

SEYİTÖMER TERMİK SANTRALİ ATIK UÇUCU KÜLLERİNİN
YAPI MALZEMESİ OLARAK DEĞERLENDİRİLMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Met. Müh. Şenol YILMAZ

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 22 Haziran 1992

Tezin Savunulduğu Tarih : 10 Temmuz 1992

Tez Danışmanı : Doç.Dr. Osman T. ÖZKAN

Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Vahdettin SEVİNÇ
Doç.Dr. İ. Ayhan ŞENGİL

ÖNSÖZ

Bu çalışmayı titizlikle yöneten, çalışma süresince her türlü teşvik ve fedakarlığı esirgemeyen, bilgi ve tecrübelerinden istifade ettiğim Sayın Doç.Dr.T.Osman ÖZKAN'a teşekkür ederim.

Tezimin hazırlanması, deneylerimin esas olarak İ.T.Ü. Sakarya Mühendislik Fakültesi Metalurji Mühendisliği Bölümünde yapılabilmesi sonucunda mümkün olmuştur. Sağlanmış olan tüm olanaklar için Bölüm Başkanlığı'na teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmada kullanılan kül ve kil örneklerinin temin edildiği Seyitömer Termik Santrali İşletme Müdürlüğü ile Akdemirler Tuğla A.Ş. (Kütahya)'ne, deneysel çalışmaların ilk aşaması olan hammadde karakterizasyonu için gerekli testlerin yapılmasında sağlanan olanaklar nedeniyle TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi, Malzeme Araştırma Bölümü Başkanlığı'na teşekkür etmek isterim.

Ayrıca, çalışmalarına yakın ilgi gösteren başta Yrd.Doç.Dr.Cuma BİNDAL, Metalurji Mühendisleri Uğur SEN ve S.Cem OKUMUS olmak üzere tüm mesai arkadaşlarıma teşekkür etmeyi borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

ÖZET	v
SUMMARY	vi
BÖLÜM 1. GİRİŞ	1
BÖLÜM 2. UÇUCU KÜLLERİN ÖZELLİKLERİ VE KULLANIM	
ALANLARI	3
2.1. Uçucu Küllerin Tanımı ve Sınıflandırılması	3
2.2. Uçucu Küllerin Mineralojik ve Kimyasal	
Yapıları	4
2.3. Uçucu Küllerin Fiziksel Özellikleri	7
2.3.1. Görünüş	7
2.3.2. Tane Boyutu	7
2.3.3. Özgül Ağırlık	7
2.3.4. Karbon Miktarı	8
2.3.5. Uçucu Küllerin Manyetik Özellikleri	8
2.3.6. Uçucu Küllerin Puzolanik Özellikleri	9
2.4. Uçucu Küllerin Kimyasal Özellikleri	9
2.5. Termik Santrallerde Atık Uçucu küllerin	
Toplanması	9
2.6. Termik Santral Atık Uçucu Küllerinin	
Kullanım Alanları	12
2.6.1. Tuğla Üretiminde Kullanımı	12
2.6.2. Çimento ve Beton Yapımında Kullanımı	13
2.6.3. Hafif Agregada Yapımında Kullanımı	13
2.6.4. Karayolları Yapımında Kullanımı	13
2.6.5. Gaz Beton Yapımında Kullanımı	16
2.6.6. Uçucu Küllerin Kullanıldığı Diğer	
Alanlar	16
BÖLÜM 3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	17
3.1. Deney Programı	17
3.2. Hammadde Karakterizasyonu	18
3.2.1. Mineralojik Analiz	18
3.2.2. Tane Boyutu ve Özgül Ağırlık Analizi	20

3.2.3. Taramalı Elektron Mikroskobu İncelemesi ve Elektron Mikroprob Analizi	21
3.3. Deney Numunelerinin Hazırlanması	21
3.3.1. Harmanlama ve Kalıplama	21
3.3.2. Kurutma ve Pişirme	23
3.3.3. Sinterleşme	24
3.4. Deney Numunelerine Uygulanan Test Yöntemleri	28
3.4.1. Kuruma, Pişme, Toplu Küçülme ve Kızdırma Kaybı	28
3.4.2. Gözenek Miktarı ve Bulk Yoğunluk	29
3.4.3. Su Emme	30
3.4.4. Basma Mukavemeti Testi	31
3.4.5. Donma Testi	32
3.4.6. Pamuklaşma Testi	32
BÖLÜM 4. DENEY SONUÇLARI	34
4.1. Hammadde Karakterizasyonu	34
4.1.1. Mineralojik Analiz	34
4.1.2. Tane Boyutu ve Özgül Ağırlık Analizi	40
4.1.3. Taramalı Elektron Mikroskobu İncelemesi ve Elektron Mikroprob Analizi	44
4.2. Deneysel Çalışma Sonuçları	51
4.2.1. Kuruma, Pişme, Toplu Küçülme ve Kızdırma Kaybı	52
4.2.2. Gözenek Miktarı ve Bulk Yoğunluk	59
4.2.3. Su Emme	61
4.2.4. Basma Mukavemeti	64
4.2.5. Donma	66
4.2.6. Pamuklaşma	66
BÖLÜM 5. SONUÇLARIN İRDELENMESİ	67
KAYNAKLAR	73
EKLER	77
ÖZGEÇMİŞ	80

ÖZET

Seyitömer Termik Santrali atık uçucu küllerinin yapı malzemesi olarak değerlendirilmesi amacıyla ele alınan bu araştırmanın ilk aşamasında, kullanılan hammaddelerin karakterizasyonu yapılmıştır. Diferansiyel termal analiz (DTA)-termogravimetri (TG) ve x-ışınları difraksiyonu yöntemleri ile yapılan mineralojik analizlerde, uçucu küllerin çoğunlukla amorf faz içerdiği, kristal fazında enstatit, α -kuvars ve kalsiyum sülfat'dan oluştuğu saptanmıştır. Bağlayıcı olarak kullanılan kilin ise montmorillonit, illit, kaolen, anortit ve α -kuvars içeren kompleks bir karışım olduğu görülmüştür. Piknometre ile yapılan özgül ağırlık ölçümlerinde kilin 2350 kg/m^3 , iki elektrofiltrenin farklı üç kademesinden alınan ve E1, E2, E3 olarak isimlendirilen uçucu küllerinde sırasıyla 1470, 1760, 2010 kg/m^3 olarak bulunmuştur. Uçucu küllerde tane iriliğinin $5-80 \mu\text{m}$ arasında değiştiği ve E1 olarak kodlanan kül örneğinin bu aralıkta daha iri tane dağılımı içerdiği belirlenmiştir. Taramalı elektron mikroskobu incelemesinde tanelerin çoğunlukla aglomere olduğu, ancak bir kısmında tamamen eriyerek küresel şekil aldığı ve elektron mikroprob analizinde de bu küresel tanelerin cam fazı yapan alkali elementlerce zengin olduğu bulunmuştur.

Araştırmanın ikinci aşamasında, karakterizasyonu yapılan uçucu kül ve kil örneklerinden değişik oranlarda hazırlanan karışımlardan, yarı-kuru presleme yöntemi ile yaklaşık 40 mm çapında ve 25 mm yüksekliğinde numuneler üretilmiştir. Numuneler 110°C 'de kurutulup, 900 ve 1000°C sıcaklıkta pişirildikten sonra çeşitli testlere tabi tutularak, özellikleri tesbit edilmiştir.

Yapılan testler sonucunda deney numunelerinin kuruma küçültmelerinin % 0.08-1.29, pişme küçültmelerinin % 0.23-1.69, kızdırma kayıplarının % 5.33-7.80, gözenek miktarlarının % 31.37-56.29, bulk yoğunluklarının $1030-1880 \text{ kg/m}^3$, su emme miktarlarının % 15.42-58.32 ve basma mukavemetlerinin de $1.7-45.5 \text{ MPa}$ arasında değiştiği bulunmuştur. Ayrıca numunelerde dikkate değer bir donma ve pamuklaşma görülmemiştir. % 50 ve % 25 kül içeren numunelerin mukavemetlerinin ($8.7-23.7 \text{ MPa}$) Türk Standardlarına (TS 705) uygun olduğu, % 80 kül içeren numunelerin mukavemetlerinin de ($3.4-3.7 \text{ MPa}$), 400 kg/m^3 özgül ağırlığa sahip bir ytong yapı malzemesinin mukavemetine (3.4 MPa) eşdeğer olduğu saptanmıştır.

Sonuçta atık uçucu küllerin, bağlayıcı olarak kil ilavesiyle inşaat sektöründe hafif duvar örgü malzemesi olarak potansiyel kullanım alanı olabileceği belirlenmiştir.

BENEFICATION OF SEYİTÖMER POWER PLANT WASTE FLY ASH AS A BUILDING MATERIAL

SUMMARY

Fly ash is obtained as a secondary waste product in power plants using low grade coal unsuitable for domestic and industrial purposes. The coal is ground into a fine powder and then carried in a suspension of primary air to burners where it is mixed with a stream of pre-heated secondary air generated from the wind-boxes of the furnace walls. When ground low grade coal is burnt between 1500-1700 °C, 20 percent of the ash formed falls to the bottom of the furnace where it is removed by water. This waste material is called furnace bottom ash. The remaining 80 percent of the ash (in fine dust form) is carried to the chimney by the stream effect of the combustion gasses. This form is called fly ash. It is collected by the cyclones or precipitators known as arrestors before the gasses are discharged from the chimney. The fly ash is then stored in the large bunkers placed under the arrestors from where it is periodically removed to the ash storage area of the plant. Because this type of ash is in dry powder form and is produced in large quantities by the plant (approximately :800 tons/day for a medium sized) makes it a potential source for environmental pollution.

In generally fly ash has particle size distribution between 1-100 μm . Some of the particles are spherical in shape as a result of melting. They comprise chemically a mixture of the following oxides: SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , MgO , Na_2O , TiO_2 and oxide of sulphur combined with some of them. The remaining particles are irregularly shaped, usually in the form of agglomerates of the following minerals or oxides bound with glassy matrix : SiO_2 (quartz), $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ (mullite), Fe_2O_3 (hematite), Fe_3O_4 (magnetite) and CaCO_3 (calcite).

The chemical composition of fly ash depends on the fuel used and the combustion conditions. The table 1. given below indicates typical variations in the composition of fly ash.

Table 1. Chemical composition of fly ash

Chemical components	Max. value found (wgt. %)	Min. value found (wgt. %)
SiO ₂	51	45
Al ₂ O ₃	32	24
Fe ₂ O ₃	11	7
CaO	5.4	1.1
MgO	4.4	1.5
K ₂ O	4.5	2.8
Na ₂ O	1.7	0.9
TiO ₂	1.1	0.8
SO ₃	1.3	0.3
Cl	0.15	0.05

In the last decade research in science and technology has focused on the protection of the environment. Environmentally harmful waste products have been used in order to attempt to make them less harmful. Within this context research studies have also been carried out on fly ash with success as a civil engineering material.

Therefore the main aim in this study has been to investigate the utilization of the fly ash of the Seyitömer power plant (Kütahya-Turkiye) in brickmaking for building purposes. The fly ash samples obtained from the three bunkers of the two stage precipitators of the plant (600 MW power, with approximately 600 tons/day fly ash) were designated as E₁, E₂, E₃. The clay which was used as binder was obtained from a brickmaking factory (Aydemirler Tuğla A.Ş., Kütahya-Turkiye) near to the plant.

Although some work has been done on using fly ash for brickmaking in Turkey, most of these studies have omitted detailed characterization of fly ash. Therefore, the first step of this study was focused on this point. For this purpose the following analytical techniques and tests were used.

- X-ray diffraction, differential thermal analysis (DTA) and thermal gravimetry (TG) to identify the phases in the samples.
- Particle size measurements and specific gravity determinations to identify the physical characteristic of the samples.
- Scanning electron microscopy and electron microprobe analysis to characterize the physical and chemical nature of the samples at micro level.

In the second step of the study cylindrically shape brick samples measuring 40 mm diameter and approximately 25 mm in height were prepared by semi-dry pressing using fly ash and clay mixed in different proportions. After drying the samples at 110 °C they were fired at 900, 1000 °C for 1 hour. The following tests were carried to evaluate the properties; drying and firing shrinkage, loss on ignition, bulk density, porosity determination, compressive strength, freezing and efflorescence testing.

The results of the study can be summarized as follows;

- a) The particle size analysis of the fly ash carried out in the Micromeritics 5000 D system, revealed a size distribution between 5-80 μm in all samples. E₁ having the coarsest and E₃ having the finest.
- b) Specific gravity measurements done by the picnometre method gave the results 2350 kg/m³ for the clay, 1470, 1760, 2010 kg/m³ for the samples E₁₋₃ respectively. Figures lower than 2150 kg/m³ for the fly ash indicate a low iron oxide content in the chemical composition.
- c) X-ray diffraction study showed that the fly ash samples mainly consisted of glassy phase and the remeaning crystalline phases comprised of α -quartz, enstatite and calcium sulphate.
- d) Scanning electron microscopy and electron microprobe analysis studies showed that the fly ash consisted mainly of agglomerate particles, some of them being spherically shaped. The agglomeration formed between the above mentioned crystalline phases joined by a glassy matrix. The spherical formation occurred in the particles which had high alkaline content resulting in a low temperature melt.

e) The tests carried out on brick specimens fired at 900, and 1000 °C gave the following results.

- Increasing the addition of clay causes an approximate linear increase in drying shrinkage. The percentage of shrinkage was found to be 0.1 in clay-free brick samples and 1.3 in 100 % pure clay bricks.
- The firing shrinkage was found to be slightly decreased with 10 % clay addition in both 900, 1000 °C fired samples. The figures being 0.1 % and 0.15 % respectively. The further addition of clay results in linear increase in shrinkage to the values 1.23, 1.70 % found for pure clay samples fired at the above temperatures respectively.
- The variations in the porosity and the bulk densities of the samples were found to be dependent on clay addition.

Porosity in clay free samples had a percentage of 56.3 and 55.4 fired at 900, 1000 °C, which decreased to approximately 33.0 and 31.4 in pure clay samples fired at the above temperatures respectively.

As expected the bulk density showed the opposite effect. The figures obtained being 1030-1050 kg/m³ for clay-free bricks and 1880 kg/m³ in pure clay bricks again fired at the above respective temperatures.

- The water absorption tests gave a similar trend obtained in porosity tests.
- The freezing test carried out on the specimens showed that no deterioration took place. Similarly no efflorescence effect was observed on the specimens.
- The crushing strength of the brick specimens showed an increase both with the addition of clay and increased firing temperature.
- The figures being 1.7 and 1.8 MPa in clay free samples fired at 900, 1000 °C respectively, increasing to 38.4 and 45.5 MPa in pure clay samples.

The strength of 3.2-3.4 MPa obtained in 20 % clay added specimens were found to be comparable to the YTONG bricks with specific gravity of 400 kg/m³ which are widely used as a building material in Turkey.

The strength figures for 50 % fly ash added (approximately 9-10 MPa) and 25 % fly ash added (approximately 24-27 MPa) brick specimens fired at 900, 1000 °C, are comparable to the lower and upper strength values laid down by the Turkish Standards (TS 705) for bricks.

The results indicated that light weight bricks with potential use in the building industry could be made with fly ash waste having clay as binding material.



BÖLÜM I

1. GİRİŞ

Yeraltı kaynakları bakımından ülkemiz çok zengindir. Büyük bir rezerve sahip olan kömür kaynaklarının endüstride kullanılmayan düşük kalorili olanları, elektirik üretiminde değerlendirilmektedir. Termik santrallerde toz veya küçük parçalar halinde kömürlerin yakılması ile, elektrik enerjisinin yanısıra büyük miktarlarda da atık küller elde edilir. Küllerin % 20'si kazan altına düşerek su ile uzaklaştırılır. Bunlara kazan altı külleri denir. % 80'i ise oluşan baca gazları ile birlikte, baca çekişinin etkisi altında yukarıya doğru yükselir. Uçucu küller olarak isimlendirilen bu küller, bacanın üst kısmında elektrofiltre veya siklon adı verilen toz tutucularda tutulurlar [1, 2].

Günümüzde gittikçe gelişen çevrecilik akımları, teknolojik ve bilimsel çalışmalar; atık küllerin (özellikle büyük çoğunluğu oluşturan uçucu küllerin) değerlendirilerek, hem potansiyel bir kullanım alanı oluşturmayı, hem de doğaya verdiği zararları en aza indirmeyi amaçlamaktadır. Uçucu küllerin atık durumundan çıkartılarak, endüstride değerlendirilip yararlı hale getirilmesi için bir çok çalışma yapılmış ve başarılı sonuçlar elde edilmiştir.

Yapılan araştırmalar uçucu küllerin; çimento, beton, tuğla, hafif agrega, gaz beton ve karayolları gibi bir çok alanda değerlendirilebileceğini ortaya koymuştur. Ayrıca, uçucu küllerin yukarıda verilen kullanım alanlarının dışında; taşkın önlenmesinde, döküm kumu olarak, duvar harçlarında, metal yüzeylerinin püskürtme ile temizlenmesinde, asfalt yol yüzeylerinde kaymayı önleyici olarak, petrol

kuyuları sondajlarında ve seramik sanayiinde de kullanımı-
nın mümkün olduğu saptanmıştır [2].

Öte yandan, ülkemizde her yıl yaklaşık 11 milyon ton
uçucu kül, termik santrallerde elektrik enerjisi üretimin-
de yan ürün olarak ortaya çıkmaktadır. Büyük miktarlarda-
ki bu uçucu küllerin ancak çok küçük bir kısmı bazı çimen-
to fabrikalarında ham madde olarak, zaman zamanda baraj
enjeksiyonu, tuğla üretimi gibi amaçlarla kullanılmakta-
dır. Oysa, bir çok potansiyel kullanım alanı olmasına
rağmen, uçucu küllerin tüketiminin önemsenmeyecek kadar az
olması bir yandan çevre kirliliği öte yandan da, kül taşı-
ma sistemlerindeki olası arızalardan dolayı santralin dur-
durulması nedeniyle elektrik enerjisi üretiminde meydana
gelen kayıplar, ekonomik zararlara yol açmaktadır [3].

Bu çalışmada, Seyitömer Termik Santrali atık uçucu
küllerinin tuğla üretiminde kullanılarak, yapı malzemesi
olarak değerlendirilebilmesi imkanları araştırılmıştır.
Uçucu küllerin karakterizasyonu ile ilgili yeterli araş-
tırmalar olmadığı için, bu çalışmanın ilk aşamasında ka-
rakterizasyon çalışmaları yapılarak bu boşluk doldurulmaya
çalışılmıştır. İkinci aşamada da, karakterizasyonu yapı-
lan uçucu küllere, bağlayıcı olarak kil ilave edilerek de-
ğişik oranlarda karışımlar hazırlanmıştır. Hazırlanan bu
karışımlardan yarı-kuru presleme yöntemi ile üretilen nu-
munelere çeşitli testler uygulanarak özellikleri
tesbit edilmiştir.

Sonuçta, uçucu küllerin bağlayıcı olarak az bir kil
ilavesiyle inşaat sektöründe hafif duvar örgü malzemesi
olarak potansiyel kullanım alanı olabileceği saptanmıştır.
Elde edilen başarılı sonuçlar, bu konuda yapılacak ticari
nitelikli çalışmalara ışık tutarak, ülkemiz uçucu külleri-
nin değerlendirilmesi konusuna yeni bir boyut getirmiştir.

BÖLÜM II

2. UÇUCU KÜLLERİN ÖZELLİKLERİ VE KULLANIM ALANLARI

2.1. Uçucu Küllerin Tanımı ve Sınıflandırılması

Uçucu küller, katı yakıtlardan elektrik üreten termik santrallerin bir yan ürünü olarak elde edilirler. Bu amaçla, genellikle endüstride kullanılmayan düşük kalorili kömürler kullanılır. Degirmenlerde öğütülerek toz haline getirilen kömürler, sıcak hava ile birlikte yanma fırını içerisine püskürtülmektedir. 1700-1500°C sıcaklık aralığında kömür tozlarının yakılması sonucunda oluşan küllerin, yaklaşık % 20'si kazan altına düşerek su ile uzaklaştırılır. Bunlara kazan altı külleri denir. Küllerin % 80'i ise, oluşan baca gazları ile birlikte baca çekişinin etkisi altında yukarıya doğru yükselir. Uçucu küller olarak isimlendirilen bu küller, bacanın üst kısmında elektrofiltre veya siklon adı verilen toz tutucularda tutulurlar. Bu küller daha sonra toz tutucuların alt kısmında bulunan bunkerlerde biriktirilir ve periyodik olarak santral dışına alınır. Genellikle küresel bir yapıya sahip olan uçucu küllerin çapları 1-100 µm değerleri arasındadır [1, 2].

Termik santrallerde yakıt olarak, ülke kaynaklarına göre taş kömürü veya linyit kömürü kullanılmaktadır. Bu yüzden uçucu küller orijinlerine göre iki ana gruba ayrılırlar [2]:

- 1) Taş kömürü uçucu külleri
- 2) Linyit kömürü uçucu külleri

Kimyasal yapıları bakımından ise uçucu külleri 4 ana sınıfa ayırmak mümkündür [2].

1) Silikat-alumina esaslı uçucu küller : Yapılarının büyük bir kısmını kuvars (SiO_2) ve bir miktar alumina (Al_2O_3) meydana getirmektedir. Genellikle taş kömürü uçucu külleridir [2].

2) Silikat-kalsit esaslı uçucu küller : Yapılarındaki ana oksitler kuvars (SiO_2) ve kalsit'tir (CaCO_3). Fakat, kalsit miktarı oldukça yüksektir [2].

3) Sülfür-kalsit esaslı uçucu küller : Yapılarının büyük bir bölümü kükürt trioksit (SO_3) ve kalsit'ten (CaCO_3) meydana gelmiştir. Bu sınıfa genellikle linyit kömürü uçucu külleri girmektedir [2].

4) Sınıflandırılmayan uçucu küller : Termik santrallerdeki yakma sisteminin homojen olmamasından kaynaklanan ve belirli bir kimyasal yapıya sahip olmayan küllerdir. Kimyasal yapıları sürekli değişebilmektedir [2].

2.2. Uçucu Küllerin Mineralojik ve Kimyasal Yapıları

Uçucu küller, gözenekli veya dolu camsı küresel taneler ile yanmamış mineralleri içeren süngerimsi ve köşeli aglomere tanelerden meydana gelmektedirler.

Genellikle bir uçucu külde; SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , SO_3 , MgO , Na_2O , K_2O ve TiO_2 gibi oksitlerin hemen hemen tamamına rastlanmaktadır. Ancak, bu oksitlerin küldeki yüzdeleri külün tipine bağlı olarak değişmektedir. Örneğin, silikat-alumina esaslı bir uçucu külde SiO_2 ve Al_2O_3 , silikat-kalsit esaslı bir uçucu külde SiO_2 ve CaCO_3 , sülfür-kalsit esaslı bir uçucu külde ise SO_3 ve CaCO_3 ana oksitlerdir. Genelde bir taş kömürü uçucu külü, toprak alkali elementlerini linyit uçucu külünden daha fazla içermektedir [2].

Uçucu küllerde en fazla bulunan oksitler kuvars (SiO_2), mullit ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$), hematit (Fe_2O_3), manyetit (Fe_3O_4) ve kalsit (CaCO_3)'dir [4]. Minerolojik analizlerde, genellikle uçucu kül içerisindeki silisyumun bir kısmının kuvars kristalleri halinde, diğer bir kısmının ise alüminayla birleşerek mullit, geri kalanın ise camı yapıda olduğu saptanmıştır. Demirin kısmen manyetit ve hematit bileşiminde, geri kalanın ise camı fazda olduğu görülmüştür. İdeal şartlarda elde edilen uçucu küllerin % 66-88'i camı yapıda, % 70-88'i SiO_2 ve Al_2O_3 , geri kalan kısmı ise demir, kalsiyum, magnezyum, sodyum, potasyum ve titanyum'dan meydana gelmektedir [5, 6].

Termik santrallerde kullanılan yakıta ve yanma şartlarına bağlı olarak uçucu küllerin kimyasal özellikleri değişiklikler göstermektedir. Türk Standardları Enstitüsü'ne göre uçucu küllerin kimyasal özellikleri tablo 2.1.'de verilmiştir [7].

Tablo 2.1. Türk Standardlarına göre uçucu küllerin kimyasal özellikleri (TS 639/1975).

Kimyasal Bileşik	% (Ağırlıkça)
$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$	70 (min.)
MgO	5 (max.)
SO_3	5 (max.)
Nem	3 (max.)
Kızdırma kaybı	10 (max.)

Amerikan Standardlarına göre uçucu küller F ve C sınıfı olarak iki gruba ayrılmıştır. F sınıfı uçucu küllerde SiO_2 ve Al_2O_3 oranı oldukça yüksektir. C sınıfı uçucu küllerde ise en fazla bulunan oksit SiO_2 olmasına rağmen, % 10'dan fazla miktarlarda CaO'de içermektedir [8].

Tablo 2.2. ASTM standartlarına göre uçucu küllerin kimyasal özellikleri (ASTM C 618-80).

Kimyasal Bileşik	% (Ağırlıkça)	
	F Sınıfı	C Sınıfı
$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$	70 (min.)	50 (min.)
SO_3	5 (max.)	5 (max.)
Nem	3 (max.)	3 (max.)
Kızdırma kaybı	12 (max.)	6 (max.)

Uçucu küllerin içerdikleri kimyasal bileşiklerin maksimum ve minimum miktarları da tablo 2.3.'de verilmiştir [5]

Tablo 2.3. Uçucu küllerin içerdikleri bileşiklerin maksimum ve minimum miktarları.

Kimyasal Bileşik	% (Ağırlıkça,max.)	% (Ağırlıkça,min.)
SiO_2	51	45
Al_2O_3	32	24
Fe_2O_3	11	7
CaO	5.4	1.1
Mgo	4.4	1.5
K_2O	4.5	2.8
Na_2O	1.7	0.9
TiO_2	1.1	0.8
SO_3	1.3	0.3
Cl	0.15	0.05

2.3. Uçucu Küllerin Fiziksel   zellikleri

2.3.1. Görüntü

Uçucu küllerin renkleri aşk ve koyu gri ile siyah arasında değişmektedir. K  ldeki karbon, demir ve nem miktarı küllerin renklerini etkilemektedir [5]. Mikroskop altında incelendiklerinde süngerimsi, gözenekli veya gözeneksiz küresel ve aglomere tanelerden meydana geldikleri g  r  lmektedir. Linyit kömürü u  cu külleri, ta   kömürü u  cu küllerinden daha koyudur. İyi yanmış u  cu küller, iyi yanmamış küllerden daha a  k renktedir. İyi yanmamış küllerin koyu rengi, yapılarında mevcut yanmamış karbon-dan ileri gelmektedir [2].

2.3.2. Tane Boyutu

Uçucu küllerin tane boyutu, kullanılan kömürün cinsine ve   ę  t  lme derecesine bağlı olarak değişmektedir. Ta   kömürü u  cu küllerinin tane boyutu, linyit kömürü u  cu küllerinin tane boyutundan daha k    kt  r. Tane boyutuna etki eden ikinci faktör ise, tane boyutu köşk olan u  cu küllerin mümkün olabildiğince bacadan kaçmasına engel olunarak tutulmasıdır. Bacadan ka  an küller ne kadar iyi yakalanırsa, o oranda ince taneli küller elde edilmektedir. Elektrofiltrelerde daha ince u  cu küller tutulduğu için; elektrofiltrelerde tutulan u  cu küllerin tane boyutu, siklonlarda tutulanlardan daha k    kt  r. Genel olarak u  cu küllerin tane boyutları 1-100 μm , özgül yüzeyleri ise 0.1-0.5 m^2/gr arasındadır [2].

2.3.3. Özgül Ağırlık

Uçucu küllerin ortalama özgül ağırlıkları 2150 kg/m^3 'dir [9]. Ancak küldeki kuvars, alumina, demir ve karbon miktarları özgül ağırlığı değiştirmektedir. Örneğin, u  cu

külün demir miktarı arttıkça özgül ağırlığı artmaktadır. Ayrıca, uçucu küllerin içerisinde değişik özgül ağırlıklara sahip farklı tanelerde bulunabilmektedir [2].

2.3.4. Karbon Miktarı

İyi yanma olan termik santrallerde karbon miktarı çok düşük olmaktadır. Eski tip santrallerde bu oran % 10'a yükselmekte, yenilerde % 3'ün altında kalmaktadır. Antrasit yakan santrallerde yanma problemi nedeniyle karbon miktarı yüksektir. Uçucu külün karbon miktarı kızdırma kaybı değerinden az olmalıdır. Kızdırma kaybı değeri 0.9 ile çarpıldığında yaklaşık olarak karbon miktarı bulunabilmektedir [5].

Uçucu küllerdeki karbon, yanıcı olmayan tanelerin yüzeyi üzerinde ince karbon tabakası veya ayrı taneler olarak bulunmaktadır. Uçucu küllerdeki karbon tanelerinin tane boyutu çoğu zaman diğer tanelerden daha büyüktür [10].

2.3.5. Uçucu Küllerin Manyetik Özellikleri

Uçucu küllerin içerisine bir mıknatıs sokulduğunda, bir miktar uçucu kül mıknatısa yapışır. Mıknatıs bir hava akımına tutularak manyetik olmadığı halde yapışan taneler uzaklaştırılır. Bu deney birkaç defa yapıldıktan sonra uçucu küllerin % 25'inin mıknatısta kaldığı görülmüştür. % 7.7 Fe_2O_3 içeren bir uçucu külde, mıknatısa yapışan kısım yaklaşık % 6.8 olmaktadır. Kimyasal analizde; mıknatısta tutulan kısmın % 63'ünün Fe_2O_3 olduğu, mıknatısa yapışmayan kısımdaki Fe_2O_3 miktarının ise % 4 olduğu tesbit edilmiştir [2].

2.3.6. Uçucu Küllerin Puzolanik Özellikleri

Uçucu küller, kireç ve su ile karıştırıldığında belirli bir süre sonunda dayanım kazanır. Uçucu küllerde puzolanik özelliğin esaslı olan bu dayanım kazanma özelliği oldukça yavaş olarak ortaya çıkar. Artan süreyle birlikte, uçucu küllerin puzolanik özellikleri artmaktadır [2]. Ayrıca, CaO miktarı yüksek uçucu küller daha iyi puzolanik özellik gösterir [11].

2.4. Uçucu Küllerin Kimyasal Özellikleri

Uçucu küllerin kimyasal özellikleri, suda çözünürlük ve asitlerin etkisi olarak ikiye ayrılmaktadır.

a) Suda çözünürlük : Uçucu küller % 2-3 oranında suda çözünürler. Çözelti, kalsiyum ve sülfat nedeniyle alkali reaksiyon vermektedir [12]. MgO , Na_2O , K_2O , SiO_2 , Al_2O_3 ve Fe_2O_3 'ün suda çözünürlükleri minimum seviyede olup, sıcaklık arttıkça uçucu küllerin suda çözünürlüğü artmaktadır [2].

b) Asitlerin etkisi : Uçucu küllere asitlerin etkisi çok azdır. Seyreltik asit içerisinde uçucu küllerin çözünürlüğünün en fazla % 15 olduğu görülmüştür. Ancak bu miktar, uçucu küllerin kimyasal ve mineralojik yapısına bağlı olarak daha da düşük olabilmektedir [2].

2.5. Termik Santrallerde Atık Uçucu Küllerin Toplanması

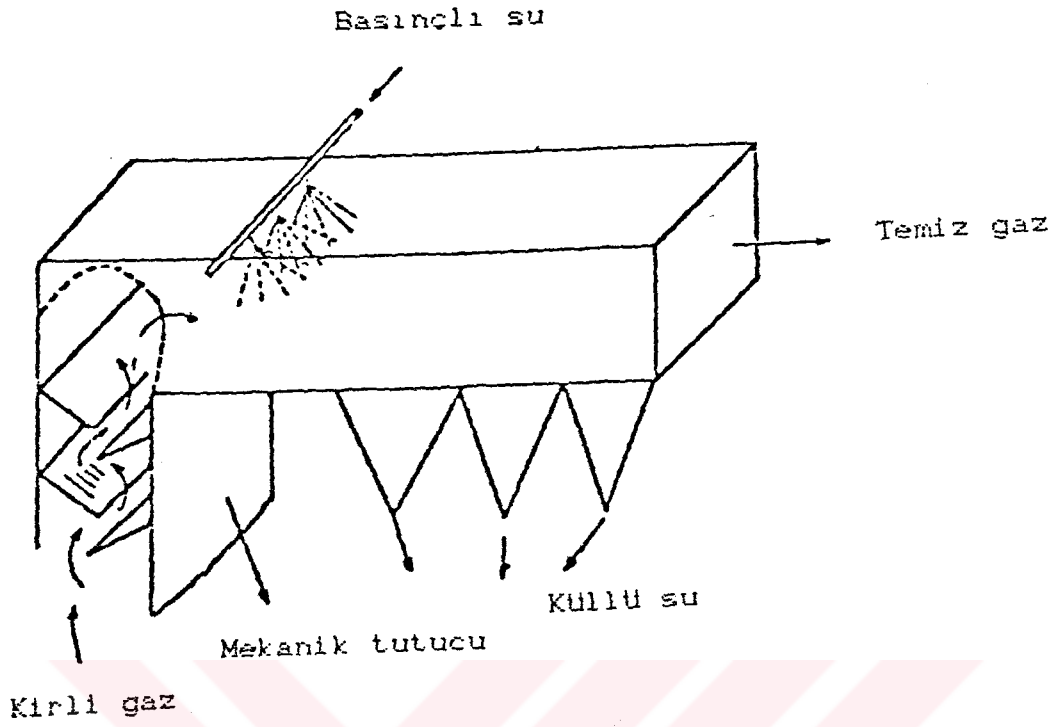
Termik santraller ile elektrik üretiminde yanma işlemi sonucunda oluşan atık küller; kömürün cinsine, kül oranına, kimyasal yapısına, kazanlara yükleme programına ve kül temizleme işlemleri ile kazan tipine bağlı olarak farklı özellikler göstermektedir [1, 2].

Termik santrallerde, toz ve parça kömürler yakılmaktadır. Toz kömür yakan termik santrallerde 0.09 mm tane boyutuna öğütülmüş kömürler kullanılır [13]. Parça kömürler ızgaralı kazanlarda yakılmakta olup, oluşan küllerin % 1-5 'i uçucu küllerdir. Toz kömürlerin kullanılmasında ise bu oran % 80'e ulaşmaktadır [2].

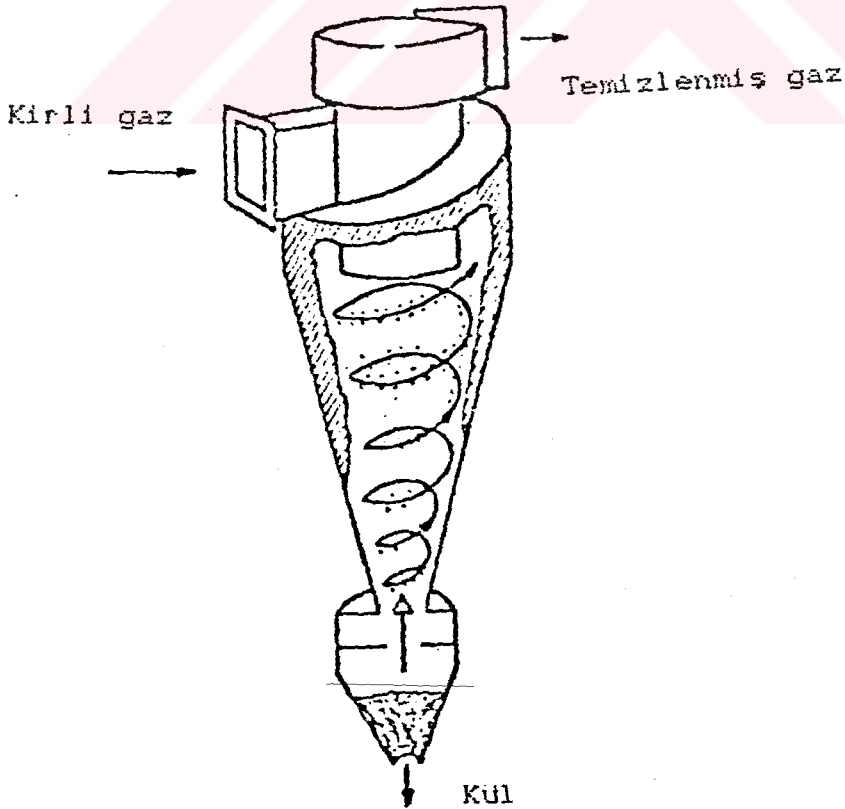
Uçucu küllerin toplanmasında aşağıdaki yöntemler kullanılır [2] :

- 1) Elektrofiltreler
- 2) Siklonlar
- 3) Nemlendirme
- 4) Filtreler
- 5) Ultrasonik çöktürme
- 6) Kontrol prosesleri

Termik santrallerde en çok kullanılan kül tutma yöntemleri, elektrofiltre ve siklonlardır. Uçucu küllerin tane boyutunun büyük olduğu durumlarda siklon gibi mekanik tutucular, küçük olduğu durumlarda ise elektrofiltreler kullanılır. Uçucu küllerin su ile ıslatılarak çöktürülmesi esasına dayanan nemlendirme yöntemi çok su tüketmekte olup, toplanan küllerin değerlendirilememesi ve yüksek maliyeti sebebiyle pek kullanılmamaktadır. Şekil 2.1.'de nemlendirme, şekil 2.2.'de de siklon ile uçucu küllerin tutulması şematik olarak verilmiştir. Filtreler, ultrasonik çöktürme ve kontrol prosesleri ile 1 μ m tane boyutuna kadar uçucu küller yakalanabilmektedir. Bacadan kaçan kül miktarı azaldığı için çevre kirliliğini azaltan bu yöntemlerin yatırım ve işletme maliyetleri çok yüksektir [2].



Sekil 2.1. Uçucu küllerin nemlendirme yöntemi ile tutulması [2].



Sekil 2.2. Siklon ile uçucu küllerin tutulması [2].

2.6. Termik Santral Atık Uçucu Küllerinin Kullanım Alanları

2.6.1. Tuğla Üretiminde Kullanımı

Tuğla üretiminde kullanılan killeri tablo 2.4.'de verildiği gibi SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MgO , CaO , K_2O , Na_2O ve TiO_2 'den meydana gelmektedir [14]. Uçucu küllerde aynı oksitleri içerdikleri için tuğla üretiminde kullanılabilir. Uçucu küllerin tuğlalarda kullanılması ile, tuğlaların kuruma ve pişme güçlükleri azalmaktadır. Aynı zamanda uçucu küllerin içerdikleri karbon, tuğlaların pişirilmesinde enerji tasarrufu sağlamaktadır [1, 10].

Uçucu küllü tuğlaların üretiminde dikkat edilecek ilk nokta konunun genelleştirilemeyeceğidir. Tablo 2.3. ile tablo 2.4.'de verilen değişim sınırları göz önüne alındığında, bütün uçucu küllerin ve killerin aynı özelliklere sahip olamayacağı ortaya çıkmaktadır. Hangi küllün, hangi kil ile kullanılacağı deneylerle saptanmalıdır. Aynı kül, bir çeşit kil ile avantajlar sağlarken, değişik özellikteki başka bir kil ile iyi sonuçlar vermeyebilir [2].

Kil tuğlaların üretimi aşağıdaki sıraya göre yapılmaktadır [15].

- 1) Öğütme
- 2) Çamur haline getirme
- 3) Dinlendirme
- 4) Kalıplama
- 5) Kurutma
- 6) Pişirme
- 7) Ambalajlama

Uçucu küllü tuğla üretiminde, küllün miktarına göre iki durum ortaya çıkmaktadır. Birincide, kil ana malzemedir. Kül, kilin özelliklerini geliştirmek ve bünyesindeki

karbonun yanma değerinden faydalanmak için kullanılır. İkindide ise uçucu kül esas malzemedir [2]. Kil, uçucu küllerin plastiklik özelliği olmadığı için bağlayıcı olarak kullanılır [16].

Uçucu kül ile kilin uygun karışımı bulunduğu zaman aşağıdaki avantajlar elde edilebilmektedir [2, 17].

- 1) Öğütme değirmeninin kolay beslenmesi (Bu sadece çok yaş veya yapışkan killeriyle çalışıldığı zaman mümkündür.)
- 2) Kalıplama için daha az kuvvet gerekmesi
- 3) Daha kolay kuruma
- 4) Yakıt tasarrufu ve daha kolay pişirme

Tuğla üretiminde kullanılan uçucu küllerin tane boyutu, tuğlaların özelliklerini etkilemektedir. Küçük tane boyutlu küllerin kullanıldığı tuğlalar, tane boyutu büyük olan uçucu küllü tuğlalara göre daha fazla basma mukavemetine ve bulk yoğunluğa sahiptirler. Ayrıca, daha düşük oranlarda pişme küçülmesi ve su emme özelliğide gösterirler [11]. Küçük tane boyutlu uçucu küllerin tuğlalarda daha iyi özellikler göstermesi, maksimum noktada teması sağlayarak yoğunlaşmayı arttırmamasından ileri gelmektedir [16].

Uçucu kül içeren tuğlaların pişirilmesinde sıkıştırma-
lı fırınların kullanımı, kil tuğlalarının pişirilmesinde kullanılan geleneksel fırınlardan daha iyi sonuçlar vermektedir. Uçucu küllerdeki karbonun yanma enerjisini daha iyi değerlendirebildikleri için, sıkıştırmalı fırınların termal verimlilikleri yüksektir. Ayrıca, bu fırınların yatırım maliyeti daha düşüktür [18].

Tablo 2.4. Cesitli kıl minaralleri ve kimyasal bileşimleri [14].

Mineral	Kimyasal Bileşim, % (Ağırlıkça)								
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	K ₂ O	Na ₂ O	TiO ₂	H ₂ O
Kaolinit	46.90	37.40	0.66	0.27	0.29	0.84	0.44	0.18	12.95
Nakrit	44.75	39.48	0.53	0.19	0.13	0.34	0.22	-	14.40
Dikkit	46.86	37.12	1.43	0.09	0.22	0.60	0.07	0.51	12.99
Halloysit	44.75	36.94	0.31	-	0.11	-	-	-	17.42
Anauxit	54.32	29.96	2.00	0.14	0.32	0.24	0.37	-	12.64
Nontronit	40.54	5.19	31.63	0.06	1.92	-	0.14	-	20.75
Klorit	31.44	17.62	-	37.64	-	-	-	-	13.19
Proklorit	23.69	21.26	26.52	17.60	3.22	-	-	-	7.63
Sepiolit	52.50	0.60	2.99	21.31	0.47	-	-	-	21.27
Attapulgit	57.85	7.89	2.82	13.44	0.30	0.08	0.53	-	16.95

2.6.2. Çimento ve Beton Yapımında Kullanımı

Çimento yapımında kullanılan hammaddeler CaO , SiO_2 , Al_2O_3 ve Fe_2O_3 olmak üzere başlıca dört bileşiği içerirler. Uçucu küllerde de değişik oranlarda aynı bileşikler bulunduğu için çimento üretiminde kullanılabilirler [2, 5].

Puzolanik özellik gösteren uçucu küllerin tek başlarına bağlayıcı özellikleri yoktur. Ancak çimento ile birlikte kullanıldığında, çimentonun hidratasyonu sırasında ortaya çıkan kalsiyum hidroksit ile kimyasal reaksiyona girerek bağlayıcı özellik kazanırlar [19].

Uçucu küller beton yapımında kullanıldıkları zaman, betonun yüzey temizliği ve işlenebilme özelliği iyileşmektedir. Aynı zamanda betonun su geçirgenliği, büzülme ve kanaması azalmakta olup, dayanımı artmaktadır [12, 20].

2.6.3. Hafif Agregası Yapımında Kullanımı

Uçucu kül, hafif öğütülmüş katı yakıt ve su karışımının $1000-1200^\circ\text{C}$ 'de sinterleştirilmesi ile pelet veya nodüller üretilir [5]. İyi bir mekanik mukavemete sahip bu agregalar betonda kullanılarak, dayanımlı hafif betonlar ve bloklar elde edilir. Ayrıca hafif olmaları sebebiyle binaların işçilik, temel masrafları, ısı ve ses iletkenliği azalır [2, 20].

2.6.4. Karayolları Yapımında Kullanımı

Uçucu küller yol yapımında dolgu malzemesi olarak kullanılır. Ancak gerekli toprak stabilizasyonunun sağlanması ile, temel veya alt temel malzemesi olarakta kullanılabilirler [2, 20].

2.6.5. Gaz Beton Yapımında Kullanımı

Gaz beton; çimento, kireç, kum ve alüminyum tozları ile uçucu küllerin karıştırılması sonucu elde edilir. Karışıma ilave edilen sıcak su, alüminyum tozları ve kireç arasında bir reaksiyona yol açar. Böylece, istenilen boyutlarda elde edilen bloklarda oluşan çok sayıda hidrojen kabarcıklarına, hidrojenin uzaklaşıp havanın girmesi ile dayanıklı ve hafif bir yapı malzemesi elde edilir [12]. Daha sonra otoklavlarda buhar kürtü uygulaması ile fiziksel ve kimyasal özellikleri iyileştirilen bloklar; kullanıldıkları binalarda ısı yalıtımının yanı sıra, hafif olmaları sebebiyle taşımada da kolaylık sağlarlar [12, 20].

2.6.6. Uçucu Küllerin Kullanıldığı Diğer Alanlar

Uçucu küllerin yukarıda verilen kullanım alanlarının dışında, kullanıldıkları diğer yerler aşağıda verilmiştir [2, 20].

- 1) İçerisindeki bazı nadir elementlerin elde edilmesinde
- 2) Taşkın önlenmesinde
- 3) Döküm kumu olarak
- 4) Duvar harçlarında
- 5) Metal yüzeylerinin püskürtme ile temizlenmesinde
- 6) Asfalt yol yüzeylerinde kaymayı önleyici olarak
- 7) Petrol kuyuları sondajlarında
- 8) Seramik sanayiinde (cam seramiklerde)

BÖLÜM III

3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

3.1. Deney Programı

Seyitömer Termik Santrali atık uçucu küllerinin yapı malzemesi olarak değerlendirilebilmesi imkanlarını araştırmak bu çalışmanın ana amacını oluşturmaktadır. Çalışmada kullanılan uçucu kül örnekleri toz linyit kömürü yakan 600 MW kapasiteli Seyitömer Termik Santralından, kil örneği ise Akdemirler Tuğla A.Ş. (Kütahya)'den temin edilmiştir.

Çalışmada; 3. ünite ön temizleme I. kademe (E_1), 4. ünite son temizleme I. kademe (E_2) ve 3. ünite son temizleme II. kademe (E_3) elektrofiltre uçucu külleri olmak üzere üç ayrı kül örneği kullanılmıştır.

Deneyisel çalışmalar, hammadde karakterizasyonu ve yapı malzemesi üretimi olarak iki aşamada gerçekleştirilmiştir. Hammadde karakterizasyonunda uçucu küller ile kilin; mineralojik, tane boyutu ve yoğunluk analizleri yapılmış, taramalı elektron mikroskopunda farklı büyütmelerde fotoğrafları çekilmiştir. Deneyisel çalışmaların ikinci aşamasında ise, karakterizasyonu yapılan uçucu kül ve kil örneklerinden değişik oranlarda karışımlar hazırlanıp, yarı-kuru presleme yöntemi ile silindirik numuneler elde edilmiştir. Daha sonra bu numunelere çeşitli testler uygulanarak, özellikleri belirlenmiştir.

3.2. Hammadde Karakterizasyonu

3.2.1. Mineralojik Analiz

Uçucu kül ve kil örneklerinin mineralojik analizlerinde iki yöntem kullanılmıştır.

a) Diferansiyel Termal analiz (DTA) ve Termogravimetri (TG)

Diferansiyel termal analiz, incelenecek maddeyi sabit bir hızla ısıtırken meydana gelen ekzotermik ve endotermik reaksiyonların görüldüğü sıcaklıkları kaydetmekten ibarettir [21]. Ekzotermik reaksiyonlar; organik maddelerin yanması, yüksek sıcaklıklarda yeni fazların oluşumu ve amorf maddelerin kristalleşmesi sebebiyledir. Endotermik reaksiyonlar ise; su kayıpları (absorbe edilmiş suyun ve kristal suların uzaklaşması), kristal yapının bozulması ve karbon-dioksit veya sülfür trioksit kayıpları sonucu oluşur [22].

DTA ile analizde esas, test edilecek madde ile standart inert bir maddenin (kalsine edilmiş kaolen veya $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$) kapalı bir yerde birlikte ısıtılmaları sırasında, aralarındaki ısı farkının kaydedilmesi esasına dayanır [21, 23]. Test maddesinin standart maddeye göre sıcaklık farkının ileride veya geride olması, test maddesi içerisinde oluşan ısıl reaksiyonun ekzotermik veya endotermik olduğunu gösterir. Bu reaksiyonlar, DTA cihazında pikler şeklinde kayıt edilir [23]. Her mineralin ısıtma düzeni içinde yapısında olan değişiklik bu mineralin karakteristiği olup; pik sıcaklıkları, pik alanları veya pik şekillerinin tanımla ile test maddesinde bulunan minerallerin kimyasal bileşimi, kristal yapısı ve reaksiyon meydana gelmesi halinde alınıp verilen enerji durumlarını ortaya koymaktadır [23, 24].

Termogravimetri (TG), test maddesinin belirli bir ısı artışıyla ısıtıldığında, bünyesinde oluşan reaksiyon sonucu kayıp olacak fiziksel ve kimyasal su miktarlarının, veya

gaz çıkışı sebebiyle olacak kayıpların gravimetrik olarak saptanması için kullanılır. Bu türlü ağırlık kayıpları entalpi değişiminide içerdüğinden; termogravimetri, DTA yöntemi ile birleştirilerek, minerallerin tanımlanmasında güçlü bir analiz yöntemi olarak kullanılmaktadır. Ancak, test maddesi bir kaç mineralden oluşmuş ve karakteristik pikler birbirleri ile çakışmışsa bu yöntem sınırlı kalabilir. Bu durumda, x-ışınları difraksiyon analizi uygulanmalıdır [23].

Analiz sırasında test maddesi, DTA cihazının (NETZSCH 429) aluminadan yapılmış kapsüllerden birine, inert olarak tanımlanan $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ ise diğerine doldurulmuştur. Bu sistem, sıcaklığı dakikada 10°C yükselen bir fırına yerleştirilmiş ve ısıtma sonucu oluşan reaksiyonlar bir yazıcı ile kağıt üzerine aktarılmıştır. Oluşan bu reaksiyonlar sürekli bir eğri şeklinde, yatay bir baz doğrultusunda altında ve üstünde eğriler vermiştir.

b) X-ışınları Difraksiyon Analizi

Uçucu kül ve kil örneklerinde bulunan kimyasal bileşikler, x-ışınları difraksiyon analiz yöntemi (Philips Difraktometre) ile tesbit edilmiştir.

Bu yöntemde, mineralin kristal yapısının incelenmesi ile mineralojik bileşimi saptanır. Burada, genellikle Cu veya Co gibi hedef bir elementten elde edilen K_α karakteristik x-ışını demeti analiz edilecek madde üzerine gönderilir. Işın demeti maddenin üç boyutlu kristal kafeslerinden difraksiyona uğrar ve bu maddeye has difraksiyon paterni elde edilir. Bunun incelenmesi ve bileşimi belirli standart minerallerde elde edilen paternler ile karşılaştırılması sonucu, maddenin kristal yapısı saptanmış olur. Standart olarak ASTM kartları kullanılır [23].

3.2.2. Tane Boyutu ve Özgül Ağırlık Analizi

Tane boyutu küçük malzemelerin, tane boyut dağılımını belirlemek için en çok kullanılan yöntemlerden birisi, mikromeritics cihazı ile yapılan analizlerdir. Bu çalışmada kullanılan uçucu kül ve kil örneklerinin tane boyut analizleride aynı yöntem ile (Sedi-Graph 5000D Micromeritics cihazında) yapılmıştır.

Bir hücre içerisindeki suda (ağırlıkça % 0.05 kalgon çözeltisi) dağıtılan analiz numunelerinin tane boyutları yer çekimi prensibine göre, x-ışınlarının şiddet değişimi ile belirlenmiştir. Bu sistemde, 0.1-100 μm boyut aralığındaki tanelerin analizi yapılabilmektedir [25].

Uçucu kül ve kil örneklerinin özgül ağırlıkları, toz halindeki veya toz haline getirilmiş maddelerin özgül ağırlıklarının saptanmasında kullanılan piknometre yöntemi ile, yapılmıştır. Bu yöntemde özgül ağırlık, aşağıda verilen formüle göre hesaplanır. [14, 25, 26].

$$d = \frac{W - P}{(W_1 - P) - (W_2 - W)} \times d_1$$

d = Test malzemesinin özgül ağırlığı (kg/m^3)

W = Ağzı kapalı piknometre + test malzemesinin ağırlığı (kg)

P = Ağzı kapalı piknometre ağırlığı (kg)

W_1 = Ağzı kapalı piknometre + saf su ağırlığı (kg)

W_2 = Ağzı kapalı piknometre + test malzemesi
+ saf su ağırlığı (kg)

d_1 = Saf suyun özgül ağırlığı (1000 kg/m^3)

3.2.3. Taramalı Elektron Mikroskobu İncelemesi ve Elektron Mikroprob Analizi

Uçucu küllerin tane yapılarını tesbit etmek amacıyla taramalı elektron mikroskobu (JOEL-840A ve TRACOR TN2000 X-ışınları Enerji Dağılım Analizörü) kullanılmış ve farklı büyütmelerde fotoğrafları çekilmiştir. Elektron mikroprob analizinde de, x-ışınları ile uçucu kül numunelerinin elementel analizleri yapılmıştır.

3.3. Deney Numunelerinin Hazırlanması

3.3.1. Harmanlama ve Kalıplama

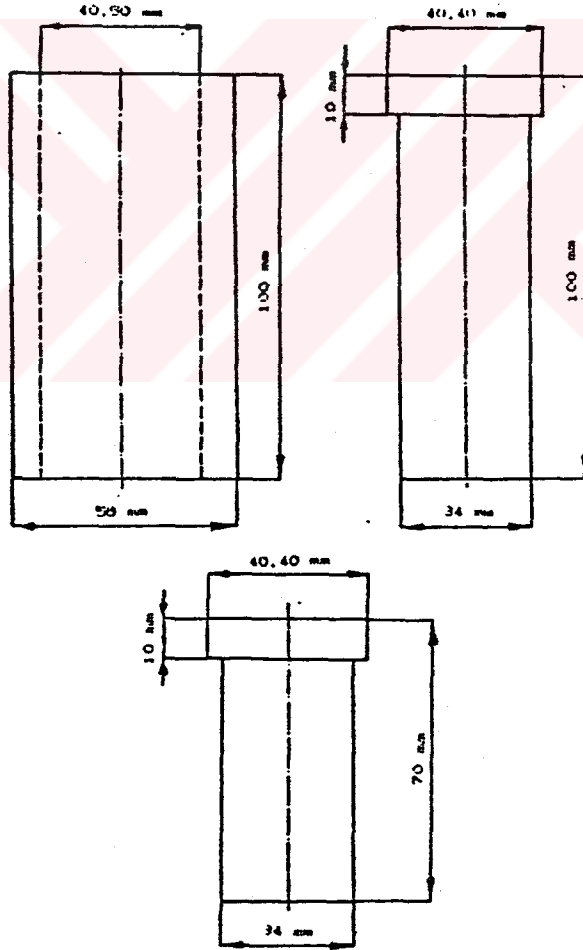
Uçucu kül ve kil örneklerine % 14 (ağırlıkça) su ilave edilerek, değişik oranlarda karışımlar hazırlanmıştır. Homojen bir karışım elde etmek için harmanlamada mikser kullanılmıştır. Aşağıdaki tabloda karışımların oranları verilmiştir.

Talo 3.1. Uçucu kül/kil karışım oranları

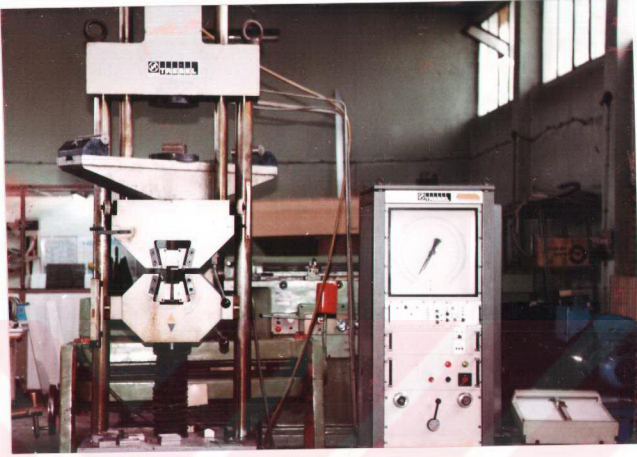
Karışım No	Uçucu kül/kil
1	100/-
2	90/10
3	80/20
4	70/30
5	60/40
6	50/50
7	40/60
8	25/75
9	-/100

Uçucu kül/kil karışımlarında kullanılan uçucu küller; E_1 , E_2 ve E_3 küllerinin aynı oranlarda karıştırılması ile elde edilmiştir. Plastik özelliği olmayan küllerde plastisiteyi sağlamak amacıyla, tamamen uçucu külden oluşan 1 no'lu karışıma % 2 oranında nişasta ilavesi yapılmıştır [1].

Uçucu kül/kil karışımlarından; Şekil 3.1.'de boyutları verilen SAE 1040 çeliğinden yapılan kalıp ile, 34,5 MPa presleme basıncı uygulanarak [1], ortalama 40 mm çapında [6] ve 25 mm yüksekliğinde numuneler elde edilmiştir. Preslemede 600 KN kapasiteli bir çekme-basma cihazı (SCMENK TREBEL 3962) kullanılmış olup, cihazın fotoğrafı Şekil 3.2.'de verilmiştir.



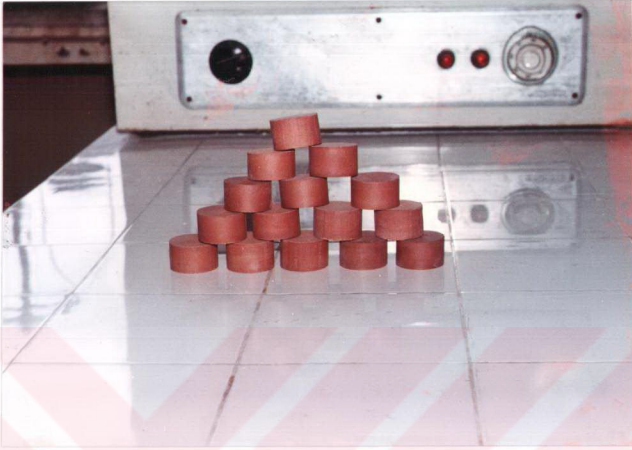
Şekil 3.1. Uçucu kül/kil karışımlarından silindirik numunelerin üretiminde kullanılan kalıp parçalarının boyutları.



Şekil 3.2. Preslemede kullanılan çekme-basma cihazı.

3.2.2. Kurutma ve Pişirme

Her bir karışımdan yarı kuru presleme yöntemi ile 12 adet üretilen deney numuneleri, elektrikli etüvde (MAS Laborteknik) 110°C 'de bir saat bekletilerek kurutulmuştur. Kurutma işleminden sonra, her bir karışımdan hazırlanan 6 numune 900°C 'de, 6'sıda 1000°C 'de 200°C/saat ısıtma hızına sahip bir elektrikli fırında (HERAEUS HANAU KR 170) bir saat bekletilerek pişirilmiştir. Pişirilmiş numunelerin fotoğrafı, Şekil 3.3.'de görülmektedir.



Şekil 3.3. Pişirilmiş numunelerin görünüşü.

3.3.3 Sinterleşme

Pişirme işlemi ile gerçekleşen sinterleşme; bir seramik bünyede, birbirleriyle temas halinde bulunan tanelerin, yüksek sıcaklıklarda birbirine bağlanarak yapışması ile, bünyenin boyut ve yoğunluklarında meydana gelen değişimdir [27].

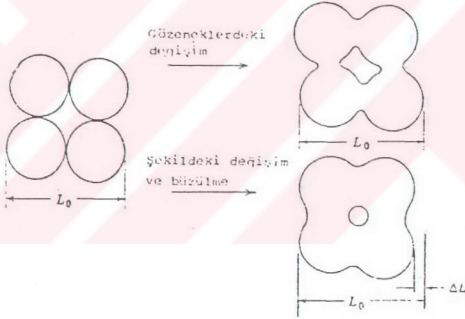
Seramik tozları, şekillendirme sırasında sıkışarak malzemedeki gözenek miktarı azalmaktadır. Kuruma sonucunda fiziksel suyun uzaklaşması ile, taneler birbiri ile temas eder. Ancak, taneler arasında boşluklar mevcuttur. Mukavemetin ve yoğunlaşmanın arttırılması için, yapıdaki mevcut gözeneklerin giderilmesi gerekir. Pişirmede; difüzyon hızlandığından birbiri ile temas halinde olan taneler arasında, özellikle yüzeyde yer alan karşılıklı atom

difüzyonu sonucunda taneler arasında boyun oluşarak, kenetlenme gerçekleşir [28].

Sinterleşme sırasında bünyede oluşan değişimler aşağıda verilmiştir [27].

- 1) Bünye pekişir ve mukavemet artar
- 2) Büzülme meydana gelir (pişme küçülmesi)
- 3) Gözeneklerin şekli değişir
- 4) Ortalama tane boyutu büyür

Sekil 3.4.'de, sinterleşme sırasında tanelerin birbirine bağlanması ve gözenek miktarı ile gözeneklerin yapısında meydana gelen değişim görülmektedir [28].



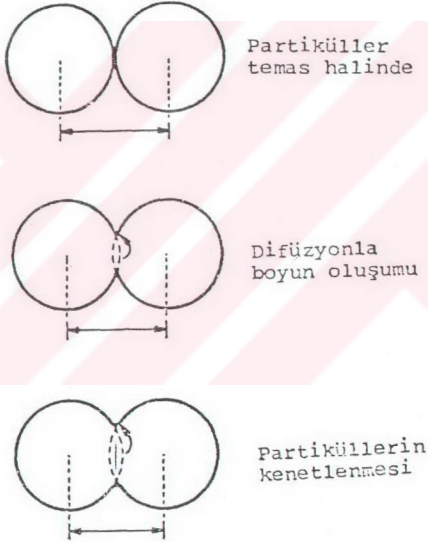
Sekil 3.4. Sinterleşme sırasında tanelerin birbirine bağlanması ve gözenek miktarı ile gözeneklerin yapısında meydana gelen değişimler.

Sinterleşme mekanizması, tamamen malzemenin taşınımına dayanır ve atomların difüzyonu (yüzey ve hacimsel) ile viskoz akışı kapsar. Sinterleşme sıcaklığı arttıkça malzemenin taşınımı (difüzyon) artmakta ve yoğunlaşma sağlanmaktadır. Sinterleşmeyi sağlayan itici güç, serbest yüzey enerjisindeki azalmadır [28].

Sinterleşme mekanizmaları üçe ayrılır [27, 28].

a) Katı Hal Sinterleşmesi

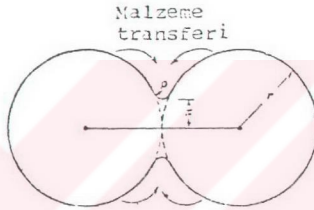
Katı halde sinterleşme, yayınma ile malzemenin taşınımını içerir. Bu proses için gerekli itici güç, boyun bölgesi ile tanenin yüzeyi arasında meydana gelen serbest enerji farkıdır [27-29]. Şekil 3.3.'de katı hal sinterleşmesinde malzemenin taşınımı şematik olarak görülmektedir [28].



Şekil 3.3. Katı hal sinterleşmesinde malzemenin taşınımı ile boyun oluşumu ve tanelerin kenetlenmesi.

b) Buhar Fazı Sinterleşmesi

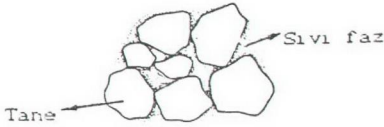
Bu prosesi iten güç, yüzey eğriligi nedeniyle buhar basıncında meydana gelen farktır. Tozların yüzeyi pozitif eğrilik yarıçapına sahip olup, buhar basıncı yüksektir. Diğer taraftan; iki tanenin birbirine temas ettiği boyun bölgesinde ise eğrilik çapı negatif olup, buhar basıncı düşüktür. Buhar fazı sinterleşmesinde, sinterleşmenin ilk adımları şekil 3.6.'da verilmiştir [28].



Şekil 3.6. Buhar fazı sinterleşmesinde, sinterleşmenin ilk adımları.

c) Sıvı Faz Sinterleşmesi

Bu proste, sinterleşme sıcaklığında fazlardan biri vizkos haldedir. Bu durum, özellikle ergime noktaları birbirinden çok farklı malzemelerin sinterleşmesinde görülür. Sıvı faz katı haldeki taneleri ıslatır ve taneler arasındaki ince kanallarda, yüksek kılcal basınç meydana gelir. Küçük tane boyutlarında; kapiler basınç miktarı daha fazla olup, sinterleşme kolaylaşır. Sıvı faz sinterleşmesi, silikat sistemlerinin çoğunda geçerli olan pişirme oluşumdur [27, 28]. Sıvı faz sinterleşmesinde, sinterleşmenin adımları şekil 3.7.'de şematik olarak görülmektedir [30].



Şekil 3.7. Sıvı faz sinterleşmesinin oluşumu.

3.4. Deney Numunelerine Uygulanan Test Yöntemleri

3.4.1. Kuruma, Pişme, Toplu Küçülme ve Kızdırma Kaybı

Silindirik deney numunelerinde meydana gelen kuruma (K.K.), pişme (P.K.) ve toplu küçülmeler (T.K.) aşağıdaki formüller yardımıyla hesaplanmıştır [14, 22, 23, 25, 31].

$$\% \text{ Kuruma Küçülmesi (K.K.)} = \frac{h_o - h_k}{h_o} \times 100$$

$$\% \text{ Pişme Küçülmesi (P.K.)} = \frac{h_k - h_p}{h_k} \times 100$$

$$\% \text{ Toplu Küçülme (T.K.)} = \frac{h_o - h_p}{h_o} \times 100$$

h_o = Presleme sonrası yükseklik (mm)

h_k = Kurutma sonrası yükseklik (mm)

h_p = Pişirme sonrası yükseklik (mm)

Numunelerin pişirilmesi sırasında; bünyelerindeki karbonun oksitlenmesi, sülfatların gaz şekline dönüşmesi ve kristal suların uzaklaşması sonucu ağırlıklarında bir azalma görülmüştür [25]. Kızdırma kaybı (K.Ka.) olarak

isimlendirilen bu azalma, aşağıdaki formüle göre hesaplanmıştır [14, 23, 25, 31].

$$\% \text{ Kızdırma Kaybı (K.Ka.)} = \frac{W_k - W_p}{W_k} \times 100$$

W_k = Kurutma sonrası ağırlık (kg)

W_p = Pişirme sonrası ağırlık (kg)

3.4.2. Gözenek Miktarı ve Bulk Yoğunluk

Etüvde 110 °C'de kurutulan numuneler tartılıp (W_a) uygun bir kaba konulduktan sonra, numunelerin yarısına kadar su doldurulmuş ve 5 dakika beklenmiştir. Kab bir ocak üzerine konarak ısıtılmış ve su kaynama noktasına yaklaşıncaya, numunelerin tümü su içerisinde kalacak şekilde kaba su ilave edilmiştir. 5 dakika kaynadıktan sonra oda sıcaklığına soğutulup, ince bir iplik bağlanan numuneler, teraziye asılarak su içerisinde tartılmıştır (W_b). Numuneler sudan çıkarılarak yüzeydeki ıslaklık kaba bir kağıt ile alınmış ve havada yeniden tartılmıştır (W_c). Bu tartımlardan aşağıdaki formüllere göre, gözenek yüzdesi (G) ve bulk yoğunluk (d_b) bulunmuştur [14, 23, 25, 31].

$$\% \text{ Gözenek (G)} = \frac{W_c - W_a}{W_c - W_b} \times 100$$

$$\text{Bulk Yoğunluk } (d_b) = \frac{W_a}{W_c - W_b} \times d_s \text{ (kg/m}^3\text{)}$$

d_s = Kullanılan sıvının yoğunluğu, deneyde su için 1000 kg/m^3 alınmıştır.

Gözenek miktarı, malzemenin içerdığı açık ve kapalı gözeneklerin toplamıdır. Bulk yoğunluk ise, numune ağırlığının tüm malzemenin hacmine bölünmesi ile elde edilir [23, 25, 31].

3.4.3. Su Emme

24 saat suda bekletme ve 5 saat suda kaynatma testleri uygulanarak deney numunelerinin su emme miktarları bulunmuştur.

a) 24 saat Suda Bekletme Testi

110 °C'de kurutulan numuneler oda sıcaklığına soğutulularak tartılmıştır. Daha sonra numuneler uygun bir kaba konulup, tamamen su içerisinde kalacak şekilde su ilave edilmiştir. 24 saat su içerisinde bekletildikten sonra yüzeyleri kabaca kurulan numuneler bekletilmeden tartılarak doygun ağırlıkları ölçülmüştür. Bu tartımlardan su emme miktarı aşağıdaki formül ile hesaplanmıştır [3, 25, 31-34].

$$\% \text{ Su Emme} = \frac{W_d - W_k}{W_k} \times 100$$

W_d = 24 saat suda bekletme sonrası ağırlık (kg)

W_k = 110 °C'de kurutma sonrası ağırlık (kg)

b) 5 saat Suda Kaynatma Testi

Yukarıdaki test'te olduğu gibi 110 °C'de kurutulan numuneler oda sıcaklığına soğutulup tartılmıştır. Her taraflarından suyun hareketine imkan verecek şekilde ince iki cam çubuk mesnet üzerine oturtulan numunelere, tamamen su içerisinde kalacak şekilde su ilave edilmiştir. Kaynama bir saat içerisinde gerçekleştirilmiş ve 5 saat kaynatma sonucunda numuneler oda sıcaklığına soğutulup, tartılarak doygun ağırlıkları tesbit edilmiştir. Kuru ve doygun ağırlıklar yardımıyla, aşağıdaki formüle göre su emme miktarı bulunmuştur [3, 14, 25, 31-33].

$$\% \text{ Su Emme} = \frac{W_{dk} - W_k}{W_k} \times 100$$

W_{dk} = 5 saat suda kaynatma sonrası ağırlık (kg)

W_k = 110 °C'de kurutma sonrası ağırlık (kg)

3.4.4. Basma Mukavemeti Testi

Deney numunelerinin basma mukavemetlerinin bulunmasında, kalıplamada kullanılan çekme-basma cihazından (SCHENK TREBEL 3962) faydalanılmıştır. Kırılıncaya kadar sürekli artan bir yük uygulanan numunelerin basma mukavemetleri, aşağıdaki formül ile hesaplanmıştır [31, 35].

$$F_b = \frac{P_k}{A_o}$$

F_b = Basma mukavemeti (N/mm²)

P_k = Kırılma anındaki yük (N)

A_o = Numunelerin basınç uygulanan yüzeyinin alanı (mm²)

3.4.5. Donma Testi

Uygun bir kap içerisine numuneler yerleştirildikten sonra, numune yüksekliğinin $1/4$ 'üne kadar su doldurulmuştur. Bir saat sonra numunelerin yarısı, ikinci saatin sonunda $3/4$ 'ü ve 24 saatin sonunda ise tamamı su içerisinde olacak şekilde kaba su doldurulmuştur. Bu durumda numuneler 48 saat su içerisinde bırakıldıktan sonra, sudan çıkarılarak bekletilmeksizin soğuk hava deposuna yerleştirilmiş ve dolap sıcaklığı 4 saatte -15°C 'ye düşecek şekilde ayarlanmıştır. Numuneler bu sıcaklıkta 2 saat bekletilip, soğuk hava deposundan çıkarılarak oda sıcaklığındaki su kabına tamamen su içerisinde kalacak şekilde yerleştirilmiştir. Don çözüldükten sonra numuneler dikkatle incelenip; çatlama, kopma, pullanma ve dağılma gibi hasarların meydana gelip gelmediği tesbit edilmiştir [35].

3.4.6. Pamuklaşma Testi

Pamuklaşma; seramik malzemelerde bulunan suda eriyebilen tuzların, kılcal gözeneklerden hareket ederek yüzeye çıkmaları ve burada suyun buharlaşması sonucu birikmesi olayıdır. Pamuklaşmaya sebep olan tuzların başlıcaları; sülfatlar, klorürler, nitratlar ve karbonatlardır [36].

Uçucu kül/kil karışımlarından yapılan numunelerin içerdikleri çözülebilir tuzların miktarını belirlemek amacıyla, pamuklaşma testi uygulanmıştır.

Bir kap içerisine yerleştirilen numunelere yüksekliklerinin $1/3$ 'ü kadar saf su ilave edilmiştir. Numuneler tarafından emilen suyun tamamen buharlaşarak uzaklaşmasından sonra, aynı işlem tekrarlanmış ve aşağıda ifade edilen özelliklerin olup olmadığı kontrol edilmiştir [32].

a) Zayıf pamuklaşma : Numunelerde, yüzeylerinin % 10'unu geçmeyecek oranda ince tuz tabakasının bulunması,

b) Orta pamuklaşma : Numune yüzeylerinde tozlaşma ve pullanma olmaksızın % 50'ye varan oranlarda tuz tabakasının bulunması,

c) Ağır pamuklaşma : Numune yüzeylerinde tozlanma ve pullanma olmaksızın % 50'den fazla oranda tuz tabakasının bulunması,

d) Ciddi pamuklaşma : Yüzeylerde tozlanma ve pullanma ile birlikte, büyük miktarlarda tuz tabakasının bulunması.

BÖLÜM IV

4. DENEY SONUÇLARI

4.1. Hammadde Karakterizasyonu

4.1.1. Mineralojik Analiz

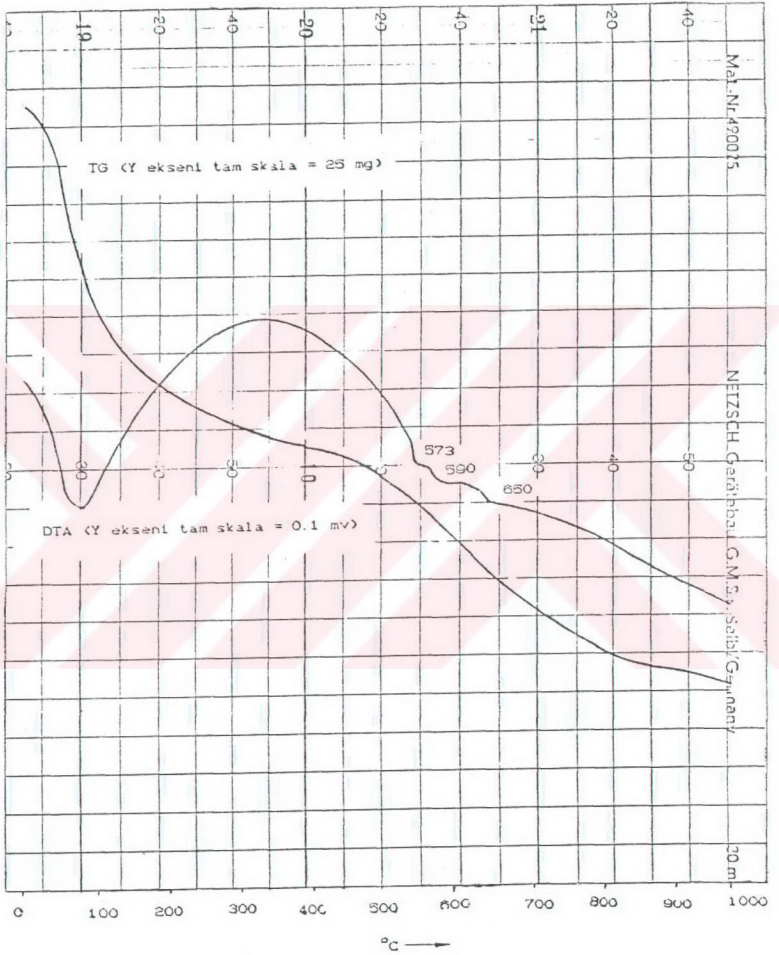
Diferansiyel termal analiz ve termogravimetri ile, x-ışınları difraksiyon analizi olarak iki yöntem ile yapılan mineralojik analiz sonuçları aşağıda verilmiştir.

a) Diferansiyel Termal Analiz (DTA) ve Termogravimetri (TG)

10 °C/dak. ısıtma hızında elde edilen kil örneğinin DTA ve TG eğrileri şekil 4.1.'de verilmiştir.

DTA eğrisinde (y eksenı tam skala = 0.1 mv), 573° C'de bir pik görölmektedir. Bu sıcaklıkta α -kuvars, β -kuvars dönüşmektedir. Kaolenin kristal suyunu kaybederek metakaolene dönüşümünü gösteren endotermik pik, DTA eğrisinde 590 °C'de görölmektedir. 650 °C'de görölen pik ise; kil örneğinde montmorillonit olduğunu göstermekte olup, montmorillonitin kristal suyunu kaybetmesi ile oluşmaktadır [14, 23, 25, 31]. Ancak, bu tür karışık faz içeren numunelerde DTA eğrisinden yararlanarak faz teşhisi zor olmaktadır. Bu sebeble kil örneğinin mineralojik analizi, x-ışınları difraksiyonu sonuçları ile desteklenmiştir.

Ağırlık azalmasını gösteren TG eğrisi (y eksenı tam skala = 25 mg) incelendiğinde ise, kil örneğindeki fiziksel suyun uzaklaşması nedeni ile 110 °C'de egride ani bir düşme gözlenmektedir. Bu sıcaklıktan sonra, kristal suların uzaklaşması sonucu egride lineer bir azalma görölmektedir.



Sekil 4.1. Kıl örneğinin DTA ve TG eğrileri.

b) X-Işınlari Difraksiyon Analizi

Uçucu kül örnekleri ile yapılan x-ışınları difraksiyon analizinde, örneklerde bulunan bileşikler aşağıda tablolar halinde verilmiştir. Ayrıca, DTA'sı yapılan kül örneğinin mineralojik analizinde daha detaylı bilgi sahibi olmak için, kilin de x-ışınları difraksiyonu yapılmıştır. X-Işınlari analizinde, $\lambda = 1.7902 \text{ \AA}$ olan Co K_{α} ışın demeti kullanılmıştır.

Bu tablolarda; örneklerde bulunan bileşikler, bu bileşiklerin difraksiyon paternlerinden elde edilen 2θ açıları, $n.\lambda = 2.d.\sin\theta$ (Bragg Kanunu) ile hesaplanan d değerleri (düzlemler arası mesafe, $\text{\AA}$) ve bileşiklerin bulunduğu ASTM kart numaraları verilmiştir.

X-ışınları analizi sonucunda; E_1 olarak kodlanan uçucu kül örneğinde (tablo 4.1.) eşit miktarlarda α -kuvars ve enstatit, çok miktarda da amorf yapıda kül tanelerinin bulunduğu tesbit edilmiştir.

Tablo 4.1. E_1 uçucu külünde bulunan kimyasal bileşikler.

2θ ($^{\circ}$)	d ($\text{\AA}$)	Bileşik	ASTM Kart No
24.25	4.26	α -kuvars	5-490
31.08	3.34		
50.00	2.12		
59.00	1.81		
35.32	2.95	Enstatit	26-876
38.57	2.71		
41.90	2.50		
67.55	1.61		

E₂ uçucu kül örneğinde (tablo 4.2.), yaklaşık eşit miktarlarda α -kuvars, ve enstatit bulunduğu, daha az miktarda kalsiyum sülfat ve çok miktarda da amorf yapıda kül tanelerinin olduğu x-ışınları analizi ile belirlenmiştir.

Tablo 4.2. E₂ uçucu külünde bulunan kimyasal bileşikler.

2 θ (°)	d (Å°)	Bileşik	ASTM Kart No
24.25 31.08 59.00 71.00 76.25 80.40 81.30	4.26 3.34 1.81 1.54 1.45 1.38 1.37	α -kuvars	S-490
32.80 35.32 38.57 41.90 52.32 74.42	3.17 2.95 2.71 2.50 2.03 1.48	Enstatit	26-876
29.72 36.30 42.50 45.18 50.97	3.49 2.85 2.47 2.33 2.08	Kalsiyum Sülfat	37-184

E₃ uçucu kül örneğinde ise (tablo 4.3.) kalsiyum sülfat, eşit miktarlarda α -kuvars ve enstatit, çok miktarda da amorf yapıda kül tanelerinin bulunduğu görülmüştür.

Tablo 4.3. E₃ uçucu kütünde bulunan kimyasal bileşikler.

2 θ (°)	d (Å°)	Bileşik	ASTM Kart No
24.25 31.08 64.82 65.80	4.26 3.34 1.67 1.65	α -kuvars	S-490
29.72 36.60 42.50 45.18 48.01 50.97 57.25 61.52 66.15	3.49 2.85 2.47 2.33 2.20 2.08 1.87 1.75 1.64	Kalsiyum Sülfat	37-184
32.48 41.90 50.20 74.42	3.20 2.50 2.11 1.48	Enstatit	26-876

Kil örneği, aşağıdaki tablodan da (tablo 4.4.) görüle-
bileceği gibi çok kompleks bir yapı göstermektedir. Kil
örneğinin çoğunluğunu montmorillonit oluşturmaktadır.
Kilin geri kalan kısmında ise; eşit miktarlarda kaolen,
illit, α -kuvars ve az miktarda da anortit mevcuttur.

Tablo 4.4 Kıl örneğinde bulunan kimyasal bileşikler.

2θ (°)	d (Å°)	Bileşik	ASTM Kart No
14.50 29.25 45.18	7.09 3.56 2.32	Kaolen	29-1488
10.53 20.54 53.45	10.02 5.02 2.00	Illit	26-911
7.00 20.60 21.75 34.35 40.35	15.00 5.01 4.50 3.02 2.58	Montmorillonit	13-135
32.55	3.20	Anortit	12-301
24.25 31.08 59.00	4.26 3.34 1.61	α-kuvars	5-490

Tablolarda verilen bileşiklerin ASTM kartlarında yer alan kimyasal formülleri aşağıda görülmektedir.

Montmorillonit : $\text{Ca}_{0.24} \cdot \text{Na}_{0.01} \cdot \text{Mg}_{0.36} \cdot \text{Fe}_{0.02} \cdot$

$\text{Al}_{1.75} \cdot \text{Si}_{3.87} \cdot \text{O}_{10} \cdot (\text{OH})_2 \cdot 1.078 \text{H}_2\text{O}$

Illit : $(\text{K}, \text{H}_3\text{O}) \cdot \text{Al}_2\text{Si}_3 \cdot \text{AlO}_{10} \cdot (\text{OH})_2$

Kaolen : $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$

Anortit : $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$

α -kuvars : SiO_2

Enstatit : $(\text{Mg}, \text{Fe}) \cdot \text{SiO}_3$

Kalsiyum Sülfat: CaSO_4

X-Işınları difraksiyon çalışmaları sonucu elde edilen paternler çok büyük oldukları için, bu paternlerin bilgisayar simulasyon eğrileri çizilmiştir. Çizilen "2 θ - X-Işınları kuanta sayımı" şematik diyagramları Ekler bölümünde verilmiştir.

4.1.2. Tane Boyutu ve Özgül Ağırlık Analizi

Uçucu küllerin tane boyutu analiz sonuçları şekil 4.2.'de görülmektedir. E_1 olarak kodlanan kül örneğindeki uçucu kül tanelerinin manyetik özellik göstermeleri sebebiyle, tane boyut analizi yapılamamıştır. Analiz sırasında, uçucu kül tanelerini dağıtmak amacıyla ağırlıkça % 0.05 kalgon kullanılmıştır.

Şekil 4.2.'de; x eksenini μm olarak tane boyutunu, y ekseninde belirtilen tane boyutunun altındaki % madde miktarını ifade etmektedir. Uçucu küllerin tane boyutu dağılım histogramlarında şekil 4.3.-4.4.'de görülmektedir.

E_2 uçucu külünün tane boyut dağılımı 5-80 μm , E_3 külünün ise 10-70 μm arasındadır (şekil 4.2.). E_2 uçucu külünde tanelerin % 61'ü 20-35 μm arasında bir boyut dağılımı göstermesine rağmen (şekil 4.3.), E_3 uçucu külünde tanelerin % 85'i 15-20 μm arasında bir dağılım göstermektedir (şekil 4.4.). Ayrıca, E_3 uçucu külünde bulunan tanelerin % 95'inin tane boyutu 20 μm 'den daha küçüktür (şekil 4.2.). Görüldüğü gibi, E_3 uçucu külünün tane boyutları E_2 külüne

göre daha dar bir aralıkta değişmektedir ve E_2 uçucu küllünden daha küçük boyutlu tanelere sahiptir.

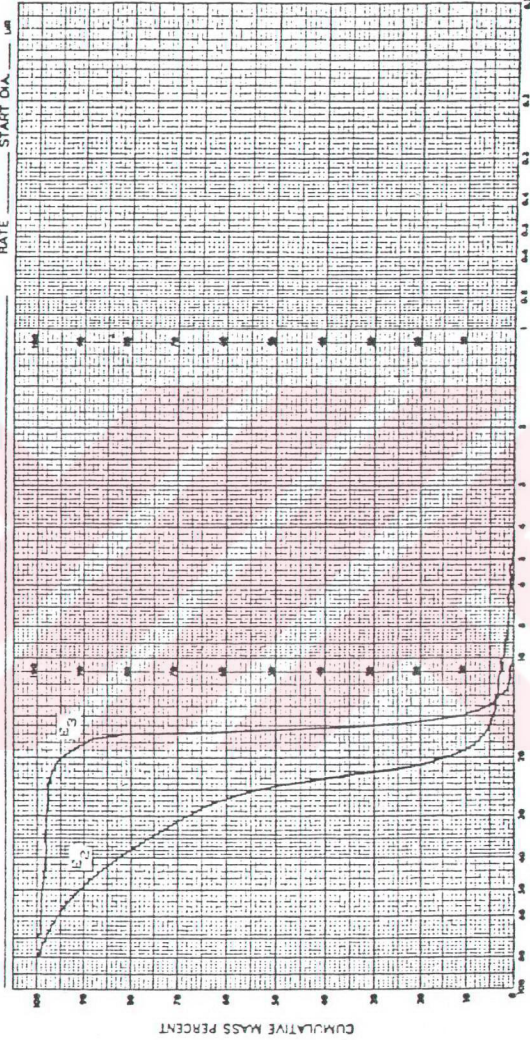
Piknometre ile yapılan özgül ağırlık ölçümlerinde kil örneğinin özgül ağırlığı 2350 kg/m^3 olarak belirlenmiştir. E_1 , E_2 ve E_3 olarak kodlanan uçucu küllerinde sırasıyla 1470, 1760 ve 2010 kg/m^3 özgül ağırlığa sahip oldukları tesbit edilmiştir.

Uçucu küllerin özgül ağırlıkları, küllerin ortalama özgül ağırlık değeri 2150 kg/m^3 'den [9] daha düşüktür. Bu sonuç E_1 , E_2 ve E_3 uçucu küllerinin demir miktarının az; alümina, kuvars ve karbon miktarının ise daha fazla olmasından kaynaklanmaktadır [2].

PARTICLE SIZE DISTRIBUTION

DATE 5/12/1991
BY
TEMPERATURE °C
RATE START DIA. μ m

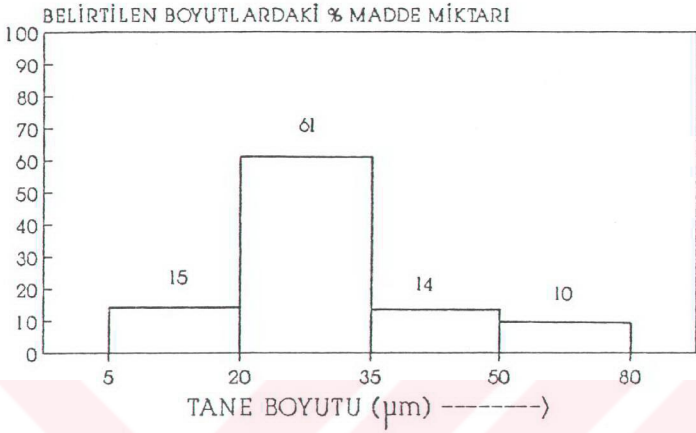
SAMPLE IDENTIFICATION Uçucu KUL (E_2 ve E_3)
Density g/cc LIQUID Density g/cc Viscosity cp
Preparation



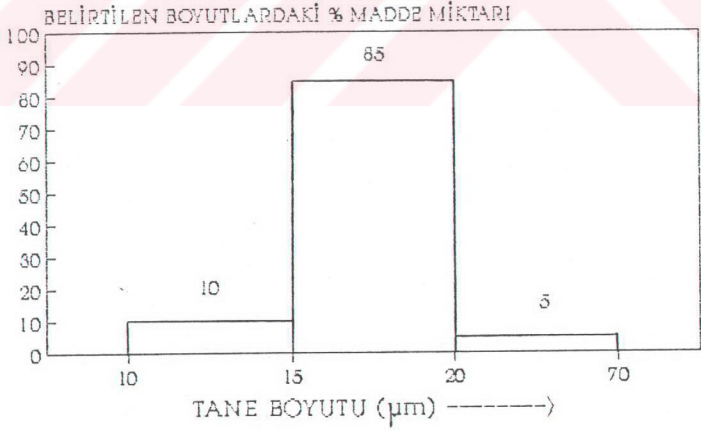
EQUIVALENT SPHERICAL DIAMETER, μ m

 micromeritics
instrument corporation

Şekil 4.2. E_2 ve E_3 uçucu küllerinin kümülatif frekans eğrisi olarak tane boyutu dağılımı.



Sekil 4.3. E₂ uçucu külünün tane boyutu dağılım histogramı.



Sekil 4.4. E₃ uçucu külünün tane boyutu dağılım histogramı.

4.1.3. Taramalı Elektron Mikroskobu İncelemesi ve Elektron Mikroprob Analizi

Uçucu küllerin yalıtkan olmaları sebebiyle, yaklaşık olarak 200 A° karbon ile kaplanarak elektron mikroskobunda çekilen ikincil elektron görüntüleri, şekil 4.5. - 4.7.'de verilmiştir.

Uçucu kül örneklerinin en küçük büyütme-lerde çekilen ikincil elektron görüntülerini içeren şekil 4.5. incelen-diğinde; en iri tanelere E_1 uçucu külünün sahip olduğu görülmektedir. Bu durum şekil 4.6. (a)'da daha belirgin olarak ortaya çıkmaktadır. E_1 uçucu külünün 300 büyütme-deki ikincil elektron görüntüsünde görülen iri aglomere tane (şekil 4.6. (a)), E_2 ve E_3 uçucu külünün 1000 büyüt-melerde çekilen ikincil elektron görüntülerindeki (şekil 4.6. (b), (c)) tanelerden daha büyük bir tane boyutuna sahiptir. Şekil 4.5. (a), (b)'de yer alan E_2 ve E_3 uçucu küllerinin 1000 büyütmedeki ikincil elektron görüntülerin-den de, en ince tane boyut dağılımına E_3 uçucu külünün sahip olduğu ortaya çıkmaktadır. E_3 uçucu külünün 2000 büyütmede çekilen ikincil elektron görüntüsünde şekil 4.7.'de verilmiştir.

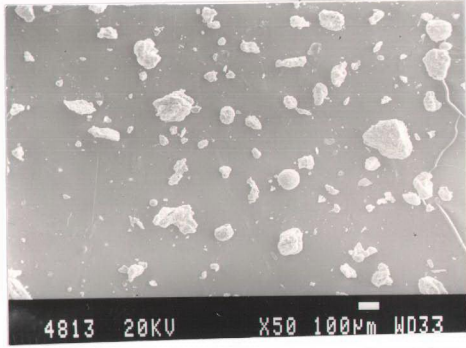
Yukarıdaki bahsedilen ikincil elektron görüntülerin-den; uçucu kül örneklerinde daha çok aglomere tanelerin bulunduğu, küresel tanelerin ise çok daha az olduğu görülmektedir. Aglomere tane; termik santral kazanlarında yük-sek sıcaklıklarda (1500-1700 °C) kömürün yakılması ile oluşan uçucu küllerin [1, 2] soğuması sırasında, tamamen erimiş tanelerle, erime sıcaklığı yüksek kristal yapıdaki tanelerin birleşmesi sonucunda meydana gelen iri bir tane-dir. Aglomere tanelerde bulunan amorf bölgeler, aglomere tanelerin içerisindeki tamamen erimiş camsı yapıyı göster-mektedir. Küresel taneler de, erime sıcaklığı düşük ele-mentlerin oluşturduğu amorf yapıdaki camsı fazı içermekte-dir.

Uçucu küllerin elektron mikroprob analizi (elementel analiz) sonuçları şekil 4.8. - 4.10.'da verilmiştir. Bu şekillerde x ekseni, x-ışını demetinin kinetik enerjisini, y ekseni de kuantal sayımını ifade etmektedir.

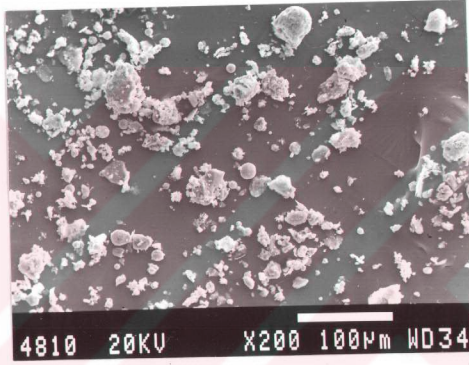
Büyük çoğunluğunun iri aglomere tanelerden oluştuğu elektron mikroskobu fotoğraflarından belirlenen E_1 uçucu kül örneği için yalnızca aglomere tane, diğer örnekler için ise aglomere tanelerin yanısıra küresel tanelerinde mikroprob analizleri yapılmıştır.

Yapılan analizlerde aglomere ve küresel tanelerin Mg, Al, Si, Ca, S, K, Ti, Fe, Na ve Mn'dan oluştuğu tesbit edilmiştir. Küresel uçucu kül tanelerinde (şekil 4.9. (a)- 4.10. (a)) Si, Al, K, Ca ve Fe'in pikleri diğerlerinden daha uzundur ve küresel tanelerin bu elementlerce daha zengin olduklarını belirtmektedir. Aglomere tanelerde ise en şiddetli pikleri Si, Al, Ca ve Fe vermektedir. E_1 ve E_2 uçucu küllerinin aglomere tanelerinde S ve K olmasına rağmen (şekil 4.8. - 4.9. (b)), E_3 uçucu külünde bu elementlerden sadece S bulunmaktadır (şekil 4.10. (b)). E_2 uçucu külü küresel tanesinde (şekil 4.9. (a)), Mn ve Na'da mevcuttur.

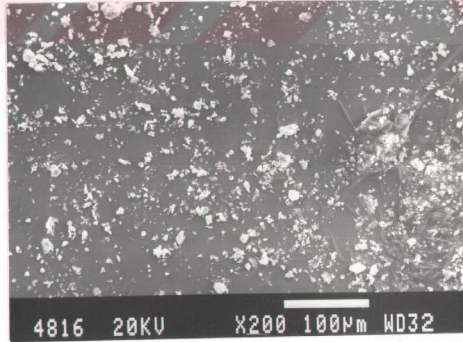
Toprak alkali elementleri (Ca, K, Na), aglomere tanelerin içerisindeki amorf bölgelerde ve küresel tanelerde daha fazla görülmektedir. Çünkü bu elementler, erime sıcaklığını düşürerek camı yapıda amorf tanelerin oluşmasına yol açmaktadır.



(a)

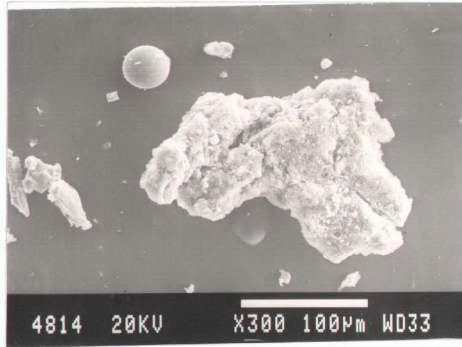


(b)

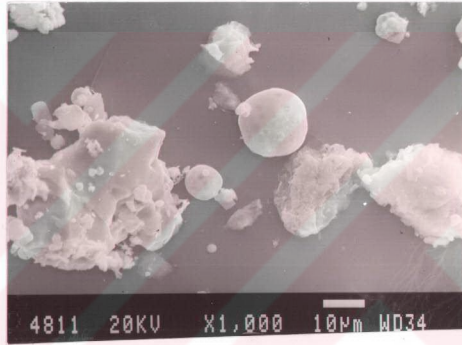


(c)

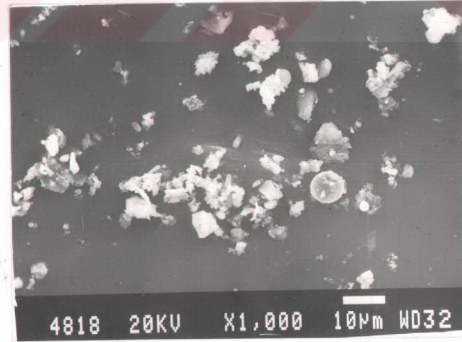
Şekil 4.5. (a) E_1 uçucu külünün 50 büyütmede, (b) E_2 uçucu külünün 200 büyütmede, (c) E_3 uçucu külünün 200 büyütmede çekilen taramalı elektron mikroskobu ikincil elektron görüntüleri.



(a)

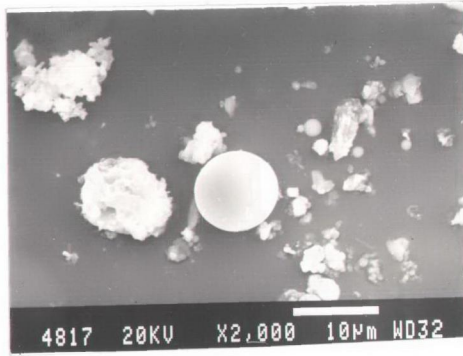


(b)

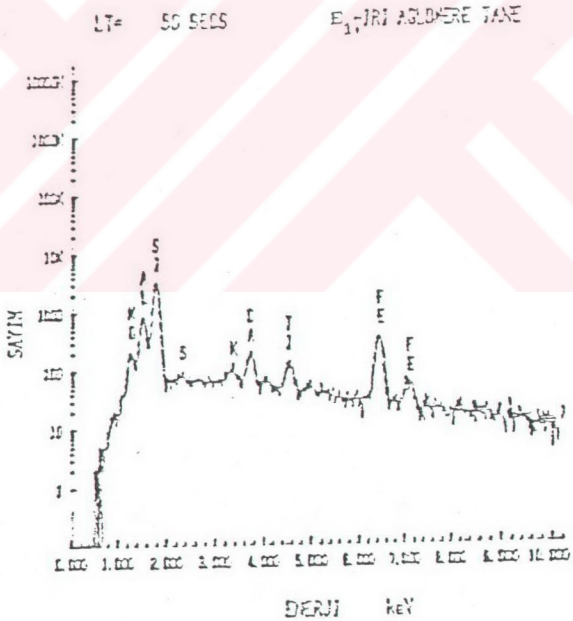


(c)

Sekil 4.6. (a) E_1 uçucu külünün 300 büyütmede, (b) E_2 uçucu külünün 1000 büyütmede, (c) E_3 uçucu külünün 1000 büyütmede çekilen taramalı elektron mikroskobu ikincil elektron görüntüleri.



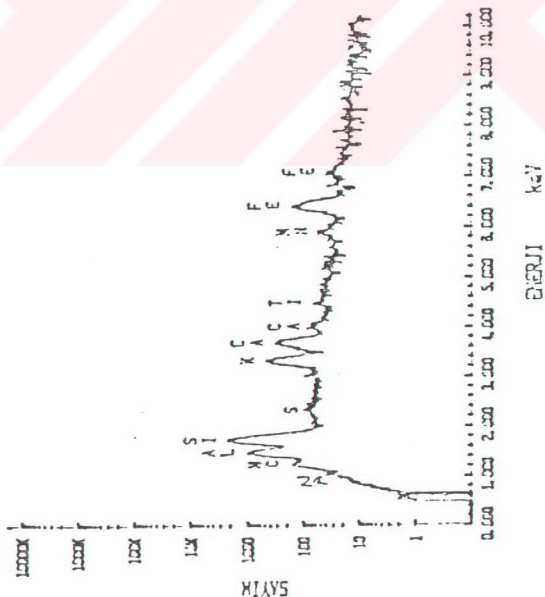
Sekil 4.7. E₃ uçucu külünün 2000 büyütmede çekilen taramalı elektron mikroskobu ikincil elektron görüntüsü.



Sekil 4.8. E₁ uçucu külünün, iri aglomere tanelerinin elektron mikroprob analizi.

E₂-KÜRESEL TANE

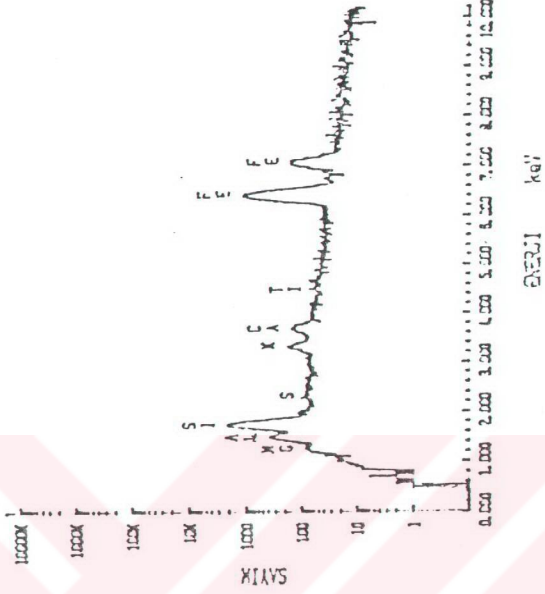
LT= 50 SECS



(a)

LT= 50 SECS

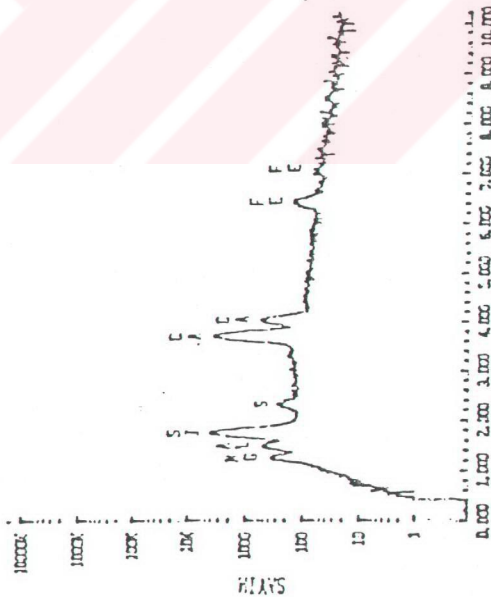
E₂-AGLOMERE TANE



(b)

Sekil 4.9. E₂ ucucu kullunlu (a) küresel tanelerin, (b) aglomere tanelerin elektron mikroprob analizi.

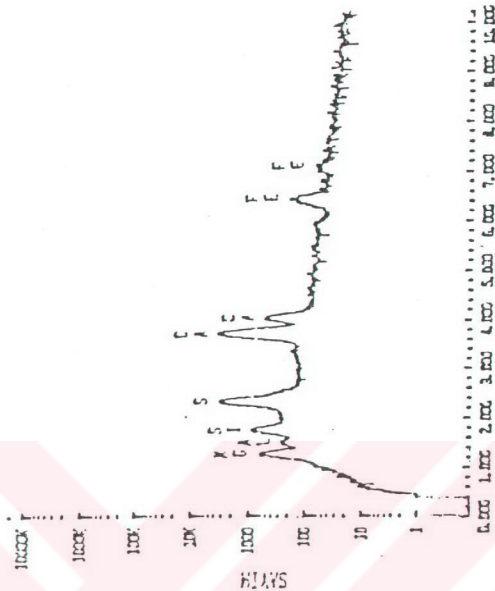
LT= 50 SECS E₃-KURESEL TAYE



DERJ keV

(a)

LT= 50 SECS E₃-AGLOMERE TAYE



DERJ keV

(b)

Sekil 4.10. E₃ urecu kulluñun (a) kuresel tanelerinin, (b) aglomere tanelerinin elektron mikroprob analizi.

4.2. Deneysel Çalışma Sonuçları

Her bir karışımdan 12 adet üretilen ve 6 adedi 900 °C 'de, 6'sıda 1000 °C'de pişirilen numuneler, aşağıdaki tabloda ifade edilen sayılarda deneylerde kullanılmıştır. Tabloda verilen numune sayıları yalnızca bir karışımdaki numuneler için verilmiş olup, diğer karışımlardan da aynı sayılarda numuneler kullanılmıştır. Elde edilen deney sonuçları, her bir test için kullanılan numunelerden elde edilen sonuçların ortalaması olarak alınmıştır.

Tablo 4.5. Deneylerde kullanılan numune sayıları

Test ismi	Kullanılan numune sayısı	
	$T_p = 900 \text{ } ^\circ\text{C}$	$T_p = 1000 \text{ } ^\circ\text{C}$
Gözenek miktarı ve bulk yoğunluk	1	1
Su emme	1	1
Basma	2	2
Donma	1	1
Pamuklaşma	1	1

Yukarıdaki tabloda T_p sembolü, pişirme sıcaklığını ifade etmektedir.

Kuruma, pişme, toplu küçülme ve kızdırma kaybı değerleri; her bir numunenin presleme, kurutma ve pişirme sonrası elde edilen boyut ve ağırlıklarının ortalamaları alınarak hesaplanmıştır.

4.2.1. Kuruma, Pişme, Toplu Küçülme ve Kızdırma Kaybı

Kalıplama, kurutma ve pişirme işlemleri sonrası deney numunelerinin ortalama boyutları ve ağırlıkları tablo 4.6. - 4.7. 'de verilmiştir. Numunelerin kuruma, pişme ve toplu küçülmeleri ile kızdırma kaybı değerleri tablo 4.8. - 4.9. 'da görülmektedir. Ayrıca, tablolardaki değerlerin grafikleri de şekil 4.11. - 4.14. 'de verilmiştir.

Kuruma küçülmesi eğrisi (şekil 4.11.), kil miktarındaki artış ile yaklaşık iki kademeli lineer olarak artmaktadır. Bu artış % 0-50 kil aralığında az miktarda olup, bu orandan sonra eğride dikkate değer bir yükselme görülmektedir. Karışımdaki kil miktarının % 50'yi geçmesiyle birlikte, kuruma küçülmesi miktarı önemli ölçüde artmakta ve % 100 kilde maksimum noktaya ulaşmaktadır.

Numuneler şekillendirilmeden önce karışıma ilave edilen su, küllerin plastiklik özelliği olmadığı için [1], yalnızca kil taneleri tarafından absorbe edilmektedir. Kurutma sırasında numunelerdeki suyun (fiziksel su) buharlaşması sonucu, taneler birbirine yaklaşmakta ve hacimsel bir küçülme oluşmaktadır [14, 22, 31]. Kuruma küçülmesi olarak isimlendirilen bu küçülme, karışımdaki kil oranının artışıyla artmaktadır.

Kilsiz numunelerde pişme küçülmesi (şekil 4.12.); 900 °C'de pişirilen numunelerde % 30 kil ilavesine kadar, 1000 °C'de pişirilen numunelerde ise % 50 kil ilavesine kadar daha fazladır. % 100 uçucu küllü numunelerde plastisiteyi sağlamak için karışıma % 2 oranında ilave edilen nişastanın [1], yüksek sıcaklıklarda yanarak uzaklaşması pişme küçülmesine sebep olmaktadır. Aynı şekilde, uçucu küllerin içerdikleri karbonun yüksek sıcaklıklarda CO ve CO₂ olarak uzaklaşmasında kilsiz numunelerde pişme küçülmesini etkileyen faktörlerden birisidir. Numunelerin pişirilmesi sırasında, erime sıcaklıkları düşük alkali elementlerden oluşan küresel amorf tanelerin ve aglomere tanelerdeki

amorf bölgelerin sıvı faz oluşturmaları ile meydana gelen sıvı faz sinterleşmesi de pişme küçülmesi oluşturmaktadır [5, 28]. Ayrıca, uçucu küllerde az miktarda bulunan kristal faz içerisindeki CaSO_4 'ün de, 900-1200 °C'lerde parçalanmasında [37, 38] çok küçük miktarlarda olsa bile küçülme-yeye yol açmaktadır. Sıcaklık artışı ile sinterleşme miktarının artması [5, 27, 28] ve CaSO_4 'ün daha fazla parçalanması [37, 38] sebebiyle; 1000 °C'de pişirilen numunelerin pişme küçülmeleri, 900 °C'de pişirilenlerden daha fazladır.

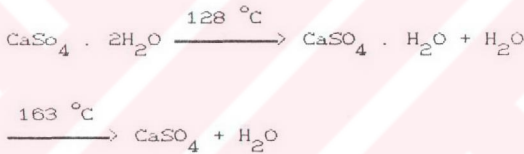
% 10 kil içeren numunelerde, kilsiz numunelere göre pişme küçülmesi daha azdır. Çünkü, % 10 kil ilavesiyle birlikte kül tanelerinin birbirleri ile teması önlenerek, sıvı faz sinterleşmesi azalmaktadır. Ayrıca; kil içeren numunelerde nişastanın olmayışı ve dolayısıyla nişastanın yanması ile oluşan küçülme ortadan kalktığı için, kil ilavesi ile birlikte pişme küçülmesinde bir azalma görülmektedir.

Kil içermeyen numunelere kil ilavesiyle birlikte azalma gösteren pişme küçülmesi, artan kil yüzdesi ve sıcaklık ile artmaktadır. Kilde bulunan alkali elementler, camsı sıvı faz oluşturmaktadır. Sıcaklığın artması ile artan sinterleşme sonucunda sıvı faz miktarıda artmakta ve dolayısı ile pişme küçülmesinde de artış meydana gelmektedir [5, 27, 28]. Ayrıca; sıvı faz sinterleşmesi oluşmadan önce, kompleks bir karışım olan kilin 400-600 °C arasında kristal suyunu kaybetmesi [14, 31, 38], uçucu küllerin sıvı faz oluşturmaları (killere göre daha az), uçucu küllerdeki karbonun yanarak uzaklaşması ve CaSO_4 'ünde parçalanması [37, 38], numunelerde pişme küçülmesine neden olmaktadır.

Kuruma ve pişme küçülmelerinin toplamı olarak ifade edilen toplu küçülme [23] eğrisi incelendiğinde, pişme küçülmesine benzer bir eğim taşıdığı görülmektedir (şekil 4.13.).

Kil içermeyen numunelerde yüksek miktarlarda görülen kızdırma kaybı (şekil 4.14.); uçucu kül karışımına kil ilavesiyle (% 10) birlikte bir azalma göstermesine rağmen, artan kil miktarı ile tekrar artış göstermektedir. Nişastanın ve karbonun uzaklaşması, CaSO_4 'ün parçalanması [37, 38] ve kilin kristal suyunu kaybetmesi [14, 31, 38] ile numunelerin ağırlıklarında bir azalma olmaktadır.

Uçucu küllerde az miktarda olan kristal fazdaki CaSO_4 , plastisiteyi sağlamak için harmanlamada karışıma ilave edilen suyla reaksiyona girerek gıpsum'a dönüşmekte ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)'dur. Daha sonra numunelerin pişirilmesinde, aşağıdaki reaksiyonlara göre gıpsum'daki suyun uzaklaşması ile bir ağırlık kaybı meydana gelmekte olup (pişme küçülmesi olmaksızın), tekrar CaSO_4 oluşmaktadır [39].



Fakat, uçucu küllerde çok miktarda amorf faz vardır. Az miktarda bulunan kristal faz içerisindeki CaSO_4 'ün uçucu kül karışımına su ilave edilmesi ile gıpsum'a dönüşmesi, pişirme sırasında gıpsumun suyunu kaybederek tekrar CaSO_4 'ün oluşması ve parçalanması işlemleri, pişme küçülmesi ile kızdırma kaybını çok az etkilemektedir. Aynı zamanda uçucu küllerdeki sıvı faz sinterleşmeside, küçük miktarlarda oluşmaktadır.

Kil ilavesiyle birlikte karışıma nişasta katılmadığı için, % 10 kil içeren numunelerde kızdırma kaybı daha azdır. Artan kil %'si ile daha fazla kristal su uzaklaşmakta ve egride bir artış oluşturmaktadır.

Tablo 4.6. Kalıplama ve kurutma sonrası numunelerin boyutları ve ağırlıkları

% Kil	Kalıplama sonrası			Kurutma sonrası		
	Çap (mm)	Yükseklik (mm)	Ağırlık (kg)	Çap (mm)	Yükseklik (mm)	Ağırlık (kg)
-	40.50	25.30	0.0400	40.40	25.28	0.0354
10	40.40	25.26	0.0426	40.40	25.24	0.0375
20	40.40	24.70	0.0441	40.40	24.67	0.0386
30	40.40	25.25	0.0483	40.35	25.20	0.0420
40	40.40	24.85	0.0491	40.35	24.78	0.0437
50	40.40	22.58	0.0489	40.35	22.50	0.0424
60	40.40	23.48	0.0541	40.30	23.35	0.0475
75	40.40	24.00	0.0615	40.25	23.77	0.0540
100	40.20	23.85	0.0675	39.75	23.54	0.0590

Tablo 4.7. Farklı sıcaklıklarda pişirme sonrası numunelerin ortalama boyutları ve ağırlıkları.

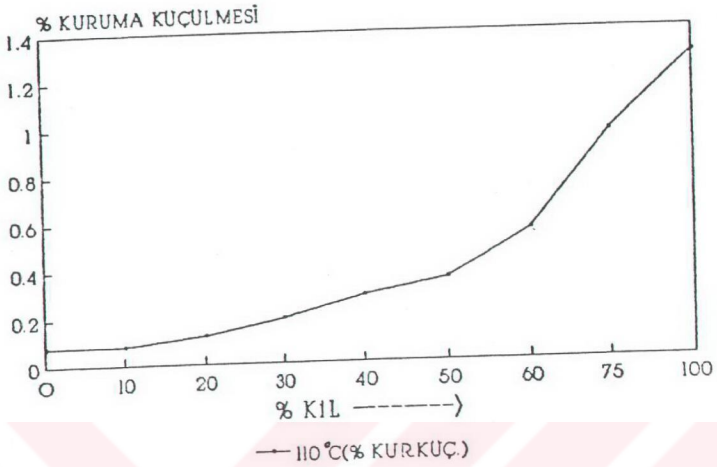
% Kil	900°C'de pişirme sonrası			1000°C'de pişirme sonrası		
	Çap (mm)	Yükseklik (mm)	Ağırlık (kg)	Çap (mm)	Yükseklik (mm)	Ağırlık (kg)
-	40.30	25.22	0.0328	40.00	25.05	0.0328
10	40.20	25.22	0.0355	40.00	25.20	0.0355
20	40.30	24.64	0.0365	40.10	24.60	0.0363
30	40.25	25.14	0.0397	40.20	25.10	0.0394
40	40.25	24.70	0.0409	40.25	24.62	0.0408
50	40.20	22.40	0.0396	40.20	22.30	0.0395
60	40.20	23.20	0.0443	40.20	23.10	0.0441
75	40.15	23.56	0.0501	40.15	23.44	0.0500
100	39.80	23.25	0.0545	30.70	23.15	0.0544

Tablo 4.8. Kuruma ve pişme küçülmeleri.

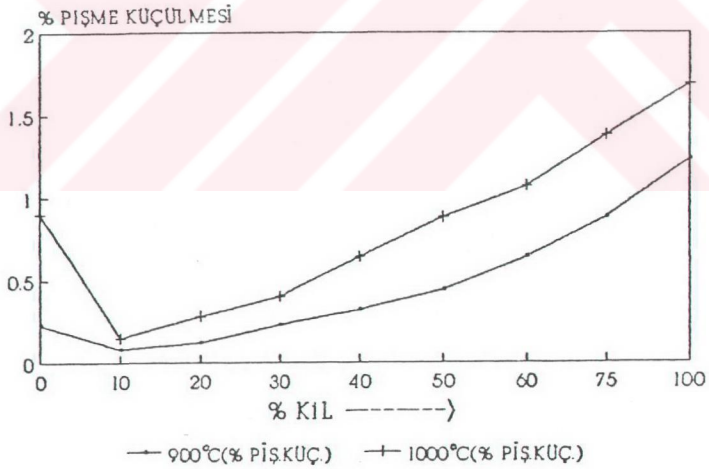
% Kil	% Kuruma küçülmesi	% Pişme küçülmesi	
		$T_p=900^{\circ}\text{C}$	$T_p=1000^{\circ}\text{C}$
-	0.08	0.23	0.90
10	0.08	0.08	0.15
20	0.12	0.12	0.28
30	0.19	0.23	0.40
40	0.28	0.32	0.64
50	0.35	0.44	0.88
60	0.55	0.64	1.07
75	0.96	0.88	1.38
100	1.29	1.23	1.69

Tablo 4.9. Toplu küçülme ve kızdırma kayıpları.

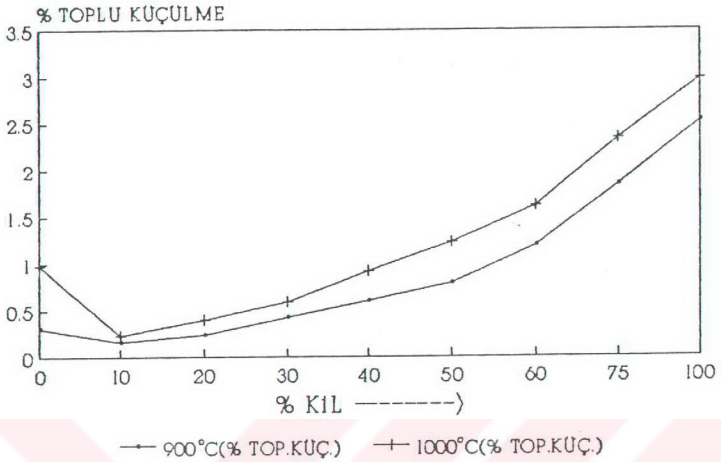
% Kil	% Toplu küçülme		% Kızdırma kaybı	
	$T_p=900^{\circ}\text{C}$	$T_p=1000^{\circ}\text{C}$	$T_p=900^{\circ}\text{C}$	$T_p=1000^{\circ}\text{C}$
-	0.31	0.98	7.34	7.34
10	0.16	0.23	5.33	5.33
20	0.24	0.40	5.44	5.95
30	0.42	0.59	5.47	6.20
40	0.60	0.92	6.40	6.63
50	0.79	1.23	6.60	6.83
60	1.19	1.62	6.73	7.15
75	1.84	2.34	7.05	7.23
100	2.52	2.98	7.62	7.80



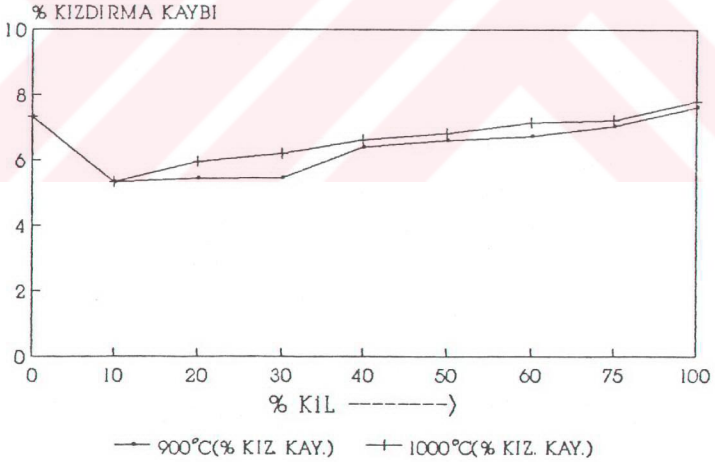
Sekil 4.11. Kuruma küçülmesinin kil ilavesi ile değişimi.



Sekil 4.12. Pişme küçülmesinin pişirme sıcaklığı ve kil ilavesi ile değişimi.



Şekil 4.13. Toplu küçülmenin pişirme sıcaklığı ve kıl ilavesi ile değişimi.



Şekil 4.14. Kızdırma kaybının, pişirme sıcaklığı ve kıl ilavesi ile değişimi.

4.2.2. Gözenek Miktarı ve Bulk Yoğunluk

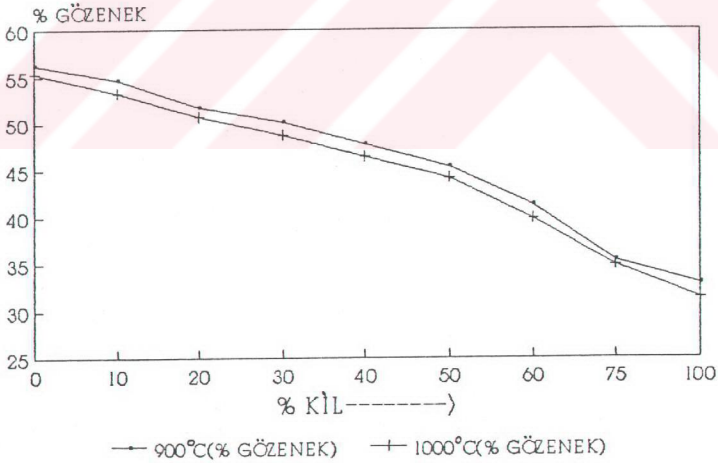
Gözenek miktarı ve bulk yoğunluk değerleri tablo 4.10.'da ve bu değerlerin grafikleride şekil 4.15. - 4.16.'da verilmiştir.

Gözenek miktarı artan kil yüzdesi ile azalmaktadır (şekil 4.15.). Kilde ve uçucu küllerde bulunan toprak alkali elementler pişirme sırasında meydana gelen sinterleşme ile camsı faza dönüşmekte ve sıvı faz sinterleşmesi oluşturmaktadır. Numunelerdeki gözeneklerin dolmasına sebep olan camsı fazın artan kil miktarı ile artmasıyla, gözenek miktarında da bir azalma görülmektedir [14, 22, 31]. Sinterleşme sıcaklığı arttıkça camsı faz oluşumuda artacağı için [5, 27, 28], 1000 °C'de pişirilen numunelerin gözenek miktarı, 900 °C'de pişirilen numunelere göre daha azdır.

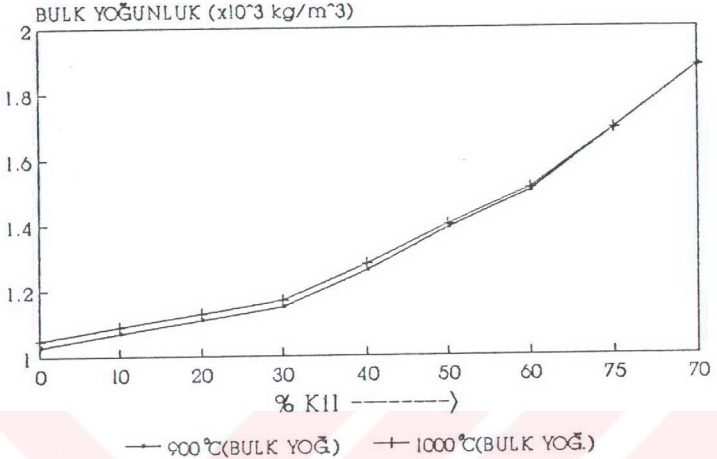
Numunelerin bulk yoğunlukları, kil miktarının artmasıyla artan bir eğilim göstermektedir (şekil 4.16). Kil ilavesiyle numunelerde artan camsı fazla birlikte, yoğunlaşmada artmaktadır.

Tablo 4.10. Farklı sıcaklıklarda pişirilen numunelerin gözenek miktarları ve bulk yoğunlukları.

% Kil	% Gözenek		Bulk yoğunluk (kg/m^3)	
	$T_p = 900^\circ\text{C}$	$T_p = 1000^\circ\text{C}$	$T_p = 900^\circ\text{C}$	$T_p = 1000^\circ\text{C}$
-	56.29	55.36	1030	1050
10	54.71	55.30	1070	1090
20	51.76	50.75	1110	1130
30	50.16	48.74	1150	1170
40	47.78	46.48	1260	1280
50	45.41	44.16	1390	1400
60	41.33	39.86	1500	1510
75	35.40	34.86	1690	1690
100	32.89	31.37	1880	1880



Şekil 4.15. Gözenek miktarının, pişirme sıcaklığı ve kil ilavesiyle değişimi.



Şekil 4.16. Bulk yoğunluğun, pişirme sıcaklığı ve kil ilavesiyle değişimi.

4.2.3. Su Emme

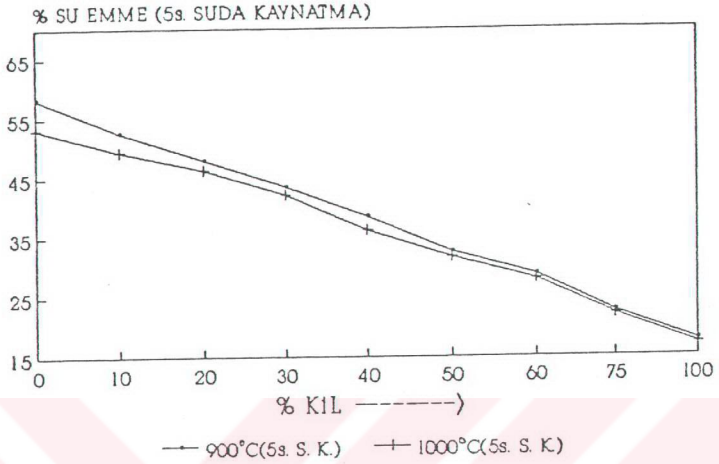
5 saat suda kaynatma ve 24 saat suda bekletme yöntemleri ile belirlenen numunelerin su emme miktarları tablo 4.11.'de ve bu değerlerin grafikleride şekil 4.17.- 4.18.'de verilmiştir.

Şekil 4.17.- 4.18.'den görüldüğü gibi numunelerin su emme miktarları, artan kil ilavesiyle azalmaktadır. Kil miktarı arttıkça camsı fazın artması sonucu gözenek miktarı ve buna bağlı olarak su emme miktarı azalmaktadır [14, 22, 31]. Numunelerin 5 saat suda kaynatma yöntemi ile tesbit edilen su emme miktarları (şekil 4.17.), 24 saat suda bekletme yöntemi ile tesbit edilen su emme miktarlarından (şekil 4.18.) daha fazladır. Kaynatma ile hareket kazanan su, kılcal kanallar ile en küçük gözeneklere de girerek su emme miktarının artmasına sebep olmaktadır. Ayrıca, pişirme sıcaklığındaki artış ile artan

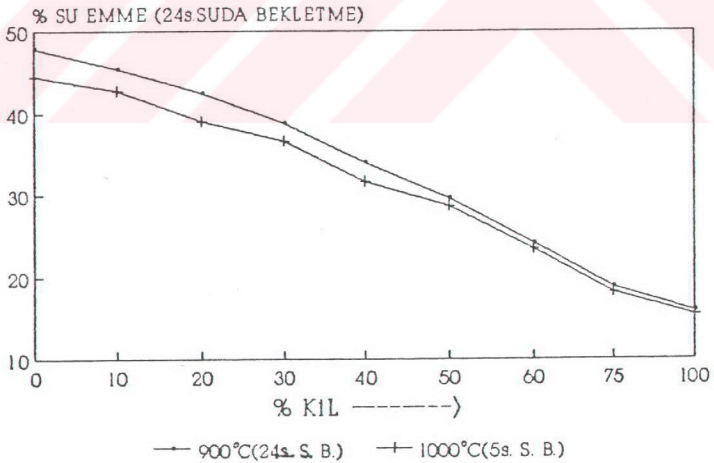
sinterleşme sonucunda, numunelerin gözenek miktarı azalmakta ve dolayısıyla su emme miktarlarında da azalma görülmektedir [5, 22, 27, 28, 31].

Tablo 4.11. Farklı sıcaklıklarda pişirilen numunelerin su emme miktarları.

% Kil	% Su emme (5 saat suda kaynatma yöntemi ile)		% Su emme (24 saat su- da bekletme yön. ile)	
	$T_p=900^{\circ}\text{C}$	$T_p=1000^{\circ}\text{C}$	$T_p=900^{\circ}\text{C}$	$T_p=1000^{\circ}\text{C}$
-	58.32	53.24	47.89	44.51
10	52.62	49.47	45.42	42.76
20	48.06	46.32	42.47	39.04
30	43.59	42.11	38.83	36.64
40	38.50	36.20	34.06	31.91
50	32.68	31.71	29.69	28.69
60	28.87	28.06	24.19	23.50
75	22.58	22.03	18.80	18.15
100	17.65	17.06	15.82	15.42



Şekil 4.17. 5 saat suda kaynatma yöntemi ile belirlenen su emme miktarlarının, pişirme sıcaklığı ve kil ilavesiyle değişimi.



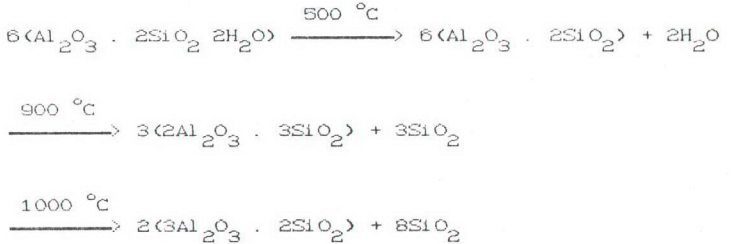
Şekil 4.18. 24 saat suda bekletme yöntemi ile belirlenen su emme miktarlarının, pişirme sıcaklığı ve kil ilavesiyle değişimi.

4. Basma mukavemeti

Deney numunelerinin basma mukavemetleri tablo 4.12.'de ve basma mukavemeti eğriside şekil 4.19.'da görülmektedir.

Farklı oranlardaki uçucu kül/kil karışımlarından yapılan numuneler içerisinde, en küçük basma mukavemetine kil içermeyen numuneler sahiptir. % 30 kil ilavesine kadar basma mukavemetinde çok az bir artış görülürken, bu orandan sonra artan kil miktarı ile basma mukavemeti artmaktadır. Kil ilavesiyle artan camsı faz; gözenek miktarını azaltarak, yoğunlaşmayı arttırmakta ve böylece daha mukavemetli numuneler elde edilmektedir [14, 22, 31]. Sıcaklık artışıyla sinterleşme arttığı için [5, 27, 28]; 1000 °C'de pişirilen numunelerin mukavemet değerleri, daha yoğun olmaları sebebiyle, 900 °C'de pişirilenlere göre yüksektir.

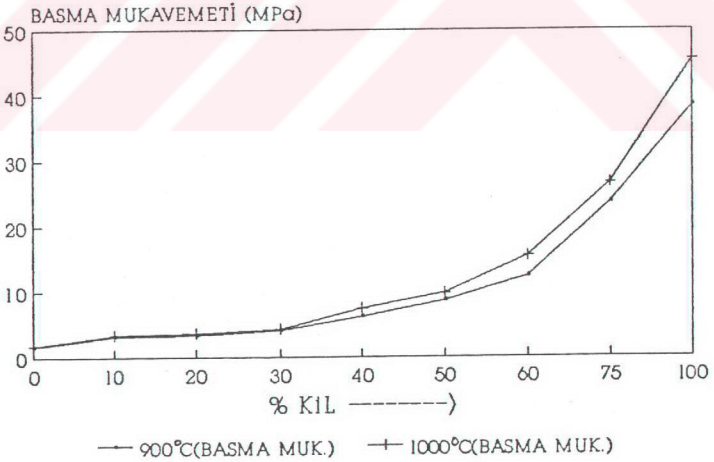
Kompleks bir karışım olan kilde bulunan kaolenin, yüksek sıcaklıklarda gösterdiği reaksiyonların sonucu oluşan yeni fazlarda mukavemet artışına sebep olmaktadır [14, 22, 27, 31].



1000 °C'de kaolende görülen mullit ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$), iğnesel oluşu nedeniyle mukavemeti arttırmaktadır [14, 27]. Artan kil ilavesi ile mullit miktarıda artacağı için, 1000 °C'de pişirilen numunelerin mukavemetleri daha yüksektir.

Tablo 4.12. Farklı sıcaklıklarda p sirilen numunelerin basma mukavemetleri.

% Kil	Basma mukavemeti (MPa)	
	$T_P=900^{\circ}\text{C}$	$T_P=1000^{\circ}\text{C}$
-	1.7	1.8
10	3.2	3.4
20	3.4	3.7
30	4.1	4.3
40	6.2	7.5
50	8.7	9.9
60	12.4	15.5
75	23.7	26.7
100	38.4	45.5



Sekil 4.19. Basma mukavemetinin, p sirme sıcaklığı ve kil ilavesi ile değişimi.

4.2.5. Donma

Donma testi sonucunda; numunelerde çatlama, kopma ve pullanma görülmemiştir. Fakat, % 100 uçucu kül içeren numunelerde, çok az miktarlarda (yüzeysel olarak) dağılma gözlenmiştir.

4.2.6. Pamuklaşma

Numunelerde pamuklaşma çok az olarak görülmüştür. Oluşan pamuklaşma, numunelerin yüzeylerinin % 10'unu geçmemekte olup (zayıf pamuklaşma), artan kül miktarı ile azalma göstermektedir.

BÖLÜM V

5. SONUÇLARIN IRDELENMESİ

Günümüzde teknolojik ve bilimsel çalışmalar, daha az doğanın kirletilmesi ve insanlığa daha yararlı hizmetler verilmesi doğrultusundadır. Yapılan araştırmalar, atık tabir edilen ve doğayı kirleten ürünlerin değerlendirilerek hem potansiyel bir kullanım alanı oluşturmayı, hem de doğaya verdiği zararları en aza indirmeyi amaçlamaktadır. Büyük bir potansiyele sahip uçucu küllerin atık durumdan çıkartılarak, endüstriyel açıdan yararlı hale getirilmesi için birçok çalışma yapılmış ve başarılı sonuçlar elde edilmiştir.

Seyitömer Termik Santrali atık uçucu küllerinin yapı malzemesi olarak değerlendirilebilmesi imkanlarını araştırmak bu çalışmanın ana amacını oluşturmaktadır. İki aşamada gerçekleştirilen araştırmanın ilk aşamasında, uçucu küllerin ve bağlayıcı olarak kullanılan kilin hammadde karakterizasyonu yapılmıştır. Uçucu küllerin tuğla üretiminde kullanılarak, yapı malzemesi olarak değerlendirilebilirliği ile ilgili daha önce çalışmalar yapılmıştır. Fakat uçucu küllerin karakterizasyonu ile ilgili yeterli araştırma bulunmamaktadır. Bu araştırmanın asıl amacı, bu konudaki boşluğu doldurmaktır. Araştırmanın ikinci aşamasında, karakterizasyonu yapılan uçucu kül ve kil örneklerinden değişik oranlarda hazırlanan karışımlardan, yarı-kuru presleme yöntemi ile silindirik numuneler üretilmiştir. Bu numuneler, 900 ve 1000 °C'de pişirildikten sonra çeşitli testlere tabi tutularak özellikleri tesbit edilmiştir.

a) Sonuçlar

1) Uçucu kül örneklerinde tane iriliğinin 5-80 μm arasında değiştiği, en iri tane boyut dağılımına E_1 uçucu külünün, en küçük tane boyut dağılımına da E_3 uçucu külünün sahip olduğu belirlenmiştir.

2) Piknometre ile yapılan özgül ağırlık ölçümlerinde kilin 2350 kg/m^3 ; E_1 , E_2 ve E_3 olarak kodlanan uçucu kül örneklerinin de sırasıyla 1470, 1760 ve 2010 kg/m^3 özgül ağırlığa sahip oldukları bulunmuştur. Uçucu küllerin özgül ağırlıkları, küllerin ortalama özgül ağırlıkları olan 2150 kg/m^3 'den daha düşük olarak ölçülmüştür. Bu sonuç, özgül ağırlıkta artışa sebep olan demirin [2], Seyitömer Termik Santrali uçucu küllerinde daha az bulunduğunu göstermektedir.

3) Diferansiyel termal analiz-termogravimetri ve x-ışınları difraksiyonu ile yapılan mineralojik analizlerde; uçucu küllerin çoğunlukla amorf faz içerdği, kristal fazında α -kuvars, enstatit ve kalsiyum sülfat'dan oluştuğu saptanmıştır. Kilin ise montmorillonit, illit, kaolen, anortit ve α -kuvars içeren kompleks bir karışım olduğu görülmüştür.

4) Taramalı elektron mikroskopunda farklı büyütmelelerde çekilen ikincil elektron görüntülerinden; uçucu kül tanelerinin çoğunlukla aglomere olduğu, ancak bir kısmında tamamen eriyerek küresel şekil aldığı görülmüştür. Elektron mikroprob analizinde de, aglomere ve küresel tanelerin Mg, Al, Si, Ca, S, K, Ti, Fe, Na ve Mn'dan oluştuğu tesbit edilmiştir. Ayrıca, bu elementlerden Si, Al, K, Ca ve Na'un küresel tanelerde daha fazla bulunduğu saptanmıştır.

5) Değişik oranlardaki uçucu kül/kil karışımlarından yarı-kuru presleme yöntemi ile üretilen deney numunelerine uygulanan testlerin sonuçları da aşağıda verilmiştir.

— Deney numunelerinin kuruma, pişme, toplu küçülme ve kızdırma kayıpları artan kil ilavesiyle artmaktadır. % 100 uçucu kül içeren numunelerde daha az kuruma küçülmesi ile, daha fazla pişme küçülmesi ve kızdırma kaybı tesbit edilmiştir. Plastiklik özelliği olmayan uçucu küller su absorbe edememekte [1] ve çok az bir kuruma küçülmesi göstermektedir. Bu yüzden, artan kil yüzdesi ile kuruma küçülmesinin arttığı görülmüştür. % 100 uçucu kül içeren karışımın plastiklik özelliği kazandırmak için % 2 oranında (ağırlıkça) ilave edilen nişasta ile küllerin içerdği karbonun yanması sonucunda, kil içermeyen numunelerde daha fazla pişme küçülmesi ve kızdırma kaybı saptanmıştır.

— Pişirme ile oluşan sinterleşme, sıcaklık ile arttığı için [5, 27, 28], 1000 °C'de pişirilen numunelerde daha fazla pişme küçülmesi görülmüştür. Pişirme sırasında, kilin kristal suyunu kaybetmeside pişme küçülmesine ve ağırlık kaybına etki eden diğer bir faktördür.

— Kil ilavesiyle birlikte numunelerin gözenek ve su emme miktarlarında azalma, basma mukavemetlerinde de artış saptanmıştır. Kil yüzdesi arttıkça, kilde bulunan alkali elementlerin oluşturduğu camsı sıvı fazda artmakta ve böylece gözenek miktarıda azalmaktadır [14, 22, 31]. Ayrıca sıcaklık artışıyla sinterleşme arttığı için [5, 27, 28], 1000 °C'de pişirilen numunelerin daha yoğun ve daha az gözeneğe sahip oldukları tesbit edilmiştir. Kil ilavesiyle artan sinterleşme sonucunda mukavemetinde yükseldiği görülmüş olup, 1000 °C'de pişirilen numunelerin daha mukavemetli olduğuda belirlenmiştir.

— Deney numunelerinde önemli ölçüde bir pamuklaşma görülmemiştir. Ayrıca donma testi sonucunda, numunelerde bir hasara rastlanmamıştır.

b) İrdeleme

Türk Standardları Enstitüsü (TSE) fabrika tuğlaları standardında (TS 705); DOT 1.8/100, DOT 1.8/220 ve DOT 2.0/240 şeklinde sınıflara ayrılan tuğlaların basma mukavemetleri sırasıyla 7.8, 17.1 ve 18.6 MPa olarak verilmiştir [35]. Bu çalışmada üretilen uçucu kül içeren tuğlaların, % 50 kül içerenlerinin mukavemetleri ise pişirme sıcaklıklarına göre 8.7 ve 9.9 MPa olarak, % 75 kül içerenlerinki de 23.7 ve 26.7 MPa olarak saptanmıştır. Görülebileceği gibi; % 50 uçucu kül içeren deney numunelerinin basma mukavemetleri, TSE 705'de yer alan DOT 1.8/100 olarak sınıflandırılan tuğlalardan, % 75 kül içeren numunelerinki de DOT 1.8/220 ve DOT 2.0/240 sınıfı fabrika tuğlalarının mukavemetlerinden daha yüksektir.

Amerikan ASTM C 216 yük taşıyıcı duvar tuğlaları standardında; standard tip tuğla için minimum basma mukavemeti 9.5 MPa, 24 saat suda bekletme ile belirlenen su emme % 13, 5 saat suda kaynatma ile belirlenen su emmede % 16 olarak belirtilmiştir . Aynı standard'da yer alan özel tip tuğla içinde yukarıdaki özellikler sırasıyla 16.8 MPa, % 7 ve % 9'dur [40]. Standard tip tuğlanın mukavemetine, bu çalışmada üretilen % 50 kül içeren 1000 °C'de pişirilmiş numuneler (9.9 MPa) sahiptir. Fakat su emme miktarları ise (% 31.71 ve % 28.69), standard tip tuğladan daha fazladır. % 75 kül içeren numunelerin mukavemetleri (23.7-26.7 MPa) ve su emme miktarları ise (% 22.58-22.03 ve % 18.80-18.15), özel tip tuğlanınkinden daha yüksektir.

İngiliz BS 3921 normal kül duvar tuğlası standardına [41] göre, minimum basma mukavemeti 4.9 MPa olup, bu çalışmada üretilen % 40 kül içeren numunelerin mukavemet değerinden (6.2-7.5 MPa) daha düşüktür.

Bu çalışmada üretilen uçucu kül içeren tuğlaların özelliklerinin kül miktarı ve pişirme sıcaklığına göre değiştiği belirlenmiş olup, Anderson ve arkadaşları tarafından

yapılan çalışmalar da [1, 17] bu sonucu desteklemektedir. Ayrıca Anderson, uçucu küllerin tane boyutunun da özellikleri etkilediğini saptamıştır [15].

Ytong yapı malzemesi; silisli havi bir dolgu maddesi, kum, kumtaşı, baca külü, yüksek fırın curufu, çimento ve alüminyum tozu içermektedir. 400 kg/m^3 özgül ağırlığa sahip olan bir ytongun basma mukavemeti 3.4 MPa, gözenek miktarı ise % 84'dür [42]. Bu çalışmada üretilen uçucu kül içeren tuğlalarla karşılaştırıldığında, ytongun gözenek miktarı çok daha fazla, fakat basma mukavemeti ise daha düşüktür. Ytongun mukavemet değerine, % 20 kül içeren uçucu küllü tuğlalar (3.4-3.7 MPa) sahiptir. Ytonga ısı ve ses yalıtımı özelliği kazandıran yüksek gözenek miktarı [42], mukavemetini azaltmaktadır.

Bu çalışmada üretilen uçucu kül içeren tuğlaların birçok özelliği Türk Standardlarına (TS 705) uygundur. Ayrıca yüksek gözenekliliği, bu tuğlalara ısı ve ses yalıtımı özelliğide kazandırmaktadır. Kütahya yöresinde kurulacak bir tesisle, Seyitömer Termik Santrali atık uçucu külleri tuğla üretiminde kullanılarak, endüstriye yararlı bir hammadde konumuna getirilebilir. Uçucu küllerin tuğla üretiminde kullanılması ile ortadan kalkan öğütme ve eleme masraflarının yanı sıra, kalıplamada daha az kuvvet gerekmesi, daha kolay kuruma, yakıt tasarrufu ve daha kolay pişirme [2, 16] imkanları böyle bir prosesi karlı duruma getirecek faktörlerdir. Ayrıca, tuğla fabrikaları basit teçhizat ilaveleriyle, uçucu kül içeren tuğlalar üretebilecek duruma getirilebilir.

c) Öneriler

1) Mevcut laboratuvar imkanları 1000°C 'den daha yüksek sıcaklıklarda çalışma imkanı vermediği için, benzer çalışmalarda daha yüksek sıcaklıklar kullanılarak, pişirme sıcaklığının etkileri araştırılmalıdır.

2) Çalışmada bağlayıcı olarak kullanılan kil, kül örneklerinin alındığı yöredeki (Kütahya) bir tuğla fabrikasından (Akdemirler Tuğla A.Ş.) temin edilmiştir. Böylece aynı bölgede kurulacak bir tesis ile, mevcut kül ve kil potansiyelinin değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Kül ve killerin özellikleri geniş bir aralıkta değiştiği için, diğer santral külleri ve farklı killeri ile benzer çalışmalar yapılarak, uçucu kül içeren tuğlalar için uygun kül ve killeri tesbit edilebilir.

3) Bu çalışmada farklı tane boyutlarındaki uçucu küller karıştırılarak kullanılmıştır. Uçucu küller tane boyutlarına göre sınıflandırıldıktan sonra kullanılarak, tane boyutunun özelliklere etkisi incelenebilir.

KAYNAKLAR

- [1] ANDERSON, M., JACKSON, G., "The Benefication of Power Station Coal and its Use in Heavy Clay Ceramics", Trans. J. Brit. Ceram. Soc., Vol.82, No.2, pp.50-55, 1983.
- [2] ————— "Türkiye Uçucu Küllerinin Özellikleri ve Kullanılma Olanakları", E.İ.E. Genel Direktörlüğü Yayın No.81-4S, 1979, Ankara.
- [3] TOKYAY, M., ÇETİN, B., "Preslenmiş, Buhar Kürtü Uygulanmış Uçucu Kül-Kireç Tuğlalarının Dayanım ve Su Emme Özellikleri", Teknik Dergi, T.M.M.O.B. İnş. Muh. Odası Yayını, Cilt 2, s.385-394, 1991.
- [4] WHITE, S.C., CASE, E.D., "Characterization of Fly Ash From Coal-Fired Power Plants", J. Mater. Sci., Vol.25., No.12, pp.5215-5219, 1990.
- [5] ————— "Sintered PFA as a Lightweight Aggregate", PFA Data Book, Cent. Elec. Gen. Board, 1974, England.
- [6] ————— "Bricks and Other Structural Ceramics" PFA Data Book, Cent. Elec. Gen. Board, 1967, England.
- [7] ————— "Uçucu Küller Standardı", TS 639, 1975.
- [8] ————— "Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolon For Use as a Mineral Admixture in Portland Cement Concrete", ASTM C 618-80, Annual Book of ASTM Standards, Vol.14, pp.381-384, 1980.
- [9] ————— "PFA Information", Powergen Broch., 1990, England.
- [10] ANDERSON, M., "Processed High Carbon PFA as a Fuel Additive in Brickmaking", Inter. Con. on Ash Tech., pp.563-568, 16-22 Sept., 1984, London-England.
- [11] HE, J.Y., SCHEETZ, B.E., ROY, D.M., "Comparison of Tuffy and Fly Ash in Blended Cement", Am. Ceram. Soc., Vol.64, No.5, pp.707-711, 1985.
- [12] ————— "An Introduction to Pulverized Fuel Ash", Powergen Broch., 1990, England.

- [13] ÖLMEZ, H., "Soma Garp Linyitleri İşletmesi, Dekabaj Kütlesi ile Soma Termik Santrali Uçucu Kullun, Endüstriyel Değerlendirilmesi", Doktora Tezi, K.T.U. Tem. Bil. Fak., 1978, Trabzon.
- [14] TANİŞAN, H.H., METE, Z., "Seramik Teknolojisi ve Uygulaması", Cilt.1, 1986, Söğüt.
- [15] ————— "Kiremit ve Tuğla", Standard; Ekonomik ve Teknik Dergi, Özel Sayı 3, T.S.E. Yayını, 1986.
- [16] BARNES, P., ANDERSON, M., "The Influence of Particle Composition on The Ceramic Behaviour of Fly Ash", Aust. Ceram. 90, 26-31 Aug., 1990, Perth-Western Australia.
- [17] ————— "PFA in Brickmaking", PFA Tech. Bull., Cent. Elec. Gen. Board, No.6, 1986, England.
- [18] ANDERSON, M., "A New Low-cost PFA Brickmaking Process", Inter. Con. on Ash Tech., pp.569-573, 16-22 Sept., 1984, London-England.
- [19] ÖZKAN, L., "Isıl İşlem Uygulaması ile Birlikte Uçucu Kül Kullanımının Beton Özelliklerine Etkisi", Yüksek Lisans Tezi, I.T.U. Fen Bil. Ens., 1986, İstanbul.
- [20] ————— "Türkiye Uçucu Kulleri (Üretim, Kullanılma Alanları, Sorunlar, Öneriler)", E.İ.E. Genel Direktörlüğü Yayın No.82-19, 1982, Ankara.
- [21] WHITEHEAD, W.L., BREGER, I.A., "Vakum Differential Thermal Analysis", Science, Vol.111, pp.272-281, 1950.
- [22] ARCASOY, A., "Seramik Teknolojisi", Marmara Univ., Guz. San. Fak., 1983, İstanbul.
- [23] ÖZKAN, O.T., KINIKOĞLU, S., TAŞAR, M.S., "Seramik Hammaddelerine Uygulanan Kimyasal Analiz ve Test Metodları", TÜBİTAK Marmara Bil. ve End. Arş. Un., Proje No.03-1601-7801, 1979.
- [24] MACKENZIE, R.C., "Differential Thermal Analysis", Academic Press, London And New York, Vol.1, pp.3-30, 1970.
- [25] ERDEM, A., SÖZER, Z., "Seramik Testleri ve Hesaplamaları", Ser. Tekn. Tas. Lisans Tezi, A.U. Uyg. Guz. San. Yüksekokulu, 1990, Eskişehir.

- [26] CHESTER, J.H., "Refractories Production and Properties", The Iron and Steel Inst., pp.476, 1973, London-England.
- [27] ÖZGEN, S., "Advanced Ceramics Materials and Manufacturing Techniques", I.T.U. Fen Bil. Ens. Metalurji Prog. Yüksek Lisans Ders Notları, 1991, İstanbul.
- [28] GEÇKİNLİ, A.E., "İleri Teknoloji Malzemeleri", I.T.U. Rektörlük Matb., 1992, İstanbul.
- [29] DAVIDGE, R.W., "Mechanical Behaviour of Ceramics", Camb. Univ. Press, 1986, Chambridge-England.
- [30] MICHAEL, F.A., DAVID, R.H., "Engineering Materials 2", Pergamon Press, Oxford and New York, 1988.
- [31] SUMER, G., "Seramik Sanayii El Kitabı", A.U. Matb., 1988, Eskişehir.
- [32] CLEWS, F.H., "Heavy Clay Technology", 2nd Edition, Academic Press, 1969, Staffordshire-England.
- [33] ————— "Sampling and Testing Brick and Structural Clay Tile", ASTM C 67-81, Annual Book of ASTM Standards, Vol.16, pp.53-62, 1981.
- [34] ————— "Harman Tuğlası (Duvarlar İçin) Standardı", TS 704, 1979.
- [35] ————— "Fabrika Tuğlaları (Duvarlar İçin Dolu ve Düşey Delikli) Standardı", TS 705, 1985.
- [36] GENÇ, S., "Duvarlar İçin Düşey Delikli Hafif Tır Tuğla Kâğır Özellikleri", Yüksek Lisans Tezi, I.T.U. Fen Bil. Ens., 1984, İstanbul.
- [37] ————— "Calcium Compounds to Chloramphenical", Encyc. Chem. Tech., 2nd Edition, Vol.4, 1967.
- [38] GÜNER, Y., "Seramik", Gençlik kitabevi A.Ş., 1987, İstanbul.
- [39] ————— "Lange's Handbook of Chemistry", 11th Edition, McGraw-Hill Book Comp., 1973, New York.
- [40] ————— "Standards Specification for Facing Brick", ASTM C 216, Annual Book of ASTM Standards, Vol.16, pp.135-139, 1981.

[41] ————— "Specification for Clay Bricks", BS 3921, England.

[42] BORHAN, B., "Ytong El Kitabı 1", Ytong Teknik Yayın No.1, 1988.



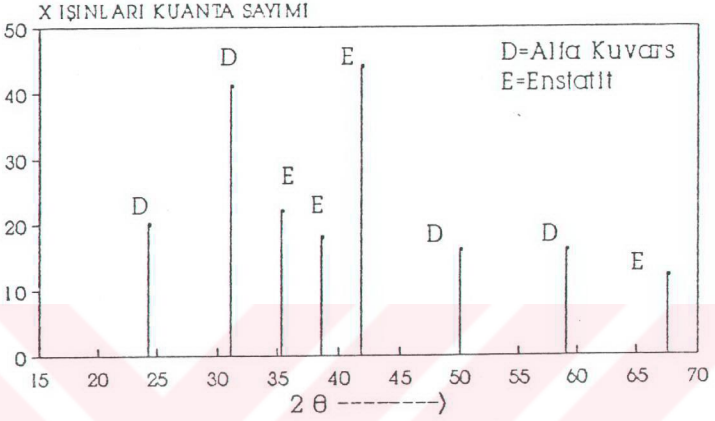
EKLER

Bu Bölümde, yapılan x-ışınları difraksiyon çalışmaları sonucunda elde edilen paternlerin bilgisayar simülasyon eğrileri sunulmuştur.

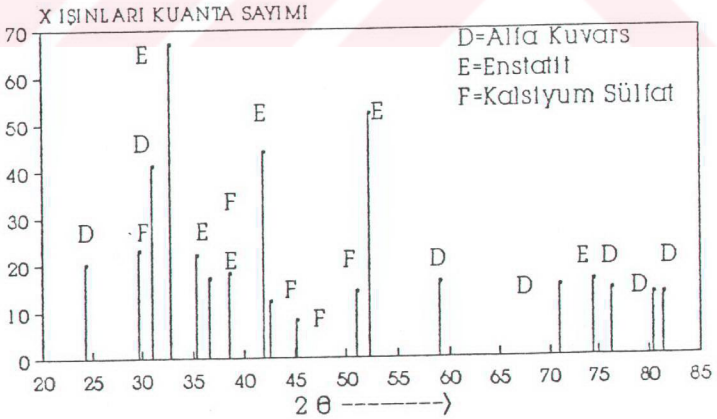
LİSTE :

- 1) E_1 kodlu uçucu külün paterni
- 2) E_2 kodlu uçucu külün paterni
- 3) E_3 kodlu uçucu külün paterni
- 4) Kıl örneğinin paterni

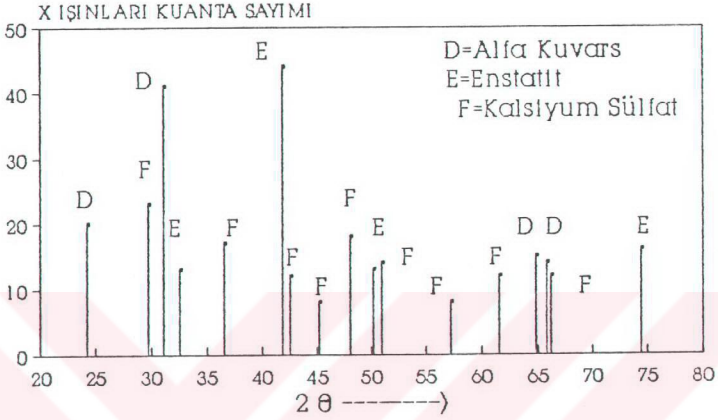
Ek 1.



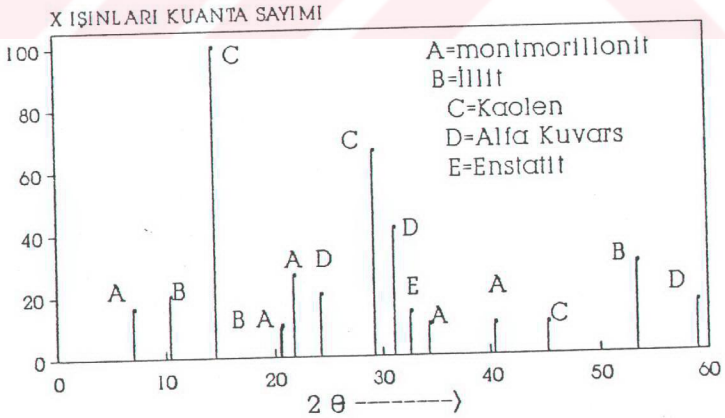
Ek 2.



Ek 3.



Ek 4.



ÖZGEÇMİŞ

1968 Yılında Mudurnu'da doğdu. İlk ve orta öğrenimini Akçakocada tamamladı. Akçakoca Endüstri Meslek Lisesi'ni 1985 yılında birincilikle bitirdi. Aynı yıl girdiği I.T.U. Sakarya Mühendislik Fakültesi Metalurji Mühendisliği Bölümünden 1989 yılında bölüm birincisi olarak mezun oldu ve I.T.U. Fen Bilimleri Enstitüsüne girmeye hak kazandı. Burada, Dil ve İnkılap Tarihi Bölümünde 1 yıl İngilizce hazırlık sınıfına devam ettikten sonra, Metalurji Ana Bilim Dalı Üretim Metalurjisi Programında Yüksek Lisans öğrenimine devam etti.

1990 yılında I.T.U. Sakarya Mühendislik Fakültesi Metalurji Mühendisliği Bölümü Üretim Metalurjisi Ana Bilim Dalına Araştırma Görevlisi olarak atanan Şenol YILMAZ halen bu görevini sürdürmektedir.