

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**SOMA TERMİK SANTRAL CÜRUFLARINDAN
YANMAMIŞ KARBONUN KAZANILMASI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Sevil AKYAZILI**

Anabilim Dalı : Maden Mühendisliği

Programı : Cevher ve Kömür Hazırlama

HAZİRAN 2009

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**SOMA TERMİK SANTRAL CÜRUFLLARINDAN
YANMAMIŞ KARBONUN KAZANILMASI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Sevil AKYAZILI
(505051105)**

Tezin Enstitüye Verildiğı Tarih : 04 Mayıs 2009

Tezin Savunulduğı Tarih : 05 Haziran 2009

**Tez Danışmanı : Prof. Dr. Neşet ACARKAN (İTÜ)
Eş Danışman : Prof. Dr. Gündüz ATEŞOK (İTÜ)
Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Şafak G. ÖZKAN (İÜ)**

HAZİRAN 2009

Aileme ve arkadaşlarıma,

ÖNSÖZ

Kömüre Dayalı Termik Santral Cüruflarının Değerlendirilmesi konusundaki yüksek lisans tezimde bana öncülük eden, yol gösteren ve her türlü yardımı benden esirgemeyen kıymetli hocam Prof. Dr. Neşet ACARKAN' a, tez çalışmalarım sırasında yardımlarını esirgemeyen değerli hocalarım Prof. Dr. Gündüz ATEŞOK ve Prof. Dr. Şafak ÖZKAN' a tez çalışmamı yapmama olanak sağlayan Cevher Hazırlama Mühendisliği Bölüm Başkanı Prof. Dr. Fatma ARSLAN' a, laboratuvar çalışmalarımda bana yardımcı olan Dr. Vecihi GÜRKAN, Doç. Dr. Gülay BULUT, Doç. Dr. Alim GÜL, Yrd. Doç. Dr. Olgaç KANGAL, Yrd. Doç. Dr. Feridun BOYLU, Araş. Gör. Ozan KÖKKILIÇ, Dr. Tahsin PEREK, Mad. Müh. Mustafa ÖZER, Kim. Müh. Sezin BALKAN, Mad. Müh. Mustafa Salih EYGİ, teknik eleman Adnan UYSAL' a ve tüm Cevher Hazırlama Mühendisliği Bölümü çalışanlarına teşekkür ederim. Ayrıca her zaman yanımda olan canım aileme, can dostlarım Deniz POLAT, Pınar TAŞ, Onur GÜVEN, Burçak BAYDAR ve Beste EVEN' e teşekkür ederim.

Haziran 2009

Sevil AKYAZILI
(Jeoloji Mühendisi)

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖNSÖZ	v
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xi
ŞEKİL LİSTESİ.....	xiii
ÖZET	xv
SUMMARY	xvii
1. GİRİŞ	1
1.1 Tezin Amacı	2
2. KÖMÜRÜN TANIMI VE ÖZELLİKLERİ	3
2.1 Kömürün Tanımı ve Oluşumu.....	3
2.2 Kömürün Özellikleri	5
2.2.1 Kömürün fiziksel özellikleri	5
2.2.2 Kömürün kimyasal özellikleri.....	8
2.2.3 Kömürün petrografik özellikleri	9
2.2.3.1 Litotipler.....	10
2.2.3.2 Masereller.....	10
2.3 Kömürün Sınıflandırılması.....	11
3. TERMİK SANTRALLERDE KÖMÜR KULLANIMI	13
3.1 Kömüre Dayalı Termik Santrallerde Kömür Miktar ve Kalitesinin Önemi.....	14
3.1.1 Yakıttan kaynaklanan sorunlar ve kömür hazırlamanın termik santraller için önemi.....	14
3.1.1.1 Kömür sahasındaki rezervin miktar ve özelliklerin tespiti	15
3.1.1.2 Termik santral kazan dizaynı parametrelerinin tespiti	17
3.1.1.3 Kömür ve elektrik üreticisi arasında santrale verilecek kömür miktar ve özelliklerini belirleyen esaslar	17
3.1.1.4 Kömür üretim faaliyetleri.....	17
3.1.1.5 Santral kömür alma, stoklama ve harmanlama sistemleri.....	18
3.1.2 Yakıt özellikleri ve santral işletmeciliği	20
3.1.2.1 Kül oranı	21
3.1.2.2 Nem ve kükürt oranı.....	22
3.1.2.3 Kömürün dayanımı	22
3.1.2.4 Linyitin ısı değeri/ kuru bazda kül oranı	23
3.1.2.5 Kömürün petrografisi	23
3.1.2.6 Klor oranı	23
3.2 Termik Santrallerde Kömürün Yakılması	23
3.3 Termik Santrallerde Yanma Sonucu Oluşan Ürünler ve Davranışları	24
3.3.1 Kömürün yanması ile mineral madde dönüşüm kinetiği ve mineral maddeden kaynaklanan birikimler	26
3.3.2 Cüruf oluşumu.....	28
3.3.3 Kurum oluşumu.....	28

3.3.4 Kömür külü oluşumu ve ergime özellikleri.....	29
3.3.5 Kömür külünün yakma sistemlerinde yarattığı sorunlar	30
3.4 Türkiye’de Kömürle Çalışan Termik Santraller ve Özellikleri	32
3.4.1 Soma Termik Santrali.....	34
4. KÖMÜRÜN YANMA ÜRÜNLERİ.....	37
4.1 Uçucu Kül.....	37
4.1.1 Uçucu küllerin sınıflandırılması.....	38
4.1.2 Uçucu küllerin özellikleri.....	39
4.1.2.1 Uçucu küllerin mineralojik ve kimyasal yapısı.....	39
4.1.2.2 Uçucu küllerin fiziksel özellikleri.....	41
4.1.2.3 Uçucu külün kimyasal özellikleri.....	42
4.1.3 Uçucu küllerin kullanım alanları.....	42
4.1.3.1 Tuğla Üretiminde kullanımı	43
4.1.3.2 Çimento ve beton yapımında kullanımı	44
4.1.3.3 Hafif agrega üretiminde kullanımı	44
4.1.3.4 Yol yapımı ve geoteknik uygulamalarda kullanımı	44
4.1.3.5 Gaz beton üretiminde kullanımı	45
4.1.3.6 Seramik ve cam üretiminde kullanımı	45
4.1.3.7 Adsorbant olarak kullanımı.....	45
4.1.3.8 Demir cevherinin peletlenmesinde kullanımı	46
4.1.4 Dünyada uçucu kül.....	46
4.1.4.1 A.B.D’ de uçucu kül.....	47
4.1.4.2 Japonya’da uçucu kül.....	47
4.1.4.3 Avrupa’da uçucu kül	48
4.1.4.4 Türkiye’ de uçucu kül	48
4.1.4.5 Uçucu küllerin zenginleştirilmesinde kullanılan yöntemler.....	50
4.2 Taban Külleri ve Cüruflar	55
4.2.1 Taban külü ve cürufların özellikleri	56
4.2.1.1 Taban külü ve cürufların fiziksel özellikleri	56
4.2.1.2 Taban külü ve cürufların kimyasal özellikleri.....	59
4.2.1.3 Taban külü ve cürufların mineralojik özellikleri	61
4.2.2 Taban külü ve cürufun kullanım alanları	63
4.2.2.1 Taban külünün kullanım alanları.....	63
4.2.2.2 Cürufların kullanım alanları	64
4.2.3 Taban külü ve cürufların değerlendirilmesi	66
4.2.3.1 Avrupa.....	67
4.2.3.2 ABD.....	67
4.2.4 Taban külü ve cürufların zenginleştirilmesi.....	67
4.2.4.1 Gravite yöntemleriyle zenginleştirme	67
4.2.4.2 Flotasyon yöntemiyle zenginleştirme.....	68
5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	71
5.1 Deneylere Esas Olan Numune.....	71
5.2 Numunenin Özellikleri	71
5.2.1 Numunenin boyut dağılımı.....	71
5.2.2 Numunenin kimyasal özellikleri	73
5.2.3 Numunenin yapısal ve mineralojik özellikleri	75
5.3 Yöntem	78
5.4 Zenginleştirme Deneyleri	79
5.4.1 Özgül ağırlık farkına göre zenginleştirme deneyleri.....	79
5.4.1.1 Yüzdürme batırma deneyleri.....	79

5.4.1.2 Jig deneyi	84
5.4.1.3 Wilfley sarsıntılı masası deneyi	84
5.4.2 Flotasyon deneyleri	85
5.4.2.1 Klasik flotasyon deneyleri.....	86
5.4.2.2 Kolon flotasyon deneyleri	92
5.4.3 Liç deneyleri	93
5.4.3.1 H ₂ SO ₄ ile yapılan liç deneyleri	93
5.4.3.2 HCl ile yapılan liç deneyleri	94
6. SONUÇLAR	97
KAYNAKLAR	99
EKLER	103
ÖZGEÇMİŞ.....	105

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.2 : Kömürün içerdiği mineral maddeler .	8
Çizelge 2.3 : Kömürdeki litotip ve masareller.....	9
Çizelge 2.4 : Kömür litotiplerinin fiziksel ve kimyasal özellikleri	10
Çizelge 2.5 : Kömürlerin A.S.T.M. sınıflandırması	11
Çizelge 3.1 : Bazı termik santrallerin kömür tüketimi ve özellikleri.	19
Çizelge 3.2 : Kömür kalitesi ile santral işletmeciliği arasındaki ilişki .	20
Çizelge 3.3 : Külün cüruf oluşturma indeksine göre sınıflandırılması.....	31
Çizelge 3.4 : Türkiye’de kömürle çalışan termik santraller ve özellikleri .	34
Çizelge 4.1 : ASTM C 618 ve TSE’ne göre uçucu küllerin kimyasal özellikleri	38
Çizelge 4.2 : Uçucu küllerin kimyasal yapıları .	39
Çizelge 4.3 : A.B.D’ de uçucu kül değerlendirme oranları .	47
Çizelge 4.4 : Japonya’da yıllara göre kül üretimi ve değerlendirme durumu	48
Çizelge 4.5 : 1999 yılına ait Avrupa’da uçucu kül değerlendirme durumu	48
Çizelge 4.6 : Türkiye’deki bazı uçucu küllerin mineralojik kompozisyonu	49
Çizelge 4.7 : Seyitömer, Çatalağzı, Afşin- Elbistan ve Tunçbilek uçucu küller	49
Çizelge 4.8 : A.B.D’de çeşitli termik santral taban küllerinin kimyasal bileşimleri .	60
Çizelge 4.9 : A.B.D’nin çeşitli termik santral cürufalarının kimyasal bileşimleri ..	60
Çizelge 4.10 : 2006 Yılında Üretilen Kül Miktarları ve Değerlendirme Alanları	67
Çizelge 5.1 : Numunenin elek analizi sonuçları.	71
Çizelge 5.2 : Numunenin boyuta göre kül ve karbon içerikleri.	72
Çizelge 5.3 : Numunenin tam analiz sonuçları.	73
Çizelge 5.4 : Numunenin elementel analiz sonuçları.	74
Çizelge 5.5 : – 4+0,5 mm boyut grubunda yüzdürme-batırma deneyi sonuçları	80
Çizelge 5.6 : -0,5 +0,1 mm boyut grubunda yüzdürme- batırma deneyi sonuçları ...	81
Çizelge 5.7 : 4+0,1 mm aralığında yüzdürme batırma deneyinin sonuçları	82
Çizelge 5.8 : Jig deneyi sonuçları.	84
Çizelge 5.9 : Sarsıntılı Masa Deneyi Sonuçları.	84
Çizelge 5.10 : Flotasyon koşulları.	87
Çizelge 5.11 : Mazotun flotasyona etkisini belirleme deneylerinin sonuçları.....	86
Çizelge 5.12 : Deney koşulları.....	88
Çizelge 5.13 : Mazotla farklı boyutlarda yapılan flotasyon deneylerinin sonuçları. .	87
Çizelge 5.14 : Deney koşulları.....	89
Çizelge 5.15 : Mazot ile farklı pH’ larda yapılan flotasyon deneylerinin sonuçları. .	89
Çizelge 5.16 : Deney koşulları.....	90
Çizelge 5.17 : Gazyağı miktarının parametre olarak alındığı deney sonuçları.....	90
Çizelge 5.18 : Montanol ile yapılan flotasyon deneylerinin koşulları.	91
Çizelge 5.19 : Deney sonuçları.	91
Çizelge 5.20 : -38 µm’ da yapılan flotasyon deneyinin sonucu.	92
Çizelge 5.21 : Kolon flotasyonu deney koşulları.....	92
Çizelge 5.22 : Kolon flotasyonu deneylerinin sonuçları.	93

Çizelge 5.23 : H_2SO_4 ile yapılan deneylerin sonuçları.	94
Çizelge 5.24 : Farklı HCl konsantrasyonlarında yapılan liç deneylerinin sonuçları. 95	95
Çizelge 5.25 : HCl farklı pülp sıcaklıklarında yapılan liç deneylerinin sonuçları....	96

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 3.1 : Termik santrallerde tüketilen kömürler ile ilgili yapılması gereken akım şeması	16
Şekil 3.2 : Buhar-elektrik üretim şeması ve kondansatör	24
Şekil 3.3 : Kömür yakan termik santrallerde kazandan çıkan ürünlerin dağılımı	25
Şekil 3.4 : Yakma ünitelerinde madde dönüşümünün indirgenme mekanizması	26
Şekil 3.5 : Kömürle çalışan termik santraller	33
Şekil 4.1 : Uçucu küllerin genel görünümeleri	41
Şekil 4.2 : Paralel plakalı triboelektrostatik ayırıcısını şematik görünümü	51
Şekil 4.3 : Triboelektrostatik ayırıcısının şematik görünümü	52
Şekil 4.4 : Altı- Foot'luk ultrasonik alomerasyon kolonu şematik görünümü	54
Şekil 4.5 : Taban küllerinin genel görünümü	57
Şekil 4.6 : Cürufların genel görünümü ve iğne yapıları	57
Şekil 4.7 : ABD' deki çeşitli termik santrallerden alınan taban küllerinin toplam elek altı eğrileri	58
Şekil 4.8 : A.B.D' deki çeşitli termik santrallerden alınan cürufların toplam elek altı eğrileri	59
Şekil 4.9 : Yanmamış karbon tanelerindeki sferik yapılar	62
Şekil 4.10: Yanmamış karbon tanelerindeki ağ yapıları	62
Şekil 4.11: Yanmamış karbon tanelerindeki petek yapıları	63
Şekil 5.1 : Numunenin toplam elek altı eğrisi	72
Şekil 5.2 : (Büy.40) -4+0,5 mm boyut grubunda 1,45 gr/cm ³ ağır sıvıda yüzen ürünlerin ince kesitleri. Kömür (siyah) taneleri içerisinde puzolan malzemeler ile birlikte izlenen kil mineralleri ve gboşlukları (beyaz)	76
Şekil 5.3 : (Büy. 200) 4+0,5 mm boyut grubunda 1,45 gr/cm ³ ağır sıvıda yüzen ürünlerin parlak kesitleri. Kömür (açık gri renkli) tanelerinin içerisinde klivaj düzlemleri boyunca tabaklaşmaya uyumlu halde izlenen kil bantları.	76
Şekil 5.4 : (Büy. 40) - (Büy.200) ; 0,5+0,1 mm 1,30 gr/cm ³ ağır sıvıda yüzen ürünlerin ince ve parlak kesitleri. Kömür (siyah) taneleri ile birlikte izlenen puzolan malzemeler,kil mineralleri, gaz boşlukları (beyaz), pirit ve melnikovit (parlak beyaz).....	77
Şekil 5.5 : (Büy. 40) - (Büy.200) ; 0,5+0,1 mm boyut grubunda 1,45 gr/cm ³ ağır sıvıda yüzen ürünlerin ince ve parlak kesitleri. Kömür (siyah) taneleri ile birlikte izlenen puzolan malzemeler, kil mineralleri, gaz boşlukları (beyaz), pirit ve melnikovit (parlak beyaz)	77
Şekil 5.6 : – 4+0,5 mm boyut grubundaki numunenin yüzdürme-batırma eğrisi.....	80
Şekil 5.7 : – 0,5+0,1 mm boyut grubundaki numunenin yüzdürme-batırma eğrisi...	81
Şekil 5.8 : – 4+0,1 mm boyut grubundaki numunenin yüzdürme-batırma eğrisi.....	82
Şekil 5.9 : Sarsıntılı masa deneyi akım şeması.....	85
Şekil 5.10 : Klasik flotasyon deneylerinin genel akım şeması	86

Şekil 5.11 : H_2SO_4 ile yapılan deneylerin sonuçları	94
Şekil 5.12 : Farklı HCl konsantrasyonlarında yapılan liç deneylerinin sonuçları	95
Şekil 5.13 : HCl ile farklı pülp sıcaklıklarında yapılan liç deneylerinin sonuçları....	96

SOMA TERMİK SANTRALİ CÜRUFALARINDAN YANMAMIŞ KARBONUN KAZANILMASI

ÖZET

Kömürle çalışan termik santrallerde kömürün yakılması sonucu kazan altında biriken malzeme cüruf olarak tanımlanmaktadır. Bu tezin amacı Soma Termik Santral' inden alınan cüruf numunesindeki yanmamış karbonun çeşitli zenginleştirme yöntemleriyle kazanılma olanaklarının araştırılmasıdır.

Soma Termik Santrali'nden alınan cüruf numunesinin sabit karbon içeriği % 13,36, kül içeriği % 69,84 olarak belirlenmiştir. Numune, çeşitli maseral gruplarını içeren yanmamış kömür, kuvars, pirit, melnikovit, hematit ve kil grubu mineraller ile birlikte camsı fazı oluşturan silis, alümina, demir, kalsiyum, magnezyum bileşikli puzolan malzemelerden oluşmaktadır.

Deneylere esas olan cüruf numunesindeki yanmamış karbonun, özgül ağırlık farkına göre zenginleştirme, flotasyon ve liç yöntemleriyle kazanılması amaçlanmıştır.

Özgül ağırlık farkına göre yapılan zenginleştirme, ağır ortam ile ayırma (yüzdürme-batırma), jig ve sarsıntılı masa deneylerini kapsamaktadır. Bu grup deneylerde en iyi sonuçlar yüzdürme batırma ve sarsıntılı masa deneylerinde elde edilmiştir. -4+0,1mm tane boyutunda yapılan yüzdürme batırma deneylerinde, deneye giren numunenin miktarca % 2,6' sı oranında % 14,90 kül içerikli konsantre ile -2+0,1mm tane boyutunda yapılan sarsıntılı masa deneylerinde, deneye giren numunenin miktarca % 8,4' ünden % 29,97 kül içerikli konsantre elde edilmiştir.

Flotasyon ile zenginleştirme, klasik ve kolon flotasyonu deneylerini kapsamaktadır. Klasik flotasyon ve kolon flotasyonu deneyleri gazyağı, mazot ve montanol kullanılarak yapılmıştır. Klasik flotasyon deneylerinde en iyi sonuç -74 µm tane boyutunda ve pH 11,80' de, 6000 g/t gazyağı kullanılarak yapılmıştır, deneye giren numunenin miktarca % 3,1' inden % 59,77 kül içerikli konsantre elde edilmiştir. Kolon flotasyonu yöntemi ile yapılan zenginleştirme deneylerinde en iyi sonuca -74 µm tane boyutunda, pH 11,80 ve toplayıcı reaktif olarak 7500 g/t gazyağının kullanıldığı flotasyon deneyinde ulaşılmış olup deneye giren numunenin miktarca % 6,7' sinden % 56,62 kül içerikli konsantre kazanılmıştır.

Liç yöntemiyle yapılan zenginleştirme deneylerinde en iyi sonuç 350 gr/lt HCl konsantrasyonunda elde edilmiş olup, deneye giren numunenin mikarca % 49' undan % 52,63 kül içeriğiyle konsantre elde edilmiştir.

RECOVERY UNBURNED CARBON FROM SOMA THERMAL POWER PLANT SLAGS

SUMMARY

Slag is defined as material accumulating under furnaces resulted from burning coal at thermal power plants. The aim of this thesis is to investigate the facilities of recovering unburned carbon from coal slags obtained from Soma Thermal Power Plant with various enrichment methods.

The main purpose is to recover unburned carbon from slag sample with methods of enrichment by specific gravity difference, flotation and leaching.

The constant carbon and ash content of coal slag sample obtained from Soma Thermal Power plant were determined as 13,36% and 69,84% respectively. Sample used in this study consists of unburned coal with several macerals, quartz, pyrite, melnicovite, iron oxide, clay minerals and pozzuolana materials composed of silica, alumina, iron, calcium, magnesium which also forms glassy phase.

Enrichment methods which relies on the differences in specific gravity includes heavy media separation (sink-float tests), jigging and vibrating table tests. Among those group of experiments, best results are from sink-float and shaking table experiments. In sink-float experiments, the best result has been recorded with -4+0,1mm size sink-float experiment and %14,90 ash content concentration was obtained which is %2,6 of the sample in the experiment. In shaking table experiments which are conducted with size of -2+0,1mm, %29,97 ash content concentration was obtained from %8,4 of the sample in the experiment.

Enrichment through flotation consists of classical and column flotation experiments. Classical flotation and column flotation experiments are conducted using kerosene, fuel oil and montanol. Best result in classical flotation experiments was in size of -74 μ m and pH 11,80, using 6000 g/t kerosene. In this experiment, %59,77 ash content concentration was obtained from %3,1 of the sample in the experiment. In column flotation method enrichment experiments, best results are shown with -74 μ m size, pH 11,80 and 7500 g/t kerosene as collector reactive. In this experiment, %56,62 ash content concentration was obtained from %6,7 of the sample in the experiment.

Best results in the experiment which is conducted through the leach method has been obtained with 350 gr/lit HCl concentration and %52,63 ash content concentration was obtained from %49 of the sample in the experiment.

1. GİRİŞ

Kömür, Türkiye’ de rezervi en yüksek olan fosil yakıtımızdan biridir. Bundan dolayı, kömüre dayalı çalışan termik santrallerin sayıları diğer kaynaklarla termik santrallerden daha fazladır. Türkiye’ de 13 adet kömüre dayalı elektrik üreten santral mevcuttur. Bu santrallerde yakılan kömürden açığa çıkan yanma ürünleri uçucu kül, taban külü ve cüruftur ve bu ürünlerin yaklaşık % 80’ i uçucu küldür. Kömüre dayalı termik santrallerden en fazla miktarda açığa çıkan kömürün yanma ürünü uçucu küldür. Uçucu küller termik santrallerde pulverize olarak öğütülmüş kömürün 1100 °C’ den daha yüksek sıcaklıklarda yakılması sonucu baca gazlarıyla sürüklenen yanma ürünleridir ve tane boyutları 100 mikron altıdır. Termik santrallerde uçucu kül haricinde, kömürün kazanlarda yakılması sonucunda baca gazlarıyla taşınamayıp kazan tabanına düşen taban külü ve kazan altından alınan cüruf olarak isimlendirilen atık ürünler de oluşmaktadır. Türkiye’ deki kömüre dayalı termik santrallerden yanma ürünlerinin senede 16 milyon tonun üzerine çıktığı bilinmekte ve üretilen atıkların ancak %10’ u değerlendirilmektedir. Geriye kalan miktar çevreye zarar vermekle birlikte, üretime dönüştürülmeyen atıklar için gün geçtikçe büyük depolama alanları gerekmektedir. Bu durum hem depolama maliyetlerini arttırmakta hem de çevresel yapıya zararlar vermektedir [1,2].

Uçucu küller ve taban külleri çimento endüstrisinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Uçucu küllerin çimento üretiminde tercih edilmesinin esas nedenleri; ince boyutlu olmaları sayesinde öğütme masraflarının düşmesi, puzolan özellik taşımaları ve içerdikleri CaO miktarlarının yüksek olması sayesinde çimento hammadde masraflarının azalmasıdır. Taban külleri ise bazı ülkelerde (A.B.D, İspanya) kimyasal ve fiziksel özelliklerinden dolayı çimento ve hafif beton üretiminde hammadde olarak kullanılmaktadırlar[3].

Cüruf, termik santrallerde kömürün yakılması sonucu kazan altından alınan kömürün yanma ürünüdür biridir. Yurtdışında yapı malzemesinden tarıma kadar geniş kullanım alanına sahip olan bu malzeme ülkemizde değerlendirilmemektedir [1].

1.1 Tezin Amacı

Bu tezin amacını, Soma Termik Santral cüruflarından yanmamış karbonun kazanılması ve bu kaynağın endüstride kullanım olanaklarının araştırılması oluşturmaktadır. Bu çalışma sayesinde ikincil bir kaynağın değerlendirilmesi mümkün olacaktır. Bu olgu; hem ekonomik hem de çevresel fayda getirecektir.

Bu çalışma, kömürle çalışan termik santrallerden elde edilen ürünler hakkında genel bilgileri, cüruf üzerinde yapılan deneysel çalışmaları ve sonuçlarını kapsamaktadır.

2. KÖMÜRÜN TANIMI VE ÖZELLİKLERİ

2.1 Kömürün Tanımı ve Oluşumu

Kömür, havanın oksijeni ile doğrudan doğruya yanabilen, %55 ile %95 arasında, serbest veya bileşim halinde karbon ihtiva eden, katı organik kökenli kayalar olarak tanımlanmaktadır [4].

Bitkilerin, doğa olaylarının etkisi altında zamanla bozularak fiziksel ve kimyasal değişimlere uğraması sonucu, kömürleri meydana getirdiği bugün kesin olarak bilinmektedir.

Bitkilerde fiziksel ve kimyasal değişimlere yol açan doğa olayları arasında bakteri ve mantar hücrelerinin faaliyetleri, oksitlenme, redüklenme, hidroliz ve damıtım (kondansasyon) ile su ortamında ısı ve basıncın etkileri sayılabilir. Fiziksel değişimlerden başlıcaları rengin kararması, parlaklık, sertlik, sıklık ve kırılabilirliğin artmasıdır. Kimyasal değişimler ise esas olarak, rutubet ve karbon, hidrojen ile oksijen bileşiklerinden oluşan uçucu maddelerin (karbon dioksit ve metan gazları gibi) kısmen kaybolarak azalması, geri kalan maddelerin molekül yapılarının değişmesi, sabit karbon ve kül oranlarının artması şeklindedir. Bitkilerin kömürlere dönüşümü sırasında meydana gelen olaylar iki aşamada meydana gelir. İlk aşamada turbalar oluşur ardından ikinci aşamada ise turbalar kömüre dönüşür. Kömürleşme sürecindeki fiziksel ve kimyasal değişimler binlerce, hatta milyonlarca yıl sürer.

Turbalar kömürleşme olayının ilk kademesini oluştururlar, ancak turbalar kömür değildirler. Turba oluşumunun başlama şekli konusunda iki teori öne sürülmüştür. Bunlardan birine göre, turba oluşumu bataklıklarda yetişen bitkilerin öldükten sonra yıkılıp aynı yerde birikmeleri ile başlamıştır. Diğerine göre ise, belirli bir bölgede yetişen bitkiler, rüzgâr ve seller tarafından taşınıp, sulu bölgelerde birikerek turba oluşumunu başlatmıştır. Birikimleri her ne şekilde olursa olsun turbalıkta çökelen organik maddeler, bakteri faaliyetleri sonucu, hidroliz, oksitlenme ve indirgenme süreçlerini içeren biyokimyasal değişikliklere uğrarlar ve böylece turba gelişir. Turba oluşumu sırasında, önce organik maddelerden hümik asitler meydana gelir.

Hümik asitlerin asidik karakterlerini kaybetmesi sonucu hüminler oluşur. Hümin ve bozunmakta olan organik madde (odun), turba olarak isimlendirilmektedir.

Turbaların kömüre dönüşümü, üst tabakaların basıncı, dağ oluşumları ve tektonik olayların etkisi ile gerçekleşmiştir. Yerkabuğundaki hareketlerden, basınç artmasından, kimyasal reaksiyonlardan ve yeraltı kaynaklarından ileri gelen ısılar da turbaların kömüre dönüşümünde rol oynar. Turbalarda meydana gelen kimyasal değişiklikler sırasında rutubet azalmakta, karbon dioksit ve metan gazları çıkarak karbonca zenginleşme olmaktadır. Odundan turbaya ve daha sonra kademeli olarak antrasite kadar çeşitli kömür türlerine dönüşümler sırasında kimyasal değişimler Çizelge 2.1’ de gösterilmiştir. Çizelge 2.1’ den görüldüğü gibi, kömürleşme olayı ilerledikçe oksijen ve uçucu madde oranları azalmakta, buna karşılık karbon oranı yükselmektedir. Hidrojen oranında ise, yüksek sınıflı kömürlere gelinceye kadar önemli bir değişiklik olmamaktadır [4].

Çizelge 2.1 : Kömürleşme olayı sırasında odun, turba ve çeşitli kömür türlerinin kimyasal bileşimlerinde meydana gelen değişiklikler [4].

Odundan Antrasite	Ham Durumdaki	Kuru ve Külsüz Bazına Göre, %			
	Nem, %	Karbon	Hidrojen	Oksijen	Uçucu Madde (900 °C’ de)
Odun (Tipik Bileşim)	20	50	6.0	42.5	75
Turba (Tipik Bileşim)	90	60	5.5	32.3	65
Kahverengi Kömür	60-40	60-70	~5.0	> 25	> 50
Linyit	40-20	65-75	~5.0	16-25	40-50
Alt Bitümlü	20-10	75-80	4.5-5.5	12-21	~45
Bitümlü	10	75-90	4.5-5.5	5-20	18-40
Yarı Bitümlü	< 5	90-92	4.0-4.5	4-5	5-20
Antrasit	< 5	92-94	3.0-4.0	3-4	1-5

2.2 Kömürün Özellikleri

2.2.1 Kömürün fiziksel özellikleri

Nem: Kömürlerde yüzey ve bünye nemi olmak üzere iki çeşit nem bulunur. Bünye nemi kömürün yapısında yer alır ve kömür tarafından adsorbe edilmiş olan ve inorganik maddelere bağlı bulunan sudan oluşur. Bünye nemi kömür türüne göre çok farklılık gösterir. Bitümlü kömürlerde % 1-3 gibi düşük bir seviyede iken, linyitlerde % 45' e kadar çıkabilmektedir. Kömürdeki nem oranının genellikle mümkün olan en düşük seviyede olması istenir. Aksi halde, nem kömürün birim kütlesindeki enerjiyi azaltır [4].

Özgül ağırlık: Tüvanan kömürdeki herhangi bir parçanın özgül ağırlığı, bu parçanın külüne, nemine, sabit karbon miktarına ve uçucu madde oranına bağlıdır. Kömürün külü arttıkça, özgül ağırlığı da artar, ancak bu artışlar birbiriyle doğru orantılı değildir. Ayrıca, külün özgül ağırlık üzerindeki etkisi kül yapıcı maddelerin cinsine göre değişir. Saf kömürün özgül ağırlığı, kömürün ait olduğu sınıfa göre değişir ve aşağıda görüldüğü gibi, linyitten antrasite doğru gittikçe artar. Kömür türlerinin özgül ağırlıkları; linyit için $0,05-1,30 \text{ g/cm}^3$, bitümlü kömür için $1,15-1,70 \text{ g/cm}^3$, antrasit için $1,40-1,70 \text{ g/cm}^3$ aralığındadır [4].

Stüktür ve kırılma: Kömürde ilk kırılma madencilik işlemleri sırasında olur. Bu işlemlerdeki kırılmalar sonucunda meydana gelen parçaların büyüklük ve şekilleri uygulanan kazı yöntemi ile birlikte, kömür yatağının ana kırık, çatlak ve zayıf yüzeyler sistemine bağlıdır. Bu sistemin özellikleri kömürden kömüre değişir ve özellikle kazı işlemlerinde önem taşır. Kırık ve çatlak sistemine en yoğun biçimde düşük uçuculu bitümlü kömürlerde rastlanır. Kırık ve çatlak sisteminin fazla belirgin olmadığı ve kırılma yüzeylerinin birbirinden uzak bulunduğu kömürleri ise “sağlam” yapılı olarak tanımlamak mümkündür [4].

Tane boyutu dağılımı: Temiz kömürün satış değerini belirleyen kül, kükürt ve kalorifik değer gibi ana faktörlere, daha az önem taşımakla beraber, tane boyutunu da ilave etmek mümkündür. Nitekim bazı satışlarda, kömürde belirli bir boyutun altındaki malzeme oranının belirli bir sınırı geçmemesi koşulu aranır. Ender olarak da belirli bir boyutun üzerinde malzeme istenmez.

Sertlik: Kömürün sertliği, ufalanabilme ve öğünebilme özelliklerine etki eder. Kömürün sertliği, kömürün ait olduğu sınıfa bağlı olup, karbon ve uçucu madde oranlarına göre değişiklik gösterir. Kömürler arasında genellikle, en yumuşak olanı linyit, en sert olanı da antrasittir. Antrasitin sertliği Mohs sisteminde 2.73-3 arasındadır.

Mukavemet: Kömürün basınca karşı mukavemeti, madencilikte tahkimat için kullanılan kömür topukları ile kırma ve öğütme işlemlerinde önem taşır. Baskı mukavemeti kömürün türü ve petrografik yapısı ile ilgilidir. Kömürün sahip olduğu en düşük mukavemet değeri uçucu maddenin % 20-25 olduğu oranlardadır. Ayrıca kömürde vitrain oranı yükseldikçe baskı mukavemeti azalır.

Ufalanabilirlik: Herhangi bir parçanın kendinden küçük parçalara kırılabilme eğilimidir ve kömürün en önemli özelliklerinden birini oluşturur. Kolay ufalanabilen kömürlerin bazı sakıncaları vardır. Herşeyden önce, bu tür kömürlerde, fiyatı genellikle daha yüksek olan iri malzeme oranı azdır. Ayrıca, ince malzemenin çokluğu nedeni ile yüzey alanı büyüktür. Yüzey alanının büyük olması ise oksitlenmeyi hızlandırarak ani yanmalara ve koklaşan kömürlerde koklaşma kalitesinin azalması veya kaybolmasına neden olabilir. Ayrıca, fazla ufalanan kömürlerde ince malzeme oranının artması, zenginleştirme masraflarının da artmasına yol açar. Kömürün ufalanabilirliği, sertlik, mukavemet, sıklık, elastiklik ve kırılgenlik gibi özelliklerine bağlıdır.

Öğünebilirlik: Kömürün öğünebilme özelliği, özellikle kömürün toz yakıt olarak kullanılmak üzere öğütölmesi sırasında önem taşır. Öğütme için kullanılan aygıtların kapasitelerinin belirlenmesinde, öğütme için gerekli enerjinin saptanmasında ve tesis kontrolünde, öğünebilme özelliğinden yararlanılır. Kömürün öğünebilirliği, kömürün sertlik, mukavemet ve kırılgenlik gibi fiziksel özellikleri ile ilişkilidir [4].

Açık havada dağılgenlik: Kömürlerin kendiliğinden dağılmasına, ıslanma veya kuruma sırasında, kömür parçalarının yüzeyleri ile iç kısımları arasında oluşan farklı gerilimler neden olmaktadır. Dağılma derecesi kömür sınıfına bağlıdır. En fazla dağılma düşük sınıflı kömürlerde görülür. Linyitler çok rahatlıkla dağılırlar. Alt bitümlü kömürlerin dağılgenliği linyitlere göre daha azdır. Bitümlü kömürler ise hava koşullarından çok az etkilenirler.

Aşındırıcılık: Kömürün aşındırma özelliği ekonomik yönden önemli bir faktördür ve kömür maddesinden çok, kömürdeki artık maddelerden ileri gelmektedir. Bu nedenle, özellikle madencilikte, kömür aşındırıcı bir madde olarak kabul edilir. Madencilik işlemleri sırasında delme, kesme ve taşıma araçlarında ve toz yakıt kullanan santrallerde öğütme araçlarında büyük aşınmalardan dolayı sorunlara neden olur.

Sürtünme Katsayısı: Kömürün sürtünme katsayısı, yüzeylerinde kömürün kaydığı oluklar, silolar, sabit elekler v.b. gibi teçhizatın planlanmasında rol oynar. Sürtünme katsayısı; ıslaklık, kayma yüzeyinin özellikleri, kömür türü, tane boyutu ve kil oranı gibi faktörlere bağlı olup, kömürün kayacağı yüzeyin sahip olması gereken en düşük eğimi tayin etmektedir. Bu eğim, kuru ince kömürde 16°' den, bazı ıslak ve killi kömürlerde 90°' ye kadar çıkabilir.

Renk ve çizgi rengi: Kömürlerin rengi, açık kahverenginden koyu siyaha kadar değişir. Linyitler açık kahverengi ile koyu kahverengi arasındadır. Üst sınıftaki kömürlerde ise, siyahın açıktan koyuya kadar değişen çeşitli tonlarına rastlanır.

Parlaklık: Kömürler mat veya parlak olabilmektedirler. Antrasit genellikle parlak olmakla beraber mat kısımları da bulunmaktadır. Linyitler daha çok mat ve toprağımsı görünümlüdürler. Bitümlü kömürlerin görünümleri ise mat ile parlak arasında değişmektedir.

Gözeneklilik: Gözeneklilik gözeneklerin işgal ettiği hacim yüzdesidir. Kömürler oldukça gözenekli maddelerdir ve toplam gözenek hacminin önemli bir kısmı çok küçük gözenekler tarafından oluşturulmuştur.

Elektrik iletkenliği: Elektrik iletkenliği, elektrik öz direncinin tersi olarak tanımlanır. Kömür öz direnci genel olarak $1-10^{14} \Omega \text{ cm}$ arasında değişen bir yarı iletkendir. Kömürün öz direnci yaşı arttıkça biraz artar [4].

Isıl iletkenlik: Bir maddenin ısı iletkenliği, ısı enerjisini sıcak bir bölgesinden daha soğuk bir bölgesine iletme özelliğidir. Uçucu maddesi, nem içeriği ve yoğunluğunun artmasıyla kömürün ısı iletkenliği artmaktadır.

Manyetik duyarlık: Organik bileşiklerin çoğu diamanyetiktir. Bu nedenle, kömürün organik kısmı da diamanyetiktir. Kömürün içerdiği inorganik maddeler ise paramanyetik ve ferromanyetik olabilir. Kömürde mineral maddelerin büyük bir çoğunluğu paramanyetiktir [4].

2.2.2 Kömürün kimyasal özellikleri

Kömür külü: Kömür yandığında içindeki inorganik maddeler oksitlenip parçalanarak genellikle oksitlerden oluşan bir katı atık bırakır. Bu artışa kömürün külü ve külün oluşmasına neden olan inorganik maddelere kömürün mineral madde içeriği denir. Bu nedenle kömürün mineral madde içeriği ile kömür oranı arasında bir bağlantı vardır. Mineral madde kömürün içerisine iki yolla gelebilir. Bunlardan ilki bitkinin yapısından gelen mineral maddesi ikincisi ise kömürleşme sırasında veya sonunda dışarıdan gelen mineral maddedir. Kömürün içerdiği mineral maddeler Çizelge 2.2’ de gösterilmiştir [4,5].

Çizelge 2.2 : Kömürün içerdiği mineral maddeler [5].

Mineral ismi	Kimyasal formül	Mineral İsmi	Kimyasal Formül
Killi mineraller		<i>Sülfür Mineralleri</i>	
Montmorillonit	$Al_2Si_4O_{10}(OH)_2 \cdot xH_2O$	Pirit	FeS_2 (kübik)
İllit-Serisit	$KAl_2(AlSi_3O_{10})$	Markasit	FeS_2 (ortorombik)
Kaolinit	$Al_2Si_2O_5(OH)_4$	Sphalerit	ZnS
Halloysit	$Al_2Si_2O_5(OH)_4$	Galen	PbS
Klorit	$Mg_3Al(AlSi_3O_{10})(OH)_8$	Kalkopirit	$CuFeS_2$
Karbonat Mineralleri		Pirotit	FeS
Kalsit	$CaCO_3$	Arsenopirit	$FeAsS$
Dolomit	$(Ca, Mg)CO_3$	Millerit	NiS
Siderit	$FeCO_3$	<i>Sülfat Mineralleri</i>	
Ankerit	$(Ca, Fe, Mg)CO_3$	Barit	$BaSO_4$
Hiterit	$BaCO_3$	Jips	$CaSO_4 \cdot 2H_2O$
Klorür Mineralleri		Anhidrit	$CaSO_4$
Halit	$NaCl$	Bassanit	$CaSO_4 \cdot \frac{1}{2}H_2O$
Silvit	KCl	Jarosit	$(Na, K)Fe_3(SO_4)_2(OH)_6$
Bişofit	$MgCl_2 \cdot 6H_2O$	Szomolnokit	$FeSO_4 \cdot H_2O$
Silikat Mineralleri		Rozenit	$FeSO_4 \cdot 4H_2O$
Kuars	SiO_2	Meianterit	$FeSO_4 \cdot 7H_2O$
Biotit	$K(Mg, Fe)_3(AlSi_3O_{10})(OH)_2$	Coquimbit	$Fe(SO_4) \cdot 9H_2O$
Zirkon	$ZrSiO_4$	Roemerit	$FeSO_4 \cdot Fe_2(SO_4)_3 \cdot 12H_2O$
Staurolit	$Al_4FeSi_2O_{10}(OH)_2$	Oksit ve Hidroksit Mineralleri	
Epidot	$Ca_2(Al, Fe)_3Si_3O_{12}(OH)$	Hematit	Fe_2O_3
Augit	$Ca(Mg, Fe, Al)(Al, Si)_2O_6$	Goethit	$FeO \cdot OH$
Hornblende	$NaCa_2(Mg, Fe, Al)_5(SiAl)_8O_{22}(OH)_2$	Lepidocrocit	$FeO \cdot OH$
Topaz	$Al_2SiO_4(OH, F)_2$	Diaspore	$AlO \cdot OH$
Fosfat Mineralleri			
Florapatit	$Ca_5(PO_4)_3(F, Cl, OH)$		

Kükürt: Kömürde kükürt organik kükürt ve inorganik kükürt olmak üzere iki ayrı kaynaktan gelmektedir. Organik kükürt bitkiden gelen kükürttür, yani kömürün kimyasal yapısına bağlıdır ve fiziksel yöntemlerle kömürden ayrılamaz. İnorganik kükürt ise mineral maddelerdeki kükürttür ve fiziksel yöntemlerle belli oranlarda kömürden uzaklaştırılabilir. İnorganik kükürt pirit, markazit, jips gibi minerallerle kömürde bulunmaktadır [4].

Uçucu madde: Kömür oksijensiz ortamda ısıtıldığı zaman sıvı ve gaz ürünler halinde çeşitli maddeler çıkmakta ve geriye kok adı verilen bir katı bırakmaktadır. Isıtmaya bağlı olarak çıkan gaz ve sıvı maddelere kömürün uçucu maddesi denmektedir. Kömür havasız bir ortamda ısıtıldığı zaman, önce kurur ve üzerinde adsorbsiyon gazları (N_2, CO_2) çıkar ve ardından parçalanmaya başlar. Kömürün parçalanması sırasında, kömür kimyasal yapısındaki yan zincirlerle, aromatik olmayan kimyasal grupların parçalanarak kömürün yapısından ayrılırlar. Bu şekilde geride kalan miktarın aromatikliği ve karbon oranı artmaktadır [4].

Kömürleşme derecesi arttıkça uçucu madde oranı azalmaktadır. Uçucu madde oranı en az olan antrasittir. Antrasitten taşkömürü sert linyitler ve yumuşak linyitlere gidildikçe uçucu madde miktarı artmaktadır [4].

2.2.3 Kömürün petrografik özellikleri

Kömür yapı itibarıyla homojen bir madde olmayıp heterojen bir maddedir. Çeşitli fiziksel ve kimyasal bileşimdeki bitkisel kısımların metaformizması ile oluşmuş, yanabilir bir kayadır. Orijinal durumdaki bitki kısımlarının ve kömürleşme sürecinin farklılığı, kömürlerde değişik fiziksel ve kimyasal yapıdaki oluşumları meydana getirir. Bu oluşumlar genellikle bantlı yapıdadır ve gözle seçilebilir. Kömürün iyi bir şekilde değerlendirilmesi ve kullanılması, bunu içindeki oluşumların (litotiplerin) tanınmasına, bilinmesine ve gerektiğinde birbirinden ayrılmasına bağlıdır. Kömürün ince kesit veya parlatma halinde hazırlanması ile yapılacak mikroskop incelemeleri, bu oluşumların da değişik yapıda ve gözle seçilemeyen bitki parçalarından oluştuğunu ortaya koyar. Litotipleri meydana getiren bu mikroskobik bitki parçalarına “maseral” adı verilir [4].

Uluslararası Kömür Petroloji Komitesi tarafından kabul edilen Stopes-Heerlen sistemine göre Çizelge 2.3’ de kömür litotip ve maserelleri, Çizelge 2.4’ de kömür litotiplerinin fiziksel ve kimyasal özellikleri verilmiştir [4].

Çizelge 2.3 : Kömürdeki litotip ve masereller [4].

Gözle görülebilen	Mikroskopta görülebilen	
Litotipler	Grup Maserelleri	Masereller
Vitrain	Vitrinit	Kollinit, Tellinit
Clarain	Vitrinit	kollonit, tellinit
Durain	İnertinit	Fusinit, kollonit, tellinit Alginit, wax, reçine
	Vitrinit	
	Exinit	
Fusain	İnertinit	Fusinit

2.2.3.1 Litotipler

Kömürün litotipleri vitrain, clarain, durain ve fusain'dir. Vitrain, Kömürün en parlak bantıdır. Homojen bir yapıya sahiptir. Yüzeyi konkav olan küpler şeklinde kırılır. Eli boyamaz ve kırılmandır. Clarain, Parlak olup, donuk şeritler içerir. Bileşimi vitrain ve durain oranlarına göre değişir. Kömürlerin en yaygın bantıdır. Durain, Kömürün donuk bantıdır. Rengi, griden kahverengimsi siyaha kadar değişiklik gösterir ve çok serttir. Kırıldığında düzgün yüzeyler verir. Fusain ise, Kömür bantları arasında odun kömürünü andıran ipliksi yapısı, siyah ve grimsi-siyah rengi ile ayırt edilebilen, kırıldığında eli boyayan çok kırılman ve toz haline gelebilen bir banttır. Bazı hallerde içerdiği mineraller yüzünden sertlik kazanır [4].

2.2.3.2 Masereller

Kömürün maserelleri vitrinite, exinit ve inertinitedir. Vitrinite, parlak kömürlerin en yaygın birimi olup, yansıyan ışıktaki gri renkte görünür. Orijini ağaç ve ağaç kabuğu dokusuna dayanır. Karbon yüzdesi kömürleşmeye bağlı olarak değişir. Exinite, orijini ağaç dokusu dışındaki bitkisel maddelere dayanan bu grup masereller mikro ve makro sporlardan, hücrelerin dış yapılarından, reçine ve yosun artıklarından oluşur. Yansıyan ışıktaki makro sporlar kırmızımsı gri, diğerleri daha koyu bir gri renkte görülürler. İnertinite, belirgin hücre yapısı gösterir. Orijini bitkinin ağaç dokusuna dayanır. Yansıyan ışıktaki sarımsı beyaz renkte görülürler [4].

Çizelge 2.4 : Kömür litotiplerinin fiziksel ve kimyasal özellikleri [4].

Litotip	Görünüş	Kül %	Uçucu M %	Sabit C%	Isıl Değer Kcal/kg	Yoğunluk	Sertlik (fusain)
Vitrain	Homojen, parlak siyah bantlı	0,5-1	35,1	64,9	7800	1,3	2
Clarain	Tabakalı, parlak-mat bantlı	0,5-2	40,3	59,7	7800	1,3	3
Durain	Mat, yansımaz, zayıf tabakalı	1,5	53,8	46,2	8000	1,25-1,45	7,5
Fusain	Odun kömürü	5,1	9,5	90,5	8000	1,35-1,45	1

2.3 Kömürün Sınıflandırılması

Bir kömürün fiziksel ve kimyasal özellikleri, kömürlerin sınıflandırılmasında ve kömür kalitesinin belirlenmesinde kullanılmaktadır. Özellikle ticari kömür sınıflamalarında en çok kullanılan A.S.T.M kömür sınıflandırmasında ana sınıf olarak sözü edilen linyit, yarı bitümlü, bitümlü ve antrasit kömürlerinin standart özellikleri Çizelge 2.5’ te verilmiştir [4].

Çizelge 2.5 : Kömürlerin A.S.T.M. sınıflandırması [4].

Ana Sınıflar	Alt Sınıflar	Külsüz Baza Göre Sabit C %	Külsüz Baza Göre Uçucu Madde %	Nemli Baza Göre Alt Kalorifik Değer Kcal/kg	Özellikler
I Antrasit	1.Meta Antrasit	98	2		Koklaşmaz Hava etkisi ile bozulmaz
	2.Antrasit	92	8		
	3.Semi Antrasit	89	14		
II Taşkömür (Bitümlü Kömür)	1.Düşük Uçucu K.	78	22		Koklaşır Hava etkisi ile bozulmaz
	2.Orta Uçucu K.	69	31		
	3.Yüksek Uçucu K.A			7800	
	4.Yüksek Uçucu K.B	69	31	7200-7800	
	5.Yüksek Uçucu K.C			6000-7200	
III Yarı Taşkömür (Yarı Bitümlü)	1.Yarı Taşkömür A			6000-7200	Koklaşmaz Hava etkisi ile bozulur
	2.Yarı Taşkömür B			5200-6000	
	3.Yarı Taşkömür C			4600-5200	
IV Linyit	1.Linyit A			4600	Sağlam yapı Gevşek yapı (koklaşmaz)
	2.Linyit B			4600	

3. TERMİK SANTRALLERDE KÖMÜR KULLANIMI

Teknolojik gelişmelerin günlük yaşama yansıması paralelinde, elektrik enerjisinin toplam enerji tüketimindeki payı da gittikçe artmaktadır. Elektrik enerjisi insan yaşamında vazgeçilmez bir enerji kaynağıdır. Bu bağlamda, bugün yaygın olarak kullanılan elektrik enerjisi üretiminde verimliliği arttırmak, kalite ve güvenilirliğin azaltılmaması koşuluyla üretim maliyetlerini ve sistem kayıplarını en aza indirmek, elektrik enerjisi sistemlerinin planlanması ve işletilmesinde en önemli hedefler haline gelmiştir. Bu kapsamda yanma öncesi kömürün, termik santralin dizayn değerlerini sağlayacak şekilde kalitesinin iyileştirilmesi zorunlu olmaktadır. Mevcut ve gelecekte tesis edilecek linyite dayalı termik santrallerde, santral teknolojisi, kömür özelliklerinin tespitine yönelik teknolojik araştırmalar, kömür üretim ve hazırlama sistemleri, santralin kömür alma, stoklama ve homojenleştirme sistemleri birlikte değerlendirilerek ortaya çıkan ve çıkacak olan olumsuzlukların çözülmesi gereklidir [5].

Ülkemizde elektrik üretim tesislerinin toplam kurulu gücü 40.761,3 MW'tır. Bu kurulu güç içindeki linyit yakıtlı termik santrallerin payı %20' dir. 2006 yılında ülkemizde üretilen toplam 176.298,6 Milyon kWh net elektrik enerjisinin 22.376 Milyon kWh'ı (%12.7) kamu tarafından işletilen linyit yakıtlı termik santrallerden üretilmiştir. Bu üretim için toplam 41.035.689 ton linyit kullanılmıştır. Ağırlıklı ortalama alt ısı değeri (AİD) 1.575 kcal/kg olarak gerçekleşmiştir. Türkiye'de, kamu'nun elinde toplam 37 üniteden oluşan 11 adet linyit yakıtlı termik santral vardır. Normal işletme koşullarında (tam yükte ve yılda 6.500 saat çalışma ile) bu santrallerin kullanacağı kömür miktarı 84.6 milyon ton/yıl olarak hesaplanmıştır. Bu verilere göre linyit kullanım oranı %48 olmuştur. Bu değerin düşük olmasının birçok nedeni vardır. En başta gelen kömürden kaynaklanan sorunlardır [5].

Ülkemizde elektrik enerjisi üretiminde çok önemli bir paya sahip olan linyit yakıtlı termik santraller; kullanacakları kömür rezervinin fiziksel ve kimyasal özelliklerine göre dizayn edilirler. Termik santrallerin işletme dönemindeki kömür özelliklerinin, santral tasarımı aşamasında kullanılan kömür özelliklerinden düşük olması, kömüre

Üretim esnasında karışan inorganik maddelerden kaynaklanmaktadır. Bu durum, termik santrallerde işletme şartlarının bozulmasına, üretim kayıplarına, teknik, ekonomik ve çevresel etkiler bakımından olumsuz koşulların ortaya çıkmasına neden olmaktadır.

Termik santrale verilen kömürün iyileştirilmesi için, kömür hazırlama tesislerine, zenginleştirme proseslerinin ilavesi ve/ veya harmanlama-homojenizasyon yapmak zorunludur. Şekil 3.1’ de, kömürle çalışacak bir termik santralde, kömürün arama safhasından termik santralde yakma aşamasına kadar geçireceğı aşamaların akım şeması verilmiştir. Şekil 3.1’ de gösterilen her aşamanın, termik santrallerin maksimum düzeyde ve düzenli bir şekilde elektrik üretmesi için yerine getirilmiş olması önem arz etmektedir [5].

3.1 Kömüre Dayalı Termik Santrallerde Kömür Miktar ve Kalitesinin Önemi

Kömürün termik santrallerde kullanımı sırasında, kömürün miktar ve özelliklerinin değışiminden kaynaklanan nedenler ile, üretilemeyen elektrik enerjisi önemli bir yer tutmaktadır. Termik santral kurulmadan önce, termik santralde yakılacak olan kömürlerin miktar ve özelliklerinin tam olarak belirlenmemesinden kaynaklanan önemli enerji kayıpları, kömürlerin ziyan olmasına neden olmakta ve termik santrallerde üretilen elektrik verimlerinin düşük olması nedeniyle kWh başına elektrik üretim maliyetlerini de önemli boyutlarda arttırmaktadır. Üretilemeyen elektrik enerjisinin nedenlerinin ortaya konulabilmesi için, kömürün arama aşamasından yakılmasına kadar çeşitli unsurların kurulacak olan termik santraller yönünden analiz edilmesi önem arz etmektedir. Türkiye’ de mevcut 13 adet kömüre dayalı termik santrallerde kömür miktar ve özelliklerinden kaynaklanan nedenlerle üretilemeyen elektrik enerjisi miktarı 1997’ de 4.5 milyar kWh iken, 1998’ de yaklaşık 5.5 milyar kWh’ ye yükselmiştir [5].

3.1.1 Yakıttan kaynaklanan sorunlar ve kömür hazırlamanın termik santraller için önemi

Kömür hazırlama; kömürün iyileştirilmesi ve özel kullanımlara uygun bir hale getirilmesi için uygulanan fiziksel ve mekanik işlemler olarak tanımlanmaktadır. Bir başka deyişle, Kömür Hazırlama, üretilen kömürden çeşitli teknolojilerin istediğı ürünleri elde etmek üzere yapılan işlemlerin tümüdür. Bu tanımlardan hareketle,

termik santraller için kömür hazırlama işlemi; tüketim yerinin teknolojik koşullarına uygun hale getirmek ve tüketimde kolaylıklar sağlamak amacıyla, kömürdeki inorganik madde içeriğini azaltarak kalorisini yükseltme ve harmanlama/homojenizasyon yaparak santrale sevk etmek olarak tanımlanabilir [5].

Termik santral kazanlarında yakılacak kömürün kimyasal ve fiziksel özellikleri kazan dizayn değerlerine uygun olmalıdır. Ancak bu durumda kazandan yüksek performans ve verim alınabilir.

Kömür içindeki kül yapıcı yabancı maddelerin artması, kömür hazırlama ve nakil tesislerindeki taşıma bantlarında hasarlara ve yırtılmalara, kırma-eleme ve öğütme tesislerinde büyük çapta malzeme aşınmalarına, tesislerde tıkanmalara sebep olmakta ve santralde elektrik üretimini aksatarak çok büyük ekonomik kayıplara yol açmaktadır. Kömürdeki kül oranının artması, kazan içinde de üretimi etkiler. Bu durumda kazan içerisinde fazla kül oluşacağından kazan boru sistemlerinde aşınmalar ve boru patlamaları olmakta, santral sık sık devre dışı kalmakta ve dolayısıyla büyük üretim kayıpları oluşmaktadır. Ayrıca aşırı kül ve cürufun kazandan atılmasında da aksaklıklar olmakta ve santralde yük düşmeleri meydana gelmektedir.

Kömürde nemin istenenden fazla olması durumunda, kömür nakil sistemlerinde tıkanma, sıvanma ve aşınmalar olmasının yanında kazan yanma odasında sıcaklık düşmesine sebep olmakta, santral verimini ve elektrik üretimini olumsuz etkilemektedir. Kömürdeki nem ve külün kazan dizayn değerlerinden az olması durumunda ise kalori artacağından, kazan içinde yüksek sıcaklıklar meydana gelmekte ve kazanda büyük cüruflaşmalar olmaktadır. Kömüre dayalı termik santrallerin yakıttan kaynaklanan üretim düşüklüklerinin başlıca nedenleri maddeler halinde aşağıda açıklanmaktadır [5].

3.1.1.1 Kömür sahasındaki rezervin miktar ve özelliklerin tespiti

Aramalarla varlığı tespit edilen kömür rezervinin karakteristikleri; kömür damarından alınan karot numuneleri analize tabi tutularak orijinal ve kuru bazlarda kömürün alt ve üst ısı değerleri, kül, nem ve kükürt içeriği, elementer analizi, kömür külünün kimyası ayrıca erime, akma ve yumuşama sıcaklıkları olarak tespit edilmektedir [5].

3.1.1.2 Termik santral kazan dizaynı parametrelerinin tespiti

Arama safhasında kömür rezervi ve özellikleri belirlenmiş olan bir sahadaki rezerve yönelik olarak termik santral yapımı aşamasında, santralin kazan dizaynı için sahadan yeniden (mostra, yarma ya da aynalardan) numune alınarak analize tabi tutulmaktadır. Alınan bu numunelerden elde edilen sonuçlar hiç bir şekilde sahadaki kömür rezervini temsil etmemektedir. Sonuçta, santral kazan karakteristiklerinin belirlenmesinde bu numelerden elde edilen sonuçlar ile kömür üretimi aşamasındaki fiili durumlar arasında farklılıklar ortaya çıkmıştır [5].

3.1.1.3 Kömür ve elektrik üreticisi arasında santrale verilecek kömür miktar ve özelliklerini belirleyen esaslar

Kömür ve elektrik üreticisi arasında santrale verilecek kömürün miktarı, özellikleri, teslim yeri ve kömür boyutlarını kapsayan bir protokol yapılmaktadır. Bu protokolle temel alınan unsurlar, arama safhasında belirlenen kömür rezervinin ortalama kül, nem ve ısı değerleri ile santral yapımcısı tarafından kazan dizaynına esas sahadan alınan numunelerin analizlerinden elde edilen sonuçların birlikte değerlendirilmesi ile oluşturulmaktadır. Genelde santral yapım aşamasında belirlenen değerler, santralin işletmeye alınmasından sonra zaman içerisinde önemli sapmalar gösterebilir. Sonuçta kömür ve elektrik üreticisi arasındaki protokollerin revizyonunu gerekir. Çizelge 3.1’ de, Türkiye’deki bazı santrallerle ilgili protokol revizyonları örnek olarak verilmektedir. Kömürün Özelliklerindeki bu revizyon santrale verilecek kömür miktarını arttırmakta ya da azaltmaktadır. Ayrıca, kömürün alt ısı değerindeki bu değişikliklerle beraber, santrale verilecek kömürün kül ve nem oranlarında değişikliğe uğramıştır [5].

3.1.1.4 Kömür üretim faaliyetleri

Türkiye’de termik santralleri besleyen sahalarda kömür üretimi Soma, Tunçbilek ve Seyitömer hariç genellikle bir ocaktan yapılmaktadır. Dolayısıyla, kömür özelliklerindeki dalgalanmaları ortadan kaldıracak koşullar olmadığından üretilen kömür doğrudan termik santral stok sahasına taşınmaktadır. Ancak, kömür üretimi sırasında, kömürün özelliklerinde olumsuz yönde sapmalara neden olan damar içindeki ara kesmenin, damarın tavan ve taban formasyonlarının kömüre karışmaması için selektif bir üretimin yapılması kömür üretim teknolojisinin seçiminde ve organizasyonunda gerekli titizlik gösterilmelidir. Ayrıca, hazırlanmış

olan kömür üretim projesi için kömürün tüm kimyasal özelliklerinin dağılımını gösteren haritalar baz alınarak her aşamada üretim kontrollü olarak yapılmalıdır. Kömür üretimi aşamasında bir homojenizasyonun yapılması teknik olarak mümkündür. Ancak, zaten santral stok sahasında yapılması gereken böyle bir uygulamanın üretim aşamasında da yapılması kömür ve elektrik üretim faaliyetlerini arttırıcı bir etken olacaktır [5].

3.1.1.5 Santral kömür alma, stoklama ve harmanlama sistemleri

Kömür üreticisi tarafından termik santrallere protokollerde belirlenmiş noktalarda kömür teslimi yapılmaktadır. Termik santral stok sahalarına kömür bant ve kamyonlarla taşınmaktadır. Kömür alma noktalarındaki bunkerler, kırıcılar, elekler ve bantlarda zaman zaman problemler yaşanmaktadır [5].

Santral stok sahaları, kömür üretiminde olabilecek bir aksaklık halinde termik santralin yakıtsız kalmasını önlemek, kömür sahasından farklı özelliklerde gelen kömürleri harmanlama yöntemleri ile üst seviyede değerlendirmek ve kömür kalitesindeki dalgalanmaları en aza indirmek amacıyla tesis edilmektedir.

Kömür üreticisi tarafından teslim noktasında santral işleticisine verilen kömürler kamyon ve bantlarla kömür teslim noktalarındaki ızgara-bunker-kırıcı sistemine verildikten sonra santral işleticisi tarafından kömürler stok sahasına taşınmaktadır. Bu akış içerisinde santrale homojen kömür verilmesinde bir başka önemli husus da teslim noktalarında alınan temsili numunelerin otomatik sistemlerle alınmasındaki aksaklıklar ve hızlı bir şekilde numunelerin analize tabi tutulamamasıdır. Numune alım ve analizindeki organizasyonun hızlı olarak yapılması ve süreklilik kazandırılması kömürün homojenleştirilmesinde önemli bir unsurdur. Dolayısıyla, değişik ya da aynı kömür damarlarından üretilen ve üç boyutta da kalori, kül, nem ve diğer özellikleri itibarıyla farklılık gösterebilen, ayrıca, damar içindeki ve damarın tavan ve taban kayaçlarından üretim sırasında kömüre karışan inorganik maddeler nedeniyle kömür kalitesindeki dalgalanmaları en aza indirmek en önemli hedeflerden biri olmalıdır. Yanma veriminin arttırılabilmesi için stok sahalarında yapılacak kömür homojenleştirme çalışmalarında insan faktörünü en aza indirebilecek sistemlerin tesisine gidilmelidir [5].

Çizelge 3.1 : Bazı termik santrallerin kömür tüketimi ve özellikleri [5].

Santralin Adı	Gücü	Termik Santral Dizayn Değerleri		Kömür ve Elektrik Üreticisi Arasında Yapılan Protokol Değerleri			Yürürlükteki Protokol	
		Kömür Tüketimi	Kömür AID	Protokol Tarihi	Kömür Tüketimi	Kömür AID	Kömür Tüketimi	Kömür AID
		Ton	Kcal/kg		Ton	Kcal/kg	Ton	Kcal/kg
Seyitömer	3x150	350.000	1.800		4.750.000	1.750±100	400.000	1.750±100
Seyitömer 4	1x150				9.350.000		150.000	1.600±100
Tunçbilek A	2x32	2.300.000	3.650				490.000	3.500±100
	1x65		3.900					
Tunçbilek B	2x150		2.000				1.950.000	2.170±100
Soma B	4x165	4.000.000	2.400	1974 (1,2)		2.750±%10	4.600.000	2.200+200,-100
Yatağan	3x210	4.200.000	2.100	1976	3.120.000	2.100±%10	3.300.000 (1,2)	2.000±100
				1980	1.724.210	1.900±%10	1.725.000 (3)	1.750±100
Yeniköy	2x210	3.300.000	1.750	1980	3.970.907	1.750±%10	3.860.000	1.700±10
Çayırhan	2x150	1.750.000	2.800	1988	1.780.000	2.700±100		2.300±100
				1992	1.800.000	2.600±100		
				1992	1.800.000	2.400±100		
				1978	1.310.000	2.500±%10	1.700.000	2.350±100
Orhaneli	210			1992	1.700.000	2.100±%10,-5	180.000	

3.1.2 Yakıt özellikleri ve santral işletmeciliği

Termik santralin kazan performansı ve kömür kalitesi arasındaki ilişkinin temelinde; kömürün yakılması sonucunda santralde ortaya çıkan ve aşağıda belirtilen problemler bulunmaktadır. Bunlar;

Kazan kirliliği

Cüruflaşma

Metal aksamda görülen aşınma

Yanma sırasında oluşan kimyasal reaksiyonlar

Maserallerin yanma işlemi üzerindeki etkileri' dir.

Kömürün yakılması sırasında, erimiş yada yapışkan tortular ısı değiştirici yüzeylerde toplandığından kazanda cüruflaşmaya yol açmaktadır. Ayrıca, sinterlenmiş malzemenin kazanın çeşitli kısımlarında tortu oluşturması ise kirlenmeye neden olmaktadır. Çizelge 3.2' de Kömür kalitesi ile santral işletmeciliği arasındaki ilişki görülmektedir [5].

Çizelge 3.2 : Kömür kalitesi ile santral işletmeciliği arasındaki ilişki [5].

		Termik Verim	Çalışma Süresi	İşletme Maliyeti	Tamir-Bakım Gideri
Kömürün Kısa ve Elementer Analizi	Nem Oranı	X	X	X	X
	Kül Oranı	X	X	X	X
	Uçucu Madde	X	--	X	--
	Kükürt	X	X	X	X
	Öğütülebilirlik	--	X	X	X
	Karbon	X	--	--	--
	Hidrojen	X	--	--	--
	Klor	X	X	--	X
	Oksijen	X	--	--	--
Kömürün Diğer Özellikleri	Kömürleşme Derecesi	X	X	X	X
	Maseraller	X	X	--	--
	Kül Viskozitesi	X	X	--	X
	Yoğunluk	X	X	X	--
Kömürün Kül Analizi	Al ₂ O ₃	X	X	--	X
	SiO ₂	X	X	--	X
	TiO ₂	X	--	X	X
	Fe ₂ O ₃	X	X	--	--
	CaO	X	X	--	--
	K ₂ O	X	X	X	X
	Na ₂ O	X	X	X	X
	SO ₃	--	X	X	--

Termik santralin verimini, çalışma sistemini işletme maliyetini ve tamir-bakım giderlerini etkileyen en önemli unsurların başında, kömürün alt ısı değeri, kül, nem, kükürt içeriği ile kömürleşme derecesi, kül bileşenleri, klor, flor, kırılgenlik ve kül yumuşama özelliği gibi parametreler gelmektedir. Bu unsurlardaki aşırı dalgalanmalar santrallerde çeşitli işletme sorunlarına neden olmaktadır. Bu değışiklere bağı olarak santralin düşük yükte çalışması, devreden çıkması ve teçhizat kapasitelerinin yetersiz kalması gibi sonuçlarla karşılaşmaktadır.

Termik santrallerin performansını etkileyen kömür özellikleri ile ilgili parametreler aşağıda maddeler halinde açıklanmaktadır. Bu parametrelerin santral kazan dizaynı özellikleri çerçevesinde üretimden yakma aşamasına kadar her safhada kontrol altında tutulması gerekmektedir [5].

3.1.2.1 Kül oranı

Kül miktarının tek başına kazan performansı üzerindeki etkisi sınırlıdır. Kül oranındaki değışiklik kazanın dizayn parametreleri arasında ise külün kazan verimi üzerindeki etkisi fazla olmamaktadır. Ancak, kül oranındaki büyük dalgalanmalar kazan performansını olumsuz yönde etkilemektedir. Kül oranının artması genellikle kırıcı ve değirmenler ile kazan içindeki elemanlarda aşınmalara neden olmakta, elektrofiltreleri devre dışı bırakabilmektedir [5].

Kömür yakıldığında mineral bileşenleri esas olarak; silisyum, alüminyum, demir ve kalsiyum bileşikleri ile daha az miktarda magnezyum, titan, sodyum ve potasyum bileşiklerinden oluşan bir artık oluşturmaktadır. Kül bileşenleri analiz sonunda oksitler halinde verilmekle beraber, bunlar çoğunlukla yanma olayının gerçekleştirildiği şartlara bağı olarak, silikat, oksit ve sülfatların karışımları halinde bulunurlar. Kömür küllerinin erime özellikleri ile kirletme ve cüruflaşma eğilimleri bileşimlerinden yararlanılarak tahmin edilebilmektedir.

Genel olarak kömürün külünü oluşturan oksitler, asit oksitler ve bazik oksitler olarak sınıflandırılmaktadırlar. Asit oksitler olarak; Al_2O_3 , SiO_2 ve TiO_2 alınırken, bazik oksitler olarak; Fe_2O_3 , Na_2O , K_2O , CaO ve MgO alınmaktadır. Bazik oksitlerin asit oksitlere oranı baziklik derecesi olarak tanımlanmaktadır. Baziklik derecesi arttıkça, kömür külünün ergime derecesi düşmekte dolayısıyla da cüruflaşma problemi artmaktadır. Bu nedenle, cüruflaşma problemini azaltmak için asit oksit oranlarının

yüksek olması arzu edilmektedir. Ayrıca kükürt oranı ve kömür külündeki Fe_2O_3 cürüflaşma riskinin artması açısından diğer önemli faktörlerdir. Kömür külündeki Fe_2O_3 oranı %7'yi geçtiği zaman cürüflaşma riski artmaktadır. Cürüflaşmaya açısından CaO oranlarının %5 ile %40 arasındaki değerleri en ideal değerlerdir. Bu oran arttıkça, cürüflaşma sorunları da artmış olur [5].

Kazan içerisinde cüruf oluşum mekanizması sadece ergimeyle ilgili değildir. Asılma olarak tabir edilen kuru yapışma sonucu da kazan içerisinde kül birikmesi olmaktadır. Burada en önemli etken kuru yapışmayı kolaylaştıran alkali (Na ve K) ve kazan içerisinde redükleyici ortam olduğu zaman buharlaşan demirli bileşiklerin varlığıdır. Na, K ve Ca aynı zamanda silis ve silikatlı bileşiklerle reaksiyona girerek ergime derecesini düşürmesi açısından da önemlidir. Ancak bunların varlığının az veya çok olmasının yanında, reaksiyona girdiği elementlerin oranı da önemlidir. Örneğin, ergime derecesi 1.700°C civarında olan silika, potasyum silikata dönüştüğünde ergime derecesi 750°C 'a kadar düşebilmektedir. Burada $\text{SiO}_2/\text{K}_2\text{O}$ oranı önemli olmaktadır. Bu oran 81/19 olduğunda karışım 1300°C 'da tam olarak erimektedir. Termik santral teknolojisinde iki indeks önem taşır. Bunlar “cüruf indeksi” ile “silika modülü” olarak tabir edilen indekslerdir [5].

3.1.2.2 Nem ve kükürt oranı

Kazan içinde nem oranındaki artış, kazan veriminde kayıplara neden olmaktadır. Kazan performansı açısından kükürt varlığı avantaj ya da dezavantaj olarak görülmemelidir. Ancak, kükürt oksitler çevre kirliliği yaratmaktadır. Bazı kömürlerde kükürt oranı arttıkça bütün külün kirlilik yaratma eğiliminin de artması beklenilebilir [5].

3.1.2.3 Kömürün dayanımı

Kömürün dayanımı ile öğütme sisteminin kapasitesi arasında yakın bir ilişki vardır. Özellikle pulverize kömür yakılan kazanlarda linyit havada asılı olarak yakıldığı için kazan içerisindeki yanma olayının istenildiği gibi gerçekleşmesi, öğütme işlemi uygulanan kömürlerin tane boyut dağılımına ve yoğunluğuna bağlıdır.

Değirmenden çıkarak yakma sistemine sevk edilen kömürlerin tane boyut dağılımı istenilen değerlerin dışında kalırsa yanma olayı kazanın belli bölgesinde

yoğunlaşarak o bölgede, ısının gereğinden fazla artmasına ve küllerin eriyerek kazan kirliliği yapmasına neden olmaktadır [5].

3.1.2.4 Linyitin ısı değeri/ kuru bazda kül oranı

Linyitin ısı değeri ile kuru bazda kül oranı arasındaki ilişki elektrik üretimini doğrudan ilgilendiren önemli bir parametredir. Santrallerde yakıt olarak kullanılan linyitlerin protokollerde belirtilen sınır değerleri içinde olduğu durumlarda da elektrik üretiminin aksadığı böylece protokollerde belirtilen kriterlerin yetersiz kaldığı görülmektedir. Dolayısıyla, ısı değeri/kuru bazda kül oranı elektrik üretimi açısından en belirleyici faktörlerden biridir [5].

3.1.2.5 Kömürün petrografisi

Kömürün petrografisi üzerinde yapılan araştırmalar sonucunda;

- Eksinit-çok reaktif-kömürleşme derecesi yüksek
- Vitrit-reaktivite yüksek-kömürleşme derecesi yüksek
- İnertinit-reaktivitesi düşük-kömürleşme düşük

özelliklerini taşıdığı tespit edilmiştir.

Kömürlerin, vitrit oranı arttıkça rankı (kömürleşme derecesi) artar, rankı arttıkça da reaktivitesinde azalma gerçekleşir.

İnertinit oranı arttıkça yanma verimi ve reaktivitenin azaldığı, buna karşın eksinit oranı arttıkça yanma oranında ve veriminde artış olduğu tespit edilmiştir [5].

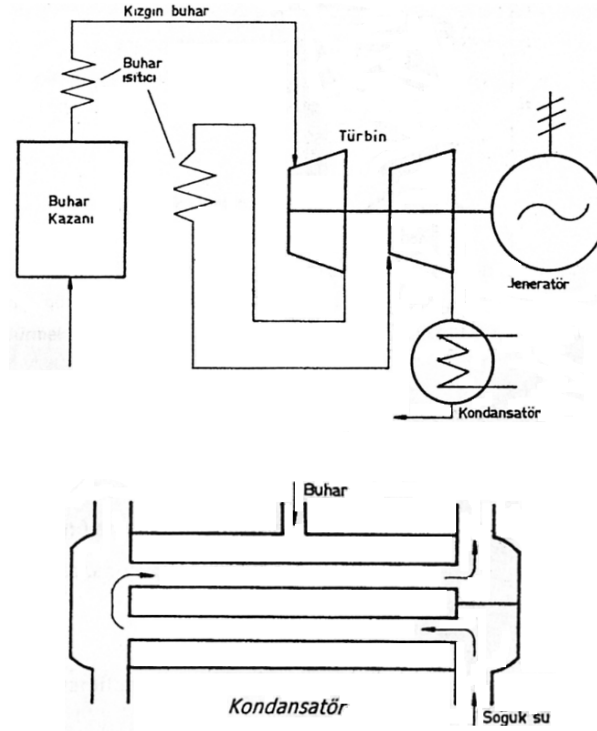
3.1.2.6 Klor oranı

Kömürün klor içeriği arttıkça külün kazan kirlileme ve korozyon eğilimi artmaktadır. Klor kül oranının bilinmesi kazanlarda korozyon ve kirlilik eğilimi açısından önemlidir [5].

3.2 Termik Santrallerde Kömürün Yakılması

Kömürün yakılmasının hedeflerinin başında, elektrik üretimi gelmektedir. Kamyon, vagon veya bant konveyörlerle santrale getirilen kömür önce primer kırıcıdan geçirilerek 0-200mm boyut seviyelerine indirilir, daha sonra sekonder kırıcıdan geçirilerek 0-30mm boyutuna indirildikten sonra santral kömür park sahasına alınır.

Kömür park sahasındaki üç fonksiyonlu makineler ile kazan üstü bunkerlerine, oradan da kömürün öğütülmesini aynı zamanda kurutulmasını sağlayan değirmenlere alınarak öğütülür ve pulverize kömür kanalları vasıtasıyla kazana gönderilir. Ardından 100µ boyutu altına getirilmiş kömür, kazanda yanma bölümüne püskürtülerek 1400°C civarında yakılır. Meydana gelen sıcak gazlar ve ısı enerjisi, kazanda tüpler içinde bulunan suyu buhara çevirir. Yüksek basınçtaki buhar, binlerce bıçağı olan türbine gönderilir. Genişleyen buhar bu bıçaklara çarparak türbin milinin yüksek bir hızla dönmesini sağlar. Türbin milinin sonunda tel sargıları içeren jeneratör bulunur. Kuvvetli manyetik alanda yüksek hızla dönen bu kısımda elektrik üretilir. Şekil 3.2’ de buhar-elektrik üretim sisteminin basit bir gösterimi verilmiştir. Yanma sonrası oluşan külün %80-85’i elektrofiltrelerle, %15-20’si ise kazan altından cüruf olarak geri alınır [5].



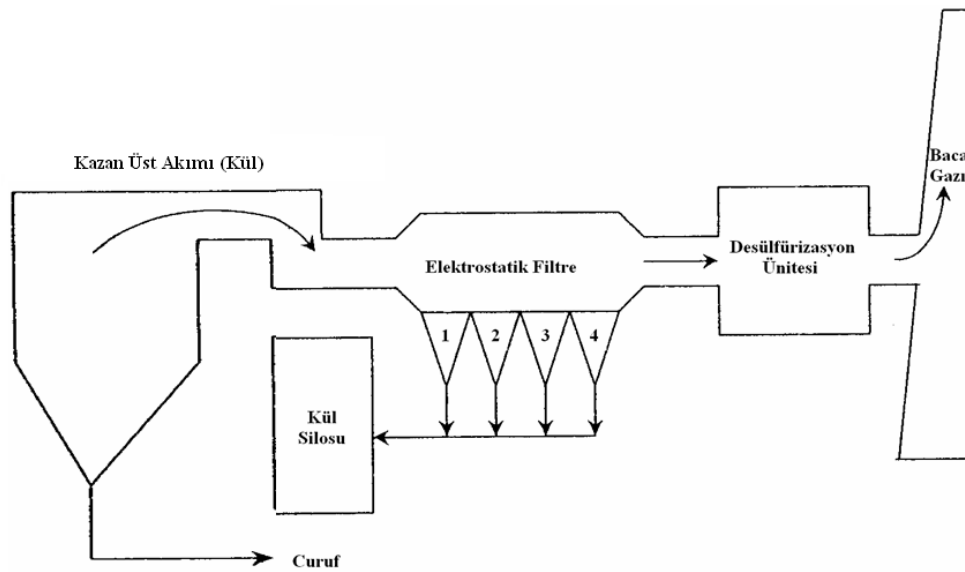
Şekil 3.2 : Buhar-elektrik üretim şeması ve kondansatör [5].

3.3 Termik Santrallerde Yanma Sonucu Oluşan Ürünler ve Davranışları

Termik santrallerde düşük kaliteli linyit kömürlerinin oluşturduğu gaz ve toz emisyonları ile büyük miktardaki katı atıklar (uçucu ve taban külü, cüruf ve baca gazı) meydana gelmiştir. Cüruf olarak tanımlanan iri kül taneleri 100 µm’ den daha iri boyutta kazanda yanmaya uğramamış artık maddelerdir. Genel olarak, kazanın

çıkışında hemen altında bulunan su ile dolu ve periyodik olarak boşaltılan cüruf oluklarına boşaltılır. Cüruf katı olarak ya da su içerisinde çöktürülerek taşınır. Cüruf/uçucu kül oranı, kömür içerisindeki kül miktarına ve cüruf/elektro filtrede tutulan kül oranına bağlıdır. Bu oran genelde 5/95 ile 20/80 arasında değişmektedir. Ancak bu oran tam olarak kesin değildir. Geri kalan katı maddeler ise uçucu kül ve taban külü olarak tanımlanırlar. Uçucu kül 10-200 µm çapa sahip, camsı yapıda ve çoğunlukla küresel tanelerdir. Bunlar kazanı hava akımı ile terk ederler ve bacadan atılmadan önce elektrostatik veya bez filtrelerde tutulur. Çok ince uçucu kül tanelerinin bir kısmı da baca gazı ile atmosfere salınırlar. Taban külleri ise uçucu küllerden daha büyük ve ağır, yerçekimi ile kazan tabanına çökelen küllerdir. Şekil 3.3’ te yanma sonrasında oluşan ürünlerin yanma kazanından hangi bölümlere gittikleri gösterilmektedir [5].

Termik santrallerde linyitlerin yakılması beraberinde önemli problemler getirmektedir. Bu sorunlar hem linyitin hem de yakma sisteminin özelliklerinden kaynaklanmaktadır. Kömür yakan termik santrallerde yanma kazan içerisinde kullanılan kömürün cinsine bağlı olarak 900-1400°C arasında gerçekleşir. Kömür parçaları kazan içerisinde ısınır, buharlaşabilen maddeler gaz haline gelir ve yanma gerçekleşir. Mineraller yüksek ısı altında bozunup erimeye, parçalanmaya başlar ve aglomere olurlar. Bir başka şekilde ifade edilecek olursa yanma sırasında kömürdeki anorganik yapıdaki değişikliğin, kömür kül yapısını ve ergime sıcaklığını etkilediği ve bununla yanma koşullarında aglomerasyona neden olduğu bilinmektedir.



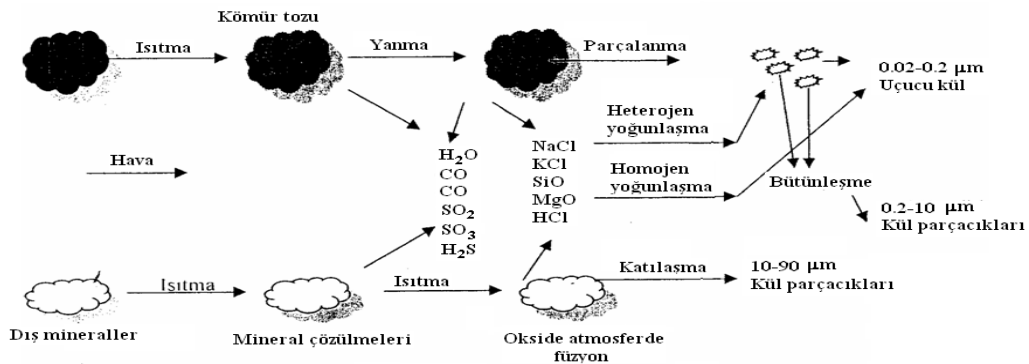
Şekil 3.3 : Kömür yakan termik santrallerde kazandan çıkan ürünlerin dağılımı

Oluşan bu madde termik santrallerde büyük problemlere yol açmaktadır, Zamanla kazan içinde cüruflaşmalar meydana gelmekle bu da yanma verimini düşürmektedir. Dolayısıyla enerji üretimini olumsuz etkilemektedir. Zaman zaman kazanı temizlemek amacıyla santral durdurulmakta bu da enerji üretiminin durmasına sebep olmaktadır [5].

3.3.1 Kömürün yanması ile mineral madde dönüşüm kinetiği ve mineral maddeden kaynaklanan birikimler

İçerdiği mineral madde kömürün üretimini, hazırlanmasını ve kullanımını etkiler. Mineral madde kömür üretim ve taşımacılığında arzu edilmeyen bir yakıt bileşenidir. Kömür hazırlama ve zenginleştirme işlemleri kömürün içerdiği mineral maddeyi azaltmaya yöneliktir. Bu işlemlerin başarısı, mineral maddenin özelliklerine (özellikler, ağırlık, boyut, şekil gibi) bağlıdır. Kömür hazırlama tekniklerinin etkinlikleri ne olursa olsun, daima önemli bir miktar mineral madde kömürde kalır ve kömürün kullanımında önemli rol oynar. Kömür bir yakma ünitesinde yakıldığında içerdiği mineral maddeler önemli değişikliklere uğrayarak klinker oluşumu, korozyon, cüruf ve kurum gibi sorunlar yaratır.

Kömür ısıtıldığında bu inorganik fazlar; katı, sıvı ve uçucu türlerinin karmaşık bir karışımını veren dönüşüm ve tepkimeler gösterirler. Kömür yakma ünitelerinde, mineral madde dönüşümünün basite indirgenmiş mekanizması Şekil 3.4’ te gösterilmiştir. Genelde yakma ünitelerinin içine iki tür parçacık gelmektedir. Bunlar; doğal mineraller içeren kömür parçacıkları ve ilgisiz mineraller’ dir [5].



Şekil 3.4 : Yakma ünitelerinde madde dönüşümünün indirgenme mekanizması [5]

Kömür parçacıkları ısıtıldıkları zaman gaz haline gelen parçacıklar yayarlar ve kömürleşmiş parçacıklar gibi yanarlar. Sonunda, %10'dan daha az organik madde

içeren ilgisiz mineral parçacıklarından daha yüksek bir ısıya ulaşırlar. Doğal mineraller ($0.1 \mu\text{m}$), kömürleşmiş parçacıklar içinde değişime uğrarlar ve kömürleşme sürecindeki parçalanma sırasında serbest kalırlar. Minerallerin çözülmesi ve katı safhaya geçme esnasında gaz çıkışı olur. Bu gazlar homojen kimyasal reaksiyonlara girerek homojen ve heterojen yoğunlaşmalara neden olurlar. Boyutları $0.02-0.2 \mu\text{m}$ olan küllerin kaynağı bu homojen yoğunlaşmalar ve minerallerin ayrışmasıdır. Ayrışmış mineral madde parçacıklarının tekrar birleşmesi de $0.2-10 \mu\text{m}$ boyutlarındaki küllerin oluşmasına neden olur. En büyük kül parçacıkları ise ($10-90 \mu\text{m}$) dönüşmüş ilgisiz, mineral parçacıklarından meydana gelir [5].

İlgisiz, minerallerden oluşan küller yaklaşık $10 \mu\text{m}$ civarındadır. 900°C altındaki sıcaklıklarda yakılan kötü kalite kömürlerin küllerinde, sıcağa dayanıklı MgO ve CaO oksitleri bulunmaktadır. Bununla birlikte maden kömürlerinin yanmasıyla oluşan küllerde SiO_2 'nin oranı fazladır. Kömürleşmiş maddede bulunan SiO'nun homojen gaz konumundayken oksitlenmesi ve daha sonra yoğunlaşarak SiO_2 'yi oluşturması, SiO_2 'nin kül içinde neden yer aldığını açıklamaktadır. Aynı zamanda yüksek uçucu sodyum homojen yoğunlaşma için çok uygundur ama toplum sodyum miktarının sadece yarıya yakını uçucu küllerde yer almaktadır. Kömürün yanmasında kömürleşmiş parçacıkların yanması sırasında doğal minerallerin ayrışmasıyla oluştuğunu söylenebilir.

Isınma yüzeylerindeki cürufelanma ve bozulmalar piritin davranışının kontrolü altındadır. Oksidasyon sürecinin %80'inde pirit ayrılarak pirotit oluşturur. Pirit aynı zamanda oksitlenerek sırasıyla magnetit ve hematit'e dönüşür. Erime safhası demirin tortulanması ile tanımlanabilir. Gözenekli pirotit'in parçalanmasıyla meydana gelen demir buharı da demir tortulanmasının kaynağıdır. Çözünür sodyumun yaklaşık %50'si buharlaşır. Tortulamada sodyum, ya tuz olarak (NaCl , Na_2SO_4), ya büyük silisli parçacıklar olarak (NaSiO_3), ya da alüminyum silikat (NaAlSiO_4) olarak tanımlanır.

Kömürün ticari olarak kullanımındaki sorunlar genellikle kömürün içerdiği mineral maddeden kaynaklanır. Yakma sistemlerinde serbest kalan mineral madde, birkaç saniye içinde fırını ve hemen sonrasında baca yolu üzerindeki kısımları geçer. Mineral maddenin çoğu nispeten yüksek erime sıcaklığına sahip küle dönüşmüşse "uçucu kül" terimi kullanılır. Bu uçucu kül, fırın içinden ince tanecikleri

uzaklaştırmak için tasarlanmış bazı donanımlara doğru hareket eder. Külün erime sıcaklığı nispeten düşükse küçük tanecikler yumuşar ve yapışkan hale gelir, bunlar duvarlara yapışabilir veya fırın boşluğundaki borular üzerinde birikebilir. Uçucu kül ve biriken tortuların varlığı ısı iletimini ve buhar üretimini düşürür, fırın boşluğundaki gaz akımına engel olur, fırının iç kısımlarında aşındırıcı etkilere yol açar. Bir kömürün bir yakıcıda sürekli olarak kolayca yakılıp yakılamayacağını belirlemede içerdiği mineral türlerinin özellikleri çok önemlidir. Düşük erime sıcaklıklı türleri oluşturabilecek hızdaki mineraller arasındaki tepkimeler veya düşük erime sıcaklıklı türleri oluşturabilen uçucu bileşiklerin ortaya çıkışı genellikle sorunların büyüklüğünü belirler [5].

3.3.2 Cüruf oluşumu

Mineral maddenin yakıcının cidarlarında eriyip sertleşmesi olarak tanımlanan cüruf oluşumu, ısı iletimini azaltır ve fırını terk eden atık gazların sıcaklıklarının yüksek olmasına neden olur. Cüruf oluşumunun en önemli etkisi, üzerinde cüruf oluşmuş metal parçalarına verdiği zarardan ötürü ısıtıcının bakım masraflarını artırmasıdır. Cüruf blokları fırının üst kısmında 1.5 metreden daha fazla bir kalınlığa erişebilir ve sonunda kendi ağırlığından ötürü düşüp fırının alt kısmında parçalanır. Elektrik enerjisi üretiminde ısıtıcı kapasitesi, cüruf oluşumu ile önemli miktarda düşer [5].

Toz kömür yakılması sırasında kömür alevinin içinde bulunduğu atmosferik koşullar, demirin stabil iyonik formunun ferro olmasından ötürü indirgeyici olarak göz önüne alınır. Kül tanecikleri alev bölgesini terk ettikten sonra daha oksitleyici bir çevre ile karşılaşır ve havanın yakıtı olan oranına bağlı olarak demirin başlıca ferrik veya ferro ile ferrik'in bir karışımı halinde olabildiği birikimleri ve uçucu külü oluşturur.

3.3.3 Kurum oluşumu

Kurum, genellikle konvektif ısı iletim yüzeylerinde nispeten düşük sıcaklıklarda (600°C'den 1100°C'ye kadar) oluşmaktadır. Alkali elementler (sodyum, potasyum) bu tür birikimlerin oluşmasındaki başlıca etkenlerdir. Bu elementler alev içerisinde uçucu hale gelir. Organik bağ yapmış alkalilerin 1400-1500°C' lik alev sıcaklıklarında kolayca uçucu hale gelmesi beklenir. Bitümlü kömürlerde sodyumun en yaygın şekli olan sodyum klorür; bu şekilde davranmaktadır. İllit' in içerdiği potasyumun kolayca uçucu hale gelemeyeceği beklenebilir; çünkü illit bu sıcaklıklarda kolayca erimiş cürufa dönüşmektedir. Bu nedenlerden ötürü kömürün

suda çözünen alkali içeriği toplam alkali içeriğine göre güvenilir bir kurum belirteci olarak göz önüne alınabilir. Bu birikimler, özellikle, yumuşak ve oldukça viskoz taneciklerin sıcak metal yüzeylerinde bozunması ve yapışmasından kaynaklanır. Yapılan incelemeler, boruların yüzeyleri üzerinde düşük sıcaklıkta eriyen bir fazın oluşumunu içeren ilk aşamanın, birikim oluşumuna izin veren bir çeşit yapışkan madde temin ettiğini göstermektedir. Başlangıç tabakasının oluşumu ile ilgili olan düşük erime sıcaklığına sahip madde; alkali sülfatları, demir veya alüminyum sülfatları içerir [5].

3.3.4 Kömür külü oluşumu ve ergime özellikleri

Kül, kömürün yanmasından sonra arta kalan mineral maddedir. Kömürün mineral madde ve kül içeriği ne bileşim ne de miktar bakımından aynı değildir. Kömür yandığı zaman, içerdiği mineral maddeler aşağıda belirtilen temel değişikliklere uğrayarak küle dönüşmektedir.

- Hidrat suyu içeren minerallerin hidrat sularını kaybetmeleri,
- Karbonatların parçalanması,
- Sülfürlerin kavrulması,
- Alkali metal klorürlerin uçuculaşması.

Kömürün yanması sırasında oluşan metal oksitlerin, organik ve pratik kükürdün bir kısmı ile reaksiyona girmesi, SO_3 artışına neden olmaktadır. Sıcaklığın yeterince yüksek olması durumunda ise, oksitler, silikatlar ve serbest silika tepkimeye girerek yeni bileşikler oluşturur.

Kül yüksek sıcaklıklarda ısıtılırsa yumuşar ve ergiyerek akışkanlaşır. Farklı kömürlerin erime özellikleri çok farklı olabilir. Kül ergime özellikleri bileşimine bağlı olarak değişmektedir. Kül kristal, yan kristal ve camsı minerallerin çok kompleks bir karışımıdır. Bu nedenle belirli bir ergime sıcaklığına sahip olması beklenemez. Ancak, kül ergime testleri sonucunda belirli bir ergime sıcaklığı saptanmaktadır.

Yakma sisteminin tasarımı, işletilmesi ve kömürlerin optimum harmanlama oranlarının belirlenmesi açısından, kullanılacak kömürün kül bileşiminin, ergimesinin ve cüruf özelliklerinin bilinmesi gerekmektedir.

Kömür külünün erime sıcaklığı yakma sisteminin tasarımında ve işletme sırasında, değerlendirmeye alınırken önemlidir. Bu nedenle kömür külünün kimyasal bileşimi ile ergime sıcaklığı arasındaki ilişkiyi bulma konusunda çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Schaeffer külün bileşimi ile ergime sıcaklıkları arasındaki ilişkiyi irdelemek için R ile tanımlanan başka bir oranı temel almıştır. Külün ergime sıcaklığı ile R arasında, daha net bir ilişki olduğu sonucuna varmıştır (3.1).

$$R = \frac{Al_2O_3 (Al_2O_3 + SiO_2)}{SiO_2 (FeO + 0.6(CaO + MgO + Na_2O + K_2O))} \quad (3.1)$$

Kömürün külünün kimyasal bileşimi ile erime sıcaklığı arasındaki ilişkiyi incelemek için bazı parametreler (3.2), (3.3), (3.4), (3.5), (3.6) ve (3.7)' de verilmiştir.

$$\text{Silika değerleri (\%)} = \frac{SiO_2 * 100}{(SiO_2 + Fe_2O_3 + CaO + MgO)} \quad (3.2)$$

$$\text{Baz/Asit Oranı} = \frac{(Fe_2O_3 + CaO + MgO + Na_2O + K_2O)}{(SiO_2 + Al_2O_3 + TiO_2)} \quad (3.3)$$

$$\text{Silika/Alumina Oranı} = \frac{SiO_2}{Al_2O_3} \quad (3.4)$$

$$\text{Demir Oksit/Kalsiyum Oksit} = \frac{Fe_2O_3}{CaO} \quad (3.5)$$

$$\text{Dolomit (\%)} = \frac{(CaO + MgO) * 100}{\text{Toplam Baz}} \quad (3.6)$$

$$\text{Demir Oksit/Dolomit Oranı} = \frac{Fe_2O_3}{(CaO + MgO)} \quad (3.7)$$

Kömür külünün ergime sıcaklığı ile kimyasal bileşimi arasındaki ilişkiyi saptamak üzere çok çeşitli formüller türetilmiş olmasının nedeni, külün ergime sıcaklığının öncelikle kimyasal bileşimine bağlı olmasındandır [5].

3.3.5 Kömür külünün yakma sistemlerinde yarattığı sorunlar

Kömürün içerdiği mineral madde sadece yakma yerine taşınıp, sonrada kül olarak atılacak bir kısım değildir. Oluşan kül yakma sistemlerinde sorunlar yaratır. Bu sorunları azaltabilmek için kullanılan kömürün kül miktarına ilaveten kimyasal bileşimini ve erime özelliklerini de bilmek gerekir. Yakıldığı zaman bıraktığı kül miktarı az; fakat erime sıcaklığı düşük olan bir kömür, daha fazla kül bırakan; ancak külünün erime sıcaklığı daha yüksek olan diğer bir kömürden daha düşük bir verimle yakılabilir.

Kömürün külü yakma sistemlerinde erime eğilimi gösterdiğinden ve sıvı bir cüruf oluşturduğundan kömürün yakıt olarak değerini önemli ölçüde etkiler. Kolay eriyen kül çeşitli sorunlar yaratır; erimiş cüruf kütlesi içimle katan yanmamış karbon yanma veriminin düşmesine neden olur. Klinkerin, erimiş veya yarı-erimiş kül, ya da külü oluşturan mineral madde karışımı olduğu, klinkerleşme sorunu ortaya çıktığından

beri bilinmektedir. Yakma sistemlerindeki ızgaraların hava geçişleri klinkerlerle tikanırse yanma verimi düşer ve baca kayıpları artar. Oluşan klinker yakma fırınının refraktör civarında eriyerek temizlenme sırasında mekanik hasar oluşmasına neden olabilir; daha önemlisi erimiş cüruf refraktör malzemeyi etkileyip erimesine neden olabilir [5].

Gray ve Moore, kül erime testinde gözlenen başlangıç deformasyon (IT) ve yarımküre sıcaklıklarına (HT) dayanan bir cüruf oluşturma indeksi (F_s) teklif etmişlerdir **(3.8)**.

$$F_s = (4IT + HT) / 5 \quad (3.8)$$

Çizelge 3.3’ den görüldüğü gibi kömür külünü cüruf oluşturma indeksine göre sınıflandırılmıştır.

Çizelge 3.3 : Külün cüruf oluşturma indeksine göre sınıflandırılması [5].

Cüruf Oluşturma indeks sıcaklığı F_s (K)	Yakıcıda cüruf oluşturma özelliği
1.505 – 1.615	Orta
1.325 – 1.505	Yüksek
<1.325	Şiddetli

Külün demir içeriği yüksek olan kömürler, toz kömür yakma sistemlerinde şiddetli cüruf oluşumuna neden olurlar. Birçok araştırmacı kömür külündeki bazik oksitlerin toplamının, asidik oksitlerin toplamına oranını, külün cüruf oluşturma eğiliminin göstergesi olarak kullanmıştır [5].

Kömür yakma sistemlerinde yüksek sıcaklıklarda küllerin sinterleşmesi veya aglomerasyonu görülmektedir. Sinterleşme ve aglomerasyon olayları iç içe geçen olaylardır. Aglomerasyon, kül taneciklerinin birbirine yapışarak daha büyük bir kütleye dönüşmesi olayıdır. Bazı Türk linyitlerinin kükürt, alkali metal (sodyum, potasyum gibi) içeriklerinin yüksek olması bunların aglomerasyon sıcaklıklarının düşmesine neden olmaktadır. Bu anlamda Düşük kül sinterleşme sıcaklığı ve yüksek ayrışma eğilimi asılması gereken önemli bir sorundur. Aglomerasyon olayının üç temel mekanizmaya göre gerçekleştiği belirtilmektedir [5].

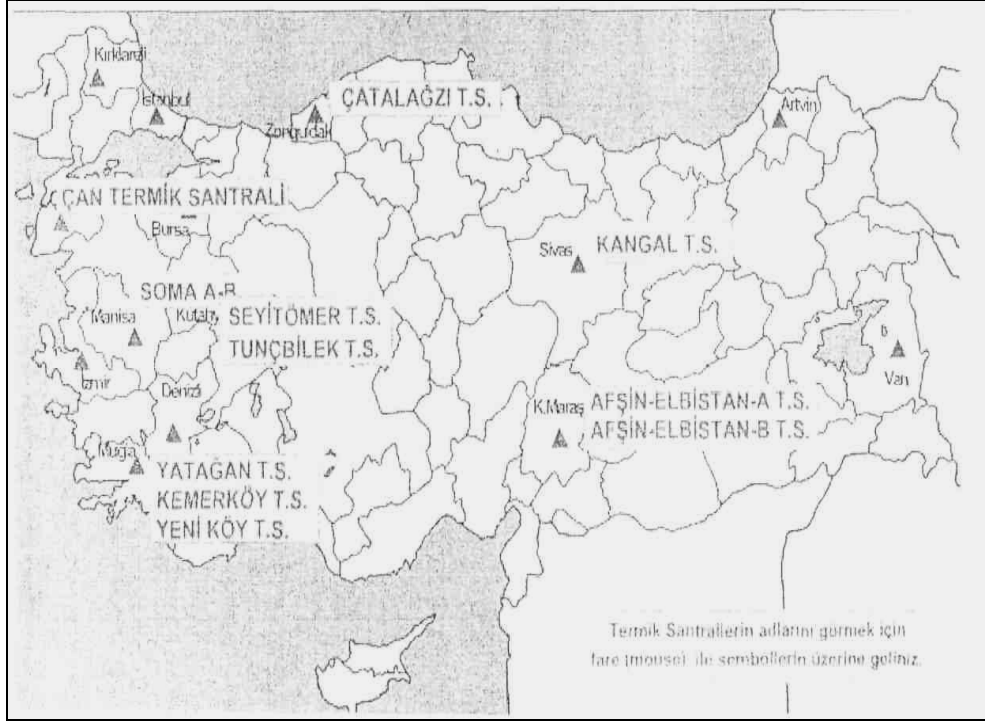
- Kısmi ergime,
- Kısmi ergime ve viskoz bir sıvının oluşumu,
- Kimyasal reaksiyon.

Aglomerasyona neden olan diğ er bir mekanizma inorganik yapıda kimyasal reaksiyonların gerçekleşmesidir. Bu kimyasal reaksiyonlar sonucunda oluşan ve ergime sıcaklıkları d    k olan bileşikler, tanecikler arasında k  pr  c  klerin kurulmasına ve b  y mesine ortam hazırlamaktadır. Linyitlerin yanması konusunda yapılan çalışmalardan elde edilen sonuçlar, linyit bünyesinde bulunan Na_2O ve K_2O 'un aglomerasyon eğilimini arttırdığını göstermiştir. Ayrıca CaO bakımından zengin kömür külünün normal koşullarda, 900°C olarak saptadı ları sinterle me sıcaklığını 600°C ' ye d   t   n  saptamıştır. Aglomerasyonun ortaya çıkmasını etkileyen birçok faktör olmasına karşın, bu olayı büyük ölçüde kömürün inorganik yapısının özelliklerinden kaynaklandığı bilinmektedir. Özellikle külün ergime sıcaklıkları ve yapısı önemli rol oynamaktadır [5].

3.4 Türkiye'de Kömürle  alı an Termik Santraller ve  zellikleri

Türkiye'de mevcut zengin kömür rezervlerine rağmen, kömürle çalışan santrallerin toplam kurulu güce oranının %20'ler seviyesindedir ve termik santrallerin büyük bir  o unlu unda, yakıt olarak linyit kullanılmaktadır. Termik enerji üretiminde 1970 öncesi en büyük payı ta k m r ne dayalı santraller alırken, 1970'lerden itibaren linyite dayalı bir üretim politikası uygulanmıştır. 2006 yılı elektrik üretiminin %29.46'sı linyitle çalışan termik santrallerden sağlanmıştır. Termik santral amaçlı linyit üretimleri 2006 yılında 21.1 milyon ton olmuştur. Bir başka deyişle linyitlerimizin büyük bir kısmı termik santrallerde tüketilmektedir. Mevcut santrallerimizde ortalama 2.000 Kcal/kg düşük ısı değerli kömürler kullanılmaktadır. Türkiye'de kömürle çalışan termik santraller  ekil 3.5' te gösterilmiş ve termiksanttrallerin bazı özellikleri  izelge 3.4' te verilmiştir [5].

Ülkemizde, düşük kalorili linyit kömürleri ile  alı an Soma Termik Santrali (Soma B-6x165 MW), Yata an Termik Santrali (3x210 MW), Yeniköy Termik Santrali (2x210 MW), ve Kemerköy Termik Santrallerinin (3x210 MW) sırasıyla; yıllık kömür ihtiyaçları 7,2 milyon ton, 5,4 milyon ton, 3,7 milyon ton, 5,7 milyon tondur. Bu santrallerde yaklaşık olarak günde 60,250 ton kömür yakılmakla ve atık depolama sahalarına günde 25.000 ton ve yılda 10 milyon tona varan k l atılmaktadır.



Şekil 3.5 : Kömürle çalışan termik santraller [5].

Türkiye’ de linyit yakıtlı termik santrallerin tamamı, tüvenan kömür yakmak üzere dizayn edilmişlerdir. Herhangi bir kömür zenginleştirme işlemi öngörülmemiştir. Kazana beslenecek kömürün belirli bir ortalama karakterde olmasını sağlamak üzere, santrale verilen farklı özelliklerdeki kömürlerin karıştırılarak harmanlanması için büyük kapasiteli stok sahaları tesis edilmiştir [5].

Seçimli Madencilik uygulanarak ocaktan üretilen tüvenan kömür, konveyörlerle veya kamyonlarla taşınarak, santral kömür park sahasına beslenmektedir. Kömür; santral kömür park sahasındaki stoklayıcı-yayıcı makineler ile harmanlama/homojenizasyon için uygun tekniklerle stoklanmakta, daha sonra kazıcı makinelerle kazılarak, boyut küçültme için primer-sekonder kırıcılardan 30mm boyut altına indirilerek termik santral bunkerlerine, oradan da değirmenlere gönderilerek öğütülmekte ve kazana beslenmektedir. Kömür hazırlama süreci; ocaktaki kömür üretiminden başlayıp, kömürün kazana beslenmesine kadar olan evreyi kapsamaktadır [5].

Çizelge 3.4 : Türkiye’de kömürle çalışan termik santraller ve özellikleri [5].

Santral	Ünite x	Kömür tüketimi	AID	Kömür Özelliği		
	Gücü MW			Kül %	Nem %	Kükürt %
Yatağan	3 x 210	3 x 230	2.100	20.5	36	2.7
Afşin-Elbistan	4 x 344	4 x 800	1.050	15.3	37.7	1.4
Yeniköy	2 x 210	2 x 280	1.750	29	33	2.72-5.96
Kemerköy	3 x 210	3 x 280	1.750	29	33	2.72-5.96
Seyitömer 1-2-3	3 x 150	3 x 200	1.800	35	34	1.5-2
Seyitömer 4	1 x 150	1 x 266	1.400-2.000	30-50	30-40	1.5-2
Soma A	2 x 22	2 x 44	3.592	24.55	25.22	0.71
Soma B 1-2	2 x 165	2 x 166	2.200	32	21	1.5
Soma B 3-4	2 x 165	2 x 166	2.200	32	21	1.5
Soma B 5-6	2 x 165	2 x 275.5	1.550	40.5	20.84	1.5
Tunçbilek 1-2	2 x 35	2 x 30	3.650	33	22	
Tunçbilek 3	1 x 65	1 x 50	1.900	25	23	
Tunçbilek 4-5	2 x 150	2 x 175	2.000	42.4	22-24	1.17
Çayırhan	2 x 150	2 x 127.3	2.800	29.91	27.5	4.65
Kangal	2 x 150	2 x 277	1.300	21-22	45-51	1.5-2.3
Orhaneli	1 x 210	1 x 200	2.560	23.8	32-36	1.9
Çan	2 x 160					
Çatalağzı	2 x 150					
Yumurtalık Sugözü	2 x 605					

3.4.1 Soma Termik Santrali

Soma Termik Santrali, Soma ve civarında üretilen 2.500 kcal/kg ısı değerinden düşük kalorili kömürlerin yakılarak elektrik enerjisi üretmek, Batı Anadolu'nun elektrik ihtiyacının en kısa mesafeden karşılamak ve yörenin sosyal ve ekonomik yönden kalkınmasını sağlamak amacıyla, 1.034 MW kurulu gücünde ve yıllık üretimi 7.45 milyar kWh olarak Manisa ili Soma ilçesine bitişik Bakır çayı vadisinde 1.200.000 m²'lik bir alan üzerine kurulmuştur. Sekiz tane üniteye sahiptir [5].

Santralin yeri seçilirken aşağıdaki faktörler dikkate alınmıştır;

- Kömür yataklarına yakınlığı,
- Yakınında kül ve cüruf atmaya, depolamaya müsait coğrafya oluşu,
- Santralin ihtiyacı olan suyun bulunabilirliği ve yakınlığı,
- Elektrik tüketim merkezlerine yakınlığı,
- Depreme mukavemet bakımından fay hattında bulunmayışı,
- Karayolu ulaşım kolaylığı,
- Rüzgâr yönü.

Santralin kömür ihtiyacı TKİ Genel müdürlüğüne bağlı ELİ merkez bölgesinin Darkale ocaklarından sağlanmaktadır. Bölgede 2.000-5.000 kcal/kg ısı değere sahip ocaklarından üretilen kömürler, I-IV. ünitelere %50'si bant - %50'si kamyon, V ve VI. ünitelere tamamı bant, VII ve VIII. ünitelere ise kamyonla nakledilmektedir. Kamyon nakliyatında kömürün santrale ulaşması için kat edilmesi gereken mesafe, bant nakliyatındaki 10 km yerine ≈ 30 km'dir.

Soma Termik Santrali'nde yakılan özellikleri aşağıda verilmiştir.

- Ortalama alt ısı değeri: 2.400-3.325 kcal/kg
- Nem : %20.8-27
- Kül : %30-50.5
- Toplam kükürt : %1.5

Elektrik üretiminde ihtiyaç duyulan su, kullanma hakkı tamamen şirkete ait 127.000.000 m³ hacimli Seyisler barajından 80 cm çapında çelik borularla sağlanmaktadır. Soma termik santralinden alınan rapora göre; 1998 yılında toplam 34.255.500 m³ su harcarken, 1999 yılında ise 40.868.500 m³ su harcanmıştır [5].

Kömür; 1.600 ton/saat kapasiteli bantlar ve kamyonlarla santrale gelmekle kırma ve eleme tesislerinde 0-30 cm ebadında hazırlanarak stok sahasına serilmektedir. Kömür stok sahası santralin bir aylık kömür ihtiyacının karşılayacak durumdadır. Yıllık kömür ihtiyacı 7.2 milyon ton olan sistemde yanan kömür miktarının tespiti için radyoaktif kantarlar kullanılmaktadır.

Kırıcı eleklerden ve kömür stok sahasından alınan kömür, bunkerlere her biri 800 ton/saat kapasiteli biri yedek, iki bantla taşınmaktadır. Bant uzunluğu 17.036 km.dir. Konveyör uzunluğu ise 8.456,5 m'dir. Kazanın temel dengesi için kömür bunkerleri her biri 500 m³ olarak dört ayrı köşeye yerleştirilmiştir. Her kazanda 37 ton/saat kapasiteli ve 550 KW gücünde 6 adet değirmen bulunmaktadır. Değirmenlerin 4 adedi direkt birer bunkerden, 2 adedi çift bunkerden beslenmektedir. Öğütülen kömür değirmenin yarattığı hava akımı ile kazanın içine toz halinde püskürtülerek yakılmaktadır [5].

Yanma sonucu meydana gelen küller gazla birlikte bacaya giderken %99 verimle çalışan elektrofiltreler yardımıyla tutulmakta ve cüruf ile elektrofiltrelerin alt çıkışından alınıp su ile karıştırılarak (1/7.9 litre) su toplama havuzuna buradan da

pompalar yardımıyla kül barajına pompalanmaktadır. Dolan baraj kademelerinin üzeri topraklanarak, düzgün tarım alanı haline getirilmektedir.

Baca yüksekliği I, II, III ve IV. gruplar için 150 metre, V. ve VI. gruplar için 275 metredir. Meteorolojik ve coğrafi şartlar etkisi ile de gaz ve kül çevreye herhangi bir zarar vermeyecek ölçüde düşürülmektedir. Cüruf kazan altında bulunan paletli cüruf çıkarıcı vasıtasıyla bantlı konveyörlere yüklenecek taşınmaktadır. Santralde yılda yakılan yaklaşık 8 milyon ton kömürden açığa çıkan kül miktarı yaklaşık 4.000.000 ton'dur [5].

4. KÖMÜRÜN YANMA ÜRÜNLERİ

Elektrik üretimi amacıyla termik santrallerde öğütülmüş kömürün yüksek sıcaklıklarda yakılması sonucu üç çeşit kömür yanma ürünü meydana gelir. Bu ürünler uçucu kül, taban külü ve cüruftur. Baca gazlarıyla sürüklenen çok ince partiküllere (100µm altı) uçucu kül, baca gazlarıyla birlikte yükselemeyerek tabanda biriken iri partiküllere taban külü, yanma sonucunda kazanın tabanında biriken akışkan haldeki malzemenin suyla ani reaksiyonu sonucunda da cüruf (kazanaltı külü) oluşmaktadır. Taban külü ve cürufların tane boyutları 100 µm üstü olan malzemelerdir [1, 6].

4.1 Uçucu Kül

Uçucu kül; elektrik üretmek için kurulmuş termik santrallerde pülverize edilmiş kömürün yakılması ile ortaya çıkan ve bacalardan toplanan atık malzemedir. 0.09 mm inceliğine kadar öğütülen kömürün yanması ile santraldeki sıcaklık 1100 °C – 1600 °C arasında bir değer alır. Yanma sırasında kömürde minerallerinde öncelikle kömürün kristal suyu ayrışır. Ayrışmayla birlikte CO₂ ve SO₄ açığa çıkar. Ocakta oluşan sıcaklıkta ergime sıcaklığına ulaşan maddeler ergir (1500 °C'ye ulaşıldığında SiO₂ hariç diğer maddeler ergir). Minerallerin 1500 °C'lik bir sıcaklığa maruz kalması sonucu yalnız ayrışmalar ve oksidasyonlar oluşur ve bunun dışında reaksiyon olmaz [1].

Kömürün yanması sırasında yanma olayına katılmayan mineraller ya ocağın içine düşerler ya da çok ince toz malzemeler halinde baca tarafından çekilen gazlarla birlikte yukarı sürüklenirler. Hava ile karşılaştıklarında ani soğuma sonucu kristalleşmeden katılaşıp puzolanik özellik kazanırlar ve tozlar yaklaşık küresel form alırlar ve hava kirliliğini önlemek amacıyla elektro filtrelerde veya siklonlarda yakalanarak baca gazları ile atmosfere çıkışları engellenir. Bu şekilde atık olarak elde edilen çok ince küle uçucu kül adı verilmektedir [8,9].

TSE 639 uçucu külü, toz haline getirilmiş veya öğütülmüş bitümlü veya linyit kömürünün yüksek sıcaklıklarda yanması sonucunda oluşan ve baca gazları ile sürüklenen silis ve alümin silisden oluşan toz şeklinde bir yanma ürünü olarak tanımlanmaktadır [10].

4.1.1 Uçucu küllerin sınıflandırılması

Uçucu küller, ASTM C618 standardına göre ($\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-Fe}_2\text{O}_3$) kimyasal kompozisyonları ve üretildikleri kömür cinslerine bağlı olarak F ve C olarak iki şekilde tanımlanmaktadır [11].

F sınıfı uçucu küller: Antrasit ve bitümlü kömürlerin yakılmasından elde edilen küllerdir. Alkali ve kireç ilavesi olmaksızın su ilave edildiğinde bağlayıcı (çimento) özelliği göstermez. Ancak CaOH ve su ile reaksiyonundan (puzzolonik reaksiyon) sonra bağlayıcı özellik (çimento) kazanır

C sınıfı uçucu küller: Linyit ve yarı bitümlü kömürlerin yakılması ile oluşan küllerdir. Yapısında bulunan serbest kireç sayesinde çimento özelliği gösterir. Bazılarında CaO oranı %10'un üzerinde olmaktadır. Ayrıca $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ toplamı % 50'den büyük değerdedir. Çizelge 4.1' de ASTM C618 ve TSE'ne göre uçucu küllerin kimyasal özellikleri verilmektedir [10, 11].

Çizelge 4.1 : ASTM C 618 ve TSE'ne göre uçucu küllerin kimyasal özellikleri

ASTM C618			TSE
Kimyasal bileşik	F[%]	C[%]	[%]
$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$	>70	>50	70 [min]
MgO	<5	<5	5 [max]
SiO_3	<5	<5	5 [max]
Nem	<3	<3	3 [max]
Kızdırma kaybı	<12	<6	10 [max]

Bunun dışında uçucu küller , kimyasal yapılarına bağlı olarak ; silikat-alümina esaslı, silikat-kalsit esaslı ve sülfür-kalsit esaslı olmak üzere üçe ayrılırlar. Çizelge 4.2' de bu sınıflandırmaya göre uçucu küllerin kimyasal kompozisyonları verilmektedir [11].

Silikat-alümina esaslı uçucu küller (F sınıfı), genellikle taş kömürü uçucu külleridir. Esas yapısı SiO_2 ve Al_2O_3 'den meydana gelir. Kireçli ve sulu ortamlarda priz yaparlar (bağlayıcı özelliği vardır). Bu tip uçucu küllerin çok ince taneli ve

yapılarının camısı oluşu, çok miktarda silis ve alüminyum içermeleri dolayısıyla hidrolik aktiviteleri yüksektir.

Siliko-kalsik uçucu küller (C sınıfı), genellikle linyit uçucu külleridir. Yapılarında SiO_2 ve CaO miktarı oldukça yüksektir. Bazı durumlarda ilave kirece gerek kalmaksızın kendiliklerinden zayıf bağlayıcı özellikleri vardır. Ancak bunların bir grubu F sınıfına girmektedir (Orhaneli ve Seyitömer Uçucu külleri gibi).

Sülfo- Kalsik uçucu külleri, yapısının bir bölümü SO_3 ve CaO 'dan meydana gelir. Genellikle linyit uçucu külleridir. Bazı hallerde bağlayıcı olmadan kendiliklerinden priz alırlar. Bu küllerin ilk günlerindeki dayanımı yüksektir. Ancak aşırı hacim genişlemeleri gösterirler ve CaO 'nun serbest halde oluşu bu sakıncasını daha da şiddetlendirir [11].

Çizelge 4.2 : Uçucu küllerin kimyasal yapıları [11].

ASTM	F Sınıfı			C Sınıfı			Diğerleri
Tanımlama	Ff	Fc	Fa	C1a	C2a	C1f	C2f
Kimyasal yapı	Siliko		Siliko- Kalsik			Sülfo Kalsik	
SiO_2	59,4	41,4	47,4	36,2	37,9	24,0	13,5
Al_2O_3	22,4	24,8	21,3	17,4	18,9	18,5	5,5
Fe_2O_3	8,9	18,6	6,2	6,4	6,5	17,0	3,5
$\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3$	90,7	84,8	74,9	60,0	63,9	59,5	22,5
CaO	2,6	2,5	16,6	26,5	24,9	24,0	59,0
Na_2O	2,2	1,5	0,4	2,2	0,8	0,8	-
MgO	1,3	0,7	4,7	6,6	6,6	1,0	1,8
SO_3	2,4	1,2	1,5	2,8	3,0	8,0	15,1
Özgül	2,18	2,42	2,46	2,69	2,68	2,75	3,11
Özgül yüzey	3600	3750	2600	2900	3200	7200	3650
Puzolanik aktivite	-	81	90	99	98	-	-
Kızdırma kaybı	2,0	9,5	15,0	0,6	0,8	-	-
Serbest kireç	-			2,8	2,2	-	28,0

4.1.2 Uçucu küllerin özellikleri

4.1.2.1 Uçucu küllerin mineralojik ve kimyasal yapısı

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

Genellikle uçucu bir külde; SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , SO_3 , MgO , Na_2O , K_2O ve TiO_2 gibi oksitleri hemen hemen tamamına rastlanmaktadır. Ancak bu oksitlerin küldeki yüzdeleri külün tipine bağlı olarak değişmektedir. Örneğin, silikat-alümina esaslı bir uçucu külde SiO_2 ve Al_2O_3 kalsit-silikat esaslı bir uçucu külde SiO_2 ve CaCO_3 ana oksitlerdir. Genelde bir taş kömürü uçucu külü, toprak alkali elementlerini linyit uçucu külünden daha fazla içermektedir [12].

Uçucu küllerde en fazla bulunan oksitler kuvars [SiO_2] ve müllit [$3\text{Al}_2\text{O}_3.2\text{SiO}_2$], hematit [Fe_2O_3], manyetit [Fe_3O_4] ve kalsit [CaCO_3]’tir. Mineralojik analizlerde, genellikle uçucu kül içerisindeki silisyumun bir kısmını kuvars kristalleri halinde , diğer bir kısmını ise alümina ile birleşerek müllit , geri kalanın ise camsı yapıda olduğu saptanmıştır. Demirin kısmen manyetit ve hematit bileşiminde , geri kalanın ise camsı fazda olduğu görülmüştür. İdeal şartlarda elde edilen uçucu küllerin % 66,88’i camsı yapıda, %70,88’i SiO_2 ve Al_2O_3 , geri kalan kısmı ise Fe,Ca-Mg ,Na, K ve Ti’den meydana gelir [1].

Uçucu küllerde, Ti, Na, K, Mg, Hf, Th, Fe daha çok alümina silikat matriksleri içinde; As, Se, Mo, Zn, Cd, W, V,U uçucu kül yüzeylerinde yoğunlaşmış şekilde Ca, Sc, Sr, La nadir toprak elementleri ve kısmen Ni; asit içinde çözülebilir fazlar halinde Mn, Be, Cr, Cu, Ga, Ba, Pb ise matriks ve matriks olmayan malzemeler arasında dağılmıştır. Uçucu küllerin kimyasal kompozisyonları çeşitli değişkenlere bağlı olup, bunlar arasında özellikle termik santrallerde yakılan kömürün kalitesi ve içerdiği safsızlıklar, toplama yöntemi, yanma süresi ve sıcaklığı sayılabilir [13, 14].

F ve C sınıfı iki uçucu kül arasında en çok dikkat çeken kimyasal fark, C sınıfı uçucu küllerin yüksek düzeyde CaO içermesinden kaynaklanmaktadır. Şayet CaO miktarı %10’dan fazla ise bu tür küller “ yüksek kireçli uçucu kül “, % 10’dan küçükse “düşük kireçli uçucu kül “ olarak adlandırılmaktadır. Bir yanma ürünü olan uçucu küllerde C içeriği de önemli bir faktördür. İyi yanma olan termik santrallerde karbon miktarı çok düşük olmaktadır. Eski tip santrallerde bu oran %10’a yükselmekte, yemilerde %3’ün altında olmaktadır. Uçucu külün karbon miktarı kızdırma kaybı değerinden az olmalıdır. Kızdırma kaybı değeri 0,9 ile çarpıldığında yaklaşık olarak karbon miktarı bulunabilmektedir [15].

4.1.2.2 Uçucu küllerin fiziksel özellikleri

Görünüş: Uçucu küllerin renkleri açık ve koyu gri ile siyah arasında değişmektedir. Karbon demir ve nem miktarı küllerin renklerini etkilemektedir. Mikroskop altında incelendiklerinde süngerimsi, gözenekli veya gözeneksiz küresel veya aglomera tanelerden meydana geldikleri görülmektedir. Linyit kömürü uçucu küllerinden daha koyudur. İyi yanmış uçucu küller, iyi yanmamış uçucu küllerden daha açık renktedir. İyi yanmamış uçucu küllerin koyu rengi, yapılarındaki yanmamış karbondan ileri gelmektedir. Uçucu küllerin genel görünüşleri Şekil 4.1' de gösterilmiştir [1, 16].



Şekil 4.1: Uçucu küllerin genel görünüşleri [16]

Tane boyutu: Uçucu küllerin tane boyutu, kullanılan kömürün cinsine ve öğütülme derecesine göre değişmektedir. Taş kömürü uçucu küllerinin tane boyutu, linyit kömürü uçucu küllerinin tane boyutundan daha küçüktür. Tane boyutuna etki eden ikinci faktör ise, tane boyutu küçük olan uçucu küllerin mümkün olabildiğince bacadan kaçmasına engel olunarak tutulmasıdır. Bacadan kaçan küller ne kadar iyi yakalanırsa o oranda ince taneli küller elde edilir. Genel olarak uçucu küllerin tane boyutları 1-100 mikron, özgül yüzeyleri ise 0,1-0,5 m²/g arasındadır [17,18].

Özgül ağırlık: Uçucu küllerin ortalama özgül ağırlığı 2150 kg/m³'dir. Ancak küldeki kuvars, alümina, demir ve karbon miktarları özgül ağırlığı değiştirmektedir. Ayrıca külün demir miktarı arttıkça özgül ağırlığı artmaktadır. Ayrıca uçucu küllerin içerisinde değişik özgül ağırlıklara sahip farklı taneler bulunabilmektedir [17, 18].

Manyetik özellik: 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 görülür. %7,7 Fe_2O_3 içeren bir uçucu külden, mıknatısa yapılan kısım yaklaşık % 6,8 olmaktadır. Kimyasal analizde mıknatısa yapışmayan kısımdaki Fe_2O_3 miktarının ise +4' olduğu tespit edilmiştir [17, 18].

Puzolanik özellik: Uçucu küller, kireç ve su ile karıştırıldığında belirli bir süre sonunda dayanım kazanır. Uçucu küllerde puzolanik özelliğin esas olan bu dayanım kazanma özelliği oldukça yavaş olarak ortaya çıkar. Artan süreyle birlikte, uçucu küllerin puzolanik özellikleri artmaktadır. Ayrıca CaO miktarı yüksek uçucu küller daha iyi puzolanik özellik gösterir [17, 18].

4.1.2.3 Uçucu külün kimyasal özellikleri

Uçucu küllerin kimyasal özellikleri, suda çözünürlük ve asitlerin etkisi olarak ikiye ayrılmaktadır [17, 18].

uçucu küller %2-3 oranında suda çözünürler. Çözelti kalsiyum ve sülfat nedeniyle alkali reaksiyon vermektedir. 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.

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.

4.1.3 Uçucu küllerin kullanım alanları

Uçucu küller yapısında bulunan SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO gibi bileşiklerden ve teknik ve fiziksel özelliklerinden dolayı büyük bir kullanım potansiyeline sahiptir. Uçucu küllerin diğer endüstrilerde kullanımının sağladığı birçok fayda vardır. Bu faydalar;

- Külün taşınma ve stoklanma masraflarını azaltır.
- Toprağa, havaya ve sulara zararlı iz elementlerin etkilerinin kontrol altına alınmasını sağlar.
- Geri kazanılan karbonun yakılmasıyla enerji ve hammadde tasarrufu sağlanır.
- Ekonomik açıdan diğer endüstrilere ucuz hammadde teşkil eder [1].

4.1.3.1 Tuğla Üretiminde kullanımı

Killer yapısındaki SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , K_2O , Na_2O , MgO ve TiO_2 bileşenlerinden dolayı tuğla üretiminde kullanılmaktadır. Uçucu küllerde, aynı oksitleri içerdikleri için tuğla üretiminde kullanılabilir. Uçucu küllerin tuğlalarda kullanılması ile , tuğlaların kuruma ve pişme küçülmesi azalmaktadır. Aynı zamanda uçucu küllerin içerdikleri karbon, tuğlaların pişirilmesinde enerji tasarrufu sağlamaktadır [19].

Uçucu küllü tuğla üretiminde, külün miktarına gerekli durum ortaya çıkmaktadır. Birincisinde kil ana malzemedir. Kül, kil özelliklerini geliştirmek ve bünyesindeki karbonun yanma değerinden faydalanmak için kullanılır. İkincisinde ise, uçucu kül esas malzemedir. Kil, uçucu küllerin plastik özelliği olmadığı için bu özelliği katmak için kullanılır. Uçucu kül ile kilin uygun karışımı ayarlandığı zaman aşağıdaki avantajlar elde edilmektedir.

- Öğütmede değirmene kolay besleme yapılması.
- Kalıplama için daha az kuvvet gerektirir.
- Daha kolay kuruma sağlar.
- Yakıt tasarrufu ve daha kolay pişme sağlar.

Tuğla üretiminde uçucu küllerin tane boyutu, tuğlaların özelliklerini etkilemektedir. Küçük taneli küllerin kullandığı tuğlalar, tane boyutu büyük olan uçucu küllü tuğlalara göre daha fazla basma mukavemetine ve bulk yoğunluğuna sahiptir. Ayrıca, daha düşük oranlarda pişme küçülmesi ve su emme özelliği gösterir. Küçük taneli küllerin tuğlalarda daha iyi özellik göstermesi, maksimum noktada teması sağlayarak yoğunlaşmayı arttırmasından ileri gelmektedir [20].

Uçucu kül içeren tuğlaların pişirilmesinde sıkıştırılmalı fırınların kullanımı, kil tuğlalarının pişirilmesinde kullanılan geleneksel fırınlardan daha iyi sonuçlar vermektedir [1].

Uçucu küllerde karbonun yanma enerjisini daha iyi değerlendirebildikleri için, sıkıştırılmalı fırınların termal verimlilikleri yüksektir. Ayrıca bu fırınların yatırım maliyetleri daha düşüktür [1].

4.1.3.2 Çimento ve beton yapımında kullanımı

Çimento yapımında kullanılan hammaddeler SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 ve CaO olmak üzere başlıca 4 bileşiği içerirler. Uçucu küllerde de değişik oranlarda aynı bileşikler bulunduğu için çimento üretiminde kullanılabilir. Bağlayıcılık özelliği gösteren uçucu küller çimento ile birlikte kullanıldıklarında çimentonun hidrasyonu sırasında ortaya çıkan kalsiyum hidroksit ile bu küller kimyasal reaksiyona girdiğinden [Puzolonik reaksiyon] bağlayıcı özellikleri daha da artar [1,21].

Uçucu küller beton yapımında kullanıldıkları zaman, betonun yüzey temizliği ve işlenebilirlik özelliği iyileşmektedir. Aynı zamanda betonun su geçirgenliği, büzülmesi azalmakta, dayanımı artmaktadır [1].

Ancak uçucu küllerin çimento sanayinde kullanılmasında dikkat edilecek en önemli husus yanmamış karbon oranının %6'nın altında olmasıdır. Aksi halde kızdırma kaybının fazla olması nedeniyle su/çimento oranı, kabarcık yüzdesi, bekleme süresi gibi parametrelerin kontrolü zorlaşmakta, mekanik dayanım özellikleri olumsuz etkilenmektedir [22].

4.1.3.3 Hafif agrega üretiminde kullanımı

Uçucu kül, hafif öğütülmüş katı yakıt ve su karışımının 1000-1200 $^{\circ}\text{C}$ 'de sinterleştirilmesi ile pelet veya modüller üretilir. İyi bir mekanik mukavemete sahip bu agregalar betonda kullanılarak hafif betonlar ve bloklar elde edilir. Ayrıca hafif olmaları sebebiyle binaların işçilik, temel masrafları, ısı ve ses iletkenliği azalır [1].

4.1.3.4 Yol yapımı ve geoteknik uygulamalarda kullanımı

Uçucu kül, yol yapımında ve geoteknik uygulamalarda genellikle iki şekilde kullanılmaktadır; dolgu malzemesi olarak ve toprak stabilizasyonu sağlamak amacıyla temel malzeme olarak kullanılmaktadır. Uçucu küller sıkıştırıldıkları zaman diğer dolgu malzemelerine nazaran daha düşük bir yoğunluğa sahip olurlar. Bu durum, özellikle sıkıştırılabilirlik özelliği yüksek uçucu küllerin yüksek zeminler üzerinde daha uygun bir dolgu malzemesi olarak kullanılabileceğini gösterir. Böylece yerleşme nedeniyle oluşan deformasyonlar daha küçük olacak, özellikle yerleşme hareketinin büyük sorunlar yarattığı köprü ayaklarında kullanılması çeşitli yararlar sağlayacaktır [1].

Son zamanlarda uçucu külün çevre geoteknolojisi uygulamalarında kullanım olanakları araştırılmaktadır. Örneğin, zararlı atık veya çöp depolanan sahalarda sızdırmazlık sağlamak amacıyla sıkıştırılmış kil yerine sıkıştırılmış uçucu kül veya kül-kum karışımının kullanılması düşünülmektedir [23].

4.1.3.5 Gaz beton üretiminde 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. Daha sonra otoklavlarda buhar kuru uygulanması ile fiziksel ve kimyasal özellikleri iyileştirilen bloklar, kullanıldıkları binalarda ısı yalıtımının yanı sıra , hafif olmaları nedeniyle taşımada da kolaylık sağlarlar [1].

4.1.3.6 Seramik ve cam üretiminde kullanımı

Uçucu küller, kil ve feldspat ilavesi yapılarak geleneksel (tabak, fincan vs.) ve sanatsal (vazo, küllük, süs eşyaları) seramiklerin üretiminde mukavemet sağlamasından dolayı kullanılmaktadır.

Uçucu küller seramik sanayiinde kullanıldığında bir takım avantajları beraberinde getirmektedir. Bunlar tane boyutunun küçüklüğü nedeniyle, öğütme masraflarının olmayışı dolayısıyla maliyetin çok düşük olması ve içerdiği karbonun pişirme işlemleri sırasında sağladığı enerji şeklinde sıralanabilir. Uçucu küller ayrıca son zamanlarda üzerinde çok çalışan ve geniş kullanım alanı bulan cam seramiklerinin üretiminde de kullanılmaktadır [1].

4.1.3.7 Adsorbant olarak kullanımı

Uçucu kül adsorpsiyon özelliğinden dolayı , değişik uygulamalarda adsorbant olarak kullanılabilir. Fe,Ca, NaO, SO₂, CO₂, Nox azaltmada adsorbant olarak kullanılabilir. Ayrıca yapılan bir çalışmada uçucu küllerin su içindeki borun tutulması amacıyla kullanımı denenmiş ve % 99 bor uzaklaştırma verimlerine ulaşılmıştır [24].

4.1.3.8 Demir cevherinin peletlenmesinde kullanımı

Demir cevherlerinin peletlenmesinde F sınıfı uçucu küller puzzolonik reaksiyon sonucunda kazandığı bağlayıcı etkisinden dolayı kullanılabilir. F sınıfı uçucu küllerin bu alanda kullanımında, bentonite göre bazı avantajlar söz konusudur. Uygun bir uçucu kil CaOH ile bağlayıcılık özelliği fazlalaşacağından daha kuvvetli bağ yapar, maliyetler azalır ve uçucu külün değerlendirilmesi ile uçucu külün çevresel etkileri azalır. Uçucu kül taneleri puzzolonik reaksiyon sonucunda kalsiyum alümina silikat jeli halinde bağlayıcı olurken , bentonitte bu olay fiziksel bağlanma ile gerçekleşir [25].

Uçucu küllerin yukarıda verilen alanlar dışında daha başka şekillerde kullanımları aşağıda sırasıyla verilmiştir [26].

- İçerisinde bulunan Al, Ni, Cr, Ti, Au, U, Ga gibi bazı elementlerin elde edilmesi amacıyla kullanılmaktadır.
- Çevresel uygulamalarda atık suların temizlenmesinde renk giderici ve çözülebilir organik süspansiyonların uzaklaştırılmasında kullanılabilir.
- Ziraatte belli pH'daki ve karakteristikteki küller zirai amaçlı olarak kullanılabilir.
- Döküm kumu olarak
- Duvar harçlarında
- Metal yüzeylerinin püskürtme ile temizlenmesinde
- Petrol kuyuları sondajlarında
- Sentetik zeolit üretiminde kullanılırlar.

4.1.4 Dünyada uçucu kül

Günümüzde uçucu küller, gerek teknik özellikleri , gerek ucuz hammadde olmaları nedeniyle, ayrıca çevresel etkilenin azaltılması ve artan depolama masraflarının önüne geçilmesi bakımından uçucu küllerin değerlendirilmesi Dünya'da önemli bir yer edinmiştir. Türkiye'de ise birçok araştırma yapılmasına rağmen uçucu küllerin değerlendirilme oranı oldukça düşüktür [1].

4.1.4.1 A.B.D’ de uçucu kül

A.B.D.’de her yıl değişik termik santrallerde üretilen uçucu küllerin değerlendirilmesi konusunda oldukça fazla çalışmalar mevcuttur. Toplam üretilen 60 milyon ton uçucu kül % 30 oranında değerlendirilmekte, diğer kısmı ise depolanmaktadır. Özellikle kömür yakma ürünlerinin değerlendirilmesi amacıyla kurulan American Coal Ash Association’da bir çok araştırmalar yapıp, bu atıkların büyük maliyetlerle depolanacağına ekonomiye kazandırılması amaçlanmaktadır. Çizelge 4.3’ te Amerika Birleşik Devletilerindeki Uçucu Küllerin Değişik Sektörlerde kullanım oranları verilmektedir [28].

Çizelge 4.3 : A.B.D’ de uçucu kül değerlendirme oranları [28].

Kullanım Alanları	Değerlendirme [ton]
Çimento-beton	9,421,903
Akışkan yatak	386,158
Yapı dolgusu	2,877,535
Yol dolgusu	1,417,600
Mineral dolgusu	285,580
Madencilik	1,413,567
Artık stabilizasyonu	3,117,947
Diğer	362,501
Toplam değerlendirme, ton	19,317,362
Toplam uçucu kül üretimi,ton	60,264,791
Değerlendirme oranı	%32,1

4.1.4.2 Japonya’da uçucu kül

Günümüzde Japonya’da üretilen 8,43 milyon ton uçucu külün 6.93 milyon tonu (%82,2’si) değerlendirilmektedir. Çizelge 4.4’ de Japonya’daki değişik yıllardaki uçucu kül üretimi ve değerlendirme durumu verilmektedir [29,30].

Çizelge 4.4 : Japonya’da yıllara göre kül üretimi ve değerlendirme durumu [29, 30]

Üretim - Değerlendirme	1994		1995		1996		1997	
	10 ⁶	%	10 ⁶	%	10 ⁶	%	10 ⁶	%
Üretim	6,526	100,0	7,123	100,0	7,208	100,0	8,43	100,0
Değerlendirme	4,215	65,6	4,782	67,1	5,058	70,2	6,93	82,2
Depolama	2,311	35,4	2,341	32,9	2,150	29,8	1,50	17,8

4.1.4.3 Avrupa’da uçucu kül

Avrupa’da üretilen yaklaşık 63 milyon uçucu külün değişik alanlarda uçucu kül kullanımı ile ilgili olarak bilgiler Çizelge 4.5’ de verilmektedir. Avrupa’da üretilen uçucu külün 10 milyon tonu İngiltere’de üretilmekle birlikte bunun 1 milyon tonu beton ve çimento üretiminde kullanılmaktadır [31].

Çizelge 4.5 : 1999 yılına ait Avrupa’da uçucu kül değerlendirme durumu [31].

Kullanım Alanları	Değerlendirme (ton)
Çimento	5,6 milyon
Beton	6,7 milyon
Yapı Dolgusu	1,4 milyon
Dolgu Malzemesi	2,7 milyon
ReklamasyonRestarasyon	15,4 milyon
Diğer	7,2 milyon
Toplam Değerlendirme	38 milyon

4.1.4.4 Türkiye’ de uçucu kül

Türkiye’ de termik santrallerden her sene toplam 13 milyon ton uçucu kül ortaya çıkmaktadır. Birçok bilim adamı bu uçucu külleri karakterize etmek için değişik çalışmalar yapmış, bu küllerin mineralojik ve kimyasal yapılarını tespit etmişlerdir Türkiye’deki bazı uçucu küllerin mineralojik bileşimleri Çizelge 4.6’ da verilmiştir [32,33].

Çizelge 4.6 : Türkiye’deki bazı uçucu küllerin mineralojik kompozisyonu [32, 33]

Mineral %	UÇUCU KÜL					
	Afşin-Elbistan	Çatalağzı	Seyitömer	Soma	Tunçbilek	Yatağan
Mullit	1,0	18,1	1,2	4,3	8,8	6,0
Kuvars	4,5	10,9	5,6	5,1	13,9	22,4
Manyetit	0,8	0,2	2,5	0,6	4,1	2,9
Hematit	4,0	0,1	6,0	2,0	3,0	7,0
Serbest CaO	18,6	0,7	5,5	9,8	0,9	1,0
Anhidrit	12,2	-	9,3	7,4	-	-
Plajiolklas	≈ 28	-	≈15	≈20		≈25
Camsı ve Amorf Faz	≈30	≈70	≈50	≈50	≈70	≈35

Çizelge 4.7’ de Seyitömer, Çatalağzı, Afşin-Elbistan ve Tunçbilek uçucu külleri üzerinde yapılan kimyasal analiz sonuçları verilmektedir [32].

Çizelge 4.7 : Seyitömer, Çatalağzı, Afşin- Elbistan ve Tunçbilek uçucu küller üzerinde yapılan kimyasal analiz sonuçları [32].

Oksit	Seyitömer	Çatalağzı	Afşin-Elbistan	Tunçbilek
SiO ₂ , %	53,50	47,60	15,14	52,10
Al ₂ O ₃ , %	15,71	24,31	7,54	19,06
Fe ₂ O ₃ , %	8,81	4,48	3,30	10,10
S+A+F, %	78,02	76,39	25,98	81,26
CaO, %	0,29	0,20	23,66	0,10
MgO, %	2,94	1,00	4,50	6,11
K ₂ O, %	1,19	3,50	0,28	1,32
Na O , %	0,77	0,58	0,57	0,49
TiO ₂ , %	0,12	1,50	1,03	1,07
SO ₃ , %	1,11	0,57	13,22	0,83
Kızdırma Kaybı, %	3,78	1,87	2,31	4,62

Türkiye’de uçucu kül üretimini sadece %0,4’ ü çimento sanayinde katkı maddesi olarak ve yapı sanayiinde değerlendirilmektedir. Özellikle uçucu küllerin adsorpsiyon özellikleri dikkate alınarak arıtılma işlemlerinde, bunun yanında İngiltere’de büyük oranda değerlendirme yöntemi olan reklamasyon ve restorasyon işlerinde, peletlemede ve bunun gibi birçok alanda değerlendirilme olasılığı olan bu

küllerin büyük oranda değerlendirilmesi ülke ekonomisi ve çevresel açıdan çok önemli faydalar sağlayacaktır [1].

4.1.4.5 Uçucu küllerin zenginleştirilmesinde kullanılan yöntemler

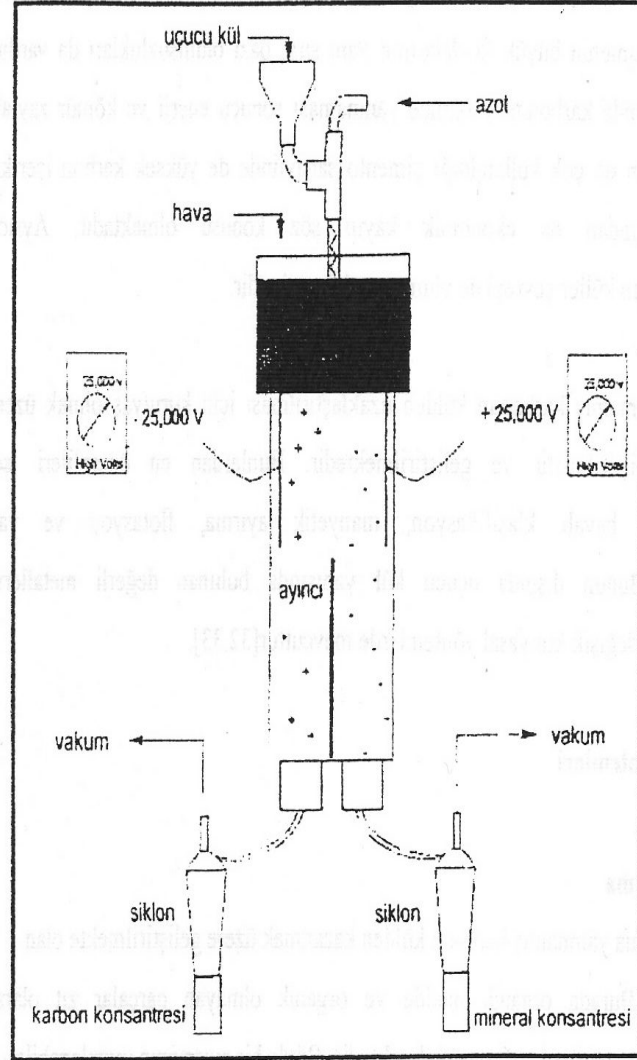
1999 senesinde çıkarılan “The Clean Air Act” ‘ne göre atmosfere daha az Nox’lerin bırakılması için, daha düşük sıcaklıkta yakmayı gerçekleştiren, yakma teknikleri geliştirilmiştir. Bu gelişmenin büyük faydalarının yanı sıra, bazı olumsuzlukları da vardır. Örneğin, yakma işleminde karbonun yeterince yanmaması sonucu enerji ve kömür zayıtı olmakta, ayrıca küllerin en çok kullanıldığı çimento sanayiinde de yüksek karbon içerikli küller kullanılmadığından da ekonomik kayıp söz konusu olmaktadır. Ayrıca değerlendirilmeyip atılan küller çevreyi de olumsuz etkilemektedir [1].

Böylece, özellikle yanmamış karbonun külden uzaklaştırılması için kuru/yaş olmak üzere çeşitli yöntemler geliştirilmiştir ve geliştirilmektedir. Bunlardan en önemlileri yaş ayırma yöntemleri; elektrostatik ayırma, havalı klasifikasyon, manyetik ayırma yaş ayırma yöntemleri ise flotasyon ve yağ aglomerasyonu ve bunun dışında uçucu kül yapısında bulunan değerli metallerin kazanılmasına yönelik değişik kimyasal yöntemlerde mevcuttur [34, 35].

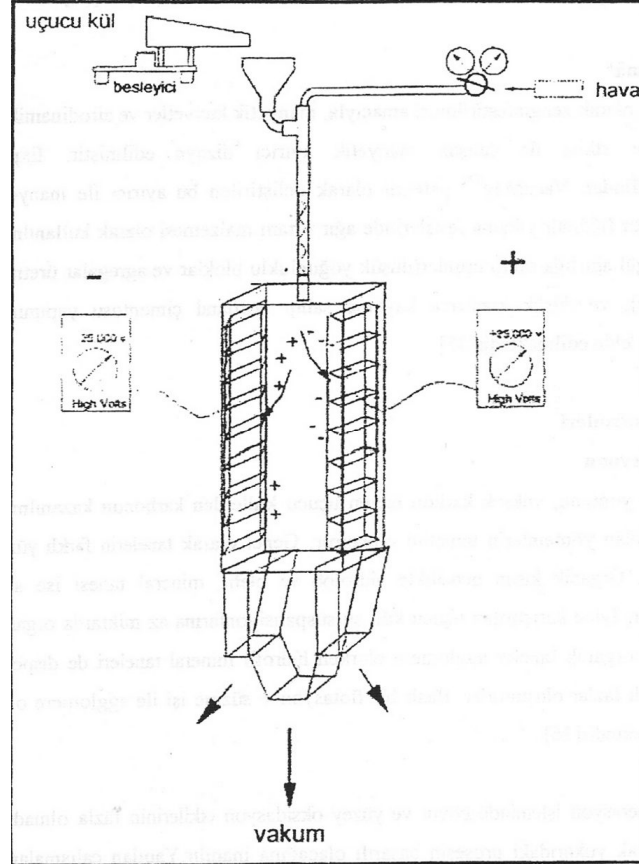
Elektrostatik ayırma: Triboelektrostatik ayırma yanmamış karbonun külden kazanmak üzere geliştirilmekte olan yeni bir yöntemdir. Burada organik madde ve organik olmayan parçalar zıt olarak yüklendikleri için elektrostatik olarak ayrılabilir. Böyle bir ayırmanın uygulanabilmesi için önemli husus da çok temiz kömür ürününün alınması ya da karbonca fakir beton hammaddesinin elde edilmesidir.

Triboelektrostatik araştırma enstitüsü FETC, tamamen pnömatik olarak yüklenme sistemleri üzerine çalışmışlardır. Çalışmalarında paralel plakalı ve de kafes plakalı ayırıcılar kullanmışlardır. Paralel plakalı triboelektrostatik ayırıcısını şematik görünümü Şekil 4.2’ de görülmektedir. Paralel plakalı ayırıcılar, basınçlı azot tarafından iletilen venturi besleme sistemi, üfleme memesi ve de yüksek gerilim ayırmasından ibarettir . Uçucu kül parçaları, venturi besleyicinin içinden geçerken türbülans ortamının etkisiyle gerek bom cidarlarına gerek kendi aralarında çarpışarak yük kazanmaktadırlar. Sonra parçalar +25000 ve – 25000 V volt gerilimine sahip levhalar arasından geçerken yüklerine bağlı olarak ayırıcı levhanın uygun tarafına düşerek ayrılmaktadır. Kafes plakalı triboelektrostatik ayırıcısının şematik görünümü

Şekil 4.3' de gösterilmektedir. Kafes aralıklarına sahip ayırıcısı genel olarak paralel levhalara benzemektedir. Fakat aralarındaki en önemli fark ise ayırma zonunu oluşturan levhaların dizilimi olmaktadır. Her iki cihazda da beslenen tanelerin yüklenme karakteristikleri kullanılan bakır veya teflon yükleyicilere göre ayarlanabilmektedir [36].



Şekil 4.2: Paralel plakalı triboelektrostatik ayırıcısını şematik görünümü [36].



Şekil 4.3: Triboelektrostatik ayırıcısının şematik görünümü [36].

Kuru ayırmanın ekonomik olarak uygulanabilmesi için yöntemin düşük maliyetli, esnek ve uygulanabilir olması gerekmektedir. İşin içine çok ince tanelerin triboelektrostatik özelliklerinin girmesi ile büyük miktarda yatırım ve araştırma gerekmektedir. Çünkü tane boyutu, boyut dağılımı, tane şekli, tanelerin hızı ve yükleyici yüzey ile, kendi aralarındaki temasları, nem, ısı etkiler, tane yüzey özellikleri gibi bir çok fiziksel ve fizikokimyasal faktörler yüzeylerin zıt olarak yüklenmesinin yanı sıra, tanelerin yüklenme derecelerine etki etmektedirler. Yapılan laboratuvar ölçekli çalışmalar, yanmamış karbonun külden kazanabilirliği ile ilgili dataları içermekte olup, kullanılan cihazlar 10 kg/saat kapasitesindedir. 1 t/saat kapasiteli ayırıcıların yapım çalışmaları sürmektedir [36].

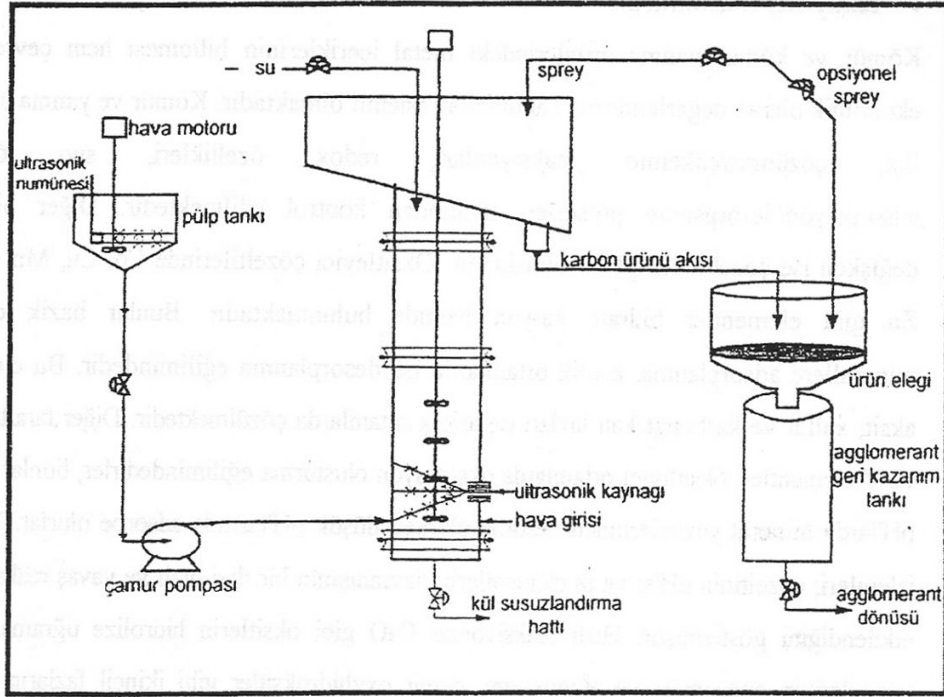
Manyetik ayırma: Uçucu küllerin kuru olarak zenginleştirilmesinde manyetik kuvvetler ve aerodinamik kuvvetlerin birlikte etkisi ile çalışan manyetik ayırıcı dizayn edilmiştir. Export Tech. Company tarafından VacMag patentli olarak geliştirilen bu ayırıcı ile manyetik özelliği olan manyetit (Kömür yıkama tesislerinde ağır ortam malzemesi olarak kullanılmak üzere) ile düşük özgül ağırlığa sahip ürünler (düşük yoğunluklu bloglar ve agregalar üretmek amacıyla kullanılan), ve

düşük kızdırma kaybına sahip portland çimentosu yapımında kullanılacak ürünler elde edilmektedir [37].

Yağ aglomerasyonu: Yağ aglomerasyonu yöntemi, yüksek karbon içeren uçucu küllerden karbonun kazanılması için geliştirilmekte olan yöntemlerin temelini oluşturur. Genel olarak tanelerin farklı yüzey özelliklerine dayanır. Organik kısım genellikle hidrofob ve olefil , mineral tanesi ise aksi özelliklere sahip olur. İyice karıştırılan uçucu kül, su süspansiyonlarına az miktarda organik çözelti katıldığında , organik taneler aglomere olurken hidrofil mineral taneleri de disperse olarak su içinde farklı fazlar oluştururlar. Basit bir flotasyon + süzme işi ile aglomere olan taneler kazanılabilmektedir [38].

Genel olarak aglomerasyon işleminde boyut ve yüzey oksidasyon etkilerinin fazla olmadığı düşüncesine dayanarak , yukarıdaki prosesin başarılı olacağına inanılır. Yapılan çalışmalarda aglomerant türleri, karıştırma hızı , hava akımı , pülp besleme hızı ve aglomerant/kül oranları gibi çeşitli parametrelerin karbonun kazanılmasında etkileri ve optimum çalışma şartları incelenmiştir. Aglomerant olarak kullanılan çözümlerden cyclohexanenin kullanımı en iyi sonuç vermiş olup % 71,2 verimle % 56,8 karbon içerikli konsantre elde edilmiştir. Yapılan çalışmalardaki sonuçlara göre karıştırma hızı arttıkça karbon oranı artmakta ; fakat bununla birlikte verimde düşüş olmaktadır. Genel olarak ortama havanın verilmesi ile % 65-71 C içerikli konsantreleri elde edilir. Fakat hava miktarı arttıkça verimin düştüğü gözlenmiştir. Bunun sebebi olarak çok sayıda kabarcığın türbülans etkisi yaratarak taneciğin aglomere olmasını engellediği düşünülebilir [1].

Bu ön çalışmalar sayesinde ultrasonik gibi yeni yöntemler geliştirilebilmiştir. Ultrasonik, hali hazır olarak tıpta tasarım; okeanografi' de; malzeme biliminde çatlak tespitinde; emülsiyon ve parça dispersiyonu stabilitesi gibi bilim dallarında malzemelerin fiziksel özelliklerinin belirlenmesinde kullanılmaktadır. Bu çalışmada ise ultrasonik dalgaların kül içindeki inorganik malzemelerin organik malzemeden ayrılmasındaki etkisi incelenmiştir. Bunun için ultrasonik etkinin hiç uygulanmadığı, sadece kolonda uygulandığı ve de hem kıvamlaştırma hem kolonda uygulandığı üç çalışma şartı belirlenmiştir. Altı- Foot'luk ultrasonik alomerasyon kolonu şematik görünümü Şekil 4.4' te gösterilmektedir [38].



Şekil 4.4: Altı- Foot'luk ultrasonik alomerasyon kolonu şematik görünümü [38].

Bu deney sonuçlarına göre , ultrasonik dalgaların karbon ile inorganik kısmın birbirinden ayrışmasını kolaylaştırdığı düşünülebilir. Ayrıca , en temiz karbonun alınmasında kıvamlaştırıcı ve kolonun her ikisinin uygulanmasının gerekli olduğu belirlenmiştir. Son olarak gerek ultrasonik etki gerek diğer parametrelerinin optimum durumları sağlandıktan sonra % 69,3 verimle % 73,4 karbon içerikli ürün elde edilebilmiştir. Daha yüksek > 1.0 Mhz'ler ve satılabilir ürün elde edilebilecek şartlarla ilgili çalışmalar devam etmektedir [38].

Flotasyon: bu yöntemle özellikle uçucu kül yapısında bulunan yanmamış karbonun uzaklaştırılması amacıyla flotasyon yöntemi klasik bir yöntem olarak kullanılabilir. Flotasyonda kollektör olarak 2 no' lu fuel oil kullanılabilir. Diesel oil, asetik asit , proprietary alakanoamid karışımı % 20 oranında fuel oil ile karıştırılarak yapılan flotasyon işleminde iyi veriler elde edilebilmektedir [39].

Kimyasal çözündürme: Kömür ve kömür yanma ürünlerindeki metal içeriklerinin bilinmesi hem çevre hem de ekonomik olarak değerlendirme bakımından önemli olmaktadır. Kömür ve yanma ürünlerinin liçi çözünme/çökelme reaksiyonları , redoks özellikler , sıvı özellikleri, adsorpsiyon/desorpsiyon prosesleri tarafından kontrol edilmektedir. Cd,Cu, Mn, Ni, Pn ve Zn gibi elementler hidrate katyon halinde bulunmaktadır. Bunlar bazik ortamlarda minerallere adsorplanma, asidik ortamlarda

ise desorplanma eğilimindedir. Bu elementlerin oksit, sülfat ve karbonat katı fazları ise asidik ortamlarda çözölmektedir. Diğer taraftan As, Mo ve V elementleri oksitleyici ortamlarda oksidasyon oluşturma eğilimdedirler, bunlar da yüksek pH'larda mineral yüzeylerinden desorbe olurken düşük pH'larında adsorbe olurlar. Yapılan liç işlemleri, çözeltinin pH'sı ve iz elementlerin davranışının bir dizi hızlı ve yavaş reaksiyonlardan etkilendiğini göstermiştir. Hızlı reaksiyonlar CaO gibi oksitlerin hidrolize uğraması, mineral yüzeylerinin çözünmesi ve alüminyum, demir oksihidroksitler gibi ikincil fazların çökelmeye başlaması gibi; yavaş reaksiyonlar zor fazların ve cam fazların çözünmesinden oluşur [40].

Günümüzde küllerden temel hammaddelerin elde edilmesi ve enerji tasarrufunun sağlanması bakımından birçok araştırmalar yapılmaktadır. Açık ki , küllerin yapısal çeşitliliği nedeniyle bütün küller için geçerli bir yöntemin bulunması mümkün değildir. Opatovice Santrali külleri, karakteristik yüksek Al ve Ti içeriğine sahiptir. Burada uygulanabilecek yöntemler aşağıda anlatılmaktadır [40].

Direk asit liçi : HCl, H₂SO₄, HP₆, HNO₃ asitleriyle gerek ortam gerek yüksek sıcaklıklarda bazı Al ve Fe bileşiklerinin çözeltiye alınması.

Direk bazik liç: Bazik ortamda boksitten Al₂O₃ ün Bayer yöntemi ile elde edilmesi gibi, birinci sınıf boksit (SiO₂ > %2,5) için en ekonomik olmaktadır Esas olarak , Sodyum Alüminatın stabilitesinin değiştirilmesi ve alüminyum hidratın sodyum hidroksit çözeltisinde çözünmesinden ibarettir.

Kireçtaşı veya soda ilavesi ile sinterleme: Mullit bağlarının yüksek sıcaklıklarda bozunarak CaO, Al₂O₃ ve 3CaOAl₂O₃ veya 2CaOSiO₂ oluşturmakta ve bunlardan dikalsiyumsilikat suda çözünmezken CaOSiO₂ suda çözünür. Bu yöntem ise yüksek SiO₂ içerikli boksitlerin işlenmesinde kullanılmaktadır.

- Klorlayıcı işlemler
- Oksitleyici işlemler: Tercihen , Fe önceden klorlayıcı işlemde geçirilir.
- Redükleyici İşlemler: Tercihen Al ve Ti önceden klorlayıcı işlemde geçirilir.

4.2 Taban Külleri ve Cürufklar

Termik santrallerde uçucu külün yanı sıra bir miktar baca gazları ile taşınamayıp kazan tabanına düşen ve taban külü olarak adlandırılan iri taneli atık ve ayrıca yanan

kömür küllerinin erimesi ve suda soğutulularak uzaklaştırılması ile bir miktar cüruf [eritilmiş kül]' da oluşabilmektedir. Uçucu ve taban kül-cüruf miktarları arasındaki dağılım kömürün yakıldığı kazan tipine, yakılan kömür cinsine ve kazan altı tipine (ıslak veya kuru) bağlı olarak değişim göstermektedir. Pulverize kömür yakan santrallerde oluşan yanma ürünlerinin büyük çoğunluğunu (yaklaşık %80) uçucu küller oluşturmakta, geri kalan miktarı da (yaklaşık %20) taban külü ve cüruftan oluşmaktadır. Türkiye'de yeni yapılmakta olan akışkan yataklı Çan Termik Santrali haricinde termik santrallerindeki kazanlarda pulverize kömür (-100 μm) yakılmaktadır ve bu nedenle oluşan uçucu kül miktarı oldukça fazladır. İkinci faktör olan kül füzyon sıcaklığı kömür içindeki minerallerin erime sıcaklığını belirler. Küller düşük füzyon sıcaklığına sahip olduklarında mineraller erime eğilimi gösterirler. Bu nedenle düşük füzyon sıcaklığına sahip kömürlerdeki atıklarda taban külü oranı daha yüksektir. Son faktör olan kazan altı tipi de kül miktarındaki dağılıma etki eder. Seyitömer Termik santralinde ıslak metoda göre dizayn edilmiş kazanlarda, yanan kömürlerden oluşan cüruf miktarı kuru tip kazanlara nazaran daha çoktur [5,6].

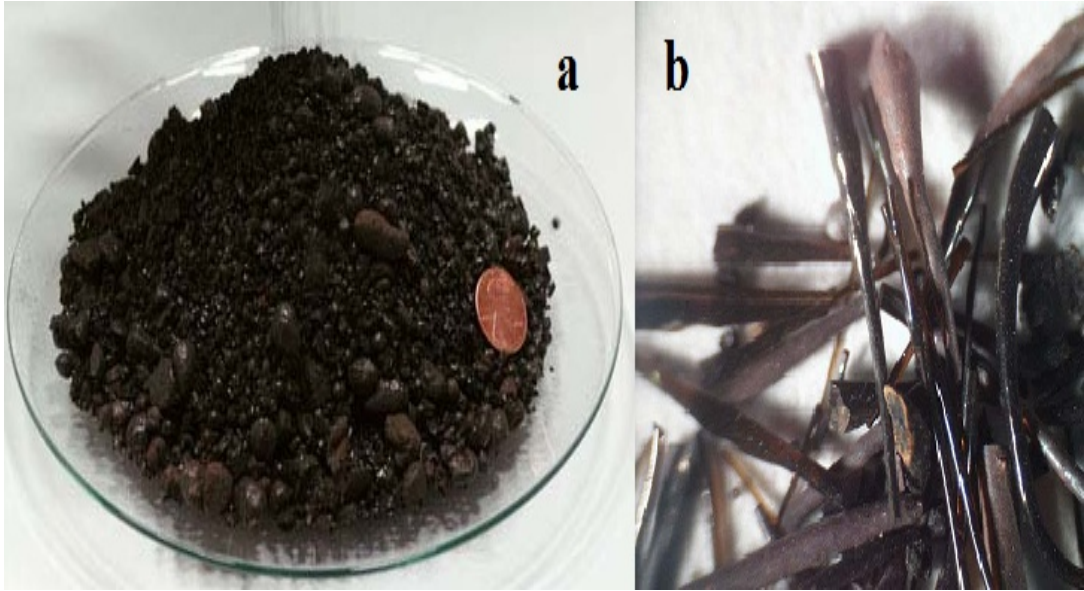
4.2.1 Taban külü ve cürufların özellikleri

4.2.1.1 Taban külü ve cürufların fiziksel özellikleri

Görünüş ve renk: Taban külleri çoğunlukla köşeli yapıda mat taneciklerden oluşan malzemelerdir. Renkleri açık griden koyu griye kadar değişim gösterir. Cüruflar ise kömürün yanması sonucunda kazanın tabanında biriken ergimiş haldeki malzemenin suyla ani soğuma geçirmesinden dolayı kaba, granüler ve gaz boşluklu taneler içerirler. Cürufların renkleri koyu griden siyaha kadar değişim gösteren parlak taneler içerirler. Cüruflara parlaklığı veren camsı matrikstir. Taban küllerinde ve cüruflarda renginin açıklığı yakılan kömürün cinsine ve yakma prosesine bağlı olarak değişiklik gösterir. Linyit kömürlerinin yakılmasından oluşan kazan ve kazan altı ürünlerin renkleri bitümlü kömürlerin yakılmasıyla oluşanlardan daha koyu renklidir. Cüruf ve taban küllerindeki yanmamış karbon oranı arttıkça renkleri koyulur. Taban küllerinin genel görünümü Şekil 4.5' de cürufların genel görünümleri ve cüruflardaki iğne yapıları Şekil 4.6 da verilmiştir [16].

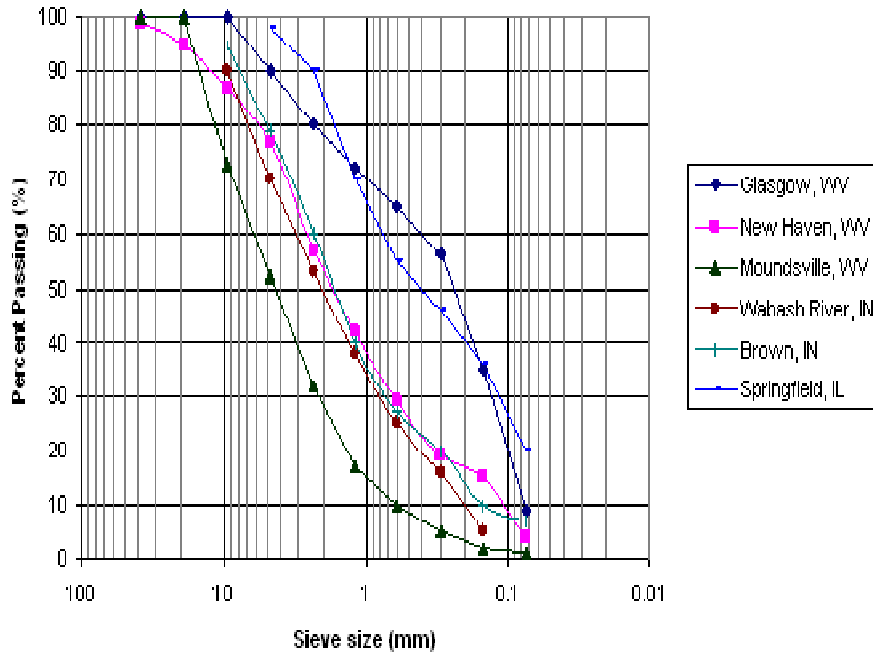


Şekil 4.5: Taban küllerinin genel görünümü [16].



Şekil 4.6: Cürufların genel görünümü ve iğne yapıları [16].

Tane boyutu: Taban külleri, ince çakıldan ince kum boyutuna kadar değişen çok az miktarda silt-kil boyutunda parçacıklar içerir. ABD'deki çeşitli termik santrallerden alınan taban küllerinin toplam elek altı eğrileri Şekil 4.7' de gösterilmektedir. Taban küllerinin En üst parça boyutları 19 mm ile 38 mm arasında değişim gösterir. Taban külünü oluşturan tanelerinin büyük çoğunluğu (%50-90) 4,75 mm elek açıklıklı elekten, %10-60'ı 0,42 mm elek açıklıklı elekten ve %5-10 veya daha az miktarı 0,074 mm elek açıklıklı elekten geçer [41].

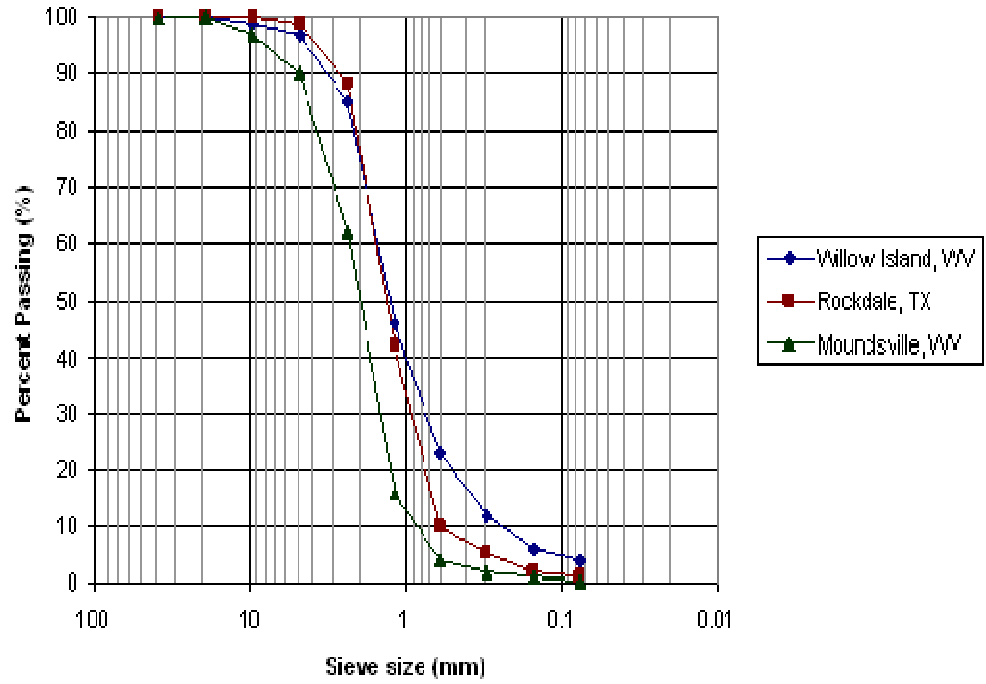


Şekil 4.7: ABD’ deki çeşitli termik santrallerden alınan taban küllerinin toplam elek altı eğrileri [41].

Cürufaların parça boyut dağılımları ince çakıldan kum boyutuna kadar değişiklik gösterir. Şekil 2’ de A.B.D’ deki i çeşitli termik santrallerden alınan cürufaların toplam elek altı eğrileri görülmektedir. Cürufaların en üst parça boyutları 12 ile 9,5 mm arasında değişir. Cürufu oluşturan tanelerinin büyük çoğunluğu (% 90-100) 4,75 mm elek açıklıklı elekten, %40-60’ı 2 mm elek açıklıklı elekten ve %5 veya daha az miktarı 0,074 mm elek açıklıklı elekten geçer [6]. Şekil 4.8’ de A.B.D’deki çeşitli termik santrallerden alınan cürufaların elek altı eğrileri görülmektedir [41].

Taban külleri ve cürufaların özgül ağırlıkları kimyasal bileşimlerine bağlı olarak değişim göstermektedir. Bu malzemelerdeki yanmamış karbon miktarları arttıkça özgül ağırlıkları azalmaktadır. Ayrıca porozite ve sünger yapıları arttıkça özgül ağırlıkları düşmektedir.

Taban küllerinin özgül ağırlıkları $2,1 \text{ gr/cm}^3$ ten $2,7 \text{ gr/cm}^3$ e kadar değişim gösterir. Cürufaların özgül ağırlıkları $2,3$ ile $2,9 \text{ gr/cm}^3$ arasındadır [41].



Şekil 4.8: A.B.D’ deki çeşitli termik santrallerden alınan cürufların toplam elek altı eğrileri [41].

4.2.1.2 Taban külü ve cürufların kimyasal özellikleri

Taban külü ve cüruflar inorganik kül yapıcı bileşenler ve yanmamış karbondan oluşmaktadır. Cüruf ve tabana küllerindeki inorganik bileşenler ağırlıklı olarak SiO_2 , Al_2O_3 ve Fe_2O_3 , CaO , MgO ’ tir. Taban külleri ve cürufların sülfat içerikleri genellikle %1’ in altındadır. Linyit kömürlerinin yakılmasıyla oluşan taban külü ve cüruflardaki CaO içeriği, bitümlü kömürlerin yakılmasıyla oluşan taban külü ve cüruflardaki CaO içeriğinden yüksektir [42].

Taban külü ve cüruflardaki organik malzeme ise ağırlıklı olarak yanmamış karbondur. A.B.D. deki çeşitli bölgelerin termik santrallerinden alınan taban küllerinin kimyasal bileşimleri Çizelge 4.8’ de yine aynı bölgelerdeki cürufların kimyasal bileşimleri ise Çizelge 4.9’ da verilmiştir [42].

Çizelge 4.8 : A.B.D’nin çeşitli bölgelerindeki termik santrallerden alınmış olan taban küllerinin kimyasal bileşimleri [42].

Yakılan Kömür Cinsi	Bitümlü Kömür			Alt- Bitümlü Kömür	Linyit
Bölge	West Virginia	Ohio	Texas		
Bileşenler	Miktar (%)				
SiO ₂	53,6	45,9	47,1	45,4	70,0
Al ₂ O ₃	28,3	25,1	28,3	19,3	15,9
Fe ₂ O ₃	5,8	14,3	10,7	9,7	2,0
CaO	0,4	1,4	0,4	15,3	6,0
MgO	4,2	5,2	5,2	3,1	1,9
Na ₂ O	1,0	0,7	0,8	1,0	0,6
K ₂ O	0,3	0,2	0,2	-	0,1

Çizelge 4.9 : A.B.D’nin çeşitli bölgelerindeki Termik Santrallerden alınmış olan cürufalarının kimyasal bileşimleri [42].

Yakılan kömür	Bitümlü kömür		Linyit
Bölge	West Virginia	Ohio	Texas
Bileşenler	Miktar (%)		
SiO ₂	48,9	53,6	40,5
Al ₂ O ₃	21,9	22,7	13,8
Fe ₂ O ₃	14,3	10,3	14,2
CaO	1,4	1,4	22,4
MgO	5,2	5,2	5,5
Na ₂ O	0,7	1,2	1,7
K ₂ O	0,1	0,1	1,1

Cürufaların kimyasal özellikleri suda ve asitteki çözünürlüklerine bağlı olarak ikiye ayrılabilir [43].

Cüruf ve taban küllerinin suda çözünme etkisi çok azdır, ağırlıkça %1-2 arasında çözeltiye geçebilirler. Bir miktar CaO çözeltiye geçer diğer metal oksitlerin sudaki çözünürlüğü çok düşük seviyelerdedir. Sıcaklık artışına bağlı olarak bu malzemelerin sudaki çözünürlüğü artabilir.

Cüruf ve taban küllerinin zayıf asitlerde çözünme etkisi azdır. Sadece kuvvetli asitlerde çözünürlükleri artar. Seyreltik HCl çözeltilerinde taban külü ve cürufların ağırlıkça maksimum %5' i, HNO₃ çözeltilerinde ise % 15-20' i çözünür. Sadece HF gibi kuvvetli asitlerde cüruflardaki silikat yapıları bozularak malzemelerin büyük bir çoğunluğu (%70 – 95) çözünerek çözeltiliye geçer [43].

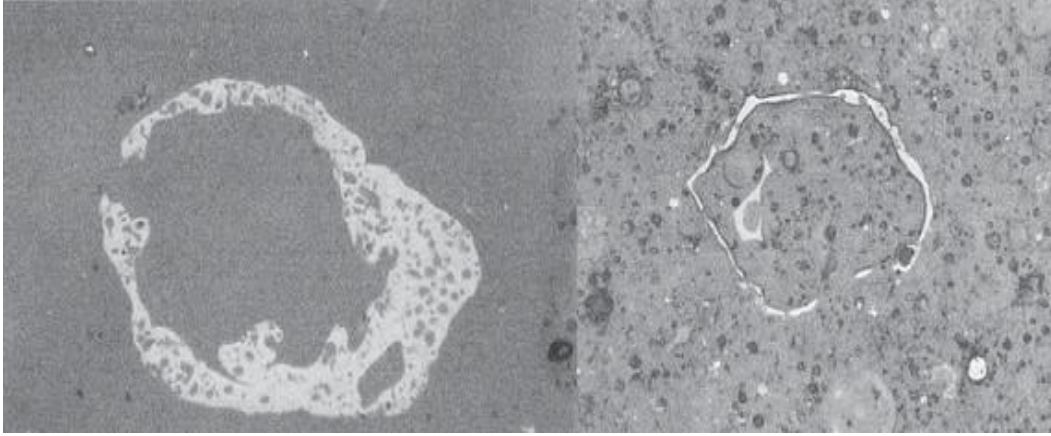
4.2.1.3 Taban külü ve cürufların minerolojik özellikleri

Cürufların minerolojik bileşimi organik ve inorganik bileşenlerden oluşmaktadır.

Taban külleri volkanik külü andıran camsı fazdaki minerallerden oluşur. Cüruflar ise volkanik kayalardan olan bazalta benzer camsı fazdaki minerallerden oluşur. Cüruf ve taban küllerinde majör mineraller kuvars, feldispat ve kil mineralleri, hematit, kalsittir. Cürufların minerolojik kompozisyonunu belirleyen en önemli faktör yakılan kömürün mineral kompozisyonudur. Yanma sürecinde kömürde bulunan kuvars kristalleri değişmezken oksidasyon sonrası pirit manyetite dönüşür [44].

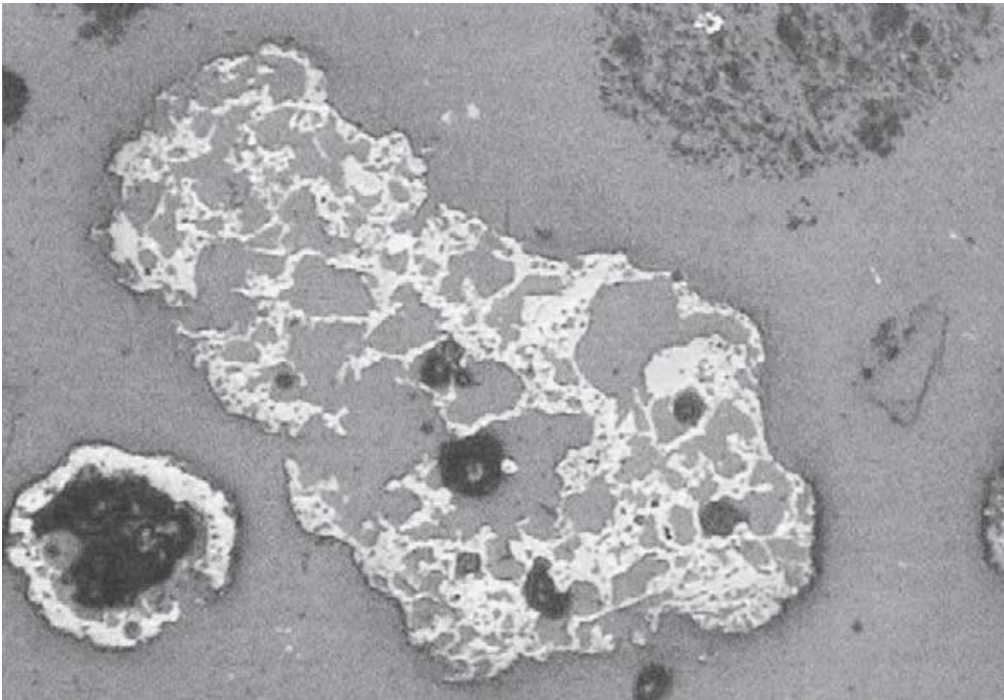
Türkiye' deki bazı termik santrallerden kazan altı numuneleri alınarak minerolojik kompozisyonları belirlenmiştir. Çayırhan Termik Santral' inde anhidrit, feldispat, kuvars, hematit, manyetit, kristabolit, CaMg-silikat (diyopsit), kireç , maghemit ve gehlenit belirlenmiştir . Soma Termik Santrali'nde kuvars, feldispat, portlandit, mullit, kristobalit, anhidrit, kalsit, kristalin kireç, hematit ve gehlenit mineralleri tanımlanmıştır. Kangal Termik Santralindeki kazan altı ürünlerin major mineralleri ise kuvars, feldispat, anhidrit, kireç (CaO), hematit, kalsit, etrinjit, hersinit, gehlenit ve portlandittir [44, 45, 46].

Taban külü ve cüruflar % 5 ila 15 arasında değişen miktarlarda yanmamış karbon içerirler. Bu ürünlerdeki yanmamış karbon tanımlamasında erime, gözenek şekli ve gözenek dağılımları dikkate alınmaktadır. Kömürün kazanda yanması sırasında yakma koşullarına bağlı olarak önce kömür tanecikleri yumuşar ve akışkanlıkları artmaya başlar yanma erledikçe akışkanlığı artan taneler şişer ve uçucu maddeler (gazlar) kömürden uzaklaşır. Gazların kömürden uzaklaşmasıyla birlikte gözenekli yapıda char olarak tanımlanan yanmamış karbon taneleri oluşur. Yanmamış karbon taneciklerinde çoğunlukla sferik yapıdırlar. Bu yapılardaki gözenekler düzensiz dağılım göstermektedir. Yanmamış kömür taneleri (char) bir veya birden fazla gözenek içerirken bu gözeneklerin hücre duvarlarında bir ila onlarca küçük gözenek bulunmaktadır [47].

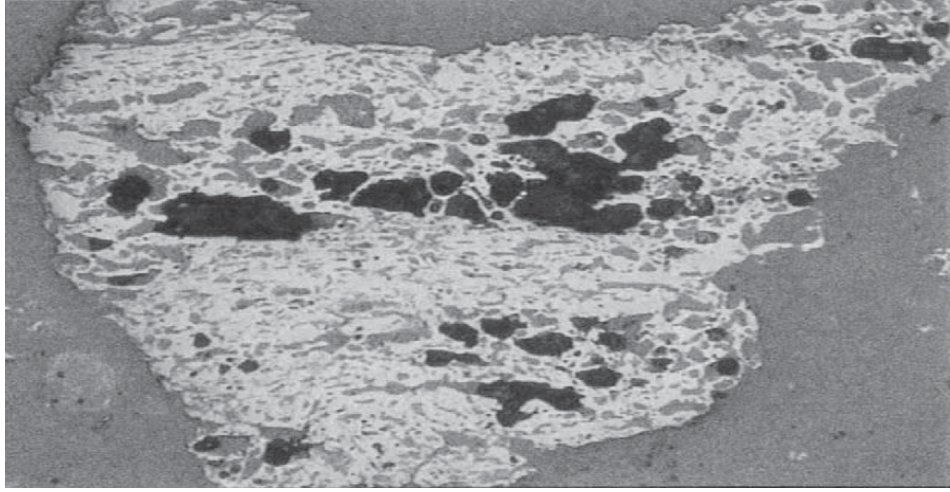


Şekil 4.9: Yanmamış karbon tanelerindeki sferik yapılar [47].

Cüruf ve taban küllerinde sferik yapıdaki kömür tanelerinin yanı sıra, ağ ve petek yapılı yanmamış karbonlar görülmekte ve Şekil 4.9’ da gösterilmektedir. Ağ ve petek yapılı yanmamış karbonlar düzenli gözenek boyutlarına sahiptirler. Şekil 4.10’ da gösterilen karbondaki ağ yapısı yanma sırasında kömürün akışkanlığının daha yüksek olduğunu ve kömürün daha iyi yandığını gösterirken petek yapısına geçildikçe kömürün yanma sırasında akışkanlığının daha az olduğunu bu nedenle kömürün tam yanmadığını göstermektedir. Yanmamış karbondaki petek yapıları Şekil 4.11’ de gösterilmektedir [47].



Şekil 4.10: Yanmamış karbon tanelerindeki ağ yapıları [47].



Şekil 4.11: Yanmamış karbon tanelerindeki petek yapıları [47].

Sferik yapılı karbon tanelerinin orijinini vitrinit ve liptinit, ağ yapılı yanmamış karbon tanelerinin orijinini vitrinit, inertinit ve mineral madde, petek yapılı yanmamış karbon tanelerinin orijinini ise inertinit oluşturmaktadır [47].

4.2.2 Taban külü ve cürufun kullanım alanları

4.2.2.1 Taban külünün kullanım alanları

Çimento üretiminde kullanımı: Çimento içeriğinde, ağırlıkça sıralandığında CaO , SiO_2 , Al_2O_3 ve Fe_2O_3 bulunur. Taban külleri bu temel oksitleri çeşitli oranlarda bünyelerinde barındırırlar. Puzolan özellik taşırlar yani kireçle karıştırıldıklarında belli miktarlarda bağlayıcılık özellikleri vardır. Külün parça boyut dağılımı, rengi ve çimentoya zarar veren yanmamış karbon, klor, sülfat gibi zararlı bileşenlerinin miktarı ve mekanik özellikleri tespit edilerek çimentoda katkı malzemesi olarak kullanılıp kullanılmayacağı belirlenir. [16, 48]

Çimento üretiminde kil, kalker ve demir filizi içeren karışımın 1400°C ' ye kadar ısıtılmasıyla oluşan granüler bir malzeme olan klinker kullanılır. Bir ton çimento klinkeri üretimi bir ton CO_2 gazının ortaya çıkmasına neden olmaktadır Kyoto sözleşmesi gereği çimento üretiminde CO_2 emisyonunu azaltmak ve daha düşük klinker faktörü olan ancak dayanıklılık problemleri azalmış çimentolar üretmek vardır. Puzolanlar, çevreye dost çimento katkı maddeleridir. Bugünkü eğilim, kısmen portland çimentosu emisyonunu tek bir katkı bileşeni katarak azaltmak yerine üç veya dört bileşenli katkılı çimentoların üretilmesidir. Taban küllerinin doğal puzolan

malzemeler olmasına karşın çimentoya katkı bileşeni olarak kullanılabilirliğiyle ilgili çalışmalar sınırlıdır [48, 49].

Kula ve arkadaşları (2001) tarafından yapılan çalışmada, taban külü ağırlıkça çeşitli oranlarda (%5-10-15-20-25) portlant çimento yerine geçirilerek hazırlanan karışımlar tamamı 90 mikron altı ortalama %25'i 40 mikron üstü olacak şekilde seramik çubuklu değirmende yaklaşık 6 saat öğütülmüştür. Öğünmüş çimento kül karışımından, harç prizmaları hazırlanmıştır. İkinci yedinci ve yirmi sekizinci günlerde TS639'a uygun olarak basınç dayanım testlerine tabi tutulmuştur. Numunelerde 7 ve 28 günlerde basınç dayanım değerlerinin TS 639' da belirlenmiş değerlerden daha yüksek olduğu saptanmıştır. Dayanım değerlerinin ivmeli olarak artışı, taban külünün iyi bir puzolan olduğu ve taban külünün belli oranlarda çimento yerine geçebileceği sonucuna varılmıştır [50].

Betonda kullanımı: Taban külleri betonda agrega olarak, ince boyutlu malzeme ve kırma taş kullanılır. Taban külü, kesme mukavemeti, permeabilite özellikleri, kompaksiyon mukavemeti, boyut dağılımı ve özgül ağırlıkları bakımından ince boyutlu agregalar ile benzer özellikler gösterir. Bu nedenle taban külü betonda ince boyutlu agrega olarak kullanılmaktadır. Külün gerek betonda gerekse çimentoda kullanılması için korozif olmaması gerekir. Kül bu uygulamalarda kullanılmadan önce korozyon testlerine tabi tutulur. Korozyon testleri, külün pH değeri, elektrik iletkenliğini, çözünebilir klorür ve sülfat içeriklerini belirlemek için yapılır. pH 5,5 üstü değerlerde, elektrik iletkenliği 1500 ohm/cm çözünebilir klorür 200 ppm'den az ve çözünebilir sülfat içeriği 1000 ppm altı olan küller korozif değildir ve yapı uygulamalarında kullanılabilirler [16, 51].

A.B.D'deki çeşitli agrega firmaları kömürün yanma ürünlerini (uçucu kül, taban külü ve cüruf) işleyip yapı endüstrisine kazandırmaktadırlar. Ürettikleri hafif beton blok ve torba betonlar çeşitli oranlarda taban külü içermektedir. Taban külleri kullanılarak oluşturulmuş hafif betonlar, dayanım özellikleri azalmaksızın normal betonlardan %35 oranında hafiftirler [16].

4.2.2.2 Cürufların kullanım alanları

Cürufların kullanımının sağladığı avantajlar: Cüruflar endüstriyel ve mühendislik uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Cüruf kullanımının avantajları aşağıda maddeler halinde verilmiştir [52].

Kimyasal olarak inert, üniform özgül ağırlıklı düşük kırılgen özellikli olmaları sayesinde endüstriyel ve mühendislik uygulamaları için cazip malzemelerdir.

Cüruflar üniform boyut dağılımları ve dayanıklı malzeme özelliklerine sahip olmalarından dolayı mühendislik uygulamalarında iri ve ince agrega malzemesi arasındaki gradasyonu sağlamak için belli oranlarda agrega karışımlarına ilave edilerek kullanılabilir. Bu gibi sebeplerden dolayı cüruflar hem ekonomik hem de kullanışlı bir malzeme olma özelliğini taşırlar.

Camsı matriksi ve birçok doğal agregalara göre düşük poroziteli olmalarından dolayı cürufların ses ve aşınma kayıpları oldukça düşüktür.

Cürufların abrazif üretiminde kullanılmaları durumunda kristalen silika miktarları çok düşük olduğundan dolayı silikosis gibi akciğer rahatsızlıkları tehlikesi minimal düzeylere iner.

Cürufların kullanılmasıyla doğal agrega tüketimi azalır.

Cürufların endüstriyel uygulamalarda kullanılması ile atık depolama alanları ve stoklama maliyetleri düşürölmüş olur [52].

Asfalt çatı kiremiti üretiminde kullanımı: Cüruf çoğunlukla çatı kiremitleri üstündeki dış yüzey bağlayıcısı olarak tüketilir. Cüruf bu alanda kullanılmak için, önce renklendirilir ardından çeşitli kaya agregalarıyla karıştırılarak kullanılır. Ayrıca mevsim şartlarına dayanıklı özelliği ve ahenkli görüntüsü cürufun kiremitlerde tercih edilmesinin esas nedenlerinden birkaçıdır. Cürufların kiremit üretiminde kullanılması için; düşük gerilme özelliğine sahip olması gerekir [52].

Aşındırıcı üretiminde kullanımı: Üstün yıkanabilme özelliği, düşük miktarda serbest silikat (%1' den az kristalen silikat) yüksek alüminyum içeriği ve birden çok geri kazanılabilme özellikleri sayesinde aşındırıcı kumu ve abrazif malzemesi olarak yaygın bir kullanıma sahiptir. Cürufları oluşturan taneler geniş boyut aralıklarında dağıldığından dolayı kolayca elenmeleri işlem kolaylığını sağlarlar. Ayrıca cüruflar sert ve köşeli parçacıklardan olduğundan dolayı abrazif üretiminde kullanılmaları durumunda ürünün kesme hızı etkinliğini artırırılar. Cürufların aşındırıcı kumu olarak kullanılması için; özgül ağırlıkları 2,6-3,1 gr/cm³, Mohs sertlik cetveline göre sertlikleri en az 6 ve serbest silis içeriklerinin düşük olması (%1den az) istenir [52].

Asfalt döşeme agregası olarak kullanımı: Cüruf asfalt üretiminde belli miktarlarda kum ve çakıl boyutlu agregalarla karıştırılarak kullanılır. Özellikle sızdırmaz örtü olarak en iyi kullanıma sahiptir. Sertliği, köşeli yüzeylere sahip olması ve kayma direncinin yüksek olması cürufların bu uygulamalarda kullanılması için tercih nedeni olmasını sağlamaktadır. Ayrıca siyah rengi, yüzey görüntüsü açısından özel bir görünüm sağlar. Bu özelliklerinden dolayı cüruflar; havaalanı ve taksi yollarının yapımında ve rehabilitasyonunda sıklıkla kullanılmaktadır [52].

Stabilize yol yapımında kullanımı: Cüruflar, klinker görünümünü andıran düşük yoğunluklu küresel taneciklere sahiptirler. Bu nedenle yol yapımında kullanılan diğer agregalara göre sıkıştırıldıklarında daha hafiftirler. Sıkışma özelliklerinin yüksek olması cürufların iyi dolgu malzemesi olma özelliğini ortaya koyar. Cüruflarla hazırlanan temel ve alt temellerde yerleşme nedeniyle oluşan deformasyonlar azalır ağır trafik yükleri altında bile cürufların tane boyut dağılımları değişmez. Aşınma ve ses iletkenliği değerlerinin düşük olması, sıkıştırılabilir malzeme özelliği taşıması ve ucuz olması, cürufların stabilize yol yapımında aranan bir madde olmasına neden olur. Cürufların bahsedilen mekanik özellikleri sayesinde yüksek trafik hacmine sahip karayolları için iyi bir stabilize temel ve alt temel alternatifi oluşturabileceği belirlenmiştir. A.B.D.' de bazı karayolu inşaatlarında cüruflar kullanılır [52, 53].

Kar ve buz kontrolünde kullanımı: Cürufu keskin köşeli ve camsı parçacıklar içerirdiklerinden dolayı çeşitli tuzlarla zemine uygulandıklarında, kar yağışı ve buzlanmanın etkili olduğu kesimlerde, yol ile taşıt tekerlekleri arasındaki sürtünmeyi arttırarak kayma riskinin ortadan kalkmasını sağlarlar. Cüruflar karayolları ve hava alanlarında zemin iyileştirici olarak kullanılmaktadırlar [52,53].

4.2.3 Taban külü ve cürufların değerlendirilmesi

Termik santrallerde kullanılan taş kömürlerinin % 10-15'i, linyit kömürlerinin ise % 20-40'ı küldür. Termik Santralin 1 kWh' lık enerji üretimi için yaklaşık 110 gram külün atık madde olarak ortaya çıkmasına neden olmaktadır. Dolayısıyla, 1000 MW' lık bir santralden bir yılda yaklaşık 650.000 ton uçucu kül ve taban külü ve cüruf elde edilmektedir. Taban külü ve cüruf Amerika Birleşik Devletleri ve Avrupa' da endüstriyel hammadde niteliğinde çeşitli uygulamalarda kullanılmasına karşın ülkemizde bu malzemelerin kullanım alanı yoktur [49,54].

4.2.3.1 Avrupa

Avrupa’da 2003 yılında 65 milyon ton kömür yanma ürünü elde edilmiştir. Oluşan külün %68,7’si uçucu kül, %9.3’ü taban külü, %3,2’si cüruf ve geri kalanı (%18,8) da sülfürsüzleştirme ürünüdür. Uçucu küllerin %47’si taban küllerinin %44’ ü cürufun tamamına yakını mühendislik ve endüstride kullanılmıştır [55].

4.2.3.2 ABD

A.B.D’ de 2006 yılında üretilen kül miktarları ve değerlendirme alanları ve miktarları Çizelge 4.10’ da gösterilmiştir. Çizelgeden görüldüğü gibi A.B.D 2006 senesinde termik santrallerinden çıkan taban külünün yarısına yakını (%45,05) cürufunda tamamına yakını (%83,46) değerlendirmiştir [28].

Çizelge 4.10 : 2006 Yılında Üretilen Kül Miktarları ve Değerlendirme Alanları [28].

Üretim ve kullanım (ton)	Uçucu kül	Taban külü	Cüruf
Toplam üretilen	72.400,000	18.600,000	2.026,066
Toplam kullanılan	32.423,596	8.378,494	1.690,999
Kullanım alanı			
Beton/harç	15.041,335	597.387	0
Çimento/klinker hammaddesi	4.150,228	925.888	17.773
Akıcı dolgu beton	109.357	0	0
Yapı dolgu maddesi	7.175,784	3,908.561	126,280
Yol temelleri	379.020	815.520	60
Toprak stabilizasyonu	648.551	189.587	0
Asfalt mineral dolgusu	26.720	19.250	45,000
Don ve buz kontrolü	0	331.107	41,549
Yüzey temizleme/çatı granül	0	81.242	1.445,993
Madencilik uygulamaları	942,048	79.636	0
Wallboard	0	0	0
Atık stabilizasyonu	2.582,125	105.052	0
Ziraat	81.212	1.527	0
Agrega	271.098	647.274	416
Diğer	1,016.091	676.463	13.988
Toplam kullanım miktarı	32.423.569	8.378.494	1.690,999
% Kullanım	%44.78	%45.05	%83.46

4.2.4 Taban külü ve cürufların zenginleştirilmesi

4.2.4.1 Gravite yöntemleriyle zenginleştirme

Cüruf ve taban küllerindeki yoğunluğu düşük olan yanmamış karbon yoğunluğu yüksek olan külden gravite yöntemleriyle geri kazanılması mümkündür. Cüruftaki

hafif malzeme ağır bileşenlerinden jig ve spiraller kullanılarak geri kazanılabilmektedir [56].

Cüruf ve taban küllerindeki ağır malzemenin hafif bileşenlerden ayrılması için spiraller kullanılabilir. Spirallere yukarıdan beslenen malzeme su karışımı şantrifüj ve gravite kuvvetlerinin etkisiyle aşağı doğru inmektedir. Yanmamış karbon gibi düşük yoğunluklu malzeme dışa doğru yönelirken, yüksek yoğunluklu bileşenler spiralin iç kısmında kalır. Hafif ve ağır malzeme spiralin alt kısmından ayrı ayrı alınarak ayırma sağlanır.

Cüruf ve taban küllerindeki kül içeriğini azaltarak yanmamış karbonu kazanmak için kullanılan yöntemlerden biri jig ile ayırma yöntemidir. Ayırma ortamı olarak su ya da hava kullanılarak, malzemedeki yanmamış karbon ve ağır mineraller yoğunluklarına göre tabakalanarak birbirlerinden ayrılırlar [56].

4.2.4.2 Flotasyon yöntemiyle zenginleştirme

Klasik hücre flotasyonu ve kolon flotasyonu ile yapılan çalışmalarda cüruftaki yanmamış karbon, belli oranlarda cüruftan kazanılmıştır. Cüruflardaki yanmamış karbonun kazanılması amacıyla çeşitli araştırmacılar tarafından bazı çalışmalar yapılmıştır. Duruöz (2002) tarafından yapılan çalışmada Tunçbilek Termik Santrali'nden alınan cüruf numunelerindeki yanmamış karbonun klasik hücre flotasyonu yöntemiyle kazanılması amacıyla yapılan deneyler sonucunda elde edilen optimum parametreler belirlenmiştir;

- Tane boyutu: -0,150 μm
- Pülpte katı oranı: %25
- Kollektör(gazyağı)-köpürtücü (MIBC) miktarı: 5500 gr/ton-1400 gr/ton
- Bastırıcı(Na_2SiO_3) miktarı: 600 gr/ton
- Köpürtücü(MIBC) miktarı: 1400 gr/ton

Bu koşullarla yapılan deney sonucunda %91,47 kül içerikli cüruf numunesinden, %76,59 kül içerikli konsantre %46,51 yanabilir verimle elde edilmiştir [57].

Altinkaya (2002) tarafından yapılan çalışmada % 85,40 kül içerikli Seyitömer Termik Santrali cüruflarındaki yanmamış karbonun kazanılması amacıyla flotasyon deneyleri yapılmış ve aşağıda verilen optimum flotasyon koşulları belirlenmiştir.

- 0,122 mm tane boyutu
- %20 pülpte katı oranı
- 4000 g/ton gazyağı
- 500 g/ton camsuyu
- 1400 g/ton  amyacı
- 2dakika köpük alma süresi
- 8 lt/dk hava miktarı
- 1400 dev/dk karıştırma hızı

Bu flotasyon koşullarıyla yapılan flotasyon deneyleri neticesinde %15,40 oranında yanmamış karbon % 45,82'ye ve 688 kcal/kg olan alt ısıl değeri 2900 kcal/kg'a % 45,37 verimle yükseltilmiştir [58].

Demir (2004) tarafından yapılan çalışmada Tunçbilek Termik Santrali'nden alınan c r f numunesindeki yanmamış karbonun kolon flotasyonu yöntemiyle kazanılması amacıyla yapılan çalışmada köpürtücü (MIBC) miktarı, pülpte katı oranı, kollektör(gazyağı) miktarı, bastırıcı (Na_2SiO_3) miktarı parametreleri değiştirilerek optimum parametreler belirlenmiştir. Bu parametreler aşağıda sunulmuştur.

- Tane boyutu: -150 m
- Pülpte katı oranı: %18
- Köpürtücü (MIBC) miktarı: 900 gr/ton
- Kollektör (Gazyağı) miktarı: 4000 gr/ton
- Bastırıcı (Na_2SiO_3) miktarı: 460 gr/ton
- Koşullandırma süresi: 2+2+2+2 dk.

Bu koşullarda kuru bazda %80,05 k l içeren c r f numunesinden %46,07 k l içerikli konsantre % 42,58 yanabilir verimle elde edilmiştir [59].

5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Deneysel çalışmalar; numunenin özelliklerinin tespiti, gravite, flotasyon, liç deneyleri ve sonuçlarını kapsamaktadır.

5.1 Deneylere Esas Olan Numune

Deneysel çalışmalarda kullanılan cüruf numunesi, Soma Termik Santrali 1 ve 4. ünitelerinden Soma Termik Santrali yetkilileri tarafından alınmış ve İ.T.Ü. Maden Fakültesi Cevher ve Kömür Hazırlama Bölümüne teslim edilmiştir. Toplamı 40 kg olan numune deneylere esas olan numuneyi oluşturmuştur.

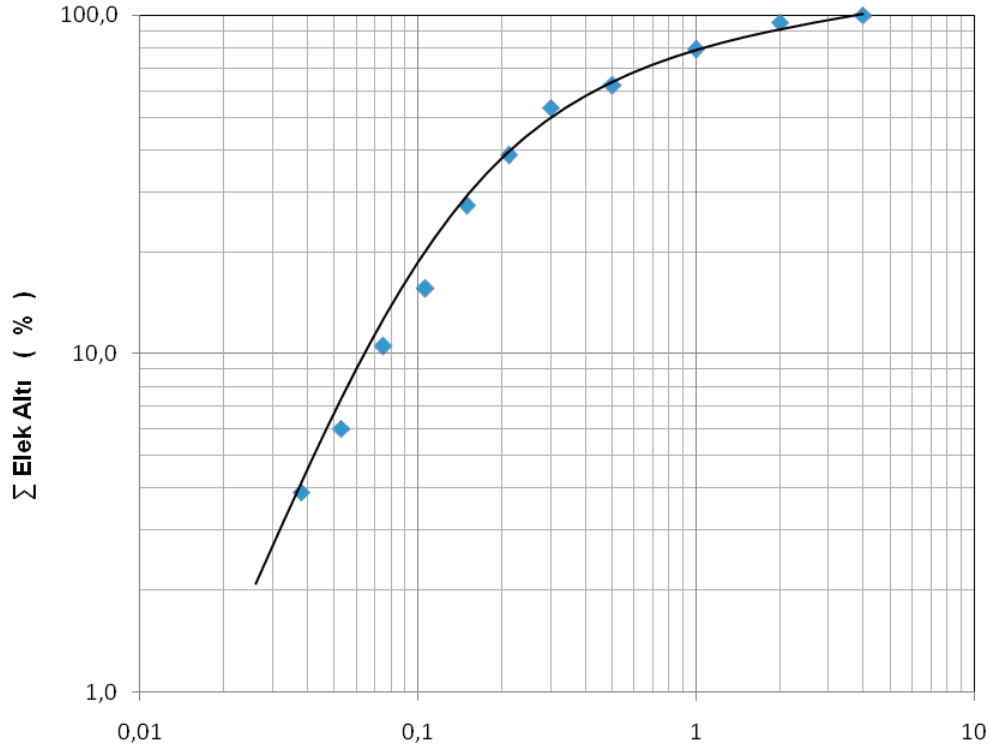
5.2 Numunenin Özellikleri

5.2.1 Numunenin boyut dağılımı

Deneylerde kullanılan cürufun boyut dağılımını saptamak amacıyla kuru elek analizi yapılmış elek analizi sonuçları Çizelge 5.1’ de, elek analizi sonuçlarına göre oluşturulmuş toplam elek altı eğrisi Şekil 5.1’ de gösterilmiştir.

Çizelge 5.1 : Numunenin elek analizi sonuçları.

Elek açıklığı (mm)	Miktar (%)	Toplam elek altı (%)	Toplam elek üstü (%)
-4,000+2,000	5,30	100,00	5,30
-2,000+1,000	15,70	94,70	21,00
-1,000+0,500	16,90	79,00	37,90
-0,500+0,300	8,80	62,10	46,70
-0,300+0,212	14,70	53,30	61,40
-0,212+0,150	11,20	38,60	72,60
-0,150+0,106	11,80	27,40	84,40
-0,106+0,074	5,10	15,60	89,50
-0,074+0,053	4,50	10,50	94,00
-0,053+0,038	2,10	6,10	96,10
-0,038	3,90	3,90	100,00
Toplam	100,00		



Şekil 5.1 : Numunenin toplam elek altı eğrisi

Şekil 5.1’ de gösterilen cürufa ait olan toplam elek altı eğrisinden, numunenin d_{50} boyutu 0,30 mm, d_{80} boyutu da 1,00 mm olarak belirlenmiştir.

Numunedeki karbon ve külün boyuta göre dağılımları da incelenmiş ve sonuçları Çizelge 5.2’ de verilmiştir. Yapılan çalışmalara göre boyut küçüldükçe ürünlerin kül içeriği yükselmektedir. Fakat iri boyutlarda (-4+1,00 mm) elde edilen ürünlerin miktarı cüruf numunesinin ancak % 21’ ini oluşturmakta ve kül içeriği ise % 54,65 düzeyindedir. Numunenin karbon içeriği de kül artışına paralel olarak ince boyutlarda (-1,00 mm) düşmektedir.

Çizelge 5.2 : Numunenin boyuta göre kül ve karbon içerikleri.

Elek açıklığı (mm)	Miktar (%)	Kül (%)	Kül dağılımı (%)	Karbon (%)	Karbon dağılımı (%)
-4,000+2,000	5,30	51,83	3,90	21,20	8,40
-2,000+1,000	15,70	55,60	12,50	21,90	25,70
-1,000+0,500	16,90	60,54	14,60	20,50	25,90
-0,500+0,300	8,80	64,03	8,10	20,20	13,30
-0,300+0,212	14,70	71,65	15,10	12,50	13,80
-0,212+0,106	23,00	81,13	26,70	5,70	9,80
-0,106	15,60	85,27	19,00	2,60	3,00
Toplam	100,00	69,84	100,00	13,36	100,00

5.2.2 Numunenin kimyasal özellikleri

Numunenin kimyasal bileşimini tespit etmek için Kanada’ daki ACME laboratuvarlarında kimyasal ve elementel analizleri yapılmıştır. Numunenin tam kimyasal analiz sonuçları Çizelge 5.3’ de, elementel analiz sonuçları ise Çizelge 5.4’ te gösterilmiştir.

Çizelge 5.3 : Numunenin tam analiz sonuçları.

İçerik (%)	Miktar (%)
Sabit C	15,54
Kızdırma Kaybı	30,00
SiO ₂	19,85
Al ₂ O ₃	7,08
Fe ₂ O ₃	2,85
MgO	1,63
CaO	36,77
Na ₂ O	0,26
K ₂ O	0,57
TiO ₂	0,22
P ₂ O ₅	0,13
MnO	0,04
Cr ₂ O ₃	0,01
S	0,65

Çizelge 5.4 : Numunenin elementel analiz sonuçları.

Element	Miktar (ppm)	Element	Miktar (ppm)
Ag	<0,10	Ni	30,00
As	33,40	Pb	20,20
Ba	547,00	Pr	3,64
Be	2,00	Rb	31,40
Bi	<0,10	Sb	0,20
Cd	0,20	Sc	6,00
Ce	30,30	Se	0,50
Co	6,50	Sm	2,50
Cs	9,10	Sn	<1,00
Cu	20,10	Sr	330,60
Dy	1,96	Ta	0,40
Er	1,15	Tb	0,35
Eu	0,59	Th	9,00
Ga	7,10	Tl	<0,10
Gd	2,25	Tm	0,20
Hf	2,00	U	16,80
Hg	<0,01	V	104,00
Ho	0,39	W	1,20
La	17,00	Y	12,00
Lu	0,18	Yb	1,17
Mo	2,10	Zn	35,00
Nb	6,80	Zr	66,50
Nd	14,40	Au (ppb)	2,50

5.2.3 Numunenin yapısal ve mineralojik özellikleri

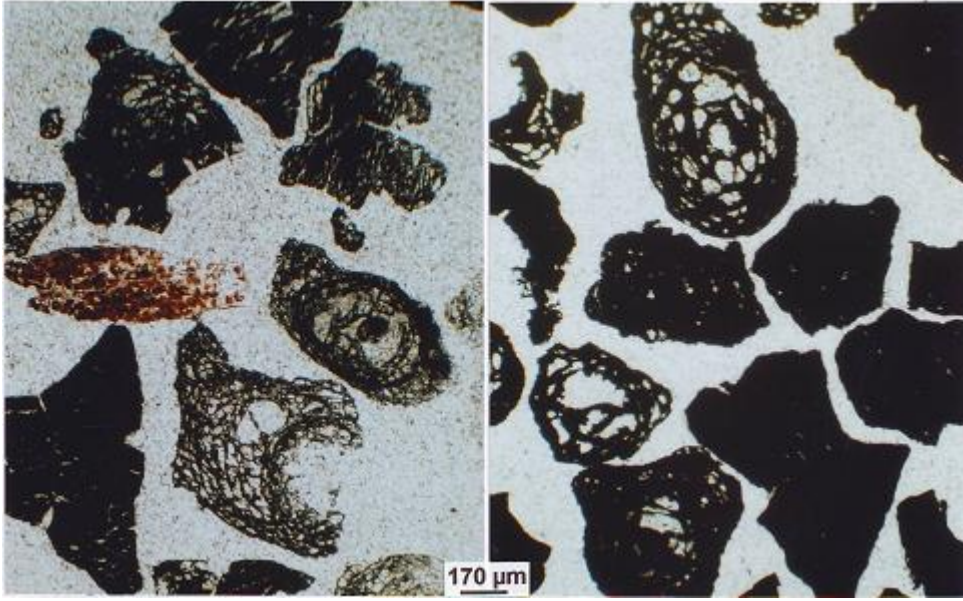
Deneysel çalışmalara esas olan cüruf numunesinin çeşitli boyut gruplarında çinko klorür ile yapılan yüzdürme batırma deneylerinden elde edilmiş 1,30 ve 1,45 gr/cm³ yoğunluklarında yüzen ürünlerden oluşan temsili numuneler epofiks ile kalıba alındıktan sonra bu deney ürünlerinin ince ve parlak kesitleri hazırlanmıştır.

Kesitlerin mikroskobik incelemeleri sonucu cüruf bileşiminin büyük bir çoğunluğunu (camsı fazı) oluşturan kalsiyum-magnezyum-demir-amümina ve silis bileşikli puzolan ve yanmamış karbon bileşikli malzemeler ile birlikte kil grubu mineraller, anhidrit, kuvars, hematit, pirit ve melnikovit (jel pirit) minerallerinin bulundukları tespit edilmiştir.

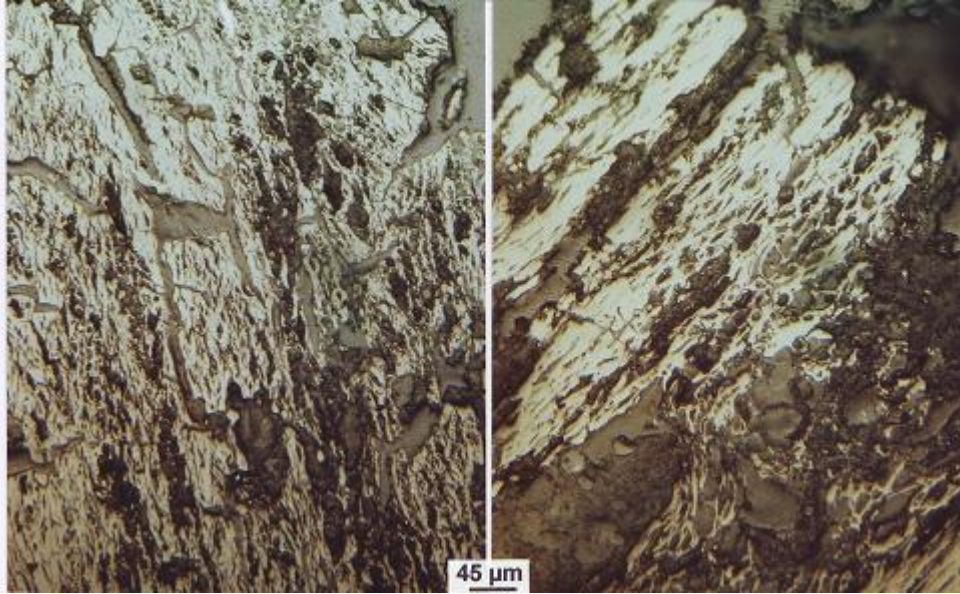
Şekil 5.2 ve Şekil 5.3' te gösterilen ince ve parlak kesitlerde, cüruf numunesinin iri boyut grubunda (-4+0,5mm) 1,45 g/cm³ yoğunluklu ağır sıvıda yapılan yüzdürme batırma deneyinden üretilen yüzen ürünün mikroskobik incelemeleri sonucunda; kül yapıcı puzolan malzemeler ile beraber bulunan yanmamış karbon bileşikli malzemelerin bileşiminde, özellikle klivaj düzlemlerine paralel yer yer çok ince laminalı bantlar halinde kil grubu mineraller ile birlikte gaz boşluklarının bulundukları gözlemlenmiştir.

Şekil 5.4 ve Şekil 5.5' te gösterilen ince ve parlak kesitlerde, cüruf numunesinin ince boyut grubunda (-0,5+0,1mm) 1,30 ve 1,45g/cm³ yoğunluklarında ağır sıvıda yapılan yüzdürme batırma deneylerinden üretilen yüzen ürünlerin mikroskobik incelemeleri sonucunda; kömür taneleri ile birlikte izlenen puzolan malzemeler, kil mineralleri, gaz boşlukları ve faz boyutları 5 ila 10 mikron arasında değişen pirit ve melnikovit tanelerine rastlanmıştır. Ayrıca kül yapıcı bileşenler serbest halde de cüruf içerisinde görülmektedir.

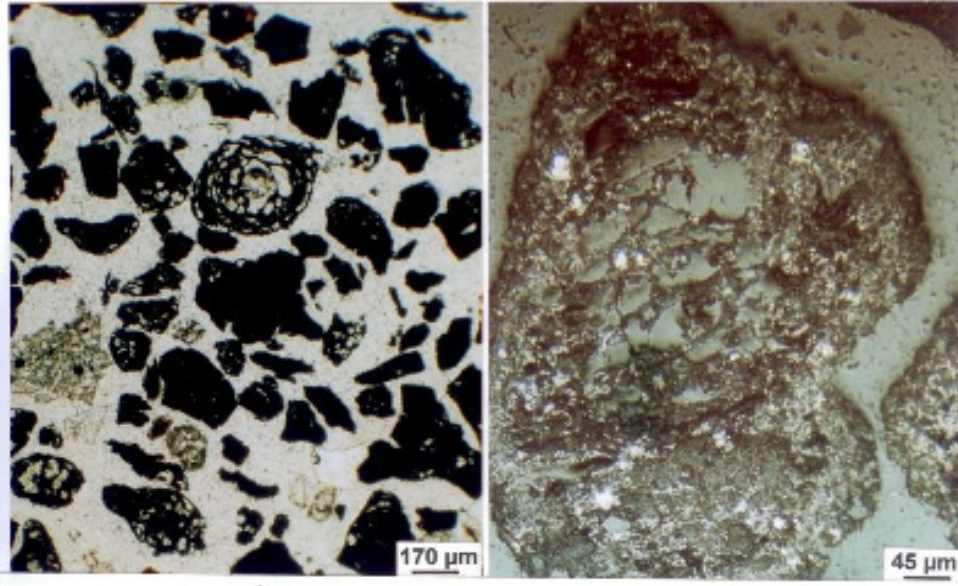
Yüzdürme-batırma deneylerinden elde edilen ürünlerin mikroskobik incelemeleri sonucu karbonlu bileşikler içerisindeki kül yapıcı inorganik malzemelerin serbestleşme boyutunun 75-80 mikron dolayında olduğu belirlenmiştir.



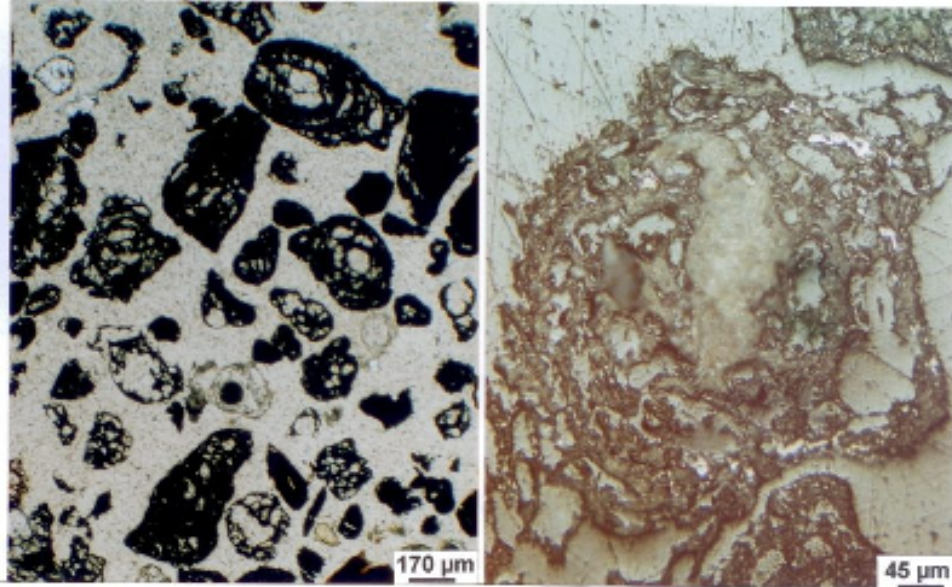
Şekil 5.2 : (Büy.40) -4+0,5 mm boyut grubunda 1,45 gr/cm³ ağır sıvıda yüzen ürünlerin ince kesitleri. Kömür (siyah) taneleri içerisinde puzolan malzemeler ile birlikte izlenen kil mineralleri ve gboşlukları (beyaz)



Şekil 5.3 : (Büy. 200) 4+0,5 mm boyut grubunda 1,45 gr/cm³ ağır sıvıda yüzen ürünlerin parlak kesitleri. Kömür (açık gri renkli) tanelerinin içerisinde klivaj düzlemleri boyunca tabaklaşmaya uyumlu halde izlenen kil bantları.



Şekil 5.4 : (Büy. 40) - (Büy.200) ; 0,5+0,1 mm 1,30 gr/cm³ ağır sıvıda yüzen ürünlerin ince ve parlak kesitleri. Kömür (siyah) taneleri ile birlikte izlenen puzolan malzemeler, kil mineralleri, gaz boşlukları (beyaz), pirit ve melnikovit (parlak beyaz)



Şekil 5.5 : (Büy. 40) - (Büy.200) ; 0,5+0,1 mm boyut grubunda 1,45 gr/cm³ ağır sıvıda yüzen ürünlerin ince ve parlak kesitleri. Kömür (siyah) taneleri ile birlikte izlenen puzolan malzemeler, kil mineralleri, gaz boşlukları (beyaz), pirit ve melnikovit (parlak beyaz)

5.3 Yöntem

Soma Termik Santrali cürufundan zenginleştirme yöntemleri ile yanmamış karbonun kazanılması amaçlanmıştır. Zenginleştirme deneyleri 3 farklı yöntem kullanılarak yürütülmüştür.

- Özgül ağırlık farkına göre zenginleştirme
- Flotasyon
- Liç.

Özgül ağırlık farkına göre zenginleştirme, ağır ortam ile ayırma (yüzdürme batırma), jig, sarsıntılı masa zenginleştirme deneylerini kapsamaktadır.

Ağır ortam ile ayırma, 1,3, 1,45, 1,60, 1,75 ve 1,90 gr/cm³ yoğunluklarında yüzdürme-batırma şeklinde yapılmıştır. Numuneye yüzdürme ve batırma -4+0,5 mm ve -0,5+0,1 mm boyut gruplarında uygulanmıştır. Ağır sıvı yapımında ZnCl₂ çözeltisi kullanılmıştır.

Jig deneyleri laboratuvar tipi, pistonlu Hartz jigiyle yapılmış ve jige -4+0,5 mm boyut grubunda numune beslenmiştir. Deneyde temiz bir konsantre alınmasına çalışılmıştır.

Sarsıntılı masa deneyleri boyutu 2 mm altında olan 5 kg numune ile yürütülmüştür. Numune 0,106 mm açıklıklı elekten elendikten sonra laboratuvar tipi Wilfley sarsıntılı masasına beslenmiştir.

Flotasyon deneyleri klasik flotasyon, kolon flotasyonu şeklinde gerçekleştirilmiştir. Flotasyon deneylerinde, toplayıcı olarak mazot, gazyağı ve montanol kullanılmıştır. Kaba flotasyonun deneyleri kademeli olarak yapılmış ve elde edilen kaba konsantreye bir ya da iki defa temizleme uygulanmıştır.

Mazot ile yapılan deneylerde, mazot miktarının, tane boyutunun ve pül pH'ının karbon flotasyonuna etkisi araştırılmıştır.

Gazyağı ile yapılan deneylerde yalnız gazyağı miktarının (4000, 5000, 6000 g/t) karbon flotasyonuna etkisi araştırılmıştır.

Montanol ile yapılan deneylerde reaktif miktarlarıyla (500, 750 g/t) tane boyutunun karbon flotasyonuna etkisi incelenmiştir.

Kolon flotasyonu deneyleri -74 μm boyutunda yapılmış olup; deneylerde toplayıcı olarak gazyağı, mazot ve montanol kullanılmıştır.

Numunedeki kül yapıcı elemanları uzaklaştırmak amacıyla liç deneyleri yapılmıştır. Deneylerde çözücü olarak H_2SO_4 ve HCl kullanılmıştır. Liç deneylerinde asit konsantrasyonu ve pülp sıcaklığının kül çözünmesine etkisi araştırılmıştır.

5.4 Zenginleştirme Deneyleri

Numune üzerinde özgül ağırlık farkına göre zenginleştirme, flotasyon ve liç deneyleri yapılmıştır.

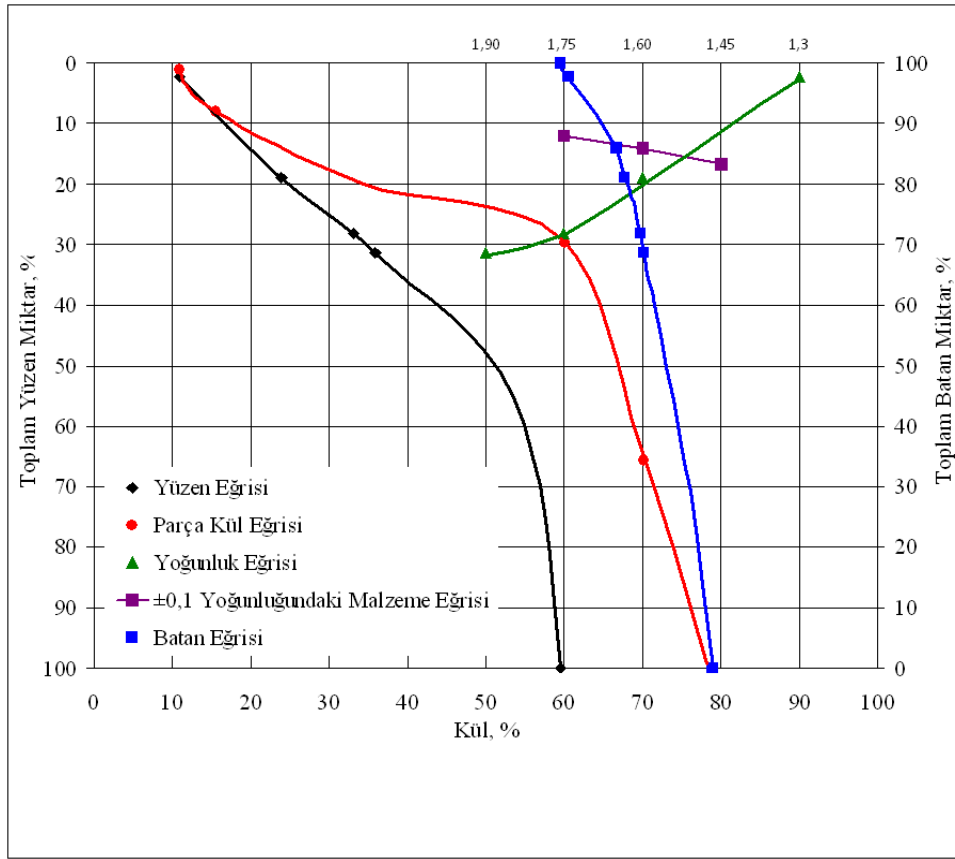
5.4.1 Özgül ağırlık farkına göre zenginleştirme deneyleri

Bu grup deneyleri yüzdürme-batırma, jig ve sarsıntılı masa deneylerini kapsamaktadır.

5.4.1.1 Yüzdürme batırma deneyleri

4+0,5 mm ve -0,5+0,1 mm boyut aralıklarında hazırlanan cüruf numuneleri üzerinde yüzdürme batırma deneyleri yapılmış ve ardından bu iki boyut grubunda yapılan deneylerin sonuçları hesaben birleştirilmiştir.

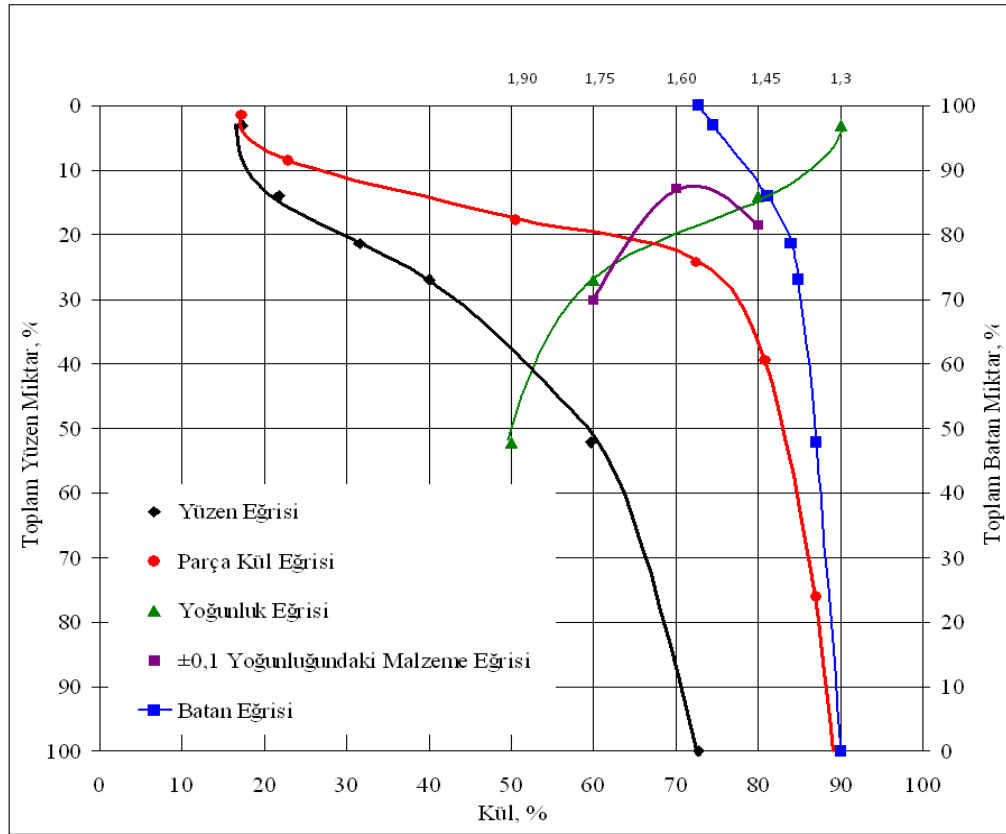
-4+0,5 mm boyut grubunda yapılan yüzdürme batırma deneyinin sonuçları Çizelge 5.5' te verilmiş olup deney sonuçlarına göre çizilen yüzdürme eğrileri Şekil 5.6' da verilmiştir. -0,5+0,1 mm boyut grubunda yapılan yüzdürme batırma deneyinin sonuçları Çizelge 5.6' da verilmiş olup deney sonuçlarına göre çizilen yüzdürme eğrileri Şekil 5.7' de verilmiştir. -4+0,5mm ile -0,5+0,1 mm boyut grubunda yapılan deneylerin hesaben birleştirilmiş sonuçları (-4+0,1 mm) Çizelge 5.7' de verilmiş olup bu sonuçlara göre çizilen yüzdürme batırma eğrileri ise Şekil 5.8' de gösterilmiştir.



Şekil 5.6 : - 4+0,5 mm boyut grubundaki numunenin yüzdürme-batırma eğrisi

Çizelge 5.5 : - 4+0,5 mm boyut grubunda yüzdürme-batırma deneyi sonuçları

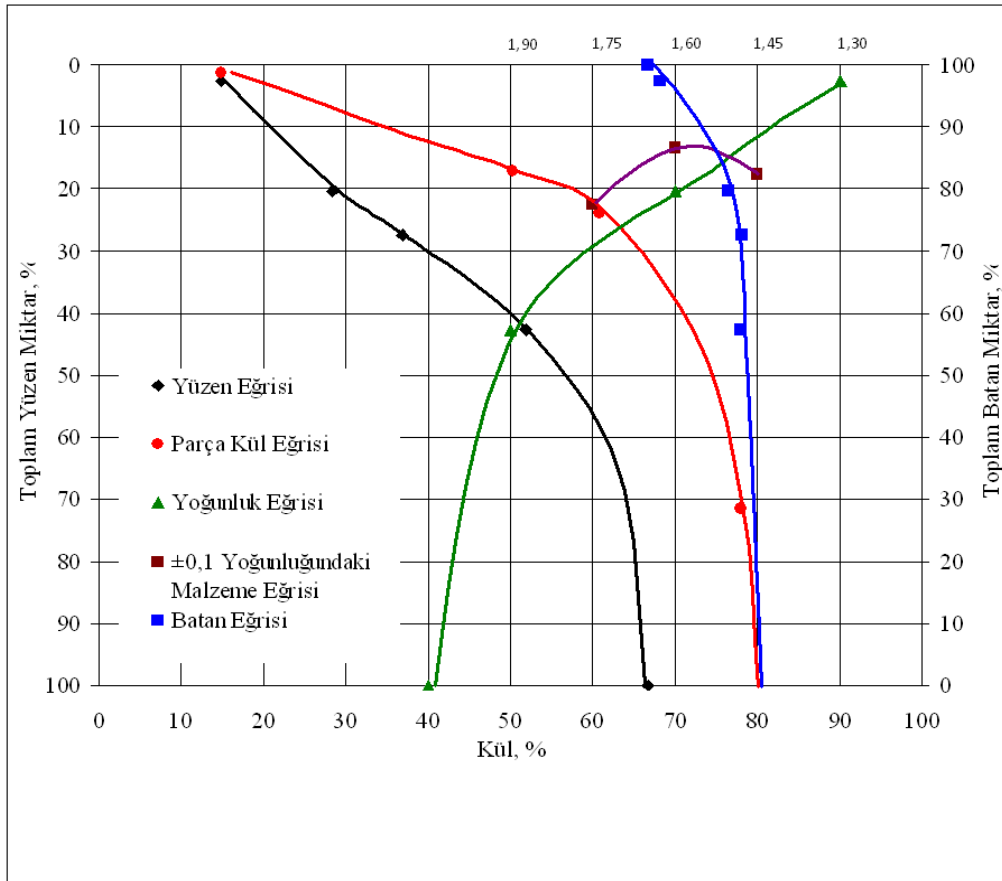
Yoğunluk aralığı	Yoğunluk aralığındaki malzeme		Toplam yüzen		Toplam batan		±0.1 Yoğ. Malzeme	
	Miktar %M	Kül %K	Miktar %ΣM	ΣKül %	Miktar %ΣM	ΣKül %	Yoğ.	±0.1 Yoğ. Malzeme miktarı
-1.30	2,20	11,01	2,20	11,01	100,00	59,46	1,30	-
+1.30 -1.45	11,80	15,56	14,00	14,85	97,8	60,55	1,45	16,70
+1.45 -1.60	4,90	50,06	18,90	23,97	86,00	66,73	1,60	14,10
+ 1,60 -1,75	9,20	52,12	28,10	33,19	81,10	67,73	1,75	12,40
+ 1,75 -1,90	3,20	60,1	31,30	35,94	71,90	69,73	1,90	-
+1.90	68,70	70,18	100,00	59,46	68,70	70,18		
Toplam	100,00	59,46						



Şekil 5.7 : -0,5+0,1 mm boyut grubundaki numunenin yüzdürme-batırma eğrisi

Çizelge 5.6 : -0,5 +0,1 mm boyut grubunda yüzdürme- batırma deneyi sonuçları

Yoğunluk aralığı	Yoğunluk aralığındaki malzeme		Toplam yüzen		Toplam batan		±0.1 Yoğ. Malzeme	
	Miktar %M	Kül %K	Miktar %ΣM	Σ Kül %	Miktar % ΣM	Σ Kül %	Yoğ.	±0.1 Yoğ. Malzeme miktarı
-1.30	3,00	17,23	3,00	17,23	100,00	72,75	1,30	-
+1.30 -1.45	11,10	22,96	14,10	21,74	97,00	74,47	1,45	18,40
+1.45 -1.60	7,30	50,51	21,40	31,55	85,90	81,13	1,60	12,90
+ 1,60 -1,75	5,60	72,43	27,00	40,03	78,60	83,97	1,75	30,70
+ 1,75 -1,90	25,10	80,82	52,10	59,68	73,00	84,86	1,90	-
+1.90	47,90	86,97	100,00	72,75	47,90	86,97		
Toplam	100,00	72,75						



Şekil 5.8 : -4+0,1 mm boyut grubundaki numunenin yüzdürme-batırma eğrisi

Çizelge 5.7 : -4+0,1 mm aralığında yüzdürme batırma deneyinin sonuçları (hesaben).

Yoğunluk aralığı	Yoğunluk aralığındaki malzeme		Toplam yüzen		Toplam batan		± 0.1 Yoğ. Malzeme	
	Miktar %M	Kül %K	Miktar %ΣM	Σ Kül %	Miktar %ΣM	Σ Kül %	Yoğ.	± 0.1 Yoğ. Malzeme miktarı
-1.30	2,60	14,90	2,60	14,90	100,00	66,79	1,30	-
+1.30-1.45	11,40	19,52	14,10	18,66	97,40	68,19	1,45	17,60
+1.45-1.60	6,20	50,35	20,30	28,38	85,90	74,66	1,60	13,40
+ 1,60-1,75	7,20	60,80	27,50	36,89	79,70	76,55	1,75	22,50
+ 1,75-1,90	15,30	78,87	42,80	51,88	72,50	78,12	1,90	-
+1.90	57,20	77,92	100,00	66,79	57,20	77,92		
Toplam	100,00	66,79						

Şekil 5.6 ve Çizelge 5.5' de gösterilen tamamı – 4 mm olan cüruf numunesinde -4+0,5 mm boyut grubunda yapılan yüzdürme batırma deneyi sonucunda 1,45 gr/cm³ lük ağır sıvıda deneye giren numunenin miktarca %14' ü % 15,56 kül içeriği ile yüzmektedir. Şekil 5.2 ve Şekil 5.3' te gösterilen ince ve parlak kesitlerde 1,45 gr/cm³ ağır sıvıda yüzen ürünlerde kömürün bünyesinde kül yapıcı bileşenlerin varlığı yüzen ürünün kül içeriğinin yüksek olmasına neden olmaktadır.

Çizelge 5.5' den görüldüğü üzere -4+0,5 mm boyut grubunda yapılan yüzdürme batırma deneyi sonucunda 1,45 gr/cm³ yoğunluğunda bulunan $\pm 0,1$ malzeme miktarı %15' den büyük olduğundan ayırmanın söz konusu yoğunlukta güç olacağı, 1,60 ve 1,75 gr/cm³ yoğunluklarında ise yapılan ayırmaların orta güçlükte olacağı görülmektedir [4].

Şekil 5.7 ve Çizelge 5.6' dan görüldüğü üzere -0,5+0,1 mm boyut grubunda yapılan yüzdürme batırma deneyinde 1,45 g/cm³ yoğunluğunda ayırma yapılması durumunda deneye giren numunenin miktarca % 14,1' i oranında % 21,74 kül içeriğinde yüzen ürün elde edilebilmektedir. Şekil 5.5' te gösterilen ince kesitte bu deney ürünlerindeki kül yapıcı bileşenlerin hem kömürün bünyesinde hem de serbest halde bulunmasından dolayı ve yüzen ürünlerin kül içeriği yüksektir.

Çizelge 5.6' dan görüldüğü üzere -0,5+0,1 mm boyut grubunda yapılan yüzdürme batırma deneyinde 1,45 ve 1,75 gr/cm³ yoğunluklarında bulunan $\pm 0,1$ malzeme miktarı %15' den büyük olduğundan ayırmanın söz konusu yoğunluklarda güç olacağı 1,60 gr/cm³ yoğunluğunda ayırma yapıldığında ise ayırmanın orta güçlükte olacağı görülmektedir [4].

Şekil 5.8 ve Çizelge 5.7' de görüldüğü üzere -4+0,1 boyut grubundaki numuneye 1,45 g/cm³ özgül ağırlığında bir ağır ortam ayırması uygulandığında ancak deneye giren numunenin miktarca % 14,1' i oranında %18,66 kül içerikli bir ürün elde etmek mümkün olabilecektir.

Çizelge 5.7' de görüldüğü üzere: -4+0,5 mm ve -0,5+0,1 mm boyut gruplarında yapılan yüzdürme batırma deneyinin hesaben birleştirilmiş (-4+0,1mm boyut grubu) sonuçlarına göre, 1,45 ve 1,75 gr/cm³ yoğunluklarında bulunan $\pm 0,1$ malzeme miktarı %15' den büyük olduğundan ayırmanın söz konusu yoğunluklarda güç olacağı, 1,60 gr/cm³ yoğunluğunda ayırma yapıldığında ise ayırmanın orta güçlükte olacağı görülmektedir [4].

5.4.1.2 Jig deneyi

-4+0,5 mm boyut grubunda hazırlanan numune üzerinde Hartz jigiyle zenginleştirme yapılmıştır. Aygıtın ayırma koşulları düzenlendikten sonra temiz bir taşan ürün (konsantre) alınmasına çalışılmıştır. Deney sonuçları Çizelge 5.8’ de verilmiştir.

Çizelge 5.8 : Jig deneyi sonuçları.

Ürünler	Miktar (%)	Kül içeriği (%)	Yanabilir verim (%)
Konsantre	14,60	34,97	21,40
Ara Ürün	11,80	40,89	15,70
Artık	29,40	49,71	33,00
Tekne ürünü	44,20	69,96	29,90
Toplam	100,00	55,47	100,00

Çizelge 5.8’ den de görüldüğü gibi, jig deneyi konsantresi deneye giren numunenin miktarca %14,6’ sı düzeyinde olup kül içeriği ise % 34,97’ dir. Kül kazanma verimi Konsantredeki kül içeriğinin yüksek olmasında, yapısal ve mineralojik analizde belirtildiği gibi kül yapıcı inorganik maddelere ait serbestleşmenin çok ince boyutlarda (75-80µm) olmasının payı büyüktür.

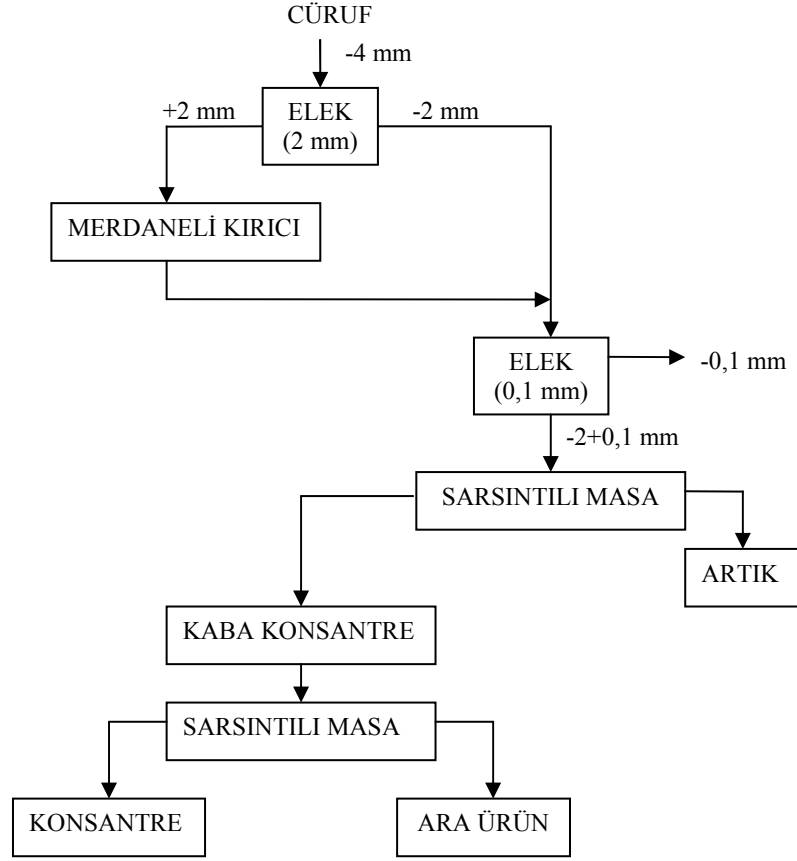
5.4.1.3 Wilfley sarsıntılı masası deneyi

Gravite yöntemiyle zenginleştirme imkânlarının araştırıldığı seri deneylerde, - 2+0,1 mm boyut grubunda hazırlanan temsili numune Wilfley sarsıntılı masasına beslenmiştir. Deneylerde laboratuvar tipi Wilfley sarsıntılı masası kullanılarak, cürufta bulunan yanmamış karbonun kül yapıcı ağır malzemeden ayrılması amaçlanmıştır. Deney sonuçları Çizelge 5.9’ da, deneyin akım şeması Şekil 5.9’ da gösterilmiştir.

Çizelge 5.9 : Sarsıntılı Masa Deneyi Sonuçları.

Ürünler	Miktar (%)	Kül (%)	Yanabilir verim (%)
Konsantre	8,40	29,97	17,80
Ara Ürün	27,30	54,48	37,70
Artık	64,30	77,20	44,50
Toplam	100,00	67,03	100,00

Çizelge 5.9’ da görüldüğü üzere Wilfley sarsıntılı masası deneyinde numuneden ancak az miktarda (% 8,8) nispeten daha düşük kül içerikli (% 29,97) konsantre kazanılmıştır.



Şekil 5.9 : Sarsıntılı masa deneyi akım şeması

5.4.2 Flotasyon deneyleri

Soma Termik Santrali’ nden alınmış cüruftaki yanmamış karbonun kül bileşenlerinden ayrılması hedeflenerek yapılan çalışmada, gravite yöntemlerine alternatif olarak flotasyon yöntemleriyle zenginleştirilme imkanları araştırılmıştır.

Yapılan yapısal ve mineralojik etüdlerde yanmamış kömür tanelerinin yapısında bulunan inorganik bileşenlerin serbestleşme boyutunun 75-80 mikron dolayında olduğu belirlenmiştir. Bu nedenle flotasyon deneyleri cürufta bulunan yanmamış karbonun yapısındaki inorganik bileşenlerin serbest hale getirilmesi amacıyla -74 ve -38 mikron tane boyutu altında gerçekleştirilmiştir. 4 mm altı olan numunenin -74 ve -38 mikron boyutlarına indirilmesi bilyalı değirmen kullanılarak % 40 bilya şarjında % 60 pülpte katı oranında kademeli olarak; -74 mikron boyutu için 60 dakika

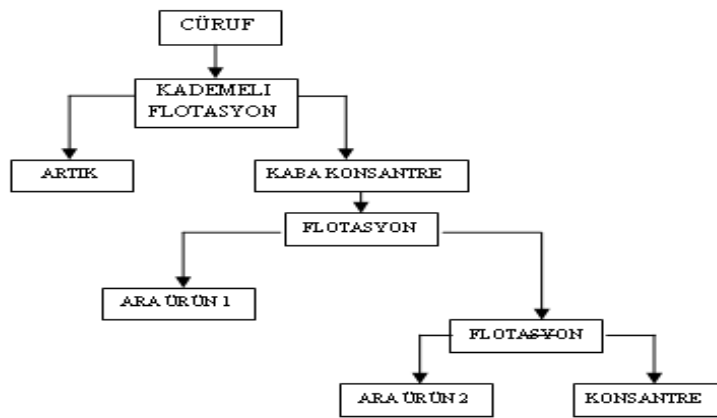
(40+20) iki kademe, -38 mikron boyutu için 120 dakika (60+40+20) üç kademe öğütülmesiyle gerçekleştirilmiştir.

Cürufaların flotasyonla zenginleştirilmesi deneyleri, klasik flotasyon, kolon flotasyonu yöntemleriyle yapılmıştır.

5.4.2.1 Klasik flotasyon deneyleri

Soma Termik Santrali cürufalarının flotasyon yöntemiyle zenginleştirilerek kül içeriklerinin düşürülmesi hedeflenmiştir. Bu maksatla, tane boyutu, kolektör cinsi ve miktarlarının değişimiyle birlikte pH değerinin yanmamış karbon flotasyonuna etkilerini araştırmak amacıyla klasik flotasyon deneyleri gerçekleştirilmiştir.

Klasik flotasyonun yapıldığı deneylerde; silikat minerallerini bastırmak amacıyla 1000 g/t Na_2SiO_3 ilavesi yapılarak pül 5 dakika karıştırılmıştır. Bu süre sonunda kademeli olarak kolektör ve ardından köpürtücü ilavesi yapılmıştır. Her bir kademede 3 dakika kıvamlandırma süresi sonunda köpük belirli bir süreyle alınmıştır. Kademeli kaba flotasyon ardından kaba konsantreye bir veya iki kademe temizleme flotasyonu uygulanmıştır. Temizleme flotasyonu sırasında köpük oluşmaması durumunda köpürtücü, köpüğün malzeme taşımaması durumunda ise az miktarda toplayıcı ilavesiyle temizleme flotasyon gerçekleştirilmiştir. Kaba flotasyonda 1300 devir /dakika olan karıştırma hızı, temizleme flotasyonunda 1000 devir/dakika'ya düşürülmüştür. Klasik flotasyon deneylerinin genel akım şeması Şekil 4.10' da gösterilmiştir. Deneyler reaktif bazında yapıldığından flotasyon deneylerinin sonuçları toplayıcı reaktif altında derlenmiş ve sunulmuştur.



Şekil 5.10 : Klasik flotasyon deneylerinin genel akım şeması

Mazot ile yapılan flotasyon deneyleri: Klasik flotasyon deneylerinde kollektör olarak mazot ile flotasyon deneyleri yapılmıştır. Bu deneylerde reaktif miktarı, tane boyutu ve pH değişiminin karbon flotasyonuna etkileri araştırılmıştır.

Reaktif miktarının etkisi: Mazot ile yapılan flotasyon deneylerinde reaktif miktarının flotasyona etkisini belirlemek için Çizelge 5.10’ da verilen sabit flotasyon koşulları altında mazot miktarlarını değiştirmek suretiyle (4000, 5000, 6000 g/t) deneyler yapılmıştır. Mazot bir defada beslenmeyip, 1000 g/t halinde beslenerek, kademeli flotasyon tercih edilmiştir. Deney sonuçları Çizelge 5.11’ de verilmiştir.

Çizelge 5.10 : Flotasyon koşulları.

pH	11,8 (Doğal)	
Tane boyutu	- 74 µm	
Pülpte katı oranı	% 20	
Na ₂ SiO ₃	1000 g/t	
Mazot miktarı	4000 g/t, 5000 g/t, 6000g/t	
Iso-octanol	600 g/t	
Kıvamlandırma süreleri	5 dk. (Na ₂ SiO ₃)	3dk (Mazot+Iso-octanol)
Köpük alma süresi	Her kademedede 3 dk.	

Çizelge 5.11 : Mazot miktarının flotasyona etkisini belirlemek için yapılandırılan deneylerin sonuçları.

Reaktif	Ürünler	Miktar	Kül içeriği	Yanabilir verim
4000	Konsantre	10,30	64,80	11,70
	Ara Ürün	30,20	65,24	33,80
	Artık	59,50	71,55	54,50
	Toplam	100,00	68,94	100,00
5000	Konsantre	8,80	63,07	10,30
	Ara Ürün 1	28,10	66,86	29,50
	Ara Ürün 2	20,10	64,13	22,90
	Artık	43,00	72,67	37,30
	Toplam	100,00	68,48	100,00
6000	Konsantre	8,30	62,96	9,80
	Ara Ürün 1	26,40	65,36	29,00
	Ara Ürün 2	19,60	64,42	22,10
	Artık	45,70	73,09	39,10
	Toplam	100,00	68,51	100,00

Mazot miktarı arttıkça kül içeriğinde az da olsa düşme olmaktadır. Fakat kül içeriğinin azalma düzeyi yeterli düzeyde (% 63 kül) değildir.

Tane boyutunun etkisi: Numunenin karbon serbestleşmesi de dikkate alınarak, -74 ve μm - 38 μm boyutunda reaktif olarak mazotun kullanıldığı deneyler yapılmıştır. Deney koşulları Çizelge 5.12’ de sonuçları ise Çizelge 5.13’ de verilmiştir.

Çizelge 5.12 : Deney koşulları.

pH	11,8 (Doğal)	
Pülpte katı oranı	% 20	
Na_2SiO_3	1000 g/t	
Mazot miktarı	5000 g/t, 6000g/t	
Iso-octanol	600 g/t	
Kıvamlandırma süreleri	5 dk. (Na_2SiO_3)	3 dk (Mazot+Iso-octanol)
Köpük alma süresi	Her kademe 3 dk.	

Çizelge 5.13 : Mazot ile farklı boyutlarda yapılan flotasyon deneylerinin sonuçları.

Tane boyutu (μm)	Reaktif miktarı (g/t)	Ürünler	Miktar (%)	Kül içeriği (%)	Yanabilir verim (%)
-74	5000	Konsantre	9,60	64,32	11,00
		Ara ürün 1	28,70	66,47	31,00
		Ara ürün 2	24,30	65,22	27,20
		Artık	37,40	74,58	30,60
		Toplam	100,00	68,99	99,80
	6000	Konsantre	10,80	64,88	12,10
		Ara ürün 1	24,50	65,72	26,80
		Ara ürün 2	20,70	65,49	22,80
		Artık	44,00	72,74	38,30
		Toplam	100,00	68,67	100,00
-38	5000	Konsantre	8,80	63,07	10,30
		Ara ürün 1	28,10	66,86	29,50
		Ara ürün 2	20,10	64,13	22,90
		Artık	43,00	72,65	37,30
		Toplam	100,00	68,49	100,00
	6000	Konsantre	8,30	62,96	9,80
		Ara ürün 1	26,40	65,36	29,00
		Ara ürün 2	19,60	64,42	22,10
		Artık	45,70	73,09	39,10
		Toplam	100,00	68,51	100,00

Tane boyutunun -74, -38 μm gibi çok ufak boyutlarda deneylere alınmasına karşın farklı boyutlarda elde edilen deney sonuçlarında belirgin bir değişim yoktur.

pH 'nın etkisi: pH' nın karbon flotasyonun etkisini belirlemek amacıyla reaktif olarak mazotun kullanıldığı flotasyon deneyleri yapılmıştır. Reaktifin 5 kademe eklendiği ve her kademe konsantre alınan deneylerde pH 7,5 ile 11,80 (doğal) değerlerinde tutulmuştur. pH 7,5 ile yapılan deneyde pH ayarlayıcısı olarak H_2SO_4 kullanılmıştır. Deneylerin koşulları Çizelge 5.14' de; sonuçları ise Çizelge 5.15' de verilmiştir.

Çizelge 5.14 : Deney koşulları.

Tane boyutu	- 74 μm
Pülpte katı oranı	% 20
Na_2SiO_3	1000 g/t
Mazot miktarı	4000 g/t
Iso-Octanol	600g/t
Kıvamlandırma süreleri	5 dk. (Na_2SiO_3)
Köpük alma süresi	Her kademede 3 dk.

Çizelge 5.15 : Mazot ile farklı pH' larda yapılan flotasyon deneylerinin sonuçları.

pH	Ürünler	Miktar (%)	Kül içeriği (%)	Yanabilir verim (%)
7,5	Konsantre 1	19,80	66,92	20,70
	Konsantre 2	16,50	66,49	17,50
	Konsantre 3	21,30	67,71	21,80
	Konsantre 4	11,00	68,2	11,10
	Konsantre 5	11,90	70,26	11,20
	Artık	19,50	71,34	17,70
	Toplam	100,00	68,41	100,00
11,8	Konsantre 1	9,80	64,94	10,80
	Konsantre 2	17,60	63,72	20,00
	Konsantre 3	15,60	65,21	17,00
	Konsantre 4	8,80	66,82	9,20
	Konsantre 5	7,30	67,73	7,40
	Artık	40,90	72,17	35,70
	Toplam	100,00	68,09	100,00

pH parametresinin incelendiği bu deneylerde, doğal pH' da daha düşük kül içerikli konsantre elde edilmiştir.

Gazyağı ile yapılan flotasyon deneyleri: Toplayıcı reaktif olarak gazyağının kullanıldığı deneylerde reaktif miktarının karbon flotasyonuna etkisi araştırılmıştır. Gazyağının 4 kademedede beslendiği deney koşulları Çizelge 5.16' da deney sonuçları Çizelge 5.17' de gösterilmiştir.

Çizelge 5.16 : Deney koşulları.

pH	11,8 (Doğal)	
Tane boyutu	- 74 µm	
Pülpte katı oranı	% 20	
Na ₂ SiO ₃	1000 g/t	
Gazyağı miktarı	4000 g/t, 5000 g/t, 6000g/t	
Iso-octanol	600 g/t	
Kıvamlandırma	5 dk. (Na ₂ SiO ₃)	3dk (Gazyağı + Iso-octanol)
Köpük alma	Her kademedede 3 dk.	

Çizelge 5.17 : Gazyağı miktarının parametre olarak alındığı deney sonuçları

Reaktif miktarı (g/t)	Ürünler	Miktar (%)	Kül içeriği (%)	Yanabilir verim (%)
4000	Konsantre	13,50	61,86	16,20
	Ara ürün	40,40	66,43	42,70
	Artık	46,10	71,65	41,10
	Toplam	100,00	68,21	100,00
5000	Konsantre	4,90	60,87	6,20
	Ara ürün 1	30,80	67,76	31,90
	Ara ürün 2	10,60	64,37	12,10
	Artık	53,70	71,12	49,80
	Toplam	100,00	68,87	100,00
6000	Konsantre	3,10	59,77	3,90
	Ara ürün 1	35,00	65,00	38,80
	Ara ürün 2	16,60	63,47	19,20
	Artık	45,30	73,44	38,10
	Toplam	100,00	68,41	100,00

Montanol 505 ile yapılan flotasyon deneyleri: Mazot ve gazyağıyla yapılan deneylerin ardından toplayıcı reaktif olarak montanol 505 ile deneyler yapılmıştır. Toplayıcı reaktif olarak montanolun kullanıldığı deneylerde tane boyutu ve reaktif miktarının karbon flotasyonuna etkileri araştırılmıştır.

Reaktif miktarının etkisi: Reaktif miktarının karbon flotasyona etkisini belirlemek amacıyla montanol miktarını 500 ve 750 g/t almak suretiyle yapılan deneylerde montanol pülpe 3 kademede beslenmiştir. Deneyin koşulları Çizelge 5.18’ de sonuçları Çizelge 5.19’ da verilmiştir.

Çizelge 5.18 : Montanol ile yapılan flotasyon deneylerinin koşulları.

pH	11,8 (Doğal)	
Tane boyutu	- 74 µm	
Pülpte katı oranı	% 20	
Na ₂ SiO ₃	1000 g/t	
Kıvamlandırma süreleri	5 dk. (Na ₂ SiO ₃)	Her kademe 3 dk (Montanol)
Köpük alma süresi	Her kademede 3 dk.	

Çizelge 5.19 : Deney sonuçları.

Reaktif miktarı (g/t)	Ürünler	Miktar (%)	Kül içeriği (%)	Yanabilir verim (%)
500	Konsantre	2,90	60,33	3,70
	Ara Ürün	40,10	65,90	43,60
	Artık	57,00	70,97	52,70
	Toplam	100,00	68,62	100,00
750	Konsantre	3,10	59,55	4,10
	Ara Ürün	45,80	68,90	46,10
	Artık	51,10	69,82	49,90
	Toplam	100,00	69,08	100,00

Tane boyutu: Tane boyutunun karbon flotasyona etkisini belirlemek maksadıyla reaktif olarak montanol kullanılarak tane boyutu -38 µm’ a indirmek suretiyle bir önceki deney koşullarında flotasyon yapılmış ve sonuçları aşağıdaki Çizelge 5.20’ de verilmiştir.

Çizelge 5.20 : -38 µm’ da yapılan flotasyon deneyinin sonucu.

Reaktif miktarı (g/t)	Ürünler	Miktar (%)	Kül içeriği (%)	Yanabilir verim (%)
500	Konsantre	3,80	59,76	4,80
	Ara Ürün	35,80	66,5	37,90
	Artık	60,40	69,97	57,30
	Toplam	100,00	68,34	100,00

Mazot ile yapılan deneylerde olduğu gibi tane boyutunun küçülmesi karbon flotasyonunu belirgin bir şekilde etkilememiştir. -74 µm ve -38 µm tane boyutlarında hemen hemen aynı sonuçlar elde edilmiştir.

5.4.2.2 Kolon flotasyon deneyleri

Soma Termik Santrali cürufklarının flotasyon yöntemiyle zenginleştirilmesi amacıyla kolon flotasyonu ile deneyler yapılmıştır. Kolon flotasyonu deneyleri laboratuvar tipi 30 x 7 cm boyutlu 0,6 litre hacimli kolon hücresinde gerçekleştirilmiştir

Kolon flotasyonu deneylerinde silikat minerallerini bastırmak amacıyla Na₂SiO₃ ilavesi yapılarak pülp 5 dakika şartlandırıldıktan sonra tek kademeli toplayıcı ve ardından köpürtücü ilavesiyle 10 dakika kıvam süresi sonunda köpük alınmaya başlamıştır.

Kolon flotasyonu deneylerinde kolektör olarak gazyağı, mazot ve montanol köpürtücü olarak iso-octanol kullanılmıştır. Farklı kolektörlerle yapılan deneysel çalışmalarda deney koşulları Çizelge 5.21’ de ve deney sonuçları Çizelge 5.22’ de gösterilmiştir.

Çizelge 5.21 : Kolon flotasyonu deney koşulları.

pH	11,8 (Doğal)
Tane boyutu	- 74 µm
Pülpte katı oranı	% 20
Na ₂ SiO ₃	1000 g/t
Mazot	10000 g/t
Iso-octanol	1000g/t
Kıvamlandırma süreleri	5 dk. (Na ₂ SiO ₃), 10dk.
Köpük alma süresi	2 dk.

Çizelge 5.22 : Kolon flotasyonu deneylerinin sonuçları.

Reaktif cinsi	Ürünler	Miktar (%)	Kül (%)	Yanabilir verim (%)
Gazyağı	Konsantre	6,70	56,62	9,10
	Artık	93,30	68,88	90,90
	Toplam	100,00	68,05	100,00
Mazot	Konsantre	10,70	61,39	13,00
	Artık	89,30	68,98	87,00
	Toplam	100,00	68,16	100,00
Montanol	Konsantre	6,50	60,60	8,10
	Artık	93,50	69,06	91,90
	Toplam	100,00	68,51	100,00

Çizelge 5.22’ de verilen deney sonuçlarına göre deneye giren numunenin ancak %6,7’ lik miktarında %56,62 kül içerikli konsantre elde edilmiştir. Kollektör cinsinin parametre olarak alındığı bu deneylerde gazyağıyla en iyi sonuç elde edilmiştir.

5.4.3 Liç deneyleri

Gravite ve flotasyon yöntemlerine alternatif olarak % 69,77 kül içerikli Soma Termik Santrali cürufunun kül içeriğini azaltmak amacıyla, cüruf numunelerine kimyasal çözündürme işlemleri uygulanmıştır. Numuneye liç yönteminin uygulanmasında, numunenin CaO içeriğinin % 37,77 düzeyinde olmasının payı büyüktür. Kalsiyumun çözeltiye alınmasıyla geriye kalan üründe karbon içeriğinin yükselmesi beklenmektedir.

Liç deneylerinde, çözücü olarak H₂SO₄ ve HCl kullanılmış ve asit konsantrasyonu ile pülp sıcaklığının kül çözünme verimine etkisi araştırılmıştır.

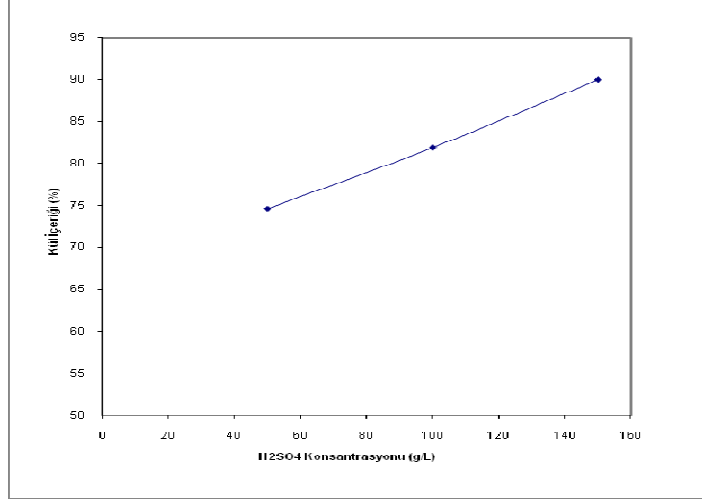
5.4.3.1 H₂SO₄ ile yapılan liç deneyleri

Konsantrasyonu değiştirmek suretiyle yapılan liç deneylerinin koşulları aşağıda, bu koşullarda elde edilen deney sonuçları Çizelge 5.23 ile Şekil 5.11’ de liç deneyi koşulları ise aşağıda verilmiştir.

- Katı/Sıvı : 1/4
- Pülp Sıcaklığı: 20±2 °C
- Liç Süresi: 2 saat

Çizelge 5.23 : H₂SO₄ ile yapılan deneylerin sonuçları.

H ₂ SO ₄ konsantrasyonu (g/L)	Liç artığı miktarı (%)	Kül içeriği (%)	Çözeltiliye alma verimi (%)
50	67,00	74,65	28,10
100	79,20	81,87	6,83
150	92,60	89,95	-



Şekil 5.11 : H₂SO₄ ile yapılan deneylerin sonuçları

Sülfirik asit ile yapılan liç deneyleri sonucunda, H₂SO₄ konsantrasyonunun artışıyla katıdaki kül içeriği de artmaktadır. Kül içeriğinin asit konsantrasyonu artışına bağlı olarak artmasının nedeni; ortamdaki (SO₄)⁻² iyonlarının numunedeki kalsiyum iyonlarıyla CaSO₄ oluşturmasından ileri gelmektedir. Olumsuz sonuçlar elde edilmesi üzerine bu grup deneylere son verilmiştir.

5.4.3.2 HCl ile yapılan liç deneyleri

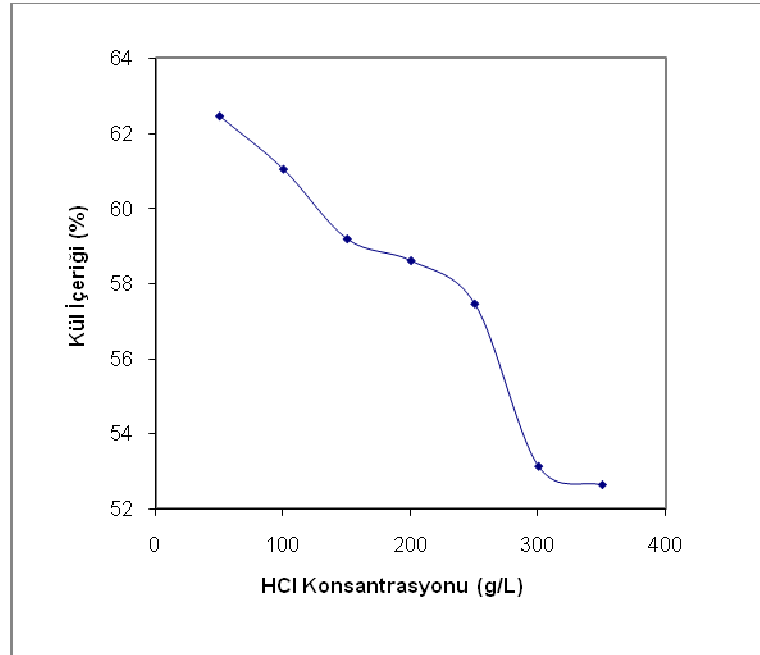
H₂SO₄ ile yapılan liç deneylerinde asit konsantrasyonunun artışıyla kül içeriğinin artması istenilmeyen bir durum olduğundan, HCl ile de liç deneyleri yapılmıştır. Bu grup deneylerde pulp sıcaklığı ve asit konsantrasyonunun inorganik maddelerin çözünmesine etkisi araştırılmıştır.

Asit konsantrasyonunun çözündürmeye etkisini belirlemek için farklı HCl konsantrasyonlarında aşağıda verilen koşullarda çözündürme deneyleri yapılmıştır. farklı HCl konsantrasyonlarında yapılan liç deneyi koşulları aşağıda, deney sonuçları ise Çizelge 5.24 ve Şekil 5.12’ de deney koşulları ise aşağıda verilmiştir..

- Katı/Sıvı :1/4
- Pülp Sıcaklığı: 20 ± 2 °C
- Liç Süresi: 2 saat

Çizelge 5.24 : Farklı HCl konsantrasyonlarında yapılan liç deneylerinin sonuçları.

HCl konsantrasyonu (g/L)	Liç artığı miktarı (%)	Kül içeriği (%)	Çözeltiye alma verimi (%)
50	63,00	62,45	43,58
100	60,00	61,04	47,32
150	54,00	59,18	53,54
200	53,00	58,6	55,30
250	51,00	57,45	57,90
300	49,00	53,12	62,60
350	49,00	52,63	62,90



Şekil 5.12 : Farklı HCl konsantrasyonlarında yapılan liç deneylerinin sonuçları

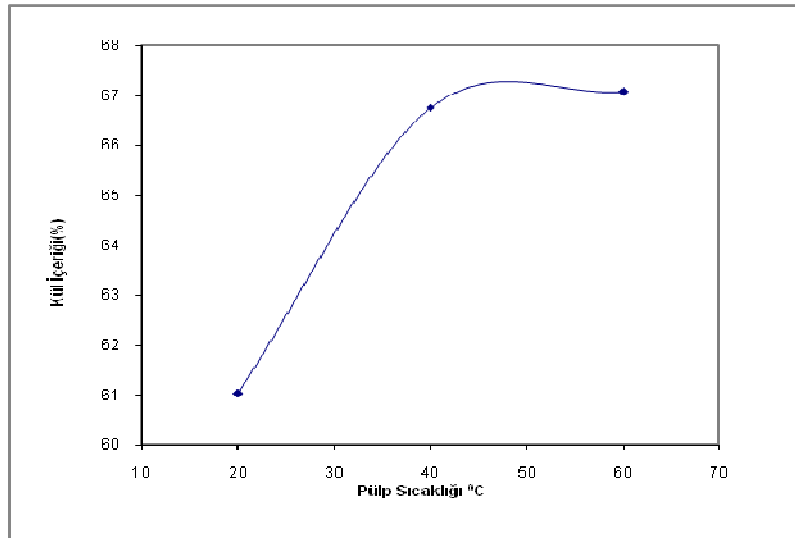
Şekil 5.12’ deki deney sonuçlarında görüldüğü üzere, yapılan deneylerdeki HCl konsantrasyonundaki artışa bağlı olarak numunenin kül içeriği ancak % 52,63’ e düşürülmüştür. Çözeltideki HCl asit konsantrasyonu arttıkça çözeltiye alma verimi artmakta, liç artığındaki kül içeriği düşmektedir.

Pülp sıcaklığının çözündürmeye etkisini belirlemek amacıyla; farklı pülp sıcaklıklarında aşağıda verilen koşullarda çözündürme deneyleri yapılmıştır ve sonuçları Çizelge 5.25 ile Şekil 5.13’ te liç deneyi koşulları ise verilmiştir.

- Katı/Sıvı : 1/4
- Pülp Sıcaklığı: 20 ± 2 °C
- Liç Süresi: 2 saat
- HCl konsantrasyonu: 100 g/L

Çizelge 5.25 : HCl ile farklı pülp sıcaklıklarında yapılan liç deneylerinin sonuçları.

Liç sıcaklığı (°C)	Liç artığı miktarı (%)	Kül içeriği (%)	Çözeltiliye alma verimi (%)
20	60,00	61,04	47,32
40	56,00	66,75	46,29
60	51,00	67,07	50,85
80	51,00	66,35	51,38



Şekil 5.13 : HCl ile farklı pülp sıcaklıklarında yapılan liç deneylerinin sonuçları

Deney sonuçlarından da görüldüğü gibi, numunenin kül içeriği % 66’ nın altına düşürülememiştir. 20 °C pülp sıcaklığındaki sonuca göre, 20 °C’ den daha yüksek sıcaklıklara ait kül içeriğinde artış bile söz konusudur. Pülp sıcaklığının artışıyla liç artığında inorganik kökenli yeni bileşiklerin oluştuğu görülmüştür.

6. SONUÇLAR

Soma Termik Santrali'nden elde edilen cüruflardan yanmamış karbon zenginleştirilmesine yönelik yapılan deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar maddeler halinde aşağıda verilmiştir.

- Numunenin kül içeriği % 69,94, karbon içeriği % 15,54 olarak saptanmıştır.
- Numunenin d_{80} boyutu 1 mm ve d_{50} boyutu ise 0,3 mm olarak saptanmıştır.
- Petrografik analizler sonucu cüruf bileşiminin büyük çoğunluğunu (camsı fazı) oluşturan kalsiyum-magnezyum-demir-alümina ve silis bileşikli puzolan ve yanmamış karbon bileşikli malzemeler ile birlikte kil grubu mineraller, anhidrit, kuvars, hematit, pirit ve melnikovit (jel pirit) minerallerinin bulundukları tespit edilmiştir. Cüruftaki karbonlu bileşikler içerisindeki kül yapıcı inorganik malzemelerin serbestleşme boyutunun 75-80 μm dolayında olduğu belirlenmiştir. Yanmamış karbon tanelerinde kül yapıcı bileşenlerin çok ince boyutlarda (75-80 μm) serbestleşmesi yanmamış karbon tanelerinin kül içeriğini arttırmakta ve zenginleştirilmesini zorlaştırmaktadır.
- Yüzdürme batırma deneyleri sonuçları değerlendirildiğinde gerek -4+0,5mm gerekse -0,5+0,1 mm boyut gruplarında, $\pm 0,1$ malzeme miktarları genellikle %14 ve daha yukarı olduğundan yapılacak ayırmaların güç olduğu tespit edilmiştir.
- Jig ile yapılan zenginleştirme deneylerinde -4+0,5 mm boyut grubundaki numuneden % 14,63 miktarda ve % 34,97 kül içeriğinde konsantre elde edilmiştir.
- Sarsıntılı masa ile yapılan zenginleştirme -2+0,1 mm boyut grubuna uygulanmış ve deneye giren numunenin miktarca %8,4'ünden %29,97 kül içerikli bir konsantre elde edilmiştir. Sarsıntılı masa deney konsantresinin ortalama ısı değeri 3250 kcal/kg'dır ve bu ürün termik santrallere tekrar beslenebilir.

- Klasik flotasyon deneyleri gazyağı, mazot ve montanol kullanılarak yapılmış ve en iyi sonuç gazyağı ile yapılan deneylerde elde edilmiştir. -74 µm boyutunda ve pH 11,80' de, 6000 g/t gazyağı kullanılarak yapılan deneylerde deneye giren numunenin miktarca %3,1' inden %59,77 kül içerikli konsantre üretilmiştir.
- Kolon flotasyonu yöntemi ile yapılan zenginleştirme deneylerinde en iyi sonuca -74 µm tane boyutunda, pH 11,80 ve toplayıcı reaktif olarak 7500 g/t gazyağının kullanıldığı flotasyon deneyinde ulaşılmıştır. Deneye giren numunenin miktarca %6,7' sinden %56,62 kül içerikli konsantre elde edilmiştir.
- Liç yöntemiyle yapılan zenginleştirme deneylerinde en iyi sonuç 350 gr/lit HCl konsantrasyonunda elde edilmiş olup, deneye giren numune miktarının % 49' undan % 52,63 kül içeriğiyle konsantre elde edilmiştir.
- Soma Termik Santral cürufu üzerinde yapılan zenginleştirme deneyleri sonucunda en iyi sonuçlar sarsıntılı masa ile zenginleştirme deneyi sonucu elde edildiğinden bu numune için önerilecek en uygun proses sarsıntılı masa ile zenginleştirme olacaktır. Bu numuneyi zenginleştirmek için önerilen prosesin akım şeması Ek 1.A' da verilmiştir.

KAYNAKLAR

- [1] Ateşok, G., 2004: İnce Boyutlu Cevherlerin Değerlendirilmesi, Uçucu Kül, *ders notları*, yayınlanmamış.
- [2] Baba, A., 2001: Muğla Termik Santrali Atık Depolama Sahasının Yeraltı Sularına Etkisi, *Jeoloji Mühendisliği Dergisi*, **5**, pp.12-20, Muğla, Türkiye.
- [3] Url-1 < <http://www.flyash.info> >, alındığı tarih 07.11.2008.
- [4] Ateşok, G., 2004: Kömür Hazırlama ve Teknolojisi, YMGV Yayınları, İstanbul, Türkiye.
- [5] Ateşok, G., 2009: Kömür, Kullanımı ve Temiz Kömür Teknolojileri, YMGV Yayınları, İstanbul, Türkiye.
- [6] Benli, İ., Uyanık, O. A., Demir, U., Şahbaz, O. ve Çelik, S. M., 2005: Seyitömer Termik Santrali Uçucu Küllerinin Tuğla Katkı Hammaddesi Olarak Kullanımı, *Türkiye 19. Uluslararası Madencilik Fuarı ve Kongresi*, İzmir, Türkiye.
- [7] Öztekin, E., 1977: Betonun Sertleşmesinin Hızlandırılmasında Kullanılan Isıl İşlemler, Eğilme Dayanımlarına Etkileri, *doçentlik tezi*, K.T.Ü., Trabzon, Türkiye.
- [8] Özkan S., 1986: Isıl İşlem Uygulaması ile Birlikte Uçucu Kül Kullanımının Beton Özelliklerine Etkisi, *yüksek lisans tezi*, İ.T.Ü., İstanbul, Türkiye
- [9] Url-2 <<http://www.mineralsusgs.gov>>, alındığı tarih 25.12.2008
- [10] TSE-639, 1975: Uçucu Kül Standardı, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, Türkiye.
- [11] ASTM-C618, 1994: Standart Specification for Coal Ash and Raw Material or Calcined Natural Pozzolans for Use as a Mineral Admixture in Portland Cement Concrete, *American Society for Testing and Material*, West Conshohocken, A.B.D.
- [12] James, C. H., Robert, R. F., Robertson, G., and Trimble, J. A., 1997: *International Ash Utilization Symposium*, Lexington, A.B.D.
- [13] Haseen, L. D., and Fisher G. L., 1980: Environment and Science Technology, *Environment and Science Technology Symposium*, Londra, İngiltere.
- [14] Cohen, C., Polat, M., Güler, ve Merdoğan H., 2001: Ore Dressing/Cevher Hazırlama, YMGV Yayınları, İstanbul, Türkiye.
- [15] Erdoğan, T. Y., 1993: Atık Hammaddelerin İnşaat Endüstrisinde Kullanımı, Uçucu Kül ve Yüksek Fırın Cürufu, *Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması Sempozyumu*, Ankara, Türkiye.
- [16] Url-3 <<http://www.caer.uky.edu/kyasheducation>>, alındığı tarih 12.06.2008.

- [17] **Yılmaz, Ş.**, 1992: Seyitömer Termik Santrali Uçucu Küllerinin Yapı Malzemesi Olarak Değerlendirilmesi, *yüksek lisans tezi*, İ.T.Ü., İstanbul, Türkiye.
- [18] **Ergüt, Ş.**, 1992: Seyitömer Termik Santrali Uçucu Küllerinin Sinterleşme Karakterizasyonu, Yapı Malzemesi Olarak Değerlendirilmesi, *yüksek lisans tezi*, İ.T.Ü., İstanbul, Türkiye.
- [19] **Anderson, M.**, 1984: Processed High Carbon PFA as a Fuel Additive in Brickmaking, *International Concrete on Ash Technology*, Londra, İngiltere.
- [20] **Anderson, M., and Jackson, G.**, 1983: The Beneficiation of Power Station Coal Use in Heavy Clay Ceramics, *Ceramics*, **82**, pp. 50-55, Londra, İngiltere.
- [21] **Özkan, L.**, 1986: Isıl İşlem Uygulaması ile Birlikte Uçucu Kül Kullanımının Beton Özelliklerine Etkisi, *yüksek lisans tezi*, İ.T.Ü., İstanbul, Türkiye.
- [22] **Villaver, C. S., and Gasiorowski, S A.**, 1999: Increasing Carbon Content of Fly Ash Consequences and Recovery of Last Value, *The Proceedings of The 24th International Technical Conference on Coal Utilization and Fuel Systems*, Clearwater, A.B.D.
- [23] **Edil, B. T., Berthauex P. M., and Vergermen, Kwa. D.**, 1987: Fly Ash as Potential Waste Liner, *Geotechnical Practice for Disposal*, 87-13, Newyork, A.B.D.
- [24] **Polat, H., Vengosh, A., Pankrotav. I. ve Polat, M.**, 2004: A New Technology for Reomoval of Boron from Water by Coal and Fly Ash, *Destilation, Destilation Research and Technology*, **164**, pp. 173-188.
- [25] **Ripke, S. J., and Kawatra, S. K.**, 2000: Can Fly Ash as Extend Bentonite Binder for Iron Ore Agglomeration?, *International Journal of Mineral processing*, **60**, pp. 181-198, A.B.D.
- [26] **Tuzcu, T. E.**, 2004: Removal of Heavy Metals from İndustrial Waste Waters with Fly Ash, *Proceedings of 10th International Mineral Symposium*, İstanbul, Turkey.
- [27] **Deniels, L. W.**, 2002: The Potential of Beneficial Reuse of Coal Ash in Southwest Virginia, *Mining Environments*, **12**, pp. 460-134, A.B.D.
- [28] **Url-4** <<http://www.acaa-usa.org/>>, alındığı tarih 12.01.2009.
- [29] **Namura, M.**, 2004: Presents State of Coal Ash Utilization in Japan, *Proceedings of 10th International Symposium*.
- [30] **Ozasa, K., Kamjio, and Owada, T.**, 2003: The Physical and Chemical Characteristics of Pulverized Coal Combustion Ashes, *The Proceedings of 24th International Technical Conference of Coal Utilization and Fuel Systems*.
- [31] **Tomanec, R., Taric, S.**, 2004: Fly Ash as A Building Material, *Proceedings of 10th International Symposium*.

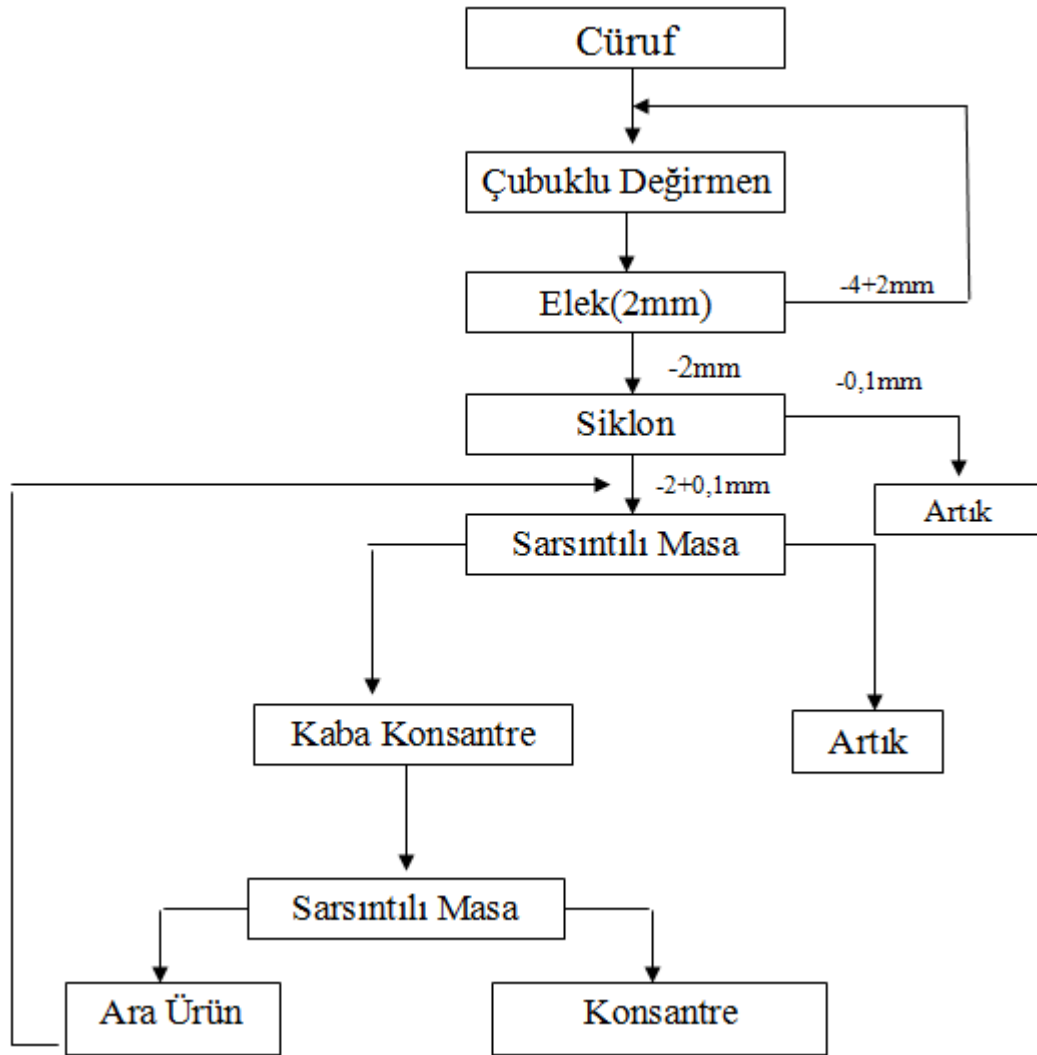
- [32] **Özdemir, O.**, 2001: Tunçbilek Uçucu Küllerinin Özelliklerinin Belirlenmesi ve Değerlendirilmesi, *yüksek lisans tezi*, İ.T.Ü., İstanbul, Türkiye.
- [33] **Özcan, M.**, 1997: Tunçbilek ve Seyitömer Uçucu Küllerinin Beton Özelliklerine Etkisi ve Etkinlik Katsayılarının Bulunması, *yüksek lisans tezi*, İ.T.Ü., İstanbul, Türkiye.
- [34] **Joang, Y., McMahan, L., and Gray. A.**, 1999: Beneficiating Value-Added Products from Fly Ash, *16th Annual International Pittsburg Coal Conference*, A.B.D.
- [35] **Matjie, R. H., Bunt, R. J., and Heerden. V.**, 2004: Extraction of Alumina from Coal Fly Ash Generated from Selected Low Rank Bituminous South Africa coal, *Mineral Engineering*, **52**, pp.121-134, A.B.D.
- [36] **Stenal., J. M.**, 1996: Dry Electrostatic Separation of Unburned Carbon from Fly Ash, *Mineral Engineering*, **32**, pp.32-55, A.B.D.
- [37] **Edward, D., Brandner, R., and Russell E. J.**, 2003: A new Fly Ash Separator Combining Magnetic Forces With Air Drag, *25th Coal Ash Symposium*.
- [38] **McMahan, L. G., Chamgne, J. N., Song, Y., and Finscth, H.**, 1999: Column Oil Agglomeration of Fly Ash with Ultrasonics, *29th Coal Ash Utilization Symposium*.
- [39] **Eisele, T.C., and Kawatra S. K.**, 2004: Use of Froth Flotation of Remove Unburned Carbon from Fly Ash, *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, **12**, pp. 12-23, Canada.
- [40] **Rice. A. C., Breit, G. N., Fishman N. S., and Bullock, J.H.**, 1999: Leachability of Trace Elements in Coal and Coal Combustion Wastes, *The Proceedings of 24th International Technical Conference on Coal Utilization Fuel Systems*.
- [41] **Url-5** <<http://www.recycledmaterials.org/>>, alındığı tarih 02.10.2008.
- [42] **Url-6** <<http://www.tfhr.gov/>>, alındığı tarih 12.03.2009.
- [43] **Palmer, A. C., Finkelman, B. R., Krasnow, R. M., Eble. F. C.**, 1995: Leaching Behavior of Environmentally Sensitive Trace Elements from Fly Ash and Bottom Ash, *U.S Geological survey*, ABD.
- [44] **Onacak, T., Karayiğit, İ. A., Gayer, A. R., and Goldsmith, S., and Querol, X.**, 1999: Çayırhan Termik santral'ine Beslenen Kömür ve Yanma Sonucu Oluşan Katı Atıkların Mineralojik ve Jeokimyasal Özelliklerinin Sistematik İncelenmesi, *52. Türkiye Jeoloji Kurultayı Bildiriler Kitabı*, **1**, pp.167-174, Ankara, Türkiye.
- [45] **Vassilev, S., Vassileva, C., Karayiğit, İ. A., Bulut, Y., Alastuey, A., and Querol, X.**, 2005: Phase-Mineral and Chemical Composition of Composite Samples from Feed Coals, Bottom Ashes and Fly ashes at The Soma Power Station, Turkey, *International Journal of Coal Geology*, **61**, pp. 35-63.
- [46] **Karayiğit, İ. A.**, 2002: Sivas-Kangal Termik Santral' ine Beslenen Linyitlerde Yanma Sonucu Oluşan Katı Atıklarda Bazı HAPs Elementlerin Dağılımı ve Orijini, sayfa.1-74 , *Tübitak Projesi*, Ankara, Türkiye.

- [47] **Magdalena, M.**, 2002: Comparison of Chars in Slag and Fly Ash as Formed in Pf Boilers from Bedzin Power Station, *Fuel*, **81**, pp. 1351-1358, Polonya.
- [48] **Akman, S.**, 1998: Yapı Malzemeleri, İ.T.Ü. Vakfı Yayınları, İstanbul, Türkiye.
- [49] **Yılmaz, K., Canpolat E.**, 2004: Taban Külü ve Zeolitin Puzolanik Çimentoda Katkı Olarak Kullanımı, *2004 Beton Kongresi*, İstanbul, Türkiye.
- [50] **Kula, I., Olgun, A., Erdoğan, Y. ve Sevinç, V.**, 2001: Effects of Colemanit Waste, Coal Bottom Ash and Fly Ash on the Properties of Cement and Concrete, *1th International Boron Symposium*.
- [51] **Philips, B. L., Groupo, J., and Perone, R.**, 2005: Evalution of Processed Bottom Ash for Use as Aggregate in Production of Concrete Mansory Units, *Kentucky of University Research*, **49**, pp.12-23, Lexington, A.B.D.
- [52] **A.C.A.A.**, 2004: Boiler slag, American Coal Ash Association Resource Bulletin, **23**, pp.12. Colorado, A.B.D.
- [53] **Vipulanandan c., Elton D.**, 1998: **Materials in Geotechnical Applications** *Geotechnical Special Publication*, 79, Newyork, AB.D.
- [54] **Url-7** < [http:// www.cedb.asce.org](http://www.cedb.asce.org)>, alındığı tarih 07.11.2008.
- [55] **Url-8** < <http://www.ecoba.com/>>, alındığı tarih 04.10.2008.
- [56] **Groppo, J., Robl, T., and Golab, C. J.**, 2008: Beneficiation of coal Combustion Ash, *Energy Waste and the Environment*, **1**, pp. 247-262, Lexington, A.B.D.
- [57] **Duruöz, U.**, 2002: Tunçbilek Termik Santral Cüruflarındaki Yanmamış Karbonun Flotasyon Yöntemiyle Kazanılması, D.Ü., *yüksek lisans tezi*, Dumlupınar, Türkiye.
- [58] **Altınkaya, S. Y.**, 2002: Seyitömer Termik Santral Cürufundan Yanmamış Karbonun Flotasyon Yöntemi ile Kazanılması, D.Ü., *yüksek lisans tezi*, Dumlupınar, Türkiye.
- [59] **Demir, U.**, 2004: Tunçbilek Termik Santrali Izgara Altı Cürufundan Yanmamış Karbonun Kolon Flotasyonu ile Kazanılması, D.Ü., *yüksek lisans tezi*, Dumlupınar, Türkiye.

EKLER

EK A.1 : Proses akım şeması

EK A.1



Şekil A.1 : Soma Termik Santrali cürufunu zenginleştirmek için önerilen prosesin akım şeması

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad: Sevil Akyazılı

Doğum Yeri ve Tarihi: İstanbul-19.07.1982

Lisans Üniversite: İstanbul Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği

