morfolojisi nihai ürün özelliklerini etkilemektedir. Ayrıca, uçucu kül içindeki kalsiyum içeriğinin, nihai basınç dayanımı üzerinde önemli bir rol oynamaktadır. Kalsiyum içeriği arttıkça daha yüksek basınç dayanımı elde edilmektedir. Bununla birlikte en iyi bağlanma özelliklerini sağlayabilmek için hammadde olarak kullanılacak olan uçucu külün sahip olması gereken bazı özellikler vardır. Bunlar;

- Düşük kalsiyum içeriği,
- %5'den daha az yanmamış malzeme,
- Max. %10 Fe₂O₃ içeriği,
- %40-50 reaktif silika içeriği,
- Yüksek oranda camsı faz,
- %80-90 oranında tane boyutu 45 mm'den düşük partiküller (Walloh and Rangan 2006).

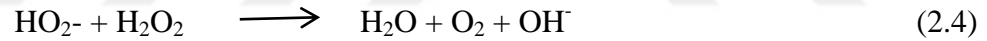
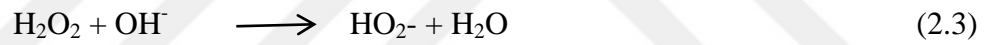
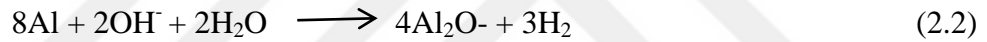
2.5.1.2 Alkali Aktivatörler

Alkali aktivatör olarak kullanılacak hammaddenin alkali oranı, hammadde içindeki Si ve Al atomlarını çözerek stabil tetrahedral yapının oluşumunu sağlayabilecek kadar yüksek olmalıdır. Jeopolimer üretiminde genellikle sodyum hidroksit (NaOH) ve sodyum silikat (Na₂SiO₃) ya da potasyum hidroksit (KOH) ya da potasyum silikat (K₂SiO₃) kullanılmaktadır. KOH, NaOH'a göre daha alkali olmasına rağmen yapılan araştırmalar NaOH'ın Si ve Al atomlarının çözündürmede daha etkili olduğunu göstermiştir. Ayrıca potasyum içerikli alkaliler pahalı olduklarından dolayı ekonomik açıdan da pek tercih edilmemektedir (Lach et al. 2016, Xu and Deventer 1999). Alkali aktivatör olarak, NaOH ve Na₂SiO₃ kombinasyonunun kullanımının tek başına NaOH kullanımına göre daha yüksek jeopolimerizasyon oranlarına yol açmaktadır. Alkali hidroksit alüminasilikat malzemenin çözünmesinden sorumluyken, Na₂SiO₃ bağlayıcı olarak rol almaktadır (Yahya et al. 2015). Katz yapmış olduğu bir çalışmada aktivatör konsantrasyonundaki artışın jeopolimer ürünün mukavemetinde artışa yol açtığını raporlamıştır (Katz 1997).

Aynı şekilde Girawale de jeopolimer beton üzerine yapmış olduğu çalışmada NaOH molaritesindeki artışın basma mukavemetinde olumlu sonuçlar verdiğini vurgulamıştır (Girawale 2015).

2.5.1.3 Köpük Oluşturucu Ajanlar

Jeopolimer köpük üretim sürecinde kullanılmaktadırlar. Köpük ajanları jeopolimer harç içindeki alkaliler ile reaksiyona girerek gaz oluşumunu sağlarlar. Oluşan gaz jeopolimer malzeme içerisinde gözenekli yapının oluşumunu sağlar. Köpük ajanı olarak hidrojen peroksit (H_2O_2), NaOCl ya da çinko, alüminyum gibi metal tozları kullanılmaktadır. Ayrıca silisyum karbür içerisinde bulunan metalik silikon impuriteyi alkali ortam içerisinde hidrojen gazı çıkışına neden olmaktadır ve bu özelliği sayesinde köpük ajanı olarak kullanıma uygundur. Alüminyum tozunun ve H_2O_2 'nin sistem içerisinde meydana getirdiği reaksiyonlar aşağıdaki eşitliklerde gösterilmektedir.



Köpük ajanı oranındaki artış gözenek miktarında artmalara sebep olarak yoğunluğu düşürmekte ancak basma mukavemetini olumsuz etkilemektedir. Her reçete içeriğine bağlı olarak belli bir orandan sonraki artış oluşan gözeneklerde birleşmelere, bundan kaynaklı çökmelere neden olmaktadır (Masi vd.2014, Ducman and Korat 2016).

2.5.1.4 Sürfaktanlar

Sürfaktanlar ara yüzeylerde etkili yüzey aktif maddelerdir. Sürfaktan maddeler yüzey gerilimini düşürdükleri için oluşan hava kabarcıkları yüzeye çıktığında uzun süre patlamadan kalırlar. Jeopolimer köpük üretiminde daha homojen ve kararlı hava kabarcıklarının oluşturulması ve karıştırma esnasında havanın sürüklenmesinin sağlanması amacıyla çeşitli sürfaktanlar kullanılmaktadır (Holmberg 2002).

2.6 Jeopolimer Köpük Oluşumu

Jeopolimer köpük oluşumunun sağlanması için iki farklı yöntem kullanılmaktadır. Bunlardan ilki pre-foaming yöntemidir. Bu yöntemde köpük ajanı su ile önceden karıştırılarak köpük yapı oluşturulmakta ve elde edilen köpük jeopolimer harca ilave edilerek gözenekli yapı meydana getirilir. İkinci yöntem ise mixed-foaming yöntemidir. Bu yöntemde gözenekli yapı, köpük ajanı diğer hammaddelerle birlikte eklenip karıştırılarak elde edilir. Köpük oluşumu esnasında meydana gelen gözeneklerin boyut ve miktarları;

- Kullanılan hammaddeye,
- Kullanılan köpük ajanına,
- Kullanılan yöntemine,
- Kür koşullarına,

Bağlı olarak değişiklik göstermektedir.

Pre-foaming yöntemi ile elde edilen jeopolimer köpükler genellikle düşük gözenekli yapı sergilemektedir. Düşük gözenekli yapı oluşumuna paralel olarak bu yöntemle elde edilen ürünlerde yüksek yoğunluk ve yüksek termal iletkenlik değerleri gözlemlenmektedir (Zhao vd.2015, Abdullah vd. 2012).

Yapılan çalışmalar, kullanılan hammaddedeki Si/Al oranındaki artışın gözenek miktarında ve gözenek boyut dağılımında azalmalar meydana getirdiğini ve buna bağlı olarak da termal iletkenlik değerini yükselttiğini göstermektedir (Zhang vd. 2015).

2.7 Jeopolimerlerin Avantajları

- **Enerji tasarrufu ve çevre dostu:** Çimento üretim sırasında kireç taşlarının ayrışması ve fosil yakıtların yanması sonucu CO₂ salınımı olmaktadır. Çimentosuz teknoloji olan jeopolimer üretimi CO₂ salınımını minimize ederek global ısınmayı engellemektedir (Masi vd. 2014, Novais vd. 2018). Ayrıca çimento üretimi için fırın sıcaklığını 1450°C'lere kadar çıkması gerekmektedir. Bu değer tuğla üretimi için 900-1300°C arasındadır. Gaz beton üretiminde ise

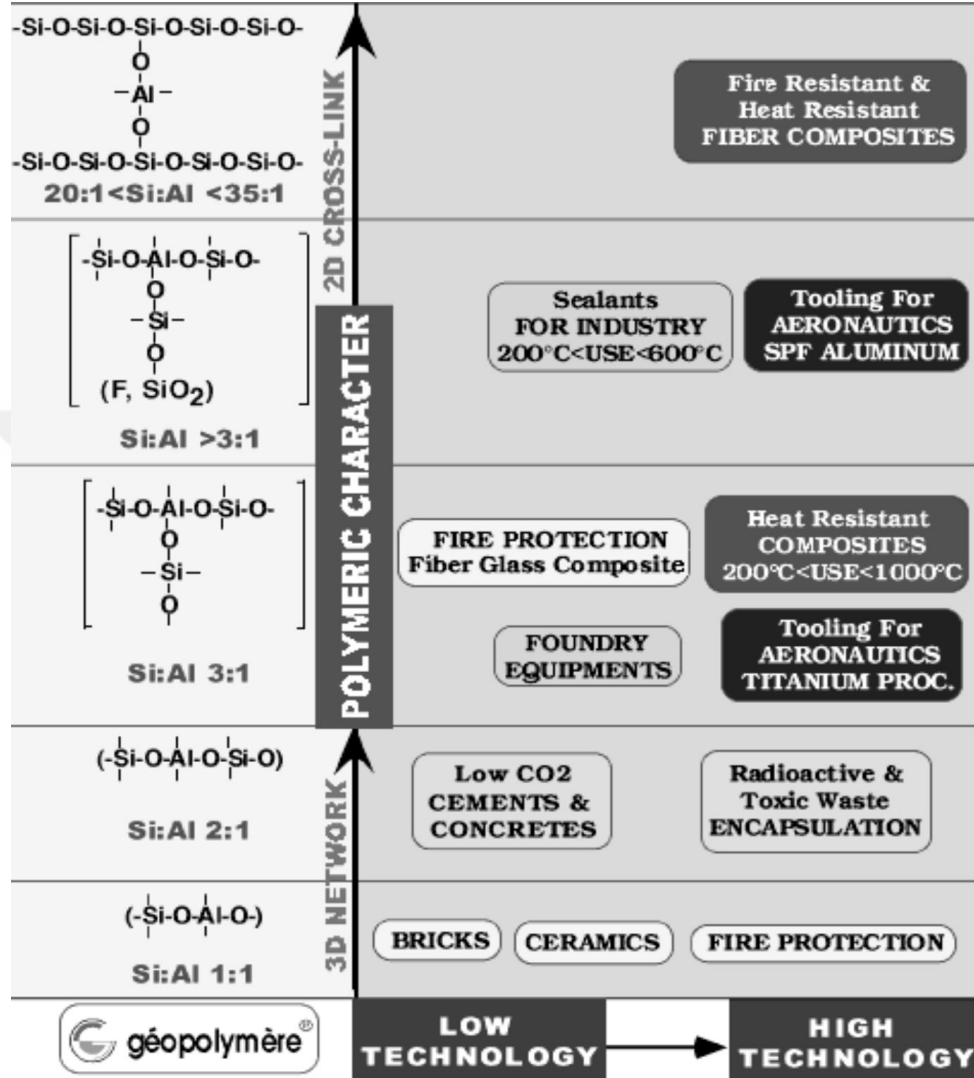
otoklav kullanımı gerekmektedir. Diğer yapı elamanlarının yüksek sıcaklık ve ek proses ihtiyaçları ekonomik açıdan yüksek maliyetler doğurmaktayken jeopolimer oda sıcaklığında üretilebilmektedir (Toprak 2011).

- **Hammadde Çeşitliliği:** Volkanik küller gibi doğal puzalonların ya da kil gibi doğal kaynakların hammadde olarak kullanılabilmesinin yanı sıra birçok sanayinin atık ürünlerinin de (uçucu kül, biokütle külü, lağım çamur külü, kağıt çamur, vb.) kullanılabilmesi jeopolimerlerin avantajlarından bir tanesidir (Riessen vd.2017).
- **Çabuk sertleşme ve donma:**
- **Zehirli metalleri immobilize etme yeteneği:**
- **İyi uzun vadeli özellikler ve dayanıklılık:** Jeopolimer malzemeler binlerce yıl dış etkilere dayanabilmektedir (Ducman and Korat 2016).
- **Yüksek ısı dayanımı:** Jeopolimerler 600 °C’de stabil kalabilirken Portland çimentosu 300 °C de bozulmalara başlar.
- **Aside karşı dayanıklılık:** Portland çimentosunun aksine jeopolimerlerin yapısı kirece dayanmaz ve bu sayede asidik çözeltilerde çözünmez (Wallah and Rangan 2006).
- **Yangına dayanıklılık:** İçeriğindeki kristalin fazların miktarına bağlı olarak 800-1000 °C’lere kadar kullanım sıcaklığına sahiptir (Bai vd. 2017).

2.8 Jeopolimerlerin Kullanım Alanları

Jeopolimerin özelliklerini ve buna bağlı olarak kullanım alanlarını belirleyen ana faktör polisialat kimyasal yapısındaki Si /Al molar oranıdır. Şekil 2.10’da görüldüğü gibi 1, 2 ve 3 gibi düşük oranlardaki Si/Al oranı sistemde rijit üç boyutlu bir ağ yapısının

oluşumunu başlatır. Si/Al oranı 15'in üzerine çıktığında ise jeopolimer malzemeye polimerik özellik sağlar (Wallah and Rangan 2006).



Şekil 2.10 Kullanım alanlarına göre jeopolimerler (Davidovits. 2002).

Si/Al oranının bire eşit olduğu sistemlerde zeolit kristaline benzeyen tuğla, seramik ve yangından koruyucu ürünler elde edilebilmektedir.

Bu oran ikiye eşit olduğunda yine seramik (kristalin), amorf arası bir yapıda jeopolimer çimento ve betonu sentezlenebildiği gibi daha ileri teknolojiler kullanılarak radyoaktif atıkların depolanması için gerekli yapılar üretilebilmektedir.

Oranın üçe eşit olduğu durumlarda ise akışkan polimerik karakter artış göstermektedir. Si/Al oranı için üzerine çıktığı durumlarda dolgu köpük malzemesi üretilebilir.

Si/Al>15 olduğunda iki boyutlu moleküler ağ yapısında jeopolimer pastası oluşmaktadır. Oluşan bu yeni yapı yangın ve ısı dayanımı yüksek malzemelerin üretiminde kullanıma uygundur ve bu özellikleri sayesinde savaş uçaklarında kullanılacak nano kompozit yapıların üretiminde tercih edilmektedir (Davidovits 2002, Wallah ve Rangan 2006).

2.9 Kolemanit

Bor endüstriyel anlamda metal ve ametal elementlerle yaptığı bileşiklerin ürün üzerinde daha iyi özellikler elde edilmesine sağladığı katkılardan dolayı önemlidir. Ayrıca Türkiye dünya genelinde %72,8'lik bor rezerviyle ilk sırada yer almaktadır. Bor elementi doğada tek başına bulunamaz. Oksitli bileşik halinde (B_2O_3) kolemanit, üleksit, tinkal ve benzeri minerallerin içinde bulunur (Kutuk 2014).

Bor ürünlerinden biri olan kolemanitin kimyasal formülü $2CaO.3B_2O_3.5H_2O$ 'dur. Hidrate haldeki kalsiyum boratın bir şeklidir ve bol miktarda kil mineraline sahiptir. Kristal yapısı mono kliniktir. Borik asit üretiminde sıkça kullanılmaktadır (Arslan ve Bayat 2016).

Endüstride kolemanitin hammadde olarak kullanımı pek yaygın değildir. Ancak literatürde katkı maddesi olarak kolemanitin kullanıldığı çalışmalara rastlanmaktadır. Buna istinaden Eti Bor işletmesi son yıllarda farklı boyutlarda öğütülmüş kolemanit ürünlerini piyasaya sürmüştür. Kolemanit, fayans üretiminde sodyum feldspata alternatif ergitme ajanı olarak, sert porselen üretiminde sinterleme yardımcı maddesi olarak, duvar karosu üretiminde mermer yerine katkı maddesi olarak kullanılmıştır (Özdemir vd. 2019).

3. MATERYAL ve METOT

3.1 Kullanılan Malzemeler

Alümina silikat kaynağı olarak tuğla taban külü ve meta kaolin kullanılmıştır. Tuğla taban külü Afyonkarahisar il sınırları içinde bulunan Uysallar Toprak Sanayi ve Ticaret A.Ş firmasından temin edilmiştir. Kullanıma hazırlamak amacıyla taban külü jet değirmeninde öğütülerek 106 mikron altına elenmiştir. Elenen taban külünün kimyasal analizi yapılmış ve Çizelge 3.1’de verilmiştir. Jeopolimer üretimi için gerekli olan total alümina silikatın sağlanması amacıyla taban külüne ilave olarak kullanılan meta kaoline ait kimyasal analiz sonuçları da Çizelge 3.1’de verilmiştir. Bu çalışmada kullanılan meta kaolin AVS İç ve Dış Ticaret Ltd. Şti. şirketinin CC-MW kodlu ürünüdür.

Çizelge 3.1 Tuğla taban külü ve meta kaolin hammaddelerine ait kimyasal analiz sonuçları.

Numune Adı	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	MgO (%)	SO ₃ (%)	K ₂ O (%)	Na ₂ O (%)	K.K
Tuğla taban külü	43,45	14,19	19,08	7,50	2,16	6,73	2,20	0,28	3,55
Metakaolen	52,76	41,66	1,04	0,39	0,66	0,11	1,36	0,07	0,42

Meta kaolinin Malvern Mastersizer 2000 test cihazı ile yapılmış olan tane dağılım analiz Çizelge 3.2 de verilmiştir.

Çizelge 3.2 Meta kaoline ait tane dağılım analizi.

Tane Dağılımı	
Elek bakiyesi +45µm (%)	Max. 0,004
D50 (µm)	4-5
D90 (µm)	22-23
D98 (µm)	39-40

Katkı malzemesi olarak kullanılacak olan 45µ ve 75µ incelikteki kolemanit Eti Maden İşletmeleri Teknoloji Geliştirme Dairesi Başkanlığı tarafından temin edilmiştir.

Elde edilecek harcın jeopolimerleşebilmesi için gerekli alkali ortamın oluşturulması amacıyla NaOH ve Na₂SiO₃ (3 modüllük) birlikte kullanılmıştır. NaOH firmadan palet olarak temin edilmiş ve kullanım için saf su ile 12 M'lık çözeltisi hazırlanmıştır.

Köpük ajanı olarak bozulma reaksiyonu sonucu O₂ açığa çıkararak gözenek oluşumunu sağlayan H₂O₂ kullanılmıştır. Ayrıca oluşan gözeneklerin boyutlarının ve stabilitelerinin sağlanması amacıyla sürfaktan olarak hostapur SAS 60 kullanılmıştır.

3.2 Deneysel Çalışmalar

Jeopolimer üretiminde karışım oranlarını belirlerken Katı/sıvı ve Na₂SO₃ / NaOH oranları önemli parametrelerdendir. Katı / sıvı oranındaki artış harcın viskozitesinde düşümlere sebep olmaktadır. Bunun yanı sıra, düşük katı /sıvı oranına sahip jeopolimer çözünme oranını hızlandırabilirken düşük bağlayıcı oranlarından kaynaklı mukavemette düşümlere sebep olabilmektedir (Yahya vd. 2015).

Zeolit bazlı jeopolimerlerde Na₂SiO₃ / NaOH oranındaki artış (1,5'e kadar) nihai ürünün basma mukavemetin de artışa yol açmaktadır (Yahya vd. 2015). Bu veriler ve literatürdeki mevcut bazı çalışmalarda dikkate alınarak hazırlanacak reçetelerde Na₂SiO₃ / NaOH oranı 2, katı / Alkali aktivatör (sıvı) oranı 1 olarak belirlenmiştir.

Jeopolimer köpüklerde yoğunluğu ve buna bağlı olarak termal iletkenliği etkileyen önemli parametrelerden biri de kullanılan köpük ajanı miktarıdır. Ducman ve Korat yapmış oldukları çalışmalarında H₂O₂ miktarının etkilerini gözlemlemişlerdir. Çalışmalarında H₂O₂ miktarı %0,5, %1, %1,5 ve %2,0 olacak şekilde denemeler dökmüşlerdir. Elde edilen sonuçlarda %1,5 oranına kadar yoğunlukta ve termal iletkenlikte azalmalar görülürken %2 oranında bu değerlerin tekrar yükselişe geçtiğini gözlemlemişlerdir. Bunun sebebini ise gözenek birleşmeleri ve çökelmeleri olduğunu savunmuşlardır (Ducman ve Korat 2016). Bu alanda başka bir çalışma da Azimi ve arkadaşları tarafından denenmiş ve benzer sonuçlar elde edilmiştir. H₂O₂ miktarında ki artış belli bir noktaya kadar termal iletkenlik üzerinde olumlu etkiler sergilerken optimum noktadan sonra olumsuz sonuçlar doğurmaktadır. Bu hususta asıl önemli konu

elde edilen gözeneklerin hücre yapısı, boyutu, şekli ve hacmidir (Azimi vd. 2016). Yapılmış olan bu çalışmalar dikkate alınarak H₂O₂ miktarı minimum %1 olarak belirlenmiştir. Aynı reçete içerisinde %1,2 H₂O₂ oranı ile de bir adet deneme reçetesi hazırlanmış ancak nihai ürün yüzeyinde fazlaca çatlaklar ve yüzeysel dağılımların meydana gelmesinden dolayı %1 oranında karar kılınmıştır.

Reçetelerde kullanılacak olan meta kaolin oranları minimumda tutulmak istenmiştir. %5 oranıyla başlanılan reçete demesinde hazırlanan jeopolimer harcın dökülebilir kıvamda olmamasından dolayı denemeler doğrultusunda minimum meta kaolin miktarı %8 olarak belirlenmiştir. Meta kaolin miktarındaki artışın nihai ürün üzerindeki etkilerin gözlemlenebilmesi için %10 ve %15 meta kaolin katkılı 2 ayrı reçete daha dökülmüştür.

Bu çalışma içerisinde ayrıca kolemanit katkısının nihai ürün üzerindeki etkisinin gözlemlenebilmesi amacıyla %1, %3 ve %5 katkılı reçeteler hazırlanmıştır. Kolemanit olarak ise iki ayrı tane boyutu (45µ ve 75µ) kullanılarak tane boyut etkisi de gözlemlenmiştir.

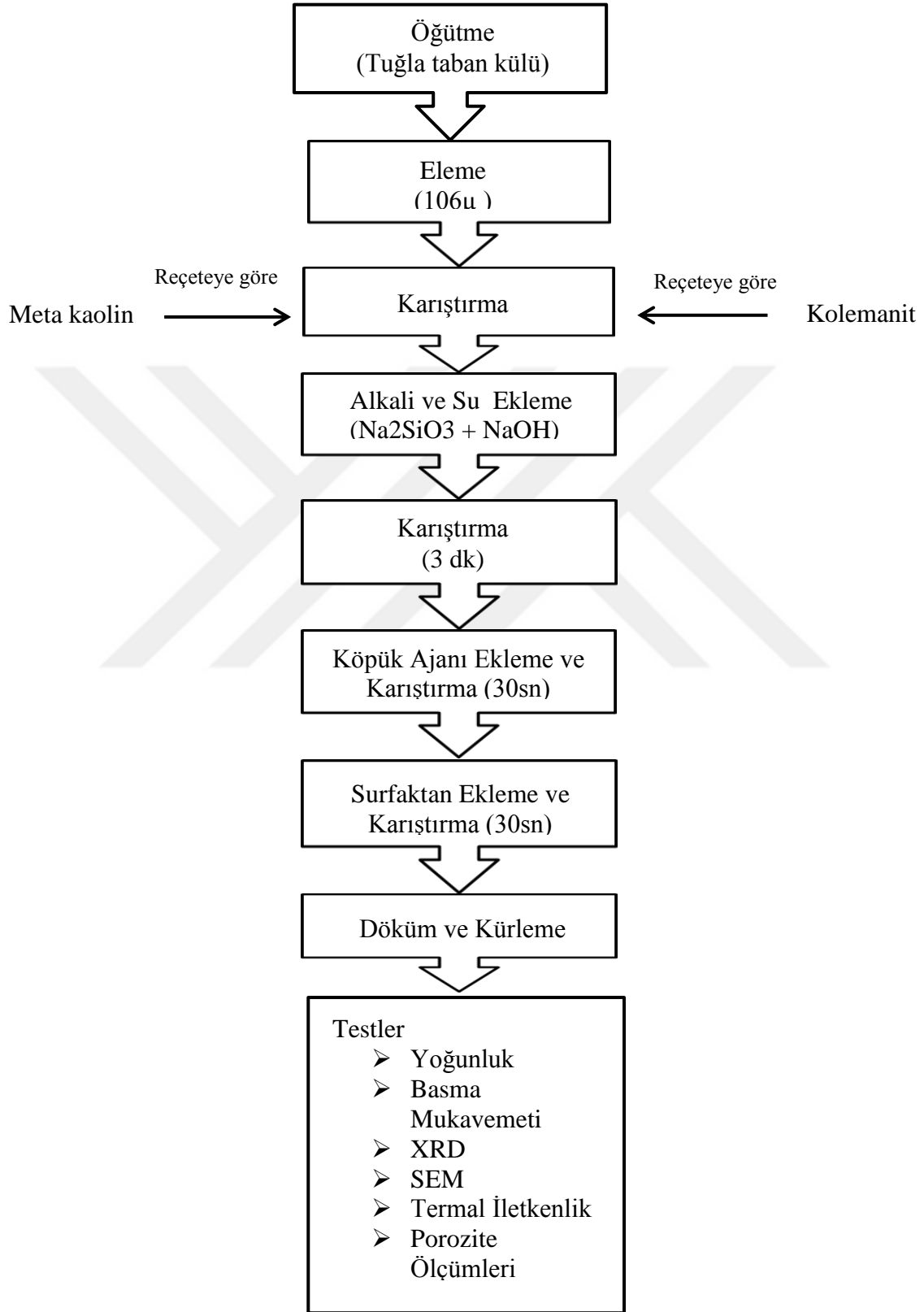
Yapılan çalışmalar kür sıcaklığındaki artışın jeopolimerizasyon üzerinde olumlu etkiler yarattığı yönündedir. Bu amaçla sıcaklığın nihai ürün üzerindeki etkilerinin gözlemlenebilmesi amacıyla ürünlere 70°C ve 90°C olmak üzere iki ayrı sıcaklıkta 6 saatlik kür koşulları uygulanmıştır. Ayrıca reçetelerden bir tanesi, kalıplara dökülüp kabarmasını tamamladıktan sonra kalıpların ağzı kapatılarak 1 gün, kalıptan çıkarıldıktan sonra ise ağzı kapalı poşet içinde 28 gün kendi ısı ve neminde küre tabi tutulmuştur.

Bütün bu parametreler dikkate alınarak toplamda 9 adet numune hazırlanmıştır. Bu numunelere ait reçetelerin ağırlıkça yüzdeleri ve kür koşulları Çizelge 3.3'de verilmiştir.

Çizelge 3.3 Hazırlanan numune reçetelerinin ağırlıkça yüzdeleri ve kür koşulları.

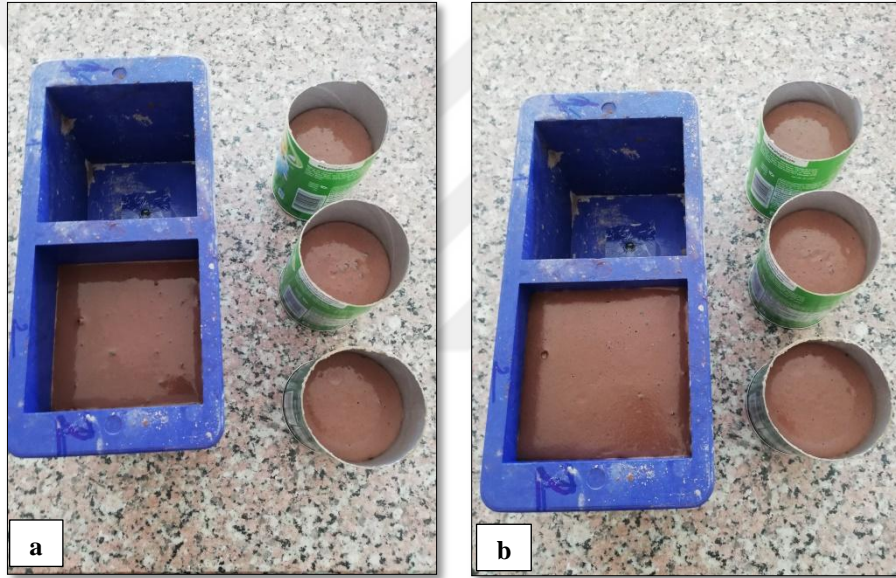
Hammadde	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9
TTK	36	34	29	34	35	31	24	31	34
Metakaolin	8	10	15	10	8	10	15	10	10
Kolemanit(45µ)	-	-	-	-	1	3	5	-	-
Kolemanit(75µ)	-	-	-	-	-	-	-	3	-
Na₂SiO₃	29,30	29,30	29,30	29,30	29,30	29,30	29,30	29,30	29,30
NaOH	14,90	14,90	14,90	14,90	14,90	14,90	14,90	14,90	14,90
H₂O₂	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Hostapur	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
Su	12	12	12	12	12	12	12	12	12
Kür koşulları (°C/Saat)	90/6	90/6	90/6	70/6	90/6	90/6	90/6	90/6	1 gün ağzı kapalı kalıpta 28 gün ağzı kapatılmış poşette

3.2.1 Deneysel Akış Şeması



Şekil 3.1 Deneysel akış şeması.

Tuğla taban külü jet değirmeninde 20dk öğütülerek 106 μ elekten elenmiş ve reçetelerde elek altları kullanılmıştır. Karıştırma işlemi mekanik karıştırıcı kullanılarak yapılmıştır. Nihai karıştırma sonrası harç, basma deneyi için çapı 75mm olan silindir kalıplara, diğer deneylerde kullanılmak için 10*10*10'luk kalıplara dökülmüştür. Kalıplara dökülen numunelerin bekleme öncesi ve sonrasına ait görüntüler resim 3.1'de verilmiştir. Kalıplara dökülen numuneler ilk kabarmaları tamamlanana kadar 15dk laboratuvar koşullarında bekletildikten sonra belirlenen sıcaklık ve sürelerde küre tabi tutulmak üzere etüve konulmuştur. Etüve ani kurumadan kaynaklı oluşabilecek çatlamları önlemek amacıyla başka bir kap içerisinde su konulmuştur.



Resim 3.1 Kalıplara dökülen numunelerin bekleme öncesi (a) ve sonrası (b) görüntüleri.

3.2.2 Porozite ve Yoğunluk Ölçümleri

Por boyutu, por boyut dağılımı ve yüzey alanı gibi por özelliklerinin ölçümlerinde civa porozimetresi kullanılmıştır. Ölçüm, civa gibi reaktif ve ıslatıcı olmayan bir sıvının, yeterli basınç uygulanmadığı takdirde ince porlara giremeyeceği prensibi üzerine kuruludur. Cihaz, uygulanan basınca karşı hücrede azalan civa miktarını, hücre uçları arasındaki kapasitans değişiminden tayin eder. Por boyutu ise basıncın fonksiyonu olarak hesaplanır.

Numunelere ait bağıl yoğunluk değerleri Arşimet yöntemi temel alınarak belirlenmiştir. Yoğunluk değerleri en az 3 numune üzerinden ortalamaları alınarak tespit edilmiştir. Yoğunluk hesabında aşağıdaki eşitlik kullanılmıştır.

$$\text{Yoğunluk} = \frac{M_0}{M_1 - M_2} \quad (3.1)$$

M0: Kuru Ağırlık, M1: Su emmiş ağırlık, M2: Su içindeki ağırlık

3.2.3 Mekanik Özelliklerin İncelenmesi

Numunelerin mekanik özelliklerinin incelenmesi amacıyla basma yüklemesi altındaki kırılma davranışları gözlemlenmiştir. Basma testlerinde Shimadzu-AG-IS-100 kN cihazı (Resim 3.2) kullanılmıştır. Testlerde 75 mm çapında silindirik kalıplara dökülen numuneler kullanılmıştır. Numunelerin alt ve üst yüzeylerinin birbirine paralel olmasına özellikle dikkat edilmiştir. Basma mukavemeti değerleri en az 3 numune üzerinden ortalamaları alınarak tespit edilmiştir.



Resim 3.2 Basma dayanımı testlerinin yapıldığı cihazın görüntüsü.

3.2.4 Mikro Yapısal ve Minerolojik Analizler

Nihai numunelerin mikro yapıları taramalı elektron mikroskobu (SEM) (LEO 1430 VP) ile incelenmiştir. İnceleme öncesinde numuneler uygun bir bölgeden kesildikten sonra soğuk kalıplama ile reçine içerisine alınmıştır. Reçineye alınan numunelerin yüzeyleri zımparalanarak pürüzsüz hale getirilmiştir.

Minerolojik incelemeler için Shimadzu marka XRD- 6000 model Bakır (Cu) x ışını tüpüne sahip cihaz kullanılmıştır. Analizi yapılacak olan numunelerden alınan uygun parçalar seramik havanlarda öğütülerek toz haline getirilmiş ve 106 μ eleklerden elenmiştir.

3.2.5 Termal İletkenlik Ölçümleri

Termal iletkenlik ölçümleri C-THERM / TCi Thermal Conductivity cihazı kullanılarak yapıldı. Cihaz 3 cm çapa sahip hassas sensörlü ile sensor üzerine koyulan malzemenin termal iletkenlik sabiti (k) W/mK cinsinden belirlenmektedir. Ölçümü yapılacak malzemenin uygun bir yüzeyi (düz ve pürüzsüz) cihazın sensörü ile temas ettirilir ve cihaz sensor ile numune arasındaki sıcaklık etkileşiminden yola çıkarak malzemenin termal iletkenlik katsayısını(k) W/mK cinsinden belirlemektedir. Ölçüm için 4*4*1 cm boyutunda numuneler hazırlandı. Hazırlanan numunelere ait görüntüler Resim 3.3'de verilmiştir.



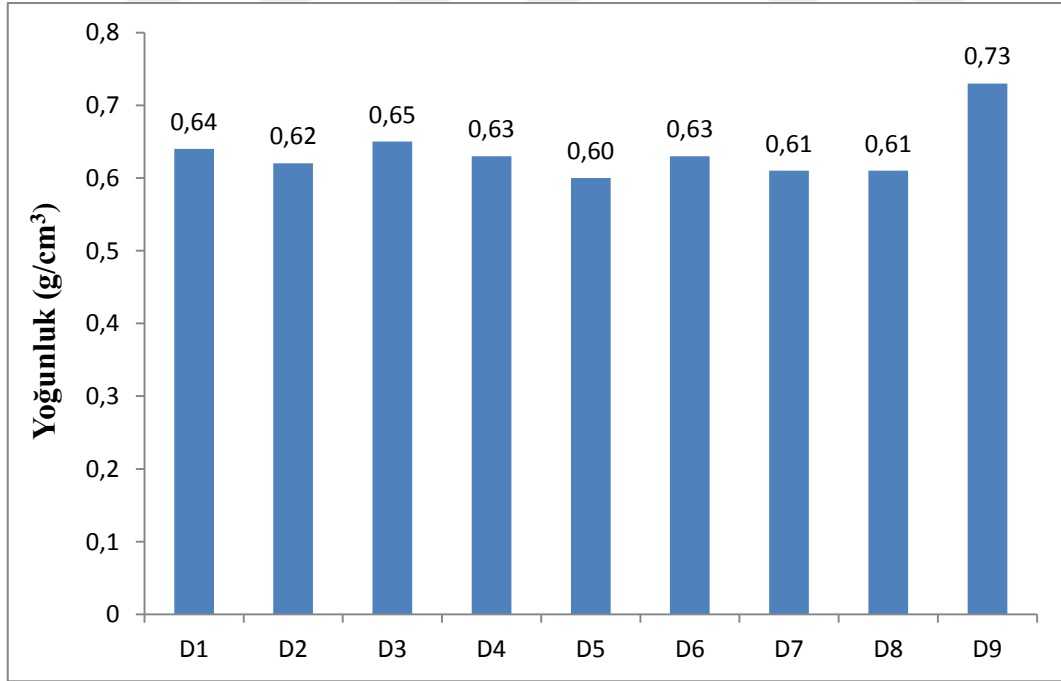
Resim 3.3 Termal iletkenlik için hazırlanan numuneler.

4. BULGULAR

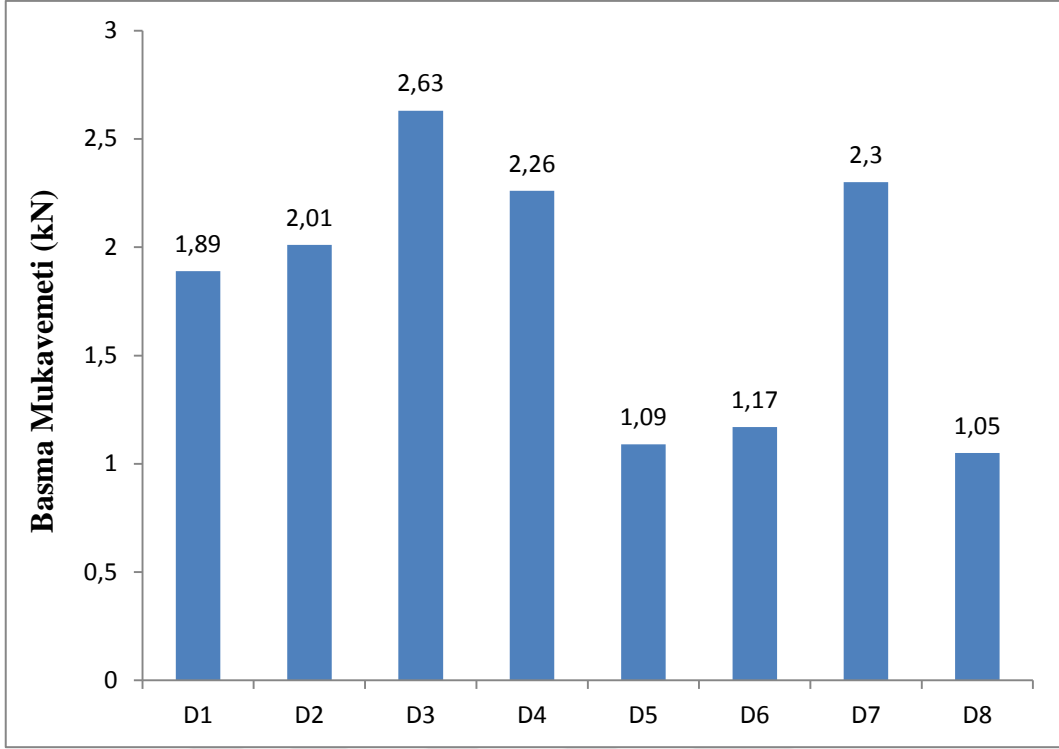
4.1 Basma Mukavemeti, Yoğunluk ve Porozite Değerleri

Kürleme koşullarını tamamlayan 9 ayrı reçetenin uygun ölçüde hazırlanmış numunelerinin Arşimet prensibi kullanılarak elde edilen yoğunluk değerlerine ait grafiği Şekil 4.1 de verilmiştir. Grafikte açıkça görüldüğü gibi numunelere ait yoğunluk değerleri 0,60 ile 0,73 g/cm³ arasında değişmekte ve en yüksek yoğunluk pikine kadar değerler arasında fazlaca sapma yoktur. En düşük yoğunluk değeri olan 0,60 g/cm³'lük değere %1 oranında 45µ incelikte kolemanit kullanılan numune; en yüksek değer olan 0,73 g/cm³'lük sonuca ise %3 oranında 75 µ incelikte kolemanit kullanılan numunede ulaşılmıştır.

Basma mukavemeti değerleri 1,05 ile 2,63 kN arasında değişmekte ve yoğunluğun aksine numuneler arası sapmalar belirgindir. Numunelere ait basma mukavemeti değerleri ise Şekil 4.2 deki grafikte verilmiştir.

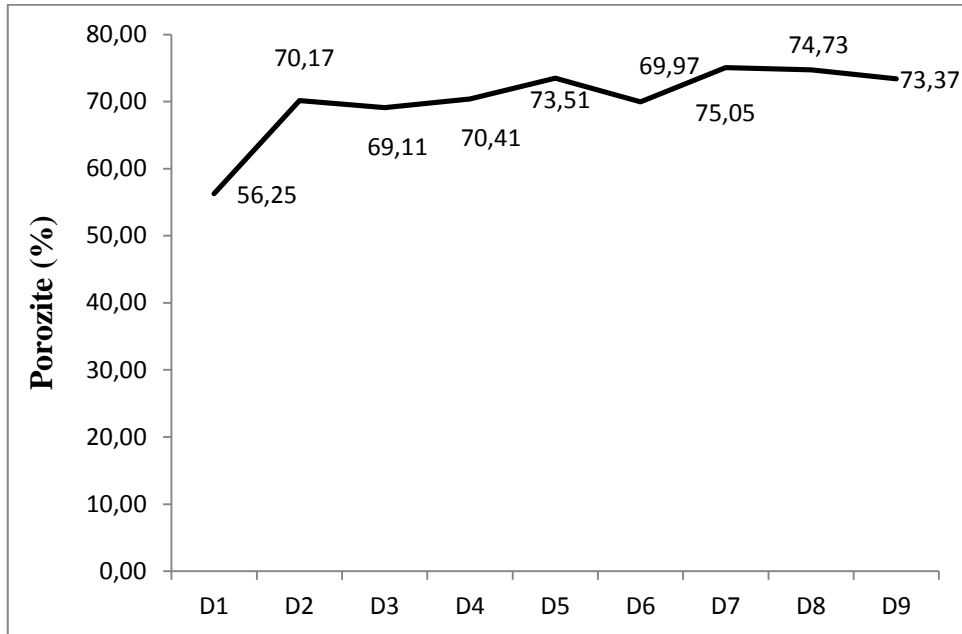


Şekil 4.1 Numunelere ait yoğunluk grafiği.

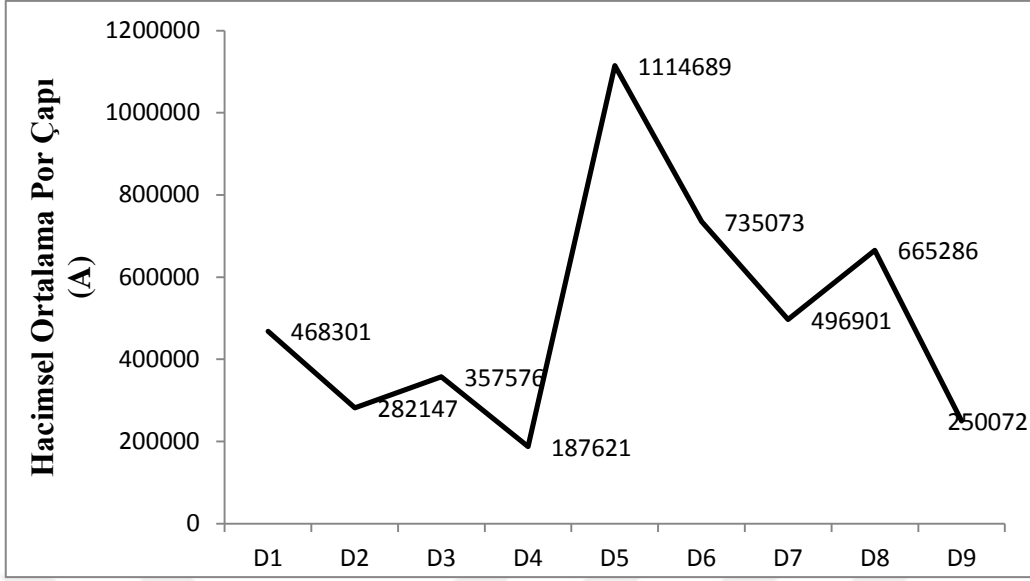


Şekil 4.2 Numunelere ait basma mukavemeti grafiği.

Numunelere ait % porozite ölçüm sonuçları ve hacimsel ortalama por çapı (A) Şekil 4.3 ve Şekil 4.4’de verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi porozite değerleri %56,25 ile %74,73 arasında; hacimsel ortalama por çapı ise 187621 A ile 1114689 A arasında değişiklik göstermektedir.



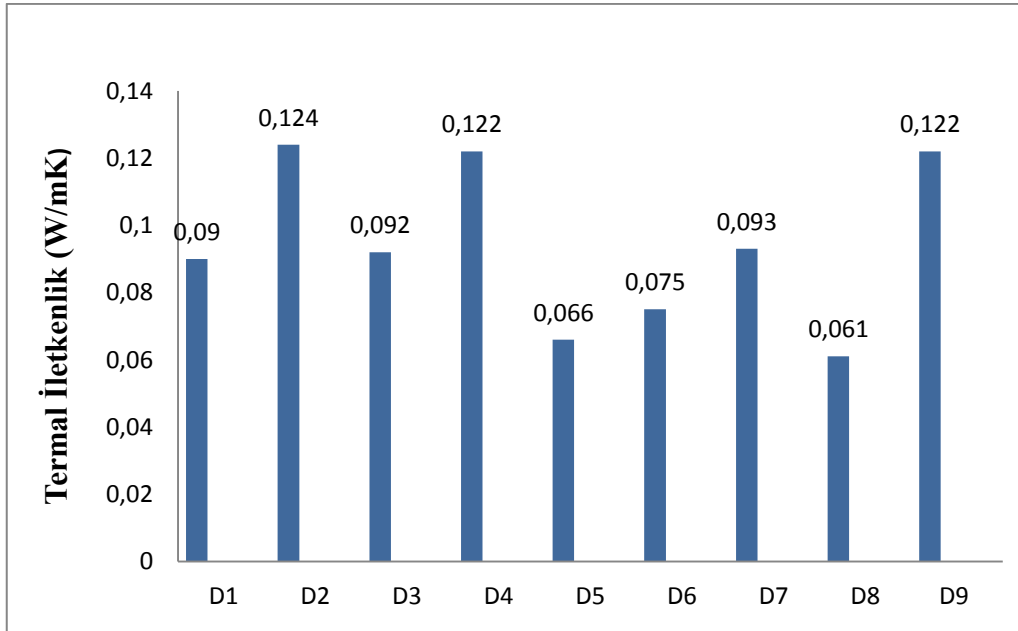
Şekil 4.3 Numunelere ait % porozite grafiği.



Şekil 4.4 Numunelere ait hacimsel ortalama por çapı grafiği.

4.2 Termal İletkenlik Değerleri

Numunelere ait termal iletkenlik değerleri 0,061 ile 0,124 W/mK gibi geniş bir aralığa yayılmıştır. Termal iletkenlik sonuçlarını gösteren grafik Şekil 4.5’de verilmiştir.

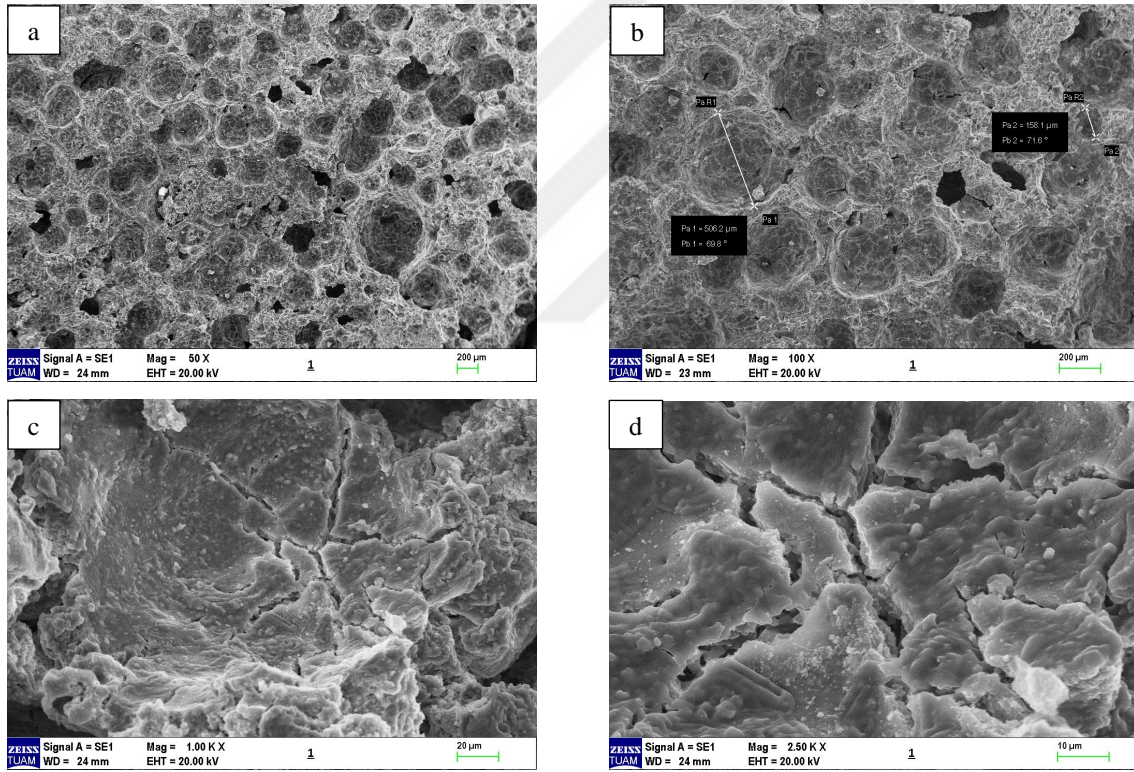


Şekil 4.5 Numunelere ait termal iletkenlik grafiği.

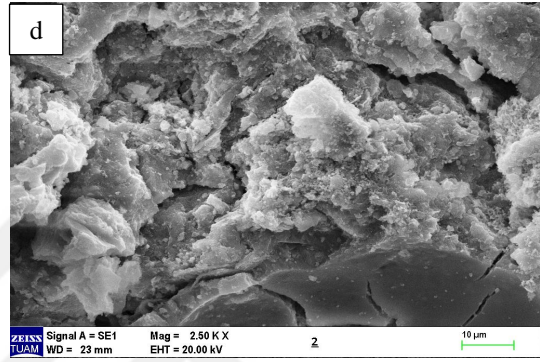
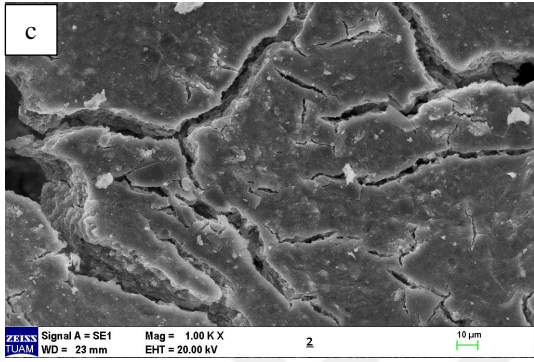
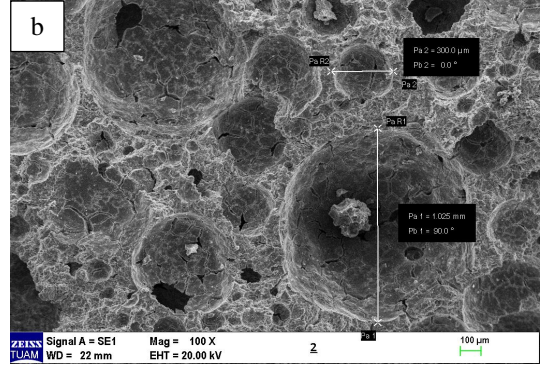
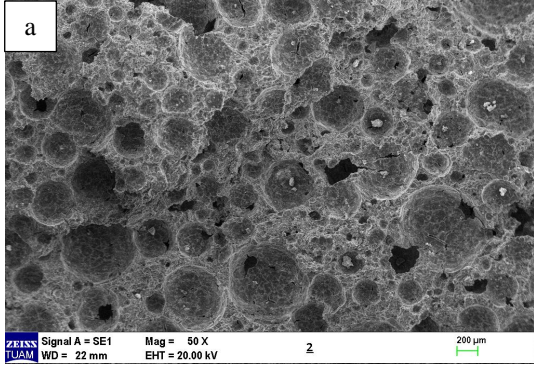
4.3 Numunelere Ait SEM Görüntüleri

SEM, numune yüzeyinin üç boyutlu görüntülerin elde edilmesinde kullanılır. Numunelerin yüzeyinden alınan SEM görüntüleri numunelerin yapısındaki gözeneklere ait homojenlik, şekil ve boyut gibi bir takım çıkarımlar yapmayı mümkün kılmaktadır. Ayrıca numune içyapısında mikro çatlak varlıklarını ve çözünmemiş kalıntı maddelerin tespitine de olanak sağlamaktadır.

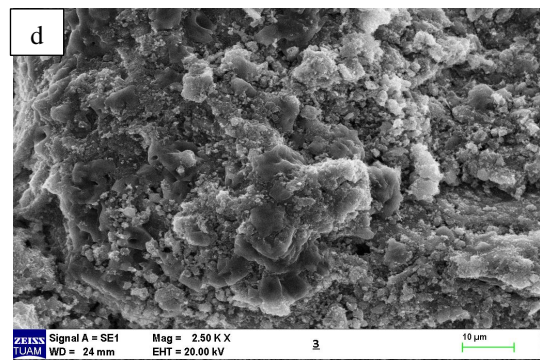
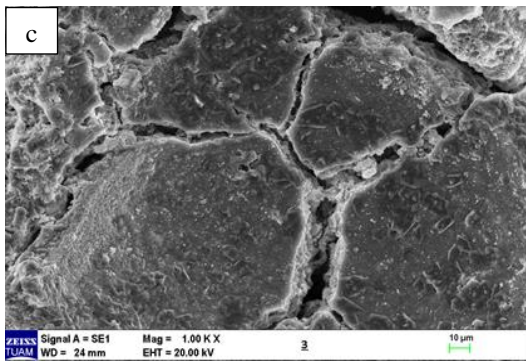
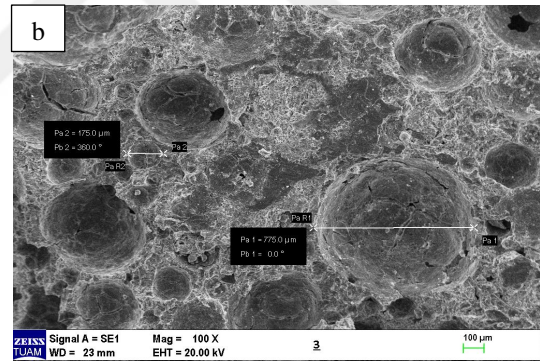
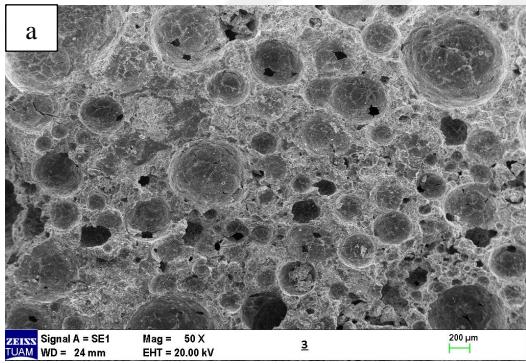
Her bir numunenin 50X, 100X, 1000X ve 2500X büyütmede elde edilen SEM görüntüleri Şekil 4.6, Şekil 4.7, Şekil 4.8, Şekil 4.9, Şekil 4.10, Şekil 4.11, Şekil 4.12, Şekil 4.13 ve Şekil 4.14 de verilmiştir.



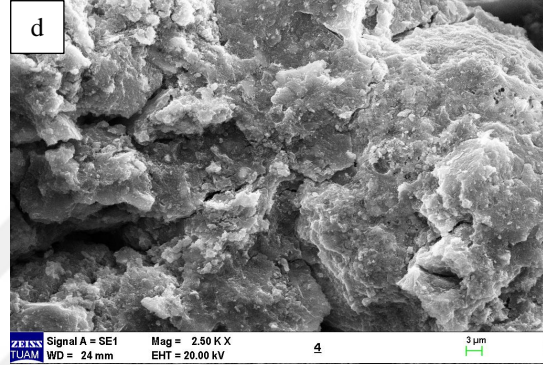
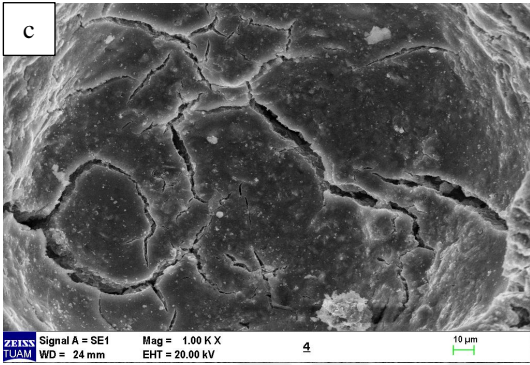
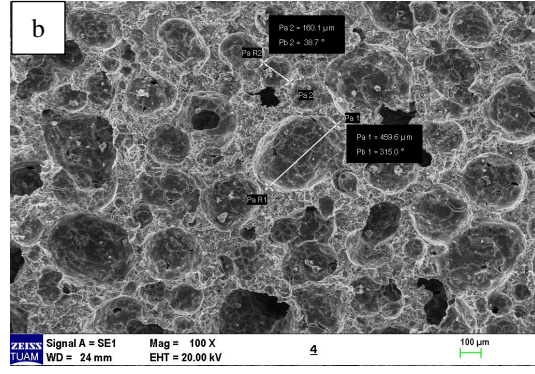
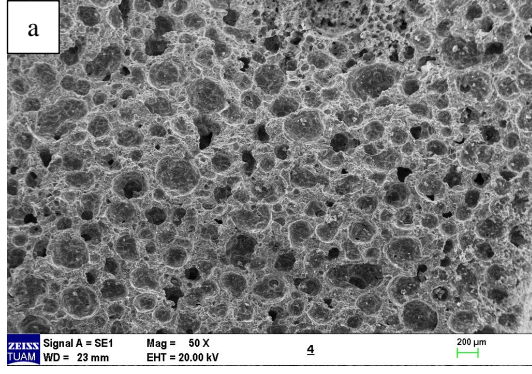
Şekil 4.6 D1 numunesine ait 50X(a), 100X(b), 1000X(c) ve 2500X(d) büyütmede SEM görüntüleri.



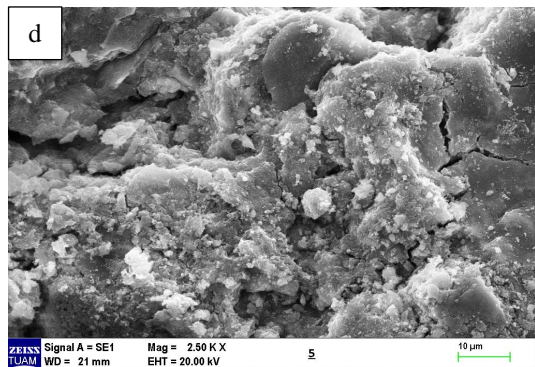
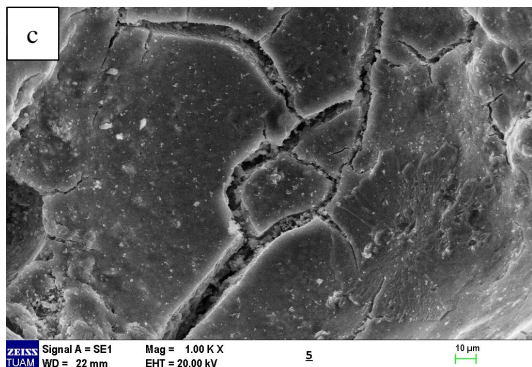
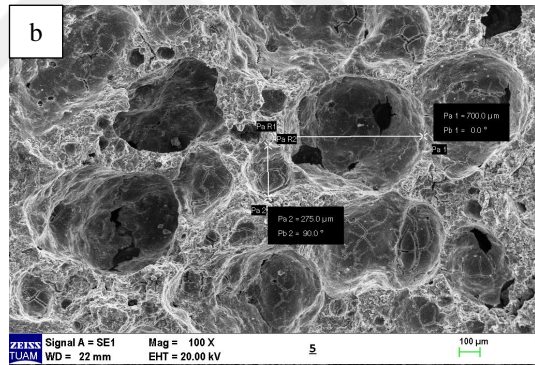
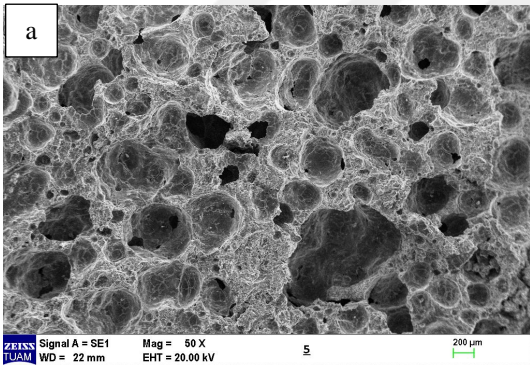
Şekil 4.7 D2 numunesine ait 50X(a), 100X(b), 1000X(c) ve 2500X(d) büyütmede SEM görüntüleri.



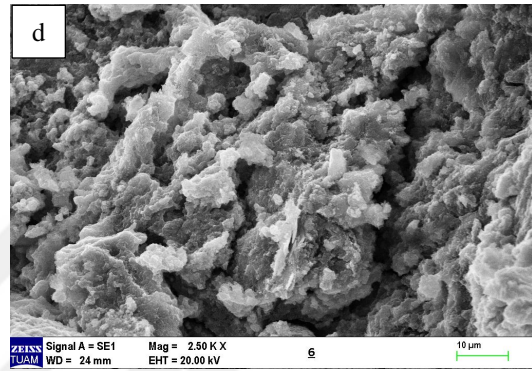
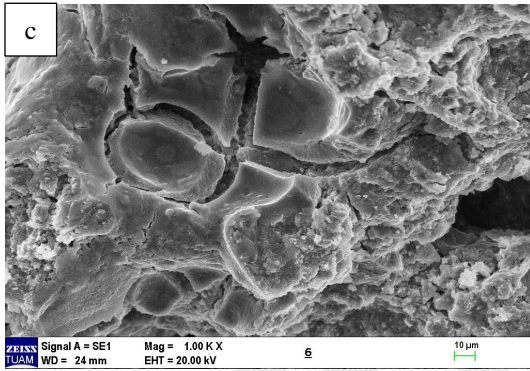
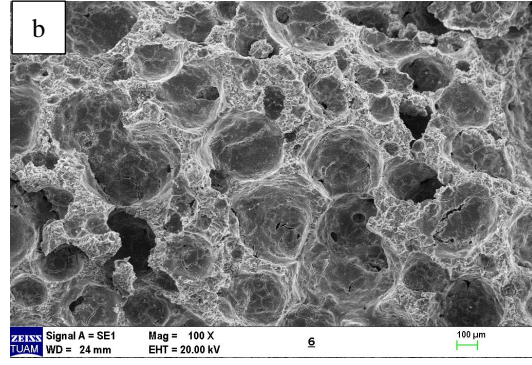
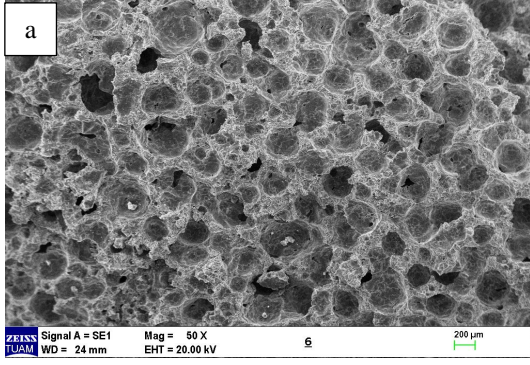
Şekil 4.8 D3 numunesine ait 50X(a), 100X(b), 1000X(c) ve 2500X(d) büyütmede SEM görüntüleri.



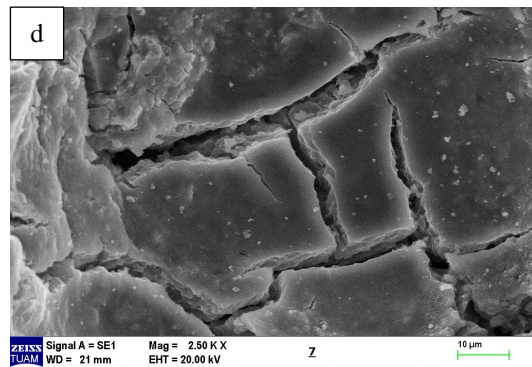
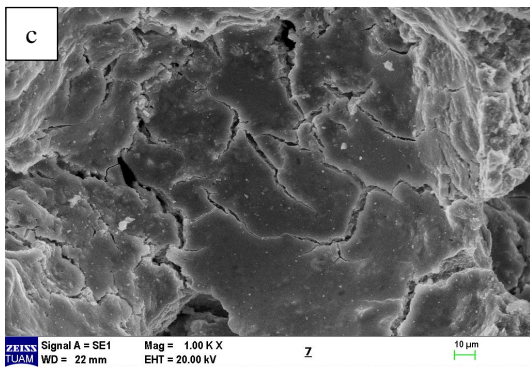
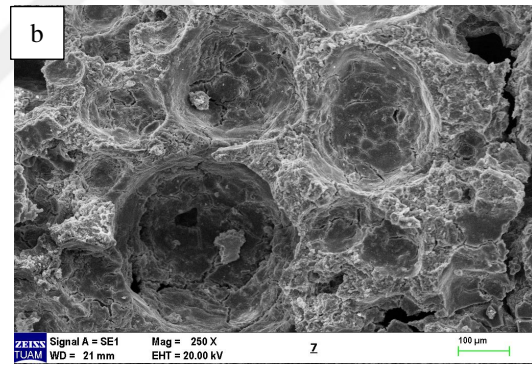
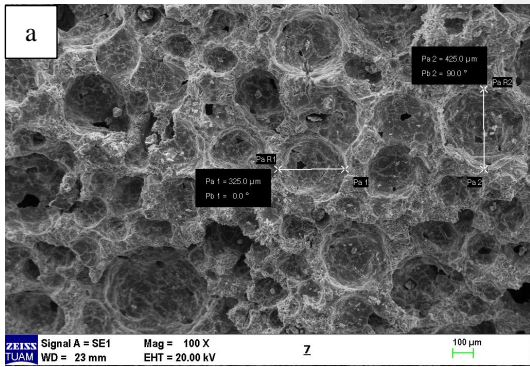
Şekil 4.9 D4 numunesine ait 50X(a), 100X(b), 1000X(c) ve 2500X(d) büyütmede SEM görüntüleri.



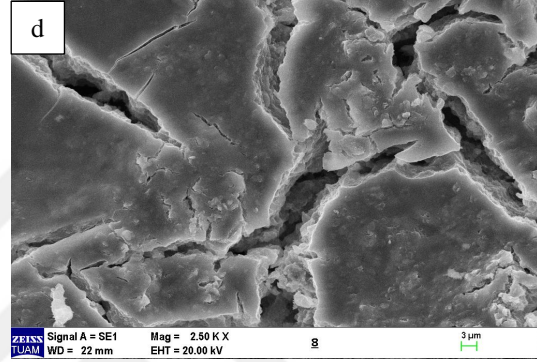
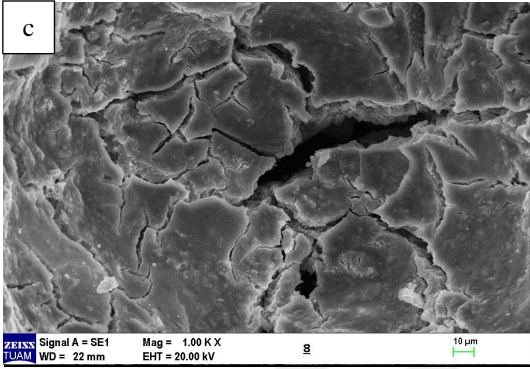
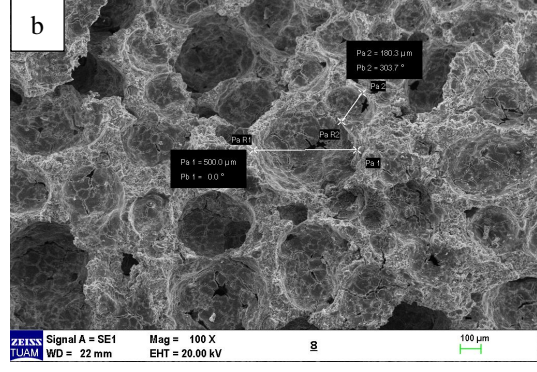
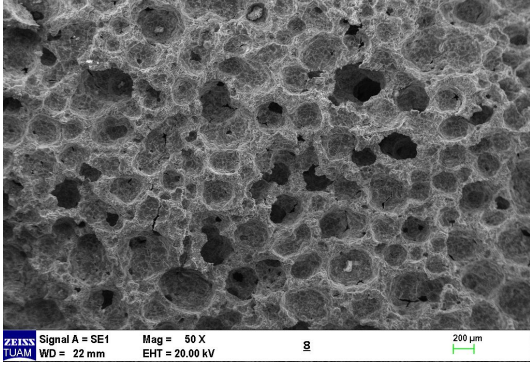
Şekil 4.10 D5 numunesine ait 50X(a), 100X(b), 1000X(c) ve 2500X(d) büyütmede SEM görüntüleri.



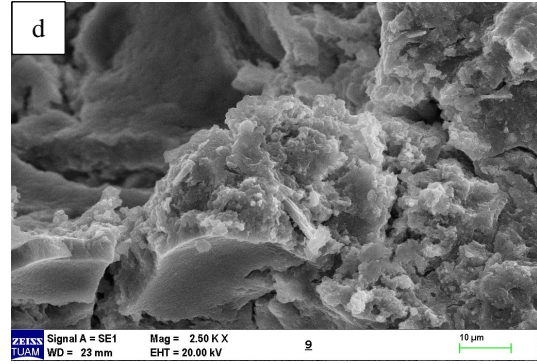
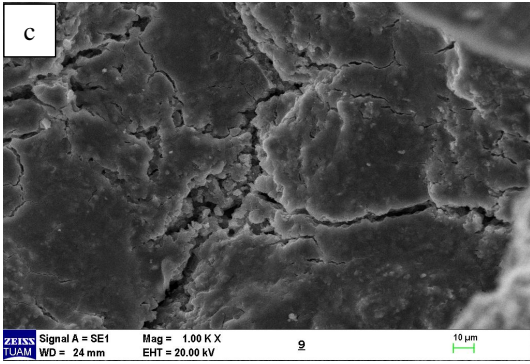
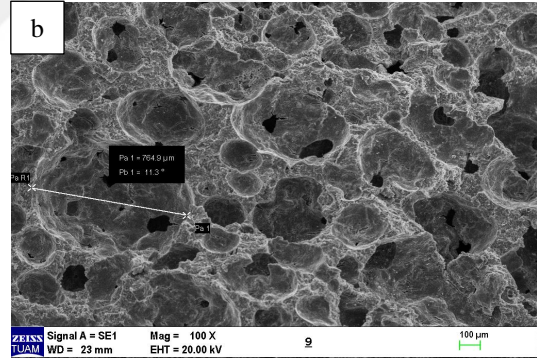
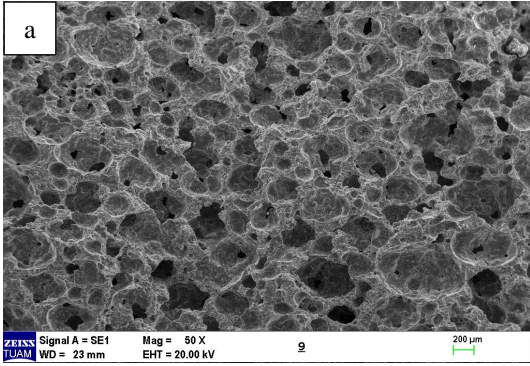
Şekil 4.11 D6 numunesine ait 50X(a), 250X(b), 1000X(c) ve 2500X(d) büyütmede SEM görüntüleri.



Şekil 4.12 D7 numunesine ait 100X(a), 250X(b), 1000X(c) ve 2500X(d) büyütmede SEM görüntüleri.



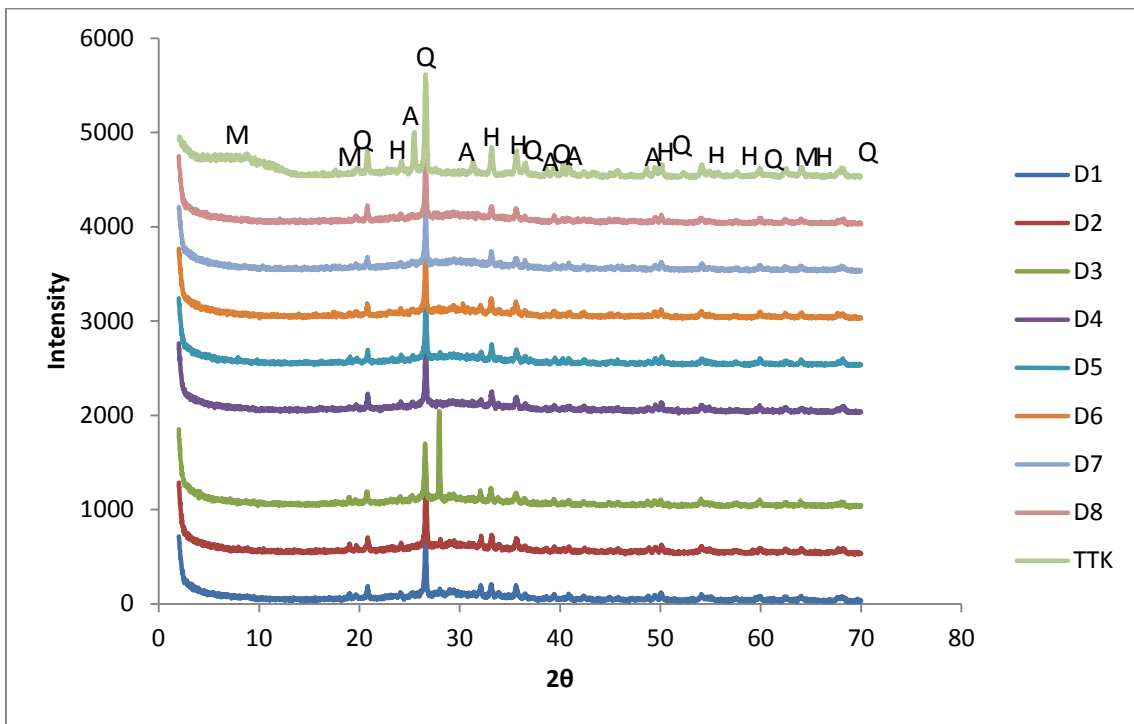
Şekil 4.13 D8 numunesine ait 50X(a), 100X(b), 1000X(c) ve 2500X(d) büyütmede SEM görüntüleri.



Şekil 4.14 D9 numunesine ait 50X(a), 100X(b), 1000X(c) ve 2500X(d) büyütmede SEM görüntüleri.

4.4 Numunelere Ait XRD Sonuçları

Kullanılan tuğla taban külü (TTK) ve nihai ürünlere ait XRD desenleri Şekil 4.15’de verilmiştir. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda, TTK ve numunelerin XRD desenlerinde ~10 - 70 (2θ) aralığında yoğunlaşan kırınım pikleri gözlenmektedir. Kırınım pikleri bütün numunelerde benzer kristalin fazların mevcut olduğunu göstermektedir. Numunelerin yapısında değişen oranlarda kuvars (SiO_2), hematit (Fe_2O_3), anhidrit (CaSO_4), muskovit ($\text{KAl}_3\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$) kristalin fazları bulunmaktadır.



Şekil 4.15 TTK ve numunelere ait XRD pikleri.

[Q-Kuvars (SiO_2), H-Hematit (Fe_2O_3), A-Anhidrit (CaSO_4), M-Muskovit($\text{KAl}_3\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$)]

5. TARTIŞMA ve SONUÇ

Numunelere ait yoğunluk sonuçlarına bakıldığında kompozisyonda meydana getirilen değişimlerin nihai sonuç üzerinde etkisinin önemli oranda olmadığı gözlemlenmiştir. %8, %10 ve %15 olarak arttırılan meta kaolinli D1, D2 ve D3 reçetelerinde yoğunluklar 0,64, 0,62 ve 0,65g/cm³ gibi birbirine oldukça yakın değerler göstermiştir. Kolemanit katkı oranlarının ve tane boyut dağılımlarının da yoğunluk üzerinde çok etkisi olmadığı, %1, %3 ve % 5 oranlarında 45 µ incelikte kolemanit eklenen D5, D6 ve D7 reçetelerinde yoğunluğun 0,60, 0,63 ve 0,61g/cm³ olarak değiştiği saptanmıştır. Aynı oranda kolemanit içermelerine rağmen incelikleri 45µ ve 75µ olarak değişen D6 ve D8 reçetelerinde ise yoğunluk değerleri 0,63 ve 0,61'dir. Benzer şekilde aynı reçeteye ancak farklı kür sıcaklığına sahip olan D2 ve D4 numunelerinde yoğunluk değerlerinin 0,62 ve 0,63g/cm³ olduğu; 70°C ile 90°C kür sıcaklıklarının yoğunluğu değiştirmediği görülmüştür. Ancak D2 ve D4 numuneleri ile aynı reçeteye sahip olan D9 reçetesine uygulanan kür koşulları yoğunlukta belirgin bir artışa sebep olmuştur. D9 reçetesi kalıba döküldükten sonra kabarması beklenmiş, sonrasında kalıbın ağzı kapatılarak bir gün laboratuvar koşullarında bekletildikten sonra kalıptan çıkarılarak 28 gün ağzı kapalı poşet içerisinde kendi nemi ve ortam sıcaklığı ile kürlenmiştir. Yoğunlukta meydana gelen bu artışın; kür sıcaklığının, diğer numunelerin içyapısında meydana getirmiş olduğu çatlak oranlarının kendi kendine kürlenme koşullarında daha aza indirilmiş olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Basma mukavemeti değerleri literatürde bahsedildiği üzere meta kaolin oranlarındaki artışa paralel olarak bir artma göstermiştir. %8, %10 ve %15 oranlarında artan meta kaolin miktarları ile D1, D2 ve D3 numunelerinde basma mukavemetleri 1,89, 2,01 ve 2,63 kN olarak artış göstermiştir. D2 ile aynı içerikli reçete olan ancak kür sıcaklığı 90°C'den 70°C'ye düşürülen D4 reçetesinde basma mukavemet değerinin 2,01 kN'dan 2,26 kN değerine yükseldiği görülmüştür. Kür sıcaklığının numunenin basma mukavemeti üzerindeki etkileri konusunda literatürdeki çalışmalarda farklı sonuçlar elde edilmiştir. Fernandez- Jimenez v.d. (1999) yüksek fırın cürufu ile yapmış olduğu çalışmasında NaOH ile cam suyunun beraber kullanıldığı durumlarda kür sıcaklığının mukavemeti düşürdüğünü ancak cam suyu kullanılmadığında ise arttırdığını söylemiştir. Silva'ya göre (1998), bu durum kürlenme sıcaklığındaki artışın reaksiyona girmemiş

malzeme miktarında artışa yol açmasından kaynaklanmaktadır. Jaarsveld v.d. (2002) ise meta kaolin uçucu kül karışımlarında kür sıcaklığının mukavemeti arttırdığını, bununla birlikte, uzun kürlenme süresinin aşırı büzülme nedeniyle malzeme yapısını zayıflattığını dile getirmiştir. Brough ve Atkinson (2002), cürufun cam suyu ile alkali aktivasyonu sonucu elde ettiği ürünlerde 20°C kür sıcaklığı ile 12 saat süreyle 80°C kür sıcaklığını kıyaslandığında mukavemetin 7 MPa'dan 72 MPa'a arttığını gözlemlemiştir (Castro-Gomes ve Jalali 2007). Kolemanit katkısının numunelerin basma mukavemetinde azalmaya sebep olduğu ancak artan 45 µ incelikteki kolemanit katkısının kolemanitli reçeteler arasında mukavemet artışını desteklediği görülmüştür. %1, %3 ve %5 oranındaki 45µ incelikli kolemanit katkılı reçetelerin basma mukavemeti değerleri 1,09, 1,17 ve 2,3 kN olarak ölçülmüştür. Bununla birlikte aynı kolemanit oranında farklı tane boyutuna sahip olan D6 ve D8 numunelerinde basma mukavemeti değeri 45µ incelikte 1,17 kN iken 75µ incelikte 1,05 kN'a düşmüştür.

Termal iletkenlik değerlerinde reçetede artan metakaolin değeriyle bir paralellik gözlenmemiştir. Bunun sebebinin SEM görüntülerinde de görüleceği üzere neredeyse numunelerin tamamında görülen ve gözenekler arasında oluşan kılcal çatlaklar olduğu düşünülmüştür. Termal iletkenlik değerinde 3 ayrı şartlama koşulunun da önemli bir değişim gözlenmemiştir. Aynı reçeteye ancak farklı kür koşullarına sahip olan D2 (90°C'de 6 saat), D4 (70°C'de 6 saat) ve D9 (poşette kendi nemi ve sıcaklığında 28 gün) numunelerine ait termal iletkenlik değerleri sırasıyla 0,124, 0,122 ve 0,122 W/mK olarak ölçülmüştür. Kolemanit katkısının numunelerin termal iletkenlik değerleri üzerinde olumlu etkisi sonuçlarda açıkça görülmektedir. En iyi termal iletkenlik değeri olan 0,061 Wm/K'ne %3 oranında 75µ incelikte kolemanit eklenerek elde edilen numunede ulaşılmıştır. Kolemanit inceliğinin 45µ'dan 75µ' na çıkarılması termal iletkenliğin 0,075'den 0,061 Wm/K'ne düşmesini sağlamıştır. Düşük orandaki kolemanit katkısı termal iletkenlik değerlerini olumlu yönde etkilerken, kolemanit miktarındaki artışla termal iletkenlik değerleri de artış göstermektedir. 45 µ incelikte %1, %3 ve %5 oranlarında kolemanit katkısıyla birlikte termal iletkenlik değerleri sırasıyla 0,066, 0,075 ve 0,093 Wm/K olarak artış göstermiştir.

Numunelere ait farklı büyümedeki SEM görüntüleri incelendiğinde numunelerin tamamında küresel yapıda homojen dağılımlı gözeneklerin olduğu görülmektedir. Gözeneklerle birlikte ağ şeklinde dağılım gösteren mikro çatlaklar kompozisyon ve kür koşulları fark etmeksizin bütün numunelerde mevcuttur. Bunun sebebinin reaksiyonun hızlı gerçekleşmesinden kaynaklı ani hava çıkışının olduğu düşünülmektedir. Köpük ajanı ve /veya sürfaktan miktarında yapılacak azaltmalarla gaz oluşum reaksiyon hızı düşürülerek ya da yaş harcın viskozitesinde meydana getirilecek azaltmalar sayesinde gaz çıkışı kolaylaştırılarak mikro çatlakların engellenebileceği düşünülmektedir.

Numunelere ait civa porozimetresi ölçüm sonuçlarında elde edilen % porozite oranları ve ortalama por çapı değerleri numunelerin kompozisyon ve kür koşullarından fazlaca etkilenmediği; değerlerin yoğunluk gibi bir birine yakın olduğu gözlemlenmiştir.

XRD pikleri tuğla taban külünde bulunan kuvars (SiO_2), hematit (Fe_2O_3), anhidrit (CaSO_4), muskovit ($\text{KAl}_3\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$) kristalin fazlarının nihai ürünlerde de mevcut olduğunu göstermektedir.

Bu tez çalışmasında kolemanit katkısı ile yüksek oranda tuğla taban külü içeren jeopolimerik ısı yalıtım malzemesi üretimi amaçlanmıştır. Bir malzemenin ısı yalıtımında kullanılabilmesi için termal iletkenlik değerinin belirli bir değerde olması gerekmektedir. ISO (International Organization for Standardization) ve CEN (European Committee for Standardization) standartlarına göre bu değer 0,065 W/mK değerinden küçük olmalıdır. Hazırlanan 9 reçete içerisinde bu özelliği taşıyan tek numune 0,061 W/mK değeri ile D8'dir. D8 reçetesinin yoğunluğu 0,61 g/cm³ ve basma mukavemeti 1,05 kN olarak belirlenmiştir. Bu özellikleri ile D8 numunesi ısı yalıtımında kullanılmaya uygundur. Diğer numuneler ısı yalıtımında kullanılmak için uygun termal iletkenlik katsayısına sahip olmamasına rağmen literatürdeki birçok çalışmaya kıyasla oldukça iyi sonuçlara sahiptir. Lach v.d. uçucu kül ve tane boyutu 100 ile 500 µm arasında değişen mikro kürecikler kullanarak yapmış oldukları çalışmada mikro kürecik ve hidrojen peroksit oranlarında yapmış olduğu değişiklikler doğrultusunda en düşük 0,0826 W/mK, en yüksek 0,1273 W/mK ısı iletkenlik katsayısı elde etmişlerdir (Lach v.d 2016). Başka bir çalışmada Feng v.d. kömür işleme tesislerinin atıkları olan kömür

uçucu külünü kullanarak yapmış oldukları çalışmada en düşük termal iletkenlik değeri olarak 0,0721 W/m K sonucunu elde edebilmişlerdir (Feng v.d 2015). Termal iletkenlik katsayısında literatürde jeopolimer olarak en iyi sonuç olan 0,03 W/mK değerine Vaou ve Panias'ın hammadde olarak perlit, NaOH ve hidrojen peroksit kullanarak yapmış oldukları çalışmaları sahiptir (Vaou ve Panias 2010).

Düşük oranlarda kolemanit katkısının jeopolimer köpüklerin termal iletkenlik değerlerini olumlu etkilediği, kolemanit katkısının tane boyutlarındaki değişimle bu etkinin daha da arttırılabileceği görülmüştür.

Atık bir malzeme olan tuğla taban külünün tek başına olmasa da çok düşük oranlarda katkılanarak jeopolimer seramik köpük üretiminde kullanılmaya uygun olduğu görülmüştür. Elde edilecek bu ürünlerin yalıtımda kullanıma uygun kompozisyonlarının oluşturulabildiği, bu sayede düşük maliyetlerle çevre dostu yalıtım ürünlerinin üretilebileceği belirlenmiştir.

Ayrıca, farklı tip ve oranlardaki köpürtücü ajan katkısı ile özellikle ısı yalıtım malzemeleri için önemli özellikler olan yoğunluk ve termal iletkenlik değerlerinde daha üstün performansların elde edilebileceği de düşünülmektedir.

6. KAYNAKLAR

- Abdullah M, Hussin K, Bnhussain M, Ismail K, Yahya Z, Razak R, 2012, Fly-ash based geopolymer lightweight concrete using foaming agent. *International Journal of Moleculer Sciences*, 13, 7186-7198.
- Al-Homoud M, 2005, Performance characteristics and practical applications of common building thermal insulation materials, *Building and Environment*, 40, 353-366.
- Alkaya E, Bögürcü M, Ulutaş F, 2012, Yaşam döngüsü analizi ve bina ısı yalıtım malzemeleri için uygulamalar, *Çevre Bilim ve Teknoloji*, 3, 261-274.
- Altınışik K, 2006, Isı Yalıtımı, Nobel Yayın Dağıtım, 276.
- Arenas J, Crocker M, 2010, Recent trends in porous sound-absorbing materials.
- Arslan V, Bayat O, 2016, Kolemanit cevherinden oksalik asit liçi ile borik asit eldesi, *Yer Altı Kaynakları Dergisi*, 10, 11-20.
- Aydın H, Ekmekçi İ, 2002, Isı yalıtım malzemesi olarak poliüretan köpüğün fiziksel ve kimyasal özellikleri, üretimi ve incelenmesi, *SAU Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 6.
- Azimi E, Abdullah M, Ming L, Yong H, Hussin K, Aziz I, 2016, Processing and properties of geopolymers as thermal insulating materials: a review, *Reviews on Advanced Material Science*, 44, 273-285.
- Bai C, Elsayed H, Franchin G, Zaggia A, 2017, High-porosity geopolymer foamd with tailored porosity for thermal insulation and wastewater treatment, *Article in Journal of Research*.
- Bakri A.M, Kamarudin H, Karem O, Ruzaidi C.M, Rafıza A.R, Norazian M.N, 2012 Optimization of alkaline aktivatör/fly ash ratio on the compressive strength of manufacturing fly ash-based geopolymer, *Applied Mechanics and Materials*, 110-116, 734-739.
- Bayraktar D, Bayraktar E.A, 2016, Mevcut binalarda ısı yalıtımı uygulamalarının değerlendirilmesi Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 7, 59-66.

- Barbour R, 1991, Synthetic class C fly ash and use thereof as partial cement replacement in general purpose concrete, United States Patent, Patent number: 4,992.112.
- Bulejko P, 2013, Porous elements based on granular materials and inorganic binders, Brno University of Technology, Yüksek Lisans Tezi, 119.
- Castro-Gomes J, Jalali S, 2007, Alkali activated binders: A review. Part 2 - About mater and binder manufacture, Construction and Building Materials, 22, 1315–1322.
- Davidovits J, 2005, Geopolymer chemistry and sustainable development, Conference paper, July 2005.
- Davidovits J, 2002, 30 years of successes and failures in geopolymer applications. Market trends and potential breakthroughs, Geopolymer 2002 Conference, Melbourne, Australia.
- Ducman V, Korat L, 2016, Characterization of geopolymer fly-ash based foams obtained with the addition of Al powder or H₂O₂ as foaming agents, Materials Characterization, 113, 207-213.
- Feng J, Zhang R, Gong L, Li Y, Cao W, Cheng X, 2015, Development of porous fly ash-based geopolymer with low thermal conductivity, Materials and Design 65, 529-533.
- Girawale M.S, 2015, Effect's of alkaline solution on geopolymer concrete, International Journal of Engineering Research and General Science, Volume 3, Issue 4.
- Güler G, Güler E, İpekoğlu Ü, Mordoğan H, 2005, Ucucu küllerin özellikleri ve kullanım alanları, Türkiye 19. Uluslararası Madencilik Kongresi ve Fuarı, IMCET 2005.
- Hameed A.M, Rawdhan R.R, Al-Mishhadani S.A, 2017, Effect of Various Factors on the Manufacturing of Geopolymer Mortar, Archives of Science, 1:3.
- Harding K, 2018, Heat transfer introduction, University of the Witwatersrand, Johannesburg.
- Holmberg K, 2002, Surfactants and polymers in aqueous solutions, Wiley 2002.0-471-49883-1.

- Kang S, Choi J, Choi S, 2019, Mechanism of heat transfer through porous media of inorganic intumescent coating in cone calorimeter testing, *Polymers* 2019, 11, 221; doi:10.3390/polym11020221.
- Karadayı T.T, Yüksek İ, 2016, Yapılarda ısı yalıtım malzemeleri üzerine bir araştırma, *Tesisat dergisi*, 242.
- Kara İ, Baran Y, 2017, Yapılarda sürdürülebilirlik ve yangın dayanıklılığı açısından cam yünü ve taş yünü malzemelerinin incelenmesi, *UMTEB-International Congress on Vocational and Technical Sciences Batumi, Georgia*.
- Katz A, 1998, Microscopic study of alkali-activation fly ash, *Cem Concr Res*, 1998;28, 197-208.
- Kioupis D, Kavakakis C, Tsivilis C, Kakali, G, 2018, Synthesis and characterization of porous fly ash-based, *Advances in Materials Science and Engineering, Volume 2018, Article ID 1942898*, 11.
- Koç E, Şenel M, 2013, Dünyada ve Türkiye’de enerji durumu- genel değerlendirme, *Mühendis ve Makina*, 54, 32-44.
- Kutuk S, 2017, Öğütülmüş nano boyutlu kolemanit mineralinin elemental ve Kristal yapı özellikleri, *Erzincan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 10, 303-313.
- Lach M, Korniejenko K, Mikula J, 2016, Thermal insulation and thermally resistant materials made of geopolymer foams, *Procedia Engineering*, 151, 410-416.
- Masi G, Rickard W, Vickers L, Bignozzi M.C, Riessen A, 2014, A comparison between different foaming methods for the synthesis of light weight geopolymers, *Ceramic International*, 40, 13891-13902.
- Novais R, Ascensao G, Ferreira N, Seabra M.P, Labrinvha J.A, 2018, Influence of water and aluminium powder content on the properties of waste-containing geopolymer foams, *Ceramic International*.
- Özçelik M, Soylu S, Atmaca İ, 2017 Endüstriyel bir tesiste arojel ile yalıtımın teknik ve ekonomik analizi, *13. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi*.

- Özdemir P, Çetin E, Balcı M, Aşkın A, Tatar İ, 2019, Kolemanitin vitrifiye sırlarında frit yerine kullanılabilirliğinin araştırılması, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi, 27, 1-8.
- Özer N, Özgünler S, 2019, Yapılarda yaygın kullanılan ısı yalıtım malzemelerinin performans özelliklerinin duvar kesitleri üzerinde değerlendirilmesi, Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, 24.
- Provis J. L, Deventer J.S.J, 2009, Geopolymers Structure, processing, properties and industrial applications, Boca Raton Boston New York Washington, DC, CRC Press: 1-7.
- Riessen A, Rickard W.D.A, Williams R.P, Riessen G.A, 2017, Methods for geopolymer formulation development and microstructural analysis, Journal of Ceramic Science Technology, 08, 421-432.
- Rovnanik P, 2010, Effect of curing temperature on the development of hard structure of metakaolin-based geopolymer, Construction and Building Materials, 24, 1176-1183.
- Salwa M, Bakri M, Kamarudin H, Ruzaidi C.M, Binhussain M, Zaliha S.Z, 2013), Review on current geopolymer as a coating material, Australian Journal of Basic and Applied Sciences, 7, 246-257.
- Shah A, Shah C.B, 2017, Effect of chemical composition of different source materials on 28th day compressive strength of geopolymer concrete cured under ambient conditions, Kalpa Publications in Civil Engineering, 1, 424-430,
- Şahin, M, ve Bozkurt, Y. (2015). Gemilerdeki kaynaklı yapılarda ısı yalıtımı. Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Dergisi, 31(ÖS), ss ÖS 35-ÖS42.
- Toprak M.U, 2011, Termik santral taban küllerinden alkali aktivasyon ile jeopolimer üretilmesi, Osmangazi Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Doktora Tezi, Eskişehir.
- Türker P, Erdoğan B, Katnaş F, Yeğınobalı A, 2009, Türkiye'deki ucucu küllerin sınıflandırılması ve özellikleri, TÇMB / AR-GE / Y03.03.

- Vaou V, Panias D, 2010, Thermal insulating foamy geopolymers from perlite, *Minerals Engineering*, 1146-1151.
- Wallah S.E, Rangan B.V, 2006, Low calcium fly ash-based geopolymer concrete: long-term properties, Research Report GC 2 Faculty of Engineering Curtin University of Technology Perth, Australia
- Xu H, Deventer J.S.J, 1999, The jeopolimerization of alumina-silicate minerals, *International Journal of Mineral Processing*, 59, 247-266.
- Yahya Z, Abdullah M, Hussin K, Ismail K, Razak R, Sandu V, 2015, Effect os solid – to-liquids, Na₂SiO₃-to-NaOH and curing temperature on the palm oil boiler ash (Si+Ca) jeopolimerization system, *Materials* 2015, 2227-2242.
- Yang T, Chou C, Chien C, 2012, The effects of foaming agents and modifiers on a foamed-geopolymer, *The 2012 World Congres on Advances in Civil, Environmental, and Materials Research*.
- Zhang Z, 2014, The effects of physical and chemical properties of fly ash on the manufacture of geopolymer foam concretes, Doctor of Philosophy (PhD) thesis.
- Zhang Z, Provis J, Reid A, Wang H, 2015, Mechanical, thermal insulation, thermal resistance and acoustic absorption properties of geopolymer foam concrete, *Cement & Concrete Composites* 62, 97–105.
- Zhang Z, Wang H, 2016, The Pore characteristics of geopolymer foam concrete and their impact on the compressive strength and modulus, Article in *Frontiers in Materials*.
- Zhao Y, Jow J, Cai X, Lai S, 2015, Fly ash-based geopolymer foam technology for thermal insulation and fire protection applications, 2015 World of Coal Ash Conference in Nasvhille.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Emel Cengiz
Doğum Yeri ve Tarihi : Kahramanmaraş / 1989
Yabancı Dili : İngilizce
İletişim (Telefon/e-posta) : (0506) 638 59 45 / emel-33@windowlive.com

Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl)

Lise : İçel Anadolu Lisesi, (2003-2007)
Lisans : Anadolu Üniversitesi, Malzeme Bilimi ve Mühendisliği,
(2007-2012)
Yüksek Lisans : Afyon Kocatepe Üniversitesi, Malzeme Bilimi ve
Mühendisliği Bölümü, (2018-2020)

Çalıştığı Kurum/Kurumlar ve Yıl

: Anadolu Mühendislik Metalurji-Refrakter San. Tic. Ltd.
Şti. (5 ay)
Sanko Ytong A.Ş (4 yıl 8 ay)