

168480

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

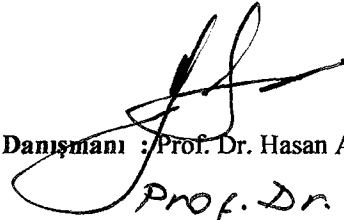
**AKIŞKAN YATAKLI YAKICILARDA İKİ FAZLI AKIŞIN
VE YANMANIN MODELLENMESİ**

Mak. Müh. Necmiye Sevi TÜTÜNCÜ

**FBE Makina Mühendisliği Anabilim Dalı Isı Proses Programında
Hazırlanan**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Hasan A. HEPERKAN



Prof. Dr. Olcay Kıncaç O. Kıncaç
Prof. Dr. Esen Bolat Bolat

İSTANBUL, 2005

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ	v
KISALTMA LİSTESİ	vii
ŞEKİL LİSTESİ	viii
ÇİZELGE LİSTESİ	ix
ÖNSÖZ	x
ÖZET	xi
ABSTRACT	xii
1. GİRİŞ	1
2. YANMA VE YANMA SİSTEMLERİ	4
2.1 Yanma Olayı	4
2.2 Yakma Sistemleri ve Yakma Sistemlerinin Karşılaştırılması	4
3. AKIŞKAN YATAKTA YAKMA TEKNOLOJİSİ	6
3.1 Akışkan Yatakta Yakma Teknolojisinin Gelişimi	6
3.2 Akışkan Yatak Prosesi	6
3.3 Akışkan Yataklı Kazanların Sınıflandırılması	9
3.3.1 Atmosferik Basınçta Çalışan Akışkan Yataklı Kazanlar	9
3.3.2 Sirkülasyonlu Akışkan Yataklı Kazanlar	9
3.3.3 Basınçlı Akışkan Yataklı Kazanlar	10
3.4 Akışkan Yatak Teknolojisinin Avantajları	10
3.5 Akışkan Yatak Teknolojisinin Dezavantajları	14
3.6 Bazı Akışkan Yataklı Kazan Tipleri	14
3.6.1 Kabarcıklı Akışkan Yataklı Kazanlar ve Kabarcıklı Akışkan Yatak Modeli	14
3.6.2 Dolaşımli Akışkan Yataklı Kazanlar	17
3.7 Türkiye’de Akışkan Yataklı Kazan Teknolojisi	19
4. AKIŞKANLAŞTIRMA PROSESİ VE BU PROSESTE KULLANILAN MATEMATİKSEL BAĞINTILAR	21
4.1 Akışkanlaştırma Ve Yanmada Kullanılan Boyutsuz Sayılar	21
4.1.1 Sherwood (Sh) Sayısı	21
4.1.2 Reynolds (Re) Sayısı	22
4.1.3 Nusselt (Nu) Sayısı	23
4.1.4 Archimedes (Ar) Sayısı	25
4.2 Minimum Akışkanlaştırma Hızı	26
4.3 Kabarcık Boyutu ve Yükselme Hızı	33
4.3.1 Yatak Genişlemesi	34
4.4 Katıların Karışımı	36
5. AKIŞKAN YATAKTA YANMA HAKKINDA LİTERATÜR ARAŞTIRMALARI	39

5.1	Kömürün Yanması.....	39
5.2	Uçucu Maddenin Oluşumu.....	39
5.3	Uçucu Maddenin Yanması.....	41
5.4	Kok Yanması.....	42
5.5	Tanecik Yanması.....	44
5.5.1	Tek Film Modeli.....	46
5.5.2	Çift Film Modeli.....	47
5.5.3	Sürekli Film Modeli.....	47
5.6	Fiziksel ve Kimyasal Reaksiyonlar.....	47
5.6.1	Kömürün Tutuşma Özelliği.....	48
5.6.2	Tanecik Yanma Reaksiyonları.....	49
5.7	SO ₂ Ve NO _x Emisyonu.....	50
5.7.1	SO ₂ Oluşumunun Önlenmesi.....	50
5.7.2	NO _x Oluşumunun Önlenmesi.....	51
5.8	Karbon Kaybı.....	52
5.9	Yanma Verimi.....	52
6.	LİTERATÜRDEKİ MODEL ÇALIŞMALARI.....	54
7.	AKIŞKAN YATAKTA MODELLEME.....	56
7.1	Model Kabulleri.....	56
7.2	Genel Model Denklemleri ve Akışkan Özelliklerinin Modellenmesi.....	56
7.2.1	Viskozite Hesabı.....	57
7.2.2	Özgül Isı Hesabı.....	58
7.2.3	Isıl İletkenlik Hesabı.....	59
7.2.4	Karışım İçin Ortalama Değerlerin Hesaplanması.....	59
7.3	Uçucu Madde Yanmasının Modellenmesi.....	60
7.4	Kömür Partikülünün Yanmasının Modellenmesi.....	63
7.5	Reaksiyon Isılarının Hesaplanması ve Modellenmesi.....	65
7.6	Tanecik Miktarı Hesaplanması.....	65
7.6.1	Aktif Yatak Tanecik Miktarı.....	65
7.6.2	Serbest Bölgeye Atılan Tanecik Miktarı.....	65
7.7	Kömürün Özelliklerinin Modellenmesi.....	67
7.8	Kütle Dengeleri.....	67
7.8.1	Aktif Yatak Kütle Dengesi.....	67
7.8.1.1	Tüm Kütle Dengesi.....	68
7.8.1.2	Azot Dengesi.....	69
7.8.1.3	Oksijen Dengesi.....	69
7.8.1.4	Karbon Monoksit Dengesi.....	69
7.8.1.5	Karbon Dioksit Dengesi.....	69
7.8.1.6	Metan Dengesi.....	69
7.8.1.7	Su Dengesi.....	70
7.8.1.8	Kükürt Dengesi.....	70
7.8.1.9	Azot Oksit Dengesi.....	70
7.8.2	Serbest Bölge Kütle Dengesi.....	70
7.9	Enerji Dengeleri.....	70
7.9.1	Aktif Yatak Enerji Dengesi.....	70
7.9.2	Serbest Bölge Enerji Dengesi.....	72
7.10	Model Denklemlerinin Çözüm Metodu.....	72
7.10.1	Sınır Şartları.....	72
7.10.2	Deney Düzeneği ve Çalışma Şartları.....	73

8. SONUÇLAR.....	75
KAYNAKLAR.....	79
İNTERNET KAYNAKLARI.....	80
ÖZGEÇMİŞ.....	81



SİMGE LİSTESİ

a	Kabarcık izinin kabarcık hacmine oranı
Ar	Archimedes sayısı
C_p	Özgül ısı (KJ/kmolK)
C_0	Oksijenin başlangıç konsantrasyonu (kmol/m ³)
D_G	Gaz fazda moleküler difüzyon katsayısı (m ² /s)
D_T	Yatak çapı (m)
d_p	Yanan kömür taneciklerinin ortalama çapı (m)
d_0	Tanecik başlangıç çapı (m)
T_{mf}	Minimum boşluk oranı
E	Efektif difüzyon katsayısı
F_Z	Kömürün tutuşma karakteristiği
g	Yerçekimi ivmesi (m/s ²)
ρ_g	Gazın yoğunluğu (kg/m ³)
ρ_p	Tanecik yoğunluğu (kg/m ³)
ρ_{A0}	Tanecik başlangıç karbon yoğunluğu (kg/m ³)
h	Yüzey film katsayısı (KJ/m ² h ⁰ C)
H_{mf}	Gaz U_{mf} hızında iken yatağın yüksekliği (m)
k_d	Gaz difüzyonu hız sabit katsayısı (m/s)
k_g	Kütle transfer katsayısı
k_r	kokun yanma esnasındaki CO/CO ₂ oranı
k	Isı iletim katsayısı (KJ/mh ⁰ C)
μ	Gazın viskozitesi (kg/ms)
m	Taneciğin kütlesi (kg)
m_0	Taneciğin başlangıç kütlesi (kg)
N	Yataktaki taneciklerin toplam sayısı

Nu	Nusselt sayısı
P	Yatağın basıncı (Pa)
r	Küresel partikülün merkezinden ölçülen radyal mesafe (m)
R	Üniversal gaz sabiti (Kj/kmolK)
Re	Reynolds sayısı
R _b	Uçucu yarıçapı (m)
Sh	Sherwood sayısı
T _{mf}	Akışkanlaşma hızı sıcaklığı (K)
T _b	Yatak sıcaklığı (K)
t _{kar}	Karışım zamanı (s)
t _b	Uçucu yanma zamanı (s)
U	Yanmanın genişlemesi (m/s)
U _b	Kabarcık örtü yükselme hızı (m/s)
U _{mf}	Minimum akışkanlaştırma hızı (m/s)
U _t	Terminal hız (m/s)
U ₀	İşletme gaz hızı (m/s)
ΔP	Basınç farkı (Pa)
γ _C	Kömür içindeki karbon miktarı (kg)
γ _{VM}	Uçucu madde ağırlık dağılımı (kg uçucu madde / kg top.madde)
γ _w	Kömür içindeki nem miktarı (kg)
X	Molar konsantrasyon (kg i bileşeni/kg top.madde)
Φ	Mekanizma faktörü
λ	Isı iletim katsayısı (W/mK)
Z _y	Uçucu maddenin yatakta ulaşacağı yükseklik (m)

KISALTMA LİSTESİ

AYT Akışkan yatak teknolojisi

AYY Akışkan yatakta yanma



ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 3.1	Sabit Yatak, Minimum Akışkanlaşma Konumu, Kabarcıklı ve Dolaşımli Akışkan Yatak.....	8
Şekil 3.2	Bir Akışkan Yataklı Yakıcının Şematik Görünümü	8
Şekil 3.3	Kabarcıklı Yatak Modelinde Gaz ve Tanecik Hareketi	15
Şekil 3.4	Kabarcık İzindeki Taneciklerin Serbest Bölgeye Fırlatılması	17
Şekil 3.5	Dolaşımli Akışkan Yataklı Kazana Dayalı Termik Santral Temsili Akım Şeması	19
Şekil 3.6	Akışkan Yataklı Kazanın Basit Şeması	20
Şekil 4.1	Belirli Büyüklükteki Tanecikler İçin Basınç Düşüşü İle Gaz Hızı	26
Şekil 5.1	Akışkan Yatakta Kömürün Yanması	43
Şekil 5.2	Büyük Kömür Taneciklerin Homojen Yanmasında Takip Edilen Adımlar	44
Şekil 5.3	Yanan Kok Taneciği Üzerindeki Reaksiyonlar	45
Şekil 7.1	Model Aktif Yatak Kontrol Hacminin Şematik Anlatımı.....	57



ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge 1.1	Türk linyitlerinin kül , nem ve kükürt içerikleri	2
Çizelge 2.1	Yakma Sistemleri Karşılaştırılması, *=birim hacimden çekilen ısı enerji	5
Çizelge 4.1	Sh Sayısı İçin Elde Edilen Bazı Korelasyonlar.....	22
Çizelge 4.2	Re Sayısı İle İlgili Bulunan Korelasyonlar	23
Çizelge 4.3	Nusselt Sayısı İçin Bulunan Sabitler (Benson 1987).....	24
Çizelge 4.4	Umf Üzerine Yapılan Çalışmalar.....	29
Çizelge 4.5	Akışkanlaştırma Hızı İçin Kabul Edilen Sabitler.....	32
Çizelge 4.6	Kabarcık Çapını Veren Korelasyonlar	35
Çizelge 7.1	Gazların Lennard-Jones Parametreleri.....	58
Çizelge 7.2	C_p Hesabında Kullanılacak A ve B katsayıları Tablosu	59
Çizelge 7.3	Yanma Entalpileri (Perry ve Chilton, 1973).....	65
Çizelge 7.4	Akışkan yatakta kullanılabilen kömür ve kimyasal özellikleri.....	74
Çizelge 8.1.	Yatak Yüksekliğine göre Sıcaklık Değişimi Grafiği	76
Çizelge 8.2.	Aktif Yatak Bölgesi İçin Yatak Yüksekliğine Göre Sıcaklık Değişimi Grafiği	76
Çizelge 8.3.	Serbest Yatak Bölgesi İçin Yatak Yüksekliğine Göre Sıcaklık Değişimi Grafiği	77
Çizelge 8.4.	Yatak Yüksekliğine Göre Beslenen Hava İçindeki Bileşen Dağılımı	77
Çizelge 8.3.	Serbest Yatak Bölgesi İçin Yatak Yüksekliğine Göre Sıcaklık Değişimi	77
Çizelge 8.5.	Yatak Yüksekliğine Bağlı Işınım Isı Kaybı Grafiği	78
Çizelge 8.6.	Yatak Boyunca Entalpi Değişimi.....	78

ÖNSÖZ

Farklı fiziksel özelliğe sahip iki akışın karışımının modellenmesi isimli yüksek lisans tezi çalışmamın gerçekleşmesinde değerli katkılarını benden esirgemeyen tez danışmanım Yıldız Teknik Üniversitesi, Makine Fakültesi Dekanı Sn.Prof.Dr.Hasan A. Heperkan 'a , çalışmalarım süresince yaptığı yardımlarından dolayı Sn. Arş.Gör.Burak Olgun 'a , 1998 yılı deneysel çalışmalarında kullandığı deney şart ve çalışma kabulleriyle tez çalışmama ışık tutan Sn.Öğr.Gör.Dr.Handan Çubuk 'a ,baştan beri manevi desteğini eksik etmeyen ve daima yanımda bulunan başta annem olmak üzere tüm Aileme teşekkürü bir borç bilirim .



ÖZET

Linyitlerimizin, yüksek uçucu madde, yüksek kükürt içeriği, yüksek kül içeriği ve düşük ısıl kapasiteye sahip olması yakılacağı sistem tasarımında bazı sorunlara neden olmaktadır. Karşılaşılabilecek sorunların en düşük olacağı sistem akışkan yatak tasarımlarıdır. SO₂ yayılım miktarı yatağa kireçtaşı veya dolomit ilave edilerek kolayca ve etkili bir şekilde kontrol edilebilmektedir. Düşük kaliteli linyitlerin toplam enerjisinin %50 'ye yakını uçucu maddeden kaynaklanır. Uçucu madde yanması hem aktif hem de serbest bölgede gerçekleşebilir. Bu da ısı değiştirici yüzeylerin yerleşim yerini etkiler. Bu çalışmada yatak yüksekliğine bağlı olarak sıcaklık dağılımı ve uçucu madde çıkışının fonksiyonları ve kinetik halde yanma modellenmiş olup ısı transferleri ve entalpi değişimleri de hesaplanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Akışkan yatak, matematiksel modelleme, yanma, uçucu madde, yanma kinetiği.



ABSTRACT

Turkish lignites contain high volatile matter, high sulphur, and high ash and have low calorific values which cause several problems in the design of combustion systems. One of the best technologies available to minimize these existing difficulties is the fluidized bed combustion system. The quantity of SO₂ diffusion can be controlled in an easy and effective way by adding limestone or dolomite particles into the bed. Almost the 50% of the low quality lignites' energy comes from its volatile content. The combustion of the volatile matter can occur both in the free-zone and in the active zone. Therefore it effects the selection of the location of the heat exchange surfaces. In this study, a mathematical model has been developed which accounts for the heat transfer and enthalpy exchange with the dispersion of heat, the function of total volatile matter, and the kinetics of combustion.

Keywords: Fluidized bed, mathematical modeling, combustion, volatile matter, kinetic combustion.



1. GİRİŞ

1974 de ortaya çıkan dünya enerji bunalımı enerji konusunda yapılan çalışmaları büyük ölçüde artırmıştır. Bu çalışmalardan başlıcaları ;

- Varolan enerji sistemleri ve yeni kurulacak sistemler için enerji ekonomisi sağlayıcı önlemlerin araştırılması ve uygulanması,
- Yeni enerji kaynaklarının (jeotermal enerji, okyanus enerjisi, gel-git enerjisi gibi) araştırılması,
- Bilinen fakat henüz yaygın uygulanmayan sistemlerin uygulanmaya daha geniş ve etkin sokulması (ısı pompası, akışkan yataklı kazanlar, güneş enerjisi, rüzgar enerjisi gibi),

şeklinde özetlenebilmektedir.

Dünya enerji ihtiyacının dörtte birinden fazlası, elektrik üretiminin ise yaklaşık %40'ı kömürle karşılanmaktadır. Kömürün bilinen rezervlerinin 1990 yılı üretim verileri temel alındığında 200 yıldan fazla bir süre yeterli olacağı tahmin edilmektedir. Bu süre doğal gaz veya petrol için geçerli sürenin yaklaşık dört katıdır. Bu nedenlerle kömürün enerji ihtiyacındaki egemen durumu artarak devam etmektedir.

Enerji sıkıntısı hızla gelişmeyi ve sanayileşmeyi amaçlayan ülkemiz açısından da en önemli sorunlardan birini oluşturmaktadır. Ülkemizin enerji üretimindeki artış, enerji gereksinmesindeki artıştan çok düşüktür, istatistiklere göre enerji tüketimimizin % 45'i petrol ve petrol kökenli kaynaklardan karşılanmaktadır. Bu petrolün ise ancak % 15'i yerli olarak üretilmektedir, ülkemizin birincil enerji kaynakları incelenecek olursa taşkömürünün % 10 ve linyitin % 79 gibi paylara sahip oldukları görülür. Linyit ve taşkömürünün enerji üretimine katkıları ise bugün % 25-30 dolayında kalmaktadır. Bu durumda Türkiye'nin ekonomik gelişmesini sürdürebilmesi için kömür kaynaklarının enerji üretimindeki paylarının artırılması ve petrole bağımlılığın azaltılması gerekmektedir.

Enerji eldesi sırasındaki çevre kirliliği sorunu da son zamanlarda ciddi boyutlara ulaşmış ve çevreyi daha az kirleten yöntemlerin araştırılmasına öncelik verilmiştir. Çevre yönetmelikleri ve insan sağlığının korunması , kömürü yakmak için temiz kömür teknolojilerini gerektirmektedir. Günümüzde sanayinin yaygın kullandığı hareketli ızgaralı kömür kazanları ve elektrik üretiminde kullanılan pulvarize kömürlü kazanların belli başlı bazı işletme problemleri olmaktadır. Hareketli ızgaralı kazanlar, buhar üreterek prosesin ihtiyacını karşılasa da, bu sistemlerin yanma verimleri son derece düşüktür. İri kömür tanecikleri ızgara

üzerinde hareket ederken yeterince havaya maruz kalamadığı için yeterince yanmadan içerisinde %40-45 yanmamış karbon bulunduran kül olarak kazanı terk etmektedir.

Pulvarize kömür sistemine dayalı santrallerimizin önemli sorunu ise bu sistemler geliştirildikleri ülkelerin kaynaklarına uygun olarak kaliteli kömürü başarıyla yakabilmektedir.

Fakat kendi özgün kaynaklarımızı incelersek ;

Türk linyiti, kül, nem ve kükürt içeriği yüksek, kalori değeri düşük bir kömürdür. Bu, kömür külü erime noktası açısından son derece önemli bir noktadır. Yatak sıcaklığı 1000 C⁰ ' ye ulaştığı zaman, kömürün pulvarize edilmiş mikron boyutundaki tanecikleri, özellikle pulvarize kömür brülörlerinin yakın bölgesinde erimeye başlar. Bir tanecik eriyip ısı paketleri üzerine yapıştığı anda birçok kül tanesi büyük bir hızla su duvarları üzerine gelerek camsı bir tabakanın oluşmasına sebep olur. Bunun sonucu olarak yanma sonucu oluşan ısının aktarılması zorlaşır ve aynı miktar üretimin yapılabilmesi için sisteme beslenmesi gereken kömür miktarı artar. Bu artış, birim enerji üretimi için oluşan emisyonların da artmasına sebep olur. Bu nedenle linyitlerimizden temiz ve verimli enerji eldesi için en uygun teknoloji şu an için işletmede olan ve halen gelişimini sürdürmekte olan akışkan yatak teknolojisidir.

Çizelge 1.1 Türk linyitlerinin kül , nem ve kükürt içerikleri

Kül içeriği (%)	Rezervdeki pay (%)	Nem içeriği (%)	Rezervdeki pay (%)	Kükürt içeriği (%)	Rezervdeki pay (%)
10-15	1,54	0-10	0,89	0-1	3,7
15-20	2,19	10-20	14,25	1-2	68,29
20-25	52,37	20-30	14,21	2-3	14,11
25-30	19,03	30-40	13,21	3-4	5,86
> 30	24,87	> 40	57,44	> 4	8,04

olarak görülmektedir. Yani linyitlerimizin %96 sı fazla kül içermektedir. Kükürt içeriği %1 in

altında olan linyitlerimiz toplam rezervin %3,7 sini oluşturmaktadır. Amerika Birleşik Devletleri 'nin kabul edilebilir kükürt oranının %0,8 olduğu dikkate alınırsa Türk linyitlerinin %97 'si yüksek kükürtlü kömürler sınıfına girmektedir.

Linyit üretimi incelendiğinde ortalama %10,9 luk bir artışla 1975 yılında 9150 bin tondan 1992 yılında 48388 bin tona ulaşmış olduğu ve 1992 yılında bir önceki yıla göre %11,85 lik bir artış olduğu görülmektedir. İleriye dönük enerji dengemiz incelendiğinde enerji açısından dışa bağımlılığın artacağı görülmektedir.

Ülkemizde her yıl artan enerji ihtiyacının karşılanmasında önemli bir yeri olan linyitlerimizin, verimli bir şekilde yakılmaları için yanma veriminin iyileştirilmesi ve çevre sorunlarının çözümü gerekmektedir. Linyitlerimizin, düşük ısı kapasite, yüksek uçucu madde, yüksek kükürt içeriği ve yüksek kül oranına sahip olması yanma esnasında bazı sorunlarını da beraberinde getirmektedir. Düşük ısı kapasite, linyitin yakılacağı tasarımlarda bazı zorluklar getirmektedir. Yüksek uçucu madde oranı ısı transferi seçimini etkilemekte, yüksek kükürt içeriği ise atmosfere büyük miktarda SO₂ verme ve çevre kirliliğini artırma riskini getirmektedir. Yüksek kül oranı yanma verimini düşürmekte ve yakıcı tasarımını etkilemektedir. Bilim adamlarının yıllardır yapmış oldukları çalışmalarda bütün bu olumsuz etkenlerin meydana getireceği sorunları en az düzeye indirebilecek tasarımın akışkan yatak teknolojisi olduğu ortaya çıkmaktadır.

Diğer ülkelerin kömürlerine uygun olarak tasarlanmış ve geliştirilmiş olan akışkan yataklarda, farklı özelliklere sahip olan linyitlerimizi verimli bir şekilde yakmak mümkün olmamaktadır. Kullanılan kömürün özelliğine bağlı kalarak tasarlanmış akışkan yatak ile farklı kömürler verimli şekilde yakılamamaktadır. Yatakta kömür besleme, kül boşaltma ve ısı çekme bölgelerinin çok iyi belirlenmesi gerekmektedir. Dünya literatüründe incelenen linyitlerin arasında Türk linyitlerinin veya eş bileşimli linyitlerin verilerine pek rastlanamamaktadır. Elde edilen veriler daha ziyade yüksek kaliteli kömürlere ait olanlardır. Ülkemizin hemen hemen bütün bölgelerinde bulunan zengin linyit rezervleri yerli kaynaklarımız içerisinde önemli bir yere sahiptir. Bilinen linyit yataklarının en önemlilerini Afşin-Elbistan, Muğla, Tunçbilek, Seyitömer, Soma, Çan, Beypazarı, Sivas ve Erzurum havzaları oluşturmaktadır. Görünen 7,339 milyon ton toplam rezervin 3,357 milyon tonunu, 1100 kcal/kg ısı değere sahip Afşin-Elbistan linyitleri oluşturmaktadır. Yine yapılan araştırmalar sonucu linyitlerimizin %69 'u düşük ısı değere sahip olup, alt ısı değerleri 2000 kcal/kg ın altındadır.

2. YANMA VE YANMA SİSTEMLERİ

2.1 Yanma Olayı

Yakıt içindeki yanabilir bileşenlerin, havanın oksijeni ile reaksiyona girmesi yanma olayını oluşturmaktadır. Yanma esnasında ısı açığa çıkar. Tüm yakıtlar bileşiminde genellikle, yanabilir elementler olan , Karbon (C), Hidrojen (H) ve bunların bileşikleri, az miktarda kükürt (S) ve yanmayan bileşenler olan azot, su ve kül içerirler .

Yanma süreçlerinin büyük bir bölümünde gerekli oksijen havadan alınır, yanma incelenirken havanın hacimsel olarak %79 azot ve %21 oksijenden oluştuğu varsayılır. Bu bileşimde olan havanın molekül ağırlığı 28,851 olup; 1,00 mol oksijene karşılık 3,76 mol azot bulunur. Yakıt içinde bütün yanabilir bileşenler tam olarak oksitlenip, CO₂, H₂O, SO₂ vb. şeklindeki ürünlere dönüşürse yanma tam yanmadır. Tam yanma için gerekli olan minimum hava miktarına stoikiyometrik hava miktarı ve bu şekilde gerçekleşen yanmaya ise teorik yanma adı verilir. Eksik yanma enerji kaybı ile sonuçlandığından uygulamada yanmanın tam olarak gerçekleştirilmesine çalışılır. Bunun için de çoğunlukla teorik hava miktarından daha fazla havanın kullanılması zorunludur. Gerekenden fazla hava bir taraftan kayıpların artmasına, diğer taraftan da ocak boyutlarının aşırı büyümesine neden olduğu için hava fazlalığını belirli bir maksimum dolayında tutmak zorunluluğu vardır. Hava fazlalık katsayısı; yakıtın cinsine, yapısına, yakma düzeneğinin dizaynına göre değişik değerler alır .

2.2 Yakma Sistemleri ve Yakma Sistemlerinin Karşılaştırılması

Yakma sistemlerinden kaynaklanan partikül ve gaz biçimindeki (toz, CO, CO₂, SO₂, NO_x, C_mH_n, vb.) çeşitli kirletici emisyonlar; hava, toprak, su kirliliği gibi çevre sorunlarına neden olmaktadır. Yanma kayıplarının azaltılması, diğer bir ifadeyle yanma veriminin artırılması, yanmadan kaynaklanan CO, NO_x, is, duman, kurum biçimindeki partiküllerin (C_mH_n) ve yakıtın içerdiği kül, kükürt, azot'un neden olduğu yakıttan kaynaklanan toz, SO₂, NO_x biçimindeki emisyonların azaltılması ile yakıt ve işletme koşullarına bağlı olarak yanma mekanizmasının bilinmesini gerektirmektedir. Yanma mekanizmasının analizi ile sağlanacak teknik bilgiler, uygun yakma sistemi tasarımı, yanma kontrol sistemi oluşturulması, temiz ve verimli yanma ile ilgili yakıt, tasarım ve işletme standartlarının hazırlanmasında kullanılabilir.

Yakma sistemlerinin tasarımı, yakıtı yönelik olarak yapılmaktadır. Uygun tasarım ve işletme, yakıt ve yanma özelliklerinin bilinmesini ve bu özelliklerin yanma mekanizmasına olan etkilerinin analizini gerektirir.

Yakma sistemleri, yakıt tane büyüklüğüne ve yanma sırasında yakıt davranışına bağlı olarak

- yüzeyde (ızgarada) yakma,
 - hacimde yakma,
 - akışkanlaştırılmış ortamda (akışkan yatakta) yakma,
- olarak üç gruba ayrılabilir.

Çizelge 2.1 Yakma Sistemleri Karşılaştırılması, *=birim hacimden çekilen ısı enerji

Parametreler	Yakma sistemleri		
	Yüzeyde yakma	Akışkan ortamda	Hacimde yakma
Yakıtanebüyüklüğü artma			
Tane hareketi	Yüzeyde	Yoğun türbülanslı	Hacimde askıda
Uygulama	Eski	En yeni	Yeni
Yakıt	Kömür	Her türlü yakıt	Gaz,sıvı,toz kömür
Yakıt kapasitesi	Düşük	Orta	Yüksek
Yatırımmaliyeti(izolasyon)	Daha yüksek	Yüksek	Düşük
SO ₂ kontrolü	Çok sınırlı	Etken kontrol	Sınırlı
NO _x kontrolü	Çok sınırlı	Etken kontrol	Sınırlı
Partikül kontrolü	Çok sınırlı	Yüksek	
Isı depolama özelliği	Sınırlı	Çok yüksek	Sınırlı
Yakıt kontrolü	Sınırlı	İyi	Çok iyi
Isı transferi	Çok sınırlı	Çok yüksek	Sınırlı
Kütle transferi	Çok sınırlı	Çok yüksek	Sınırlı
Yatak sıcaklığı	Yüksek	En düşük	Yüksek
Yanma yoğunluğu*	Düşük	Yüksek	Daha yüksek
Yanma verimi	Düşük	Yüksek	Daha yüksek
Yatak ebatları	En büyük	Küçük	Büyük

3. AKIŞKAN YATAKTA YAKMA TEKNOLOJİSİ

3.1 Akışkan Yatakta Yakma Teknolojisinin Gelişimi

Akışkan yataklı reaktörlerin, kimya sanayinde birçok proste kullanımı daha eskilere dayanıyor olsa da, kömür yakan kazanlar olarak kullanılmasına 1970 li yıllardan sonra başlanmıştır. Akışkan yatakta yanma teknik olarak endüstriyel boyutlu buhar üretimi ve elektrik enerjisi üretiminde önemli bir yer edinmiştir.

Akışkan yataklara 1930'lu yıllar ve 1940'ların başında yönelen geniş çaplı araştırma ve geliştirme çalışmaları sonucunda akışkan yatakların katı-gaz teması gerektiren uygulamalardaki avantajların saptanması, ilk olarak benzin ve diğer petrol bazlı ürünlerin üretimi için akışkan katalitik yakıcının geliştirilmesini sağlamıştır. Bugün akışkan yataklar dünya çapında birçok endüstride çeşitli prosesler için kullanılmaktadır.

1960'ların başlarında, termik santrallerden kaynaklanan kükürt dioksit (SO_2) ve azot oksit (NO_x) emisyonlarının azaltılmasının gerektiği ve akışkan yatakta yakma prosesinin bu emisyonları azaltacağı düşüncesi, kömür yakan akışkan yataklı kazan geliştirme çabalarını başlatmıştır. Bu çalışmalar sonucunda 1970'li yıllarda büyük boyutlu kabarcıklı akışkan yataklı kazan teknolojisi geliştirildikten sonra 1980'lerde uygulamalar dolaşımli akışkan yataklı kazanlara yönelmiş ve o tarihten bugüne sayıları hızla artan başarılı santral uygulamaları gerçekleştirilmiştir. Akışkan yataklı yakma teknolojileri, sanayide sıcak su, buhar, kurutma amaçlı sıcak gaz (örn. Çimento sektöründe hammadde kurutma) elde edilmesinde kullanıldığı gibi santrallerde enerji elde edilmesinde de kullanılmaktadır.

Akışkan yatak, yatak malzemesi ile kömür parçacıklarının bulunduğu ve yanmanın büyük bir kısmının tamamlandığı yer olan aktif yatak ile yoğun fazın sona erdiği noktanın üstünde kalan ve yatak akışkanının sürükleyebildiği katı taneciklerin bulunduğu ve bazen yanmanın da devam ettiği serbest bölge den meydana gelmektedir (Kunii, Levenspiel, 1977).

Akışkan yataklar , kimya ve metalurji endüstrisinde sağladıkları yüksek ısı ve kütle transferi nedeniyle geniş bir kullanım alanına sahiptirler. Ayrıca yüksek kaliteli fosil yakıtların azlığı ve pahalılığı, yanma gazlarının atmosfere bırakılmadan önce hava kirliliğini azaltıcı yönde önlem alınması konusunda zorunlulukların getirilmesi akışkan yataklı yakma sistemlerine karşı ilginin artmasına neden olmuştur (Atakül et.al., 1993) .

3.2 Akışkan Yatak Prosesi

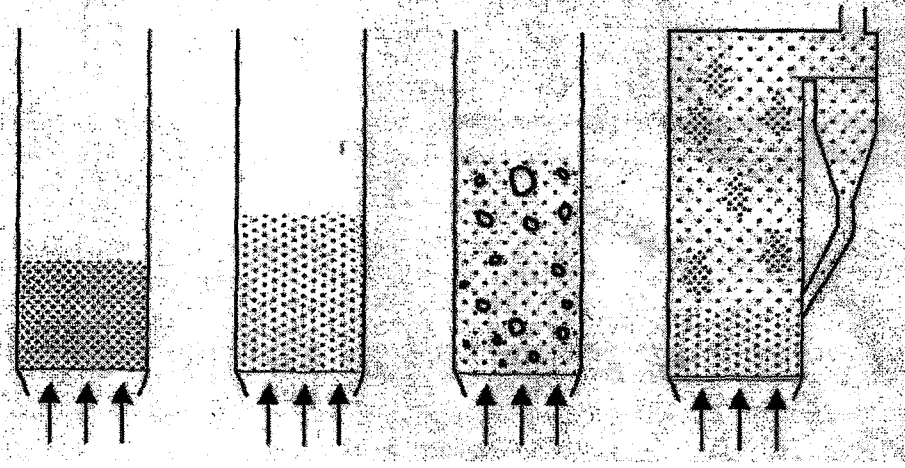
Bir kolon içinde yığılı durumda bulunan kömür taneciklerinin oluşturduğu yatak bölgesine

aşağıdan yukarıya doğru düşük hızda hava yada herhangi bir gaz akımı verildiğinde, bu hava kömür parçacıklarının arasından geçerek parçacıklar üzerinde fazla kuvvet uygulayamadan kendine boşluklar bularak yukarı doğru hareket eder. Bu durum parçacıkların hareket etmediği sabit yatak konumudur.

Aşağıdan yüksek basınçlı bir fan veya kompresör aracılığıyla yukarıya doğru beslenen akış hızı arttırıldıkça, beslenen hava kömür parçacıklarına daha fazla kuvvet uygulayarak parçacıkların arasındaki yerçekiminden kaynaklanan kuvvetleri azaltır. Hız daha da arttırıldığında parçacıkların üzerindeki kaldırma kuvveti yerçekimini dengeleyerek yukarı doğru akan havanın içinde parçacıkların asılı kalmalarını sağlar. Bu durumda yatağı oluşturan parçacıklar akışkan özellikleri sergilemeye başlamıştır ve bu durum **“minimum akışkanlaşma koşulu”**, bu koşulu sağlayan gaz hızı da **“minimum akışkanlaşma hızı”** olarak tanımlanmaktadır.

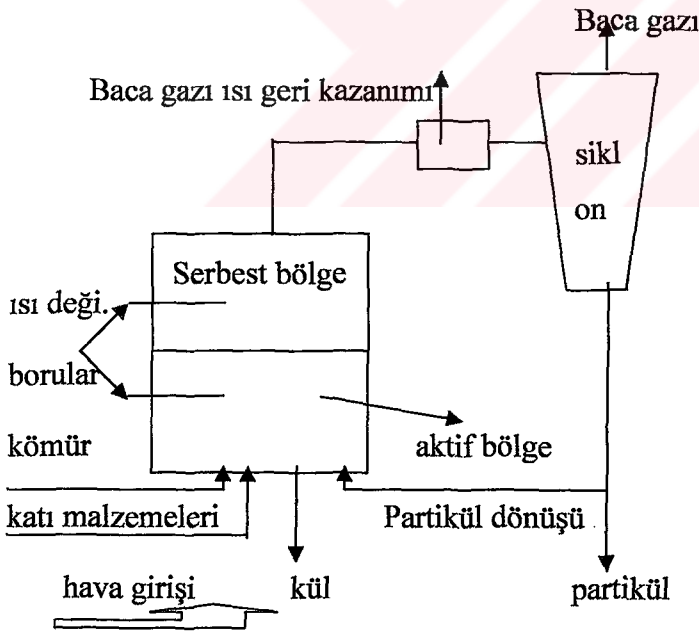
Bu konumda yatak bölgesinin kapladığı hacim fazla değişmemiştir. Gaz hızı daha da arttırılırsa ortamdaki basınç düşüşü birim kesitteki taneciklerin ağırlığına eşit olur ve tanecikler harekete başlar, yatak içinde hava kabarcıkları oluşur ve kabarcıklar yatağı suyun kaynamasına benzer bir şekilde terk eder. Bu konum **“kabarcıklı akışkan yatak”** olarak tanımlanmakta olup gaz-katı karışımının kapladığı hacim sabit yatak konumuna göre belirgin şekilde artmasına rağmen yatak bölgesi ile üzerinde bulunan serbest bölge arasında kolaylıkla ayırım yapılabilmekte ve gözle görülür bir yatak yüzeyi bulunmaktadır.

Gaz akışının daha da hızlandırılması durumunda, kabarcıklar daha da büyüyecek ve birleşerek yatakta daha büyük boşluklar oluşturacaktır. **“Türbülanslı akışkan yatak”** olarak adlandırılan bu konumda, katılar yüksek katı derişimine sahip birbirine bağlı gruplar halinde bulunurlar. Bu durumda yatak, şiddetli kaynayan sıvı görünümündedir ve sıvının birçok özelliğini taşımaktadır. Katı parçacıklara böyle bir yatak içinde akışkan özellik kazandırılmasına **“akışkanlaştırma”** denir. Eğer gaz akışı ile hareket eden katılar, havadan ayrıştırılarak yatağa geri döndürülürse parçacıklar bir döngüde dolaşmaya başlayacaktır. **Dolaşımli akışkan yatak** olarak tanımlanan bu tür sistemlerde, altta bulunan yoğun yataktan daha yukarıda bulunan seyreltik bölgeye doğru katı derişimi gittikçe düşse de kabarcıklı sistemlerin aksine iki bölge arasında belirgin bir geçiş bulunmamaktadır. Geri döndürülen katıların ağırlığı sistemden akan havanın ağırlığının yüzlerce katı olabilirken bu durum yataktaki katıların ağırlığının yarattığı basınç farkının artmasına sebep olur.



Şekil 3.1 Sabit Yatak, Minimum Akışkanlaşma Konumu, Kabarcıklı ve Dolaşım Akışkan Yatak

Yanma odasındaki basınç farkı hava akışı ile değişmekte olup, minimum akışkanlaşma hızına ulaşılan dek hızın artmasıyla artar. Bu noktada katılar havada asılı kaldığı için karşılaşılan direnç sadece yataktaki katıların ağırlığına bağlıdır. Dolayısıyla katıların sistem dışına taşınmasına sebep olacak hıza erişilene kadar basınç farkı sabit kalacaktır ve bu noktadan sonra sistemden katıların kaçmasıyla toplam ağırlık düştüğü için basınç farkı azalacaktır.



Şekil 3.2 Bir Akışkan Yataklı Yakıcının Şematik Görünümü

Genel olarak, yatak başlangıçta 500°C 'ye kadar ön ısıtmaya tabi tutulur. Yakma havası dağıtıcı eleğin altından üflenirken sisteme kömür beslemekte (yatak bölgesinin herhangi bir yerinden) ve yatak sıcaklığı, yakıtın tutuşmasına bağlı olarak hızla yükselmektedir. Bu andan

itibaren ön ısıtma sistemi devre dışı bırakılmakta ve sıcaklık yükselmesini kontrol etmek için ısı değiştiriciler devreye alınmaktadır (Davidson et.al.1985). Açığa çıkan ısı aktif yatakta ve/veya serbest bölgede taşıyıcı akışkana aktarılmaktadır. Yatak malzemesi olarak kum, kül, kireçtaşı veya dolomit gibi inert partiküller kullanılmaktadır (Ekinci v.ç.a.1981).

3.3 Akışkan Yataklı Kazanların Sınıflandırılması

Akışkan yataklı kazanlar çalışma basınçlarına göre üç gruba ayrılırlar :

- Atmosferik basınçta çalışan akışkan yataklı kazanlar
- Sirkülasyonlu akışkan yataklar
- Basınçlı akışkan yataklar

bu üç grubun özellikleri aşağıda özetlenmiştir

3.3.1 Atmosferik Basınçta Çalışan Akışkan Yataklı Kazanlar

Atmosferik basınçta çalışan akışkan yataklı kazanların yatak derinliği kapasiteye bağlı olarak genellikle 70-120 cm arasındadır. Yatak içinde gazın hızı 1,2-3 m/s dir. Bu hız minimum akışkanlaştırma hızından büyüktür. Yatak içindeki kabarcık kümeleri yukarıya doğru yükselirken türbülanslı bir ortam ve iyi bir karışım sağlarlar. Yatak malzemesi olarak, genellikle 500-1500 µm boyutunda kum veya külle işlemeye başlanır. Zamanla bunun bir kısmı oluşan yeni kül ve SO_x emisyonunu önlemek için katılan kireçtaşı veya dolomit gibi maddelerle yer değiştirir. Kullanılabilecek maksimum kömür çapı yaklaşık 25 mm dir. Yatak içerisine yerleştirilen boruların yüzey alanı 6-10 m² / m³ yatak hacmi civarındadır. Elde edilen ısı transfer katsayıları 300-500 W/m²K arasındadır. Isı akışı; yakıt ve hava miktarları değiştirilerek yatak sıcaklığının değişimiyle veya aktif yatak içerisinde kalan ısı transfer boru sayısının veya yüzey alanının yüzeylerinin yatak yüksekliği değiştirilerek ayarlanmasıyla düzenlenebilir. Sığ yatak tipinde yatak derinliği 0,15-0,3 m; gaz hızı ise 2-2,5 m/s 'dir.

3.3.2 Sirkülasyonlu Akışkan Yataklı Kazanlar

Sirkülasyonlu akışkan yataklı kazanlarda yatak içindeki gazın hızı 3-10 m/s arasında değişebilir. Yüksek hava hızı ve yüksek hızdan dolayı oluşabilecek erozyon nedeniyle yatak içine ısı değiştirici borular yerleştirilemez. Isı transferi yan duvarlara yerleştirilen borular ile yapılmaktadır. Kabarcıklı yataktaki gibi bir yatak yüzeyi tanımlamak mümkün değildir. Katı tanecikler tüm yanma hacmini doldurur ve yanma gazı ile kazandan dışarıya siklonlara doğru taşınır. Siklonlarda baca gazından ayrılan tanecikler geri dönüş borusuyla yatağa gönderilir. Sirkülasyonun sürekliliğinden dolayı yanmamış karbon taneciklerinin kaçması çok daha

düşük seviyelerde olmaktadır. Birim alandan elde edilen ısı güç $4,5 \text{ MW/m}^2$ civarındadır. Kabarcıklı akışkan yatakta bu değer $1,3 \text{ MW/m}^2$ dir.

3.3.3 Basınçlı Akışkan Yataklı Kazanlar

Basınçlı akışkan yataklı kazanlarda yatak derinliği 1,5-3 m arasında değişebilir. Hava hızı 0,9-1,5 m/s civarındadır. Kabarcıklı ve sirkülasyonlu olarak yapılabilir. 5 atm ila 20 atm aralığında bir basınç altında yandığı için buhar üretiminin yanı sıra gaz türbinlerine beslenebilecek basınca sahip yanma gazı elde edilir. Proses buharı ve buhar türbinlerinden elektrik elde edilmesine ek olarak gaz türbininden de elektrik elde ediliyor olması basınçlı sistemleri atmosferik çalışan akışkan yataklara göre daha verimli kılar . Ancak basınçlı sistemlerde sıcak gazın temizlenmesi çok önemli bir noktadır ki, eğer kazanı terk eden sıcak gaz siklonlar ve filtreler aracılığıyla parçacıklardan iyice arındırılmazsa ve korozyona yol açan gazlar bulunduruyorsa, gaz türbininin kanatlarının zarar görmesi kaçınılmazdır. Bu sebeple, sıcak gazların temizlenmesi üzerine yapılan araştırmalar, verimi yüksek bu tesisleri sorunsuzca uygulanabilir kılmak adına büyük önem teşkil etmektedir.

Basınç altında reaksiyonların gerçekleşiyor olması yanmaya olumlu etki ederken kükürt tutma verimini de artırır. Hem kabarcıklı hem de dolaşimli sistemler basınçlı olarak tasarlanabilse de daha yaygın olan kabarcıklı akışkan yatakların basınçlı uygulamalarıdır. Basınçlı dolaşimli akışkan yatakların ise geliştirme amacıyla kurulmuş üniteler üzerinde yapılan çalışmalarla uygulamaya geçilmesine çalışılmaktadır. Ayrıca bu tip yataklı kazanlarda azot oksit emisyonu daha az olmaktadır.

3.4 Akışkan Yatak Teknolojisinin Avantajları

Akışkan yatakta yakma teknolojisinin ilk geliştirilme sebebi olan kükürt dioksit ve azot oksit emisyonlarının düşürülmesi, yatak içine kireçtaşı ilavesi ile kükürt dioksitin tutulması ve düşük yanma sıcaklıklarında azot oksit oluşumunun azalmasıyla, ilave gaz arıtma tesisi gerektirmeden sağlanabilmiştir. Daha sonra yapılan çalışmalar, bu teknolojinin pratikte diğer teknolojilerle değerlendirilmesi mümkün olmayan düşük kaliteli yakıtları yakabileceğini göstermiştir. Ayrıca, akışkan yataklı kazanlar, kaynağa göre büyük farklılıklar gösteren kömür bileşimindeki değişikliklere karşı da daha esnektir. Özellikle düşük yanma sıcaklığı ve yatak içinde gerçekleşen mükemmel katı – gaz karışımı, akışkan yataklı kazanlara bir çok avantaj sağlamaktadır.

▪ Yüksek Yanma Verimi Ve Yüksek Isı Transfer Katsayısı

Akışkan yataklı kazanlarda mükemmel katı-gaz karışımının sağlanması ve parçacıkların

yatakta kalış süresinin uzunluğu nedeniyle yüksek yanma verimi elde edilmektedir. Yanma verimi kazanı terk den parçaların tutularak sisteme geri gönderilmesi ile daha da artırılır. Bunlara ilaveten yatak içerisinde ısı transfer katsayısı çok yüksek olduğu için ısı transfer yüzey alanları ve dolayısıyla kazan boyutları konvansiyonel kazanlara göre daha küçüktür ve daha az yatırım maliyeti gerektirir.

- Yakıt hazırlama kolaylığı

İri tane boyutu nedeniyle pulvarize kömür tesislerine nazaran daha düşük yatırım maliyetine sahip yakıt hazırlama tesisleri kurulmaktadır. Özellikle yüksek küllü kömürlerde, pulvarize yakıt hazırlama sistemleri sıklıkla bakım gerektirmektedir. Dolayısıyla, akışkan yataklı kazanlar için 12 mm nin altına kırılan yakıtı hazırlamak daha kolay ve ucuzdur .

- İşletme problemlerinin azlığı

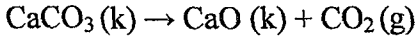
Özellikle erime ve yapışma ihtimali olan kül erime noktası düşük yakıtların akışkan yataklı kazanlarda yakılması durumunda erime noktasının altında sıcaklıklarda çalışıldığı için, ısı transfer yüzeylerine kül yapışması sonucu oluşacak birçok kazan işletme sorununa rastlanmaz. Dolayısıyla, akışkan yataklı kazanlarda % 90 civarı istenilen performans yakalanabilmektedir.

- Yakıt bileşimine esneklik

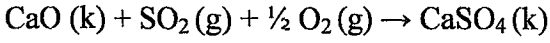
Yatak malzemesinin yüksek ısıl kapasitesi sayesinde, yakıtın yatağa girdiğinde anında ısınması ve parçacıklara yanma için uzun süre sağlanması, akışkan yataklarda düşük ısıl değerli yakıtların- bile rahatlıkla yakılabildiğini sağlamaktadır. Aynı sebeplerden akışkan yataklı kazanlar, kül ve kükürtçe zengin yakıtların değerlendirilmesine ve düşük kaliteli ikinci yakıtlarla beraber yakma işlemine uygundur. Ayrıca akışkan yataklı kazanlar, çok daha geniş bir yelpazedeki yakıt bileşimini yakabilecek şekilde tasarlanabilir. Yakıt bileşimine esneklik konusunda dolaşımli akışkan yataklı kazanlar, kabarcıklı sistemlerden daha başarılıdır.

- Düşük NO_x ve SO₂ emisyonları

Kükürt dioksit, özellikle asit yağmurlarına yol açması, dolayısıyla havada ve suda asit birikimi oluşturması sebebiyle önemle üzerinde durulan emisyonlardan biridir. Yanma sırasında, yakıtın bünyesinde bulunan kükürdün oksitlenmesiyle kükürt dioksit oluşurken, akışkan yataklı kazanlarda yatak bölgesine kireçtaşı beslenerek bu kükürt dioksit tutulur. Kireçtaşı yatağa beslendiği anda sıcaklığın etkisiyle endotermik kalsinasyonu reaksiyonu gerçekleşir ;



Kalsiyum oksit oluştuğunda ise kükürt dioksit ve oksijen gazları ile reaksiyona girerek katı fazda kalsiyum sülfat oluşturur ;



Oluşan kükürt dioksitin katı faza geçmesiyle, yatak malzemesi yada uçucu kül ile beraber sistem dışına taşınarak ortadan kaldırılacak katı atık haline gelir. Kalsiyum oksitten, kalsiyum sülfat oluşumunun gerçekleştiği yukarıdaki reaksiyonla ilgili olarak; kalsiyum sülfatın, akışkan yataklı kazanlara özgü düşük çalışma sıcaklıklarında kimyasal olarak kararlı olduğu için, katı fazda ve bozunmadan kazandan dışarı alınabildiği unutulmamalıdır.

Yanma veriminin artırılmasına ilaveten, yukarıdaki reaksiyon zincirinden en yüksek kükürt tutma verimini alabilmek için, kazanı terk edip siklonda tutulan katı parçacıkların, kabarcıklı sistemlerde küçük bir kısmı, dolaşımılılarda ise çok büyük kısmı, reaksiyonların devamı için kazana geri gönderilir. Geri gönderme işlemiyle, katıların gazla teması için daha çok süre, reaksiyon için ise daha çok yüzey alanı oluşturulduğu düşünülürse, dolaşımılı akışkan yataklı kazanlar, yanma veriminde olduğu gibi kükürt tutma veriminde de kabarcıklı akışkan yataklı kazanlara göre daha üstündür.

Azot oksitler, çevreyle etkileşimleri açısından kükürt oksitlerden çok daha geniş kapsamda etkileri olan gazlardır. Tüm çeşitlerin tanımlanması için NO_x formülü ile ifade edilen azot oksitlerin, asit yağmuru, yer seviyesinde ozon oluşumu, atmosferin üst seviyelerinde ozon tabakasının incilmesi, sera gazı etkisi ve fotokimyasal sis oluşumunda yer almasıyla çevre üzerinde belirgin etkileri vardır. Bu gazların yanma sonucunda oluşması için iki kaynak vardır ; yakıttaki azot ve yanma için beslenen havadaki atmosferik azot. Atmosferik azotun özellikle yüksek sıcaklıklarda oksijenle reaksiyona girmesinin sonucunda oluşan ısıl – azot oksit, çok daha düşük işletme sıcaklığına sahip akışkan yataklı kazanlarda kayda değer miktarda oluşmamaktadır. Yakıt kaynaklı azot oksitlerin oluşumu ise değişik mekanizmaların beraber ilerlediği reaksiyonlarla gerçekleşir. Akışkan yataklı yakıcılarda azot oksit emisyonlarının azaltılması için kademeli hava beslemesi yapılarak, sisteme verilen havanın bir kısmı alttan, geri kalanı da yatak üstünde çeşitli noktalardan beslenir. Bu uygulama ile indirgenen atmosfer oluşturulması azotun oksitlenerek azot oksite dönüşmesini engeller. Sonuç olarak da; düşük yanma sıcaklığı (750 – 900 ° C) sayesinde düşük miktarda ısıl NO_x oluşumu ve yakıcının içinde kireçtaşı ile SO_2 nin tutulması sayesinde ilave baca gazı arıtma tesisleri olmaksızın akışkan yataklı kazanlardan yönetmeliklerle belirlenmiş olan sınırların altında emisyonlar elde

edilir.

▪ Kullanılabilir kül

Akışkan yataklı kazanlarda yakma işlemi sonucunda elde edilen ve depolanabilir külün değişik kullanım alanları bulunmakta yeni kullanım sahaları için de araştırmalar sürdürülmektedir. Tarıma elverişli toprak eldesi olarak, kazanda oluşan kül tarımda kullanılan kireç ve bitkiler için bazı önemli besinleri yaptığı görevlerin büyük bir bölümünü yerine getirebilen bir yan üründür. Endüstriyel kullanım, taş ocağı ve madencilik çalışmaları gibi sebeplerden bozunmaya uğramış toprak yapısının tekrar kazanılması için de akışkan yatak külleri kullanılmaktadır. Küller çimento benzeri bir yapıya sahip olduğu için ihtiyaca uygun olarak düşük dayanımlı yada katkı yapılarak yüksek dayanımlı dolgu malzemesi olarak kullanılabilir. Küller ayrıca endüstri arazilerinin geri kazanımında ve sıvı atıkların nötralize ve stabilize edilmesinde kullanılmaktadır. Çimento benzeri yapısıyla sıvı atıkların katılaştırılması için kullanılırken bazı katılarla sıvı atıkların etrafa sızıntısını engelleyerek endüstriyel arazilerin ıslah edilmesinde önemli rol alır. Şehir katı atıklarının depolandığı yerlerde kül suya karıştırılarak günlük olarak atıkların üstünün kapatılmasında kullanılır. Bazı katılarla beraber atıkların üzerine püskürtülmesinde kabuksu bir tabaka oluşturarak çöp atıklarının üzerlerini örtmektedir.

İnşaat endüstrisinde ise çimento üretiminin bir parçası olan klinker eldesinde kullanılan bazı çeşitlerin üretiminde de temel malzeme olarak değerlendirilebilmektedir. Ayrıca akışkan yatak külü yapısal dolgu malzemesi olarak kullanılabilir. Uygulama olarak külün, kazılabilir dolgu, boru yatağı, yapısal dolgu, yol taban malzemesi, kazık dolgu ve maden çukurlarının kapatılması için kullanıldığı görülmektedir. Kendiliğinden sertleşebilme özelliğiyle akışkan yatak külü kullanılarak normal topraktan daha yüksek mukavemet elde edilir. Akışkan özelliği sayesinde ulaşılması zor noktalara döküldüğünde yüksek sıkışma mukavemetine ulaşır, ayrıca ileri bir zamanda çıkarılması gerekirse kazılarak uzaklaştırılması betondan daha kolaydır.

Kanalizasyon atıklarının işlenmesinde, pastörizasyon ve alkali stabilizasyon için kullanılır. Kül ayrıca patolojik birçok bakterinin elenmesi için de uygun özelliğe sahiptir. Bu işlemler sonucu elde edilen az kokulu toprak arazi ıslahı ve çöp sahalarının kapatılması için uygundur. Külde bulunan kireç asidik sıvı atıklarının nötralize edildiği çeşitli işlemlerde kullanılabilir. Akışkan yatak külü birçok sıvı atığın katılaştırılmasında kullanılmaktadır. Sıvı emme özelliği ve çimento benzeri yapı işlem için uygundur. Külün kokuyu azaltma etkisi de görülmektedir.

3.5 Akışkan Yatak Teknolojisinin Dezavantajları

- İşletme masraflarının ve ek masrafların artması

Akışkan yatak tasarımında kömür ve kireçtaşı hazırlama tesisleri, siklon tutucular, vantilatörler gibi önemli ilk yatırım ve işletme masrafları vardır. Ayrıca yataktaki basınç kaybı işletme masraflarını arttırır. Kül oranları yüksek ve yanma sonucunda tanecik boyutlarında küçülme olmayan kömürlerde kül, üstten yanma gazlarıyla sistemi terk etmez . Ayrıca kül boşaltma sistemi gerekir. Bu ise ek masraflara ve verim kaybına neden olur.

- Yatağın ısıl kapasitesinin yüksek olmasından dolayı yük kontrolü zor olabilir
- Tanecikler akışkanlaştırma esnasında yatak yüzeyi ve ısı taşıyıcı borulara çarparak korozyona sebep olabilir.

3.6 Bazı Akışkan Yataklı Kazan Tipleri

3.6.1 Kabarcıklı Akışkan Yataklı Kazanlar ve Kabarcıklı Akışkan Yatak Modeli

Kabarcıklı akışkan yataklı kazanlarda yakıcıya beslenen, kırıcılardan geçirilmiş yakıt ve kireçtaşı parçacıkları, alttaki dağıtıcı plakadan geçerek yanma odasına giren ve yukarı doğru akmakta olan hava akımında asılı kalırlar. Minimum akışkanlaşma koşullarını sağlayan gaz debisinin üstüne çıkıldıkça, yatak içerisinde kabarcıklar ortaya çıkmaya başlar. Kabarcıkların, taneciklerinin yatak içerisinde dolaşımının sağlanması ile katı taneciklerin kazan içerisinde mükemmel yakın bir şekilde taşınması mümkün olur. Bu kazanlarda katı-gaz karışımının gerçekleştiği yatak bölgesi ile yukarıda bulunan serbest bölge arasında kalan yatak yüzeyi oldukça belirgindir. Yanma sonucu oluşan kül, gazla beraber sürüklenir ve nispeten daha iri parçalar siklonda, ince tanelerde daha ileride bir elektrostatik yada torba filtrede tutulur. Siklonda tutulan uçucu külün gerekli görüldüğünde yatak bölgesine tekrar beslenmesiyle yanma ve kükürt tutma verimlerinin artması sağlanır.

Kabarcıklı akışkan yataklı kazanlarda, kazan borularının bir bölümü yanmanın gerçekleştiği yatak bölgesinin içine yerleştirilerek 800-900 C⁰ civarında sabit sıcaklık sağlanır. Kazanın diğer bölümlerinde uygun yerlere de baca gazlarının ısısından maksimum seviyede istifade edilecek şekilde kazan boruları yerleştirilir. Kabarcıklı akışkan yataklı kazanlar özellikle yüksek kapasitelerde uygulanmazlar, buralarda dolaşımli sistemler tercih edilmektedir.

Kabarcıklı Akışkan Yatak Modeli

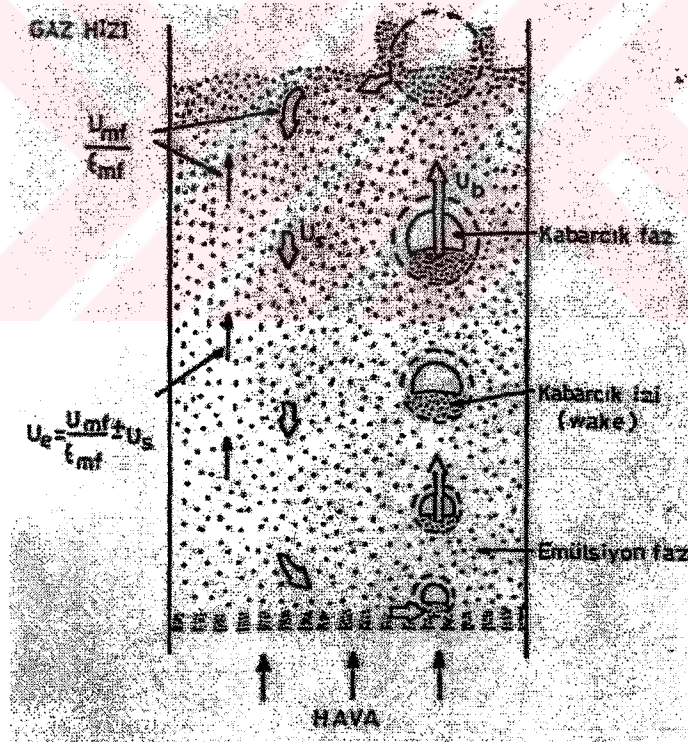
Akışkan yatak modeli 3 kısımda incelenir (Köse, 1995) ;

- yavaş kabarcıklı akışkan yatak modeli : emülsiyon ve kabarcık faz arasında

fark yok

- iki fazlı kabarcıklı yatak modeli : emülsiyon ve kabarcık faz olmak üzere iki ayrı faz vardır.
- Üç fazlı kabarcıklı yatak modeli : emülsiyon , kabarcık ve etrafındaki bulut (örtü) olmak üzere üç ayrı fazdan oluşur.

Bu zamana kadar yapılan model çalışmalarının çoğunun iki fazlı kabarcıklı yatak modeli üzerinde yapıldığı gözlenmiştir. İki fazlı kabarcıklı akışkan yatak modelinde, aktif bölge kabarcık ve emülsiyon faz olmak üzere iki ayrı fazdan oluşur. Yanmanın tamamlanması için yatağa gerekli miktarda giren hava iki ana akıma ayrılır. Bunlardan birincisi taneciklerden serbest olan kabarcık akımı diğeri ise interstial gaz akımıdır. Kok yanması ise sadece emülsiyon fazda gerçekleşmekte, yanma için gerekli O_2 nin bir kısmı ise kabarcıklardan emülsiyon faza doğru oksijen transferi ile karşılanmaktadır.



Şekil 3.3 Kabarcıklı Yatak Modelinde Gaz ve Tanecik Hareketi

Kabarcık fazı hakkında literatürdeki çalışmalar ;

Minimum akışkanlaştırma hızlarının üstündeki gaz hızlarında, yatağı akışkanlaştırmak için gerekli olan gaz miktarının fazlası, yaktan kabarcıklar halinde geçmeye başlar. Dağıtıcı eleğin hemen üzerinde oluşmaya başlayan gaz karacıkları, yatak boyunca bir yandan yükselirken diğer taraftan birleşerek daha büyük çaplı kabarcıklar meydana getirirler. Belli bir tane büyüklüğüne erişildiğinde kabarcık, parçalanarak irili ufaklı yeni kabarcıklar meydana getirir ve bu durum yatağın üst sınırına ulaşınca kadar devam eder. Bu akışa tıkaç akış (plug flow) denir. Kömür taneciği bir akışkan yatağa girdikten sonra kabarcık hareketinin bir neticesi olarak yatak yüzeyine doğru yükselir, başlangıçta yanından geçen bir kabarcık tarafından kaldırılınca kadar sabit kalır. Tanecik, kabarcık tarafından yatakta daha üstte sabit bir noktaya taşınırken aynı zamanda yana, aksel olarak da yer değiştirir. Kabarcığın hızı, tanecik yükselme hızından daha büyük olduğundan tanecik yükselmesinin sabit noktalar arasında ani olduğu kabul edilir (Stubington, Chan 1985). Kato ve Wen, kabarcıkların hareketinin daha iyi belirlenebilmesi için yatağın tüm yüksekliğinin belli sayıda kompartımana bölünmesi gerektiği görüşündedirler (Köse,1995) .

Kabarcıklar tanecikleri izlerinde yukarıya doğru taşınır. Bu konudaki ilk çalışmalardan birisi , Rowe ve Parridge tarafından yapılmıştır. Onlar kabarcık iz dağılımının, toplam küresel hacmin %25 ini kapsadığını, tanecik çapı azalmasıyla bu miktarın artma eğiliminde olduğunu ve tanecik şeklinin köşeli durumdan küresel duruma değiştiğini göstermişlerdir. Onların ölçümlerindeki kabarcık çapı 2-10 cm arasındadır.

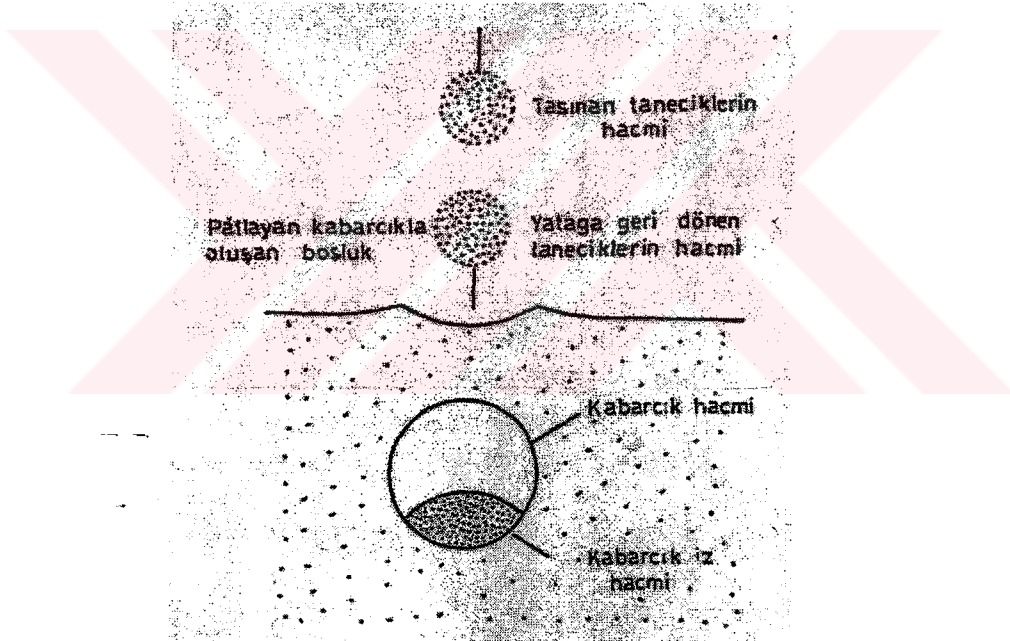
Rowe ve Widner ise hava ile akışkanlaştırılmış alümina yatakta, yatak malzemesi, yatak yüksekliği ve akış miktarının değişik kombinezonları için X ray fotoğrafını kullanarak 1867 kabarcığı incelemiştir. Sonuçta çapları 1-16 cm arasında değişen kabarcıklarda, kabarcık çapının büyümesiyle kabarcık izinin de orantılı olarak arttığını bulmuşlardır

Pereira ve Beer, yaptıkları deneylerde elde ettikleri oksijen konsantrasyonu veri setine dayanarak yanmanın büyük bir kısmının dağıtıcı elek yakınındaki bölgede oluştuğunu söylemektedirler. Bu bölgede kabarcıklar ya küçük ya da henüz şekillenmemiştir. Kabarcık yükselme hızına bağlı olarak iki ayrı kabarcık rejimi belirlenmektedir. Eğer kabarcığın yükselme hızı interstial gaz hızından büyük ise hızlı kabarcık, küçük ise yavaş kabarcık olarak tanımlanır. Yavaş kabarcık daha geniş taneciklerde ($d_p > 1 \text{ mm}$) oluşmaktadır. Hızlı kabarcık oluştuğunda, kabarcık fazından emülsiyon fazına oksijen transferi için önemli bir difüzyon direnci vardır. Yavaş kabarcık için bu direnç oldukça küçüktür.

Aktif yatak bölgesi kabarcığın yavaş veya hızlı olduğunu gösteren iki kısma ayrılıp incelenebilmektedir. Formüle etmek gerekirse ;

- a) yavaş kabarcık bölgesi $U_b < U_{mf} / T_{mf}$
 b) hızlı kabarcık bölgesi $U_b > U_{mf} / T_{mf}$

$U_b = U_{mf} / T_{mf}$ olduğunda bölgeler arasında geçiş oluşur . Geçiş bölgesinin dağıtıcı elekten itibaren 5 cm den daha az bir yüksekliğe sahip olduğu belirtilmektedir. Gerçekte ise 5 cm altındaki yüksekliklerde, ön kabarcık bölgesinde kabarcık henüz şekillenmemiş olacağından ve yatak taneciğe oksijen dağıtımını nedeniyle yavaş kabarcıklı yatağa daha yakın bir davranış göstereceğinden geçiş yüksekliği 5 cm olarak kabul edilir. Tanecikler, kabarcıkların hareketi ile yatağın hemen her tarafına ulaşmaktadır. Uçucu gazların tamamen yanması orada fazla oksijen olmasından dolayı kabarcık fazında olur. Emülsiyon fazda oksijen sınırlı olduğundan uçucular CO oluşumuna eğilim gösterirler.



Şekil 3.4 Kabarcık İzindeki Taneciklerin Serbest Bölgeye Fırlatılması

Emülsiyon Fazı :

Gönderilen akışkan hızından bağımsız olarak minimum akışkanlaşma koşulunda bulunan ve gaz tarafından akışkanlaştırılan taneciklerin bulunduğu fazdır.

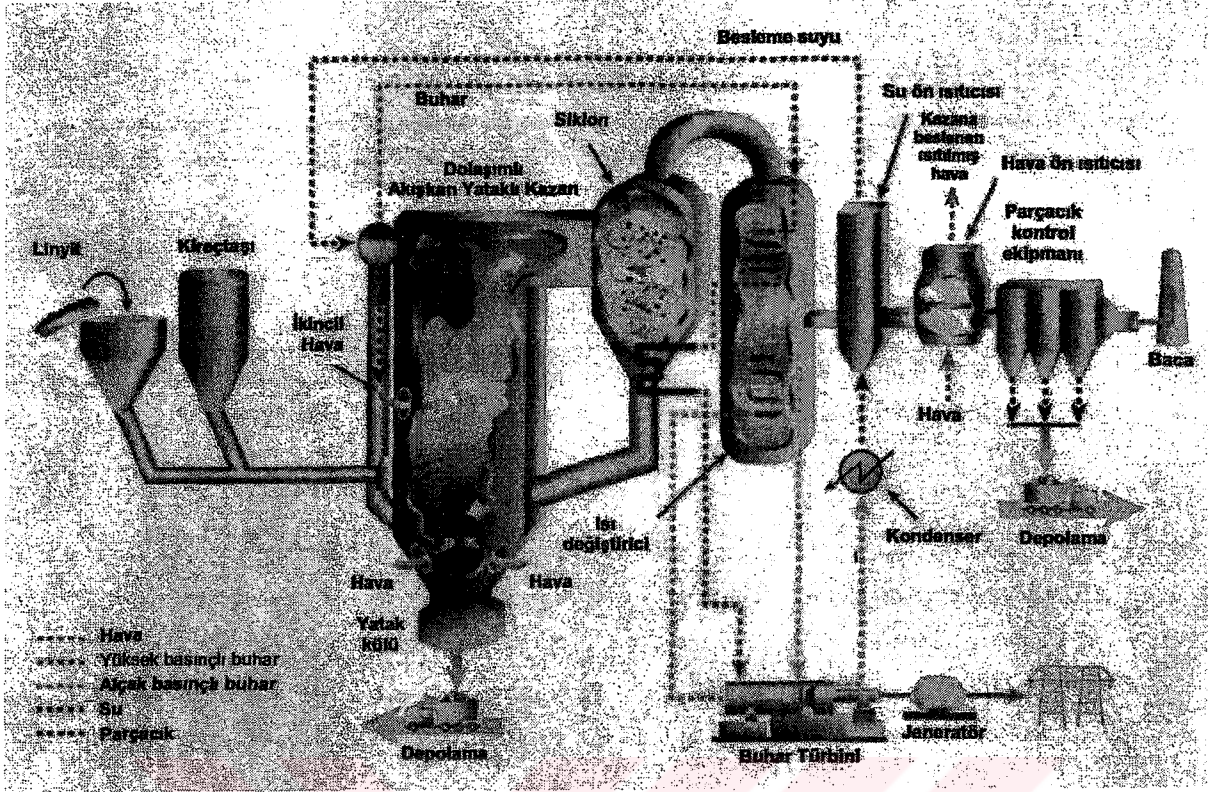
3.6.2 Dolaşımli Akışkan Yataklı Kazanlar

Dolaşımli akışkan yataklı kazanlarda, küçük tanecik boyutu ve yüksek gaz hızları sebebiyle

yatak serbest bölge ayrımı belirgin bir şekilde yapılamaz. Gaz hızları kabarcıklı sistemdekinin 2-3 katı fazla olduğu için parçacıkları rahatlıkla sürükleyerek tanecik yoğun ve seyrek bölgeleri ayıran belirli yüzeyin oluşması engellenir. Bu sistemlerde, yanma havasının kademeli olarak beslenmesiyle yanmanın tüm kazan boyunca sürmesi sağlanır. En alttan giren gaz miktarı toplam gaz miktarının %60-75 ini oluştururken geri kalan gaz daha yukarı seviyelerden ikincil gaz olarak sisteme verilir. Yanma 840-900 C⁰ da gerçekleşirken, ince tanecikler 4-6 m/s yanma gazı hızıyla yakıcının dışına taşınırlar. Bu parçacıklar genelde yanma odası çıkışına yerleştirilen siklon tarafından tutularak yanma odasına geri gönderilir. Böylece dolaşım gerçekleştirilmiş olur. Parçacık dolaşımı, parçacıkların ısısından maksimum yararlanarak yakıcı duvarına verimli ısı transferini ve kazanı terk eden parçacıkların geri dönmesi ile kömüre yanma, kireçtaşına da kükürt tutması için yakıcı içinde daha uzun kalma süresini sağlamış olur. Ayrıca geri döndürülen parçacık debisinin yanma gazı debisinden çok daha yüksek olması, yanma odası sıcaklığının stabil kalmasını sağlar. Yatağın içine yerleştirilmiş kazan boruları bulunmayan bu sistemlerde borular yanma odasının duvarlarına ve gaz yolu üzerine yerleştirilir. Kazan duvarındaki borular gereken ısıyı sistemden alırken, sıcaklığın da belirtilen düzeyle kalması için dengeyi sağlarlar.

Dolaşımli akışkan yataklı kazanlarda kullanılan kireçtaşı boyutu daha küçük olduğu için, birim ağırlık başına kireçtaşı yüzey alanının artması, kükürt dioksit – kireçtaşı reaksiyonunun da hızını artırır. Bu durum, kömürün yapısında bulunan birim kükürt karşılığında sisteme beslenmesi gereken kireçtaşı miktarını düşürmektedir. Bir başka deyişle, Ca/S molar oranı, teorik limit olan 1 e daha yakındır ki bu değere en çok yaklaşan akışkan yatak tipi dolaşımli sistemlerdir.

Dolaşımli sistemlerin bir başka avantajı ise kademeli hava beslemesi sayesinde yakıt kaynaklı azot oksit oluşumunun kabarcıklı sistemlere göre daha az oluşudur. Yanma için gerekli havanın tamamının alttan beslenmeyişi, yatak bölgesinde indirgeyen atmosfer oluşmasını ve yakıt bazlı azotun atmosferik azota indirgenmesini sağlamaktadır. Dolayısıyla, yüksek ısıdan kaynaklanan azot oksit oluşumunun da çok düşük olduğu dolaşımli akışkan yataklı kazanlarda , konvansiyonel sistemlerde bulunan herhangi ek bir tesis olmaksızın 200 mg/ Nm³ den daha az azot oksit emisyonları elde edilebilmektedir.



Şekil 3.5 Dolaşimli Akışkan Yataklı Kazana Dayalı Termik Santral Temsili Akım Şeması

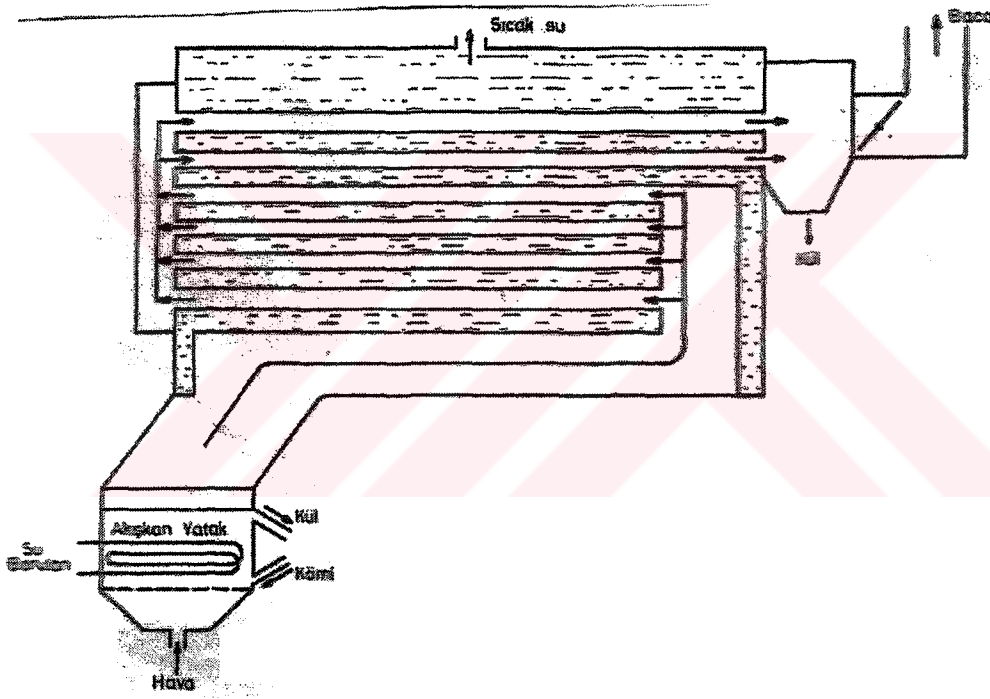
3.7 Türkiye’de Akışkan Yataklı Kazan Teknolojisi

Bu teknoloji birçok ülkede başarıyla uygulanmakta olup, ülkemiz linyitlerinin değerlendirilmesi ve doğal gazla yüksek oranda bağımlı kalmamak adına ülkemize ivedilikle adaptasyonunun gerekliliği ortaya çıkmaktadır. Bu gereksinimden hareketle 1975 yılında akışkan yataklı kazanların modellenmesi ile başlayan ve 1984 yılından bu yana pilot ölçekte deney ve tasarım geliştirme çalışmalarıyla devam eden araştırmalar ülkemiz üniversitelerinden biri tarafından, Kanada Uluslararası Teknoloji Geliştirme Ajansı'nın mali desteği ile yürütülmüş ve akışkan yataklı test ünitelerinin kurulmasıyla Türk linyitleri için know-how geliştirmeye yönelik atılımlar yapılmıştır.

Özel sektörden bu teknolojiyi kullanan örneklemeler yapılmak istenirse Dilovası bölgesinde Çolakoğlu A.Ş. ye ait dolaşimli akışkan yataklı tesis çalışmakta olup, Çan Termik Santralinde de yeni tamamlanan bir projeye alma çalışmaları tamamlanmak üzeredir. Burada iki adet dolaşimli akışkan yataklı kazandan oluşan sistem işletilecektir. Yine aynı bölgede demir çelik sektöründen İçdaş A.Ş.’nin de dolaşimli akışkan yataklı kazana dayalı elektrik santrali inşaatı devam etmektedir.

Akışkan yataklı kazanların belirtilen bütün avantajlarına rağmen Çan termik santrali dışında

Türkiye'deki bütün linyit santralleri pulvarize kömür teknolojisine dayalıdır. Ancak ülkemizde bu sistemin çalıştırılması, tasarım sıcaklığının linyit kül erime sıcaklığının üzerinde olmasından dolayı, işletme sıcaklığının tasarım değerinin altına düşürülmesiyle mümkün olmaktadır ki bu önlem verimin düşmesi anlamına gelmektedir. Mikron boyutundaki kül tanecikleri birbirinden farklı bileşime ve dolayısıyla da farklı erime sıcaklığına sahip oldukları için bu önlem bile külün eriyerek zaman içinde ısıtıcı paletleri üzerinde birikip kazan ısı veriminde büyük düşümlere sebep olmasını engelleyememektedir. Gün geçtikçe düşürülen gaz emisyon limitlerinin bir sonucu olarak pulvarize kömür tesisleri artık baca gazı desülfürizasyonu üniteleri ile birlikte inşa edilmekte, eski tesislere de bu üniteler sonradan ilave edilmektedir. Ek mali yük getiren bu tesislerin en büyük sorunu ise , fazla miktarda sulu katı atıktır.



Şekil 3.6 Akışkan Yataklı Kazanın Basit Şeması

4. AKIŞKANLAŞTIRMA PROSESİ VE BU PROSESTE KULLANILAN MATEMATİKSEL BAĞINTILAR

4.1 Akışkanlaştırma Ve Yanmada Kullanılan Boyutsuz Sayılar

4.1.1 Sherwood (Sh) Sayısı

Bu sayı taneciğinin yüzeyine oksijenin kütle transferini vermektedir. Bu aynı zamanda kok yanma hızını belirler .

$$Sh = \frac{k_g \times d_p}{D_G} \quad (4.1)$$

burada ;

kütle transfer katsayısı : k_g

kok taneciğinin çapı : d_p

gaz fazda moleküler difüzyon katsayısı : D_G

$$k_g = \frac{2 \times E}{d_p} \quad (4.2)$$

olmaktadır.

efektif difüzyon katsayısı : E

sonuçta ;

$$Sh = \frac{2E}{D_G} \quad (4.3)$$

olarak bulunmaktadır.

Bu zamana kadar yapılan çalışmalar incelendiğinde Sherwood sayısının yaklaşık olarak sabit bir değer aldığı söylenebilir ve bu değer yatak malzemesinden küçük tanecikler için yaklaşık değeri 2 dir. Kok taneciği kül/inert malzemedden büyük ise diğer bir ifadeyle yatak malzemesinden büyük tanecikler için Sh sayısı $2T_{mf}$ olarak hesaplanmaktadır.

Literatürden elde edilen Sherwood sayısı ile ilgili araştırmacıların bazı bulguları Çizelge 4.1 de yer almaktadır.

Çizelge 4.1 Sh Sayısı İçin Elde Edilen Bazı Korelasyonlar

Araştırmacılar	Sherwood sayısı için ifadeler	Açıklamalar
Avedesian & Davidson (1973)	$2 T_{mf}$	Sh=sabit
Gordon & Amundson (1976)	2	
Yagi&Kunii (1955) Leung&Smith Baron et al (1978)	$2 + 0,6 Re^{1/2} Sc^{1/3}$	
Congalidis&Georgakis (1981)	$2 + 0,6 (Re/ T_{mf})^{1/2} Sc^{1/3}$	
Howard&Chakraborty (1983)	$2 T_b + 0,69 Re^{1/2} Sc^{1/3}$	T_b = kabarcık boşluğu
Pillai (1981)	$\epsilon_{mf} (2 + 0,69 Re^{1/2} Sc^{1/3})$	$T_b = 0,7$
La Nauze & Jung (1982)	$2 T_b + 0,69 (Re/T_b)^{1/2} Sc^{1/3}$	
La Nauze (1985)	$2\epsilon_{mf} + 0,69(Re/T_{mf})^{1/2} Sc^{1/3}$	ϵ_{mf} = yatak boşluğu
Clift et al (Davidson et al 1985)	$2\epsilon_{mf} + 0,95Re^{1/2} Sc^{1/3}$	

4.1.2 Reynolds (Re) Sayısı

Bu sayı tanım olarak atalet kuvvetlerinin viskoz kuvvetlere oranı olup, yatak içindeki akışın karakterini gösterir. Aynı zamanda minimum akışkanlaştırma hızının belirlenmesinde önemli bir rol oynamaktadır.

$$Re = \frac{\text{atalet kuvvetleri}}{\text{viskoz kuvvetler}} \quad (4.4)$$

yani ;

$$Re = \frac{\rho_g d_p U_{mf}}{\mu \cdot \epsilon_{mf}} \quad (4.5)$$

ile ifade edilmektedir.

Çizelge 4.2 'de Flamant et al (1991) in çalışmalarından alınmış olup bu alanda 1984 senesinden sonra Re sayısı ile ilgili yapılan çalışmalar ve ilgili korelasyonlar detaylı olarak yer almaktadır.

Çizelge 4.2 Re Sayısı İle İlgili Bulunan Korelasyonlar

Araştırmacılar	Korelasyonlar	Açıklamalar
Thonglimp et al (1984)	$Re_{mf} = 7,54 \cdot 10^{-4} \cdot Ar^{0,98}$ $Re_{mf} = 1,95 \cdot 10^{-2} \cdot Ar^{0,66}$	$Re_{mf} < 30$ $Re_{mf} > 30$
Zheng et al (1985)	$Re_{mf} = [(18,75)^2 + 0,0313Ar]^{1/2} - 18,75$	$20 < T < 700^0 C$
Nakamura et al (1985)	$Re_{mf} = [(33,95)^2 + 0,046Ar]^{1/2} - 33,95$	$20 < T < 800^0 C$
Yang et al (1985)	$(Re^2 C_D)^{1/3}_{mf} = [f(Re/C_D)]^{1/3}_{mf}$	$T > 600^0 C$
Hartman&Svoboda(1986)	$Ar = \frac{A}{\epsilon_{mf}^3 \phi_s} Re^2 + \frac{B(1 - \epsilon_{mf})}{\epsilon_{mf} \phi_s^2} Re$ $B = 145$ ve $A = 1,053 + 6,503 \cdot 10^{-3} T$	$20 < T < 800^0 C$
Lucas et al (1986)	$Re_{mf} = [(29,5)^2 + 0,0357Ar]^{1/2} - 29,5$ $Re_{mf} = [(32,1)^2 + 0,0571Ar]^{0,66} - 32,1$	$0,8 < \phi < 1$ $0,5 < \phi < 0,8$ $T_{\text{çevre}}$

4.1.3 Nusselt (Nu) Sayısı

Nusselt sayısı yüzeyde taşınım yoluyla ısı geçişinin , iletim yoluyla ısı geçişine oranını vermektedir.

$$Nu = \frac{\text{taşıma yoluyla ısı geçişe}}{\text{iletim yoluyla ısı geçişe}} \quad (4.6)$$

Tanecik ile gaz arasındaki taşınım ile ısı transferinde, yüzey film katsayısı (h) etkili bir parametre olup akışkan özellikleri, akış ve sınır tabaka şartları ile direkt etkilenmektedir.

Zorlanmış taşınım ile olan ısı transferinin analizinde boyutsuz sayıların belirlenmesi gerekmektedir. Bunların genel ifadeleri ;

$$\text{Nu} , \text{Nusselt sayısı} = \frac{h \cdot d_p}{k} \quad (4.7)$$

$$\text{Sc} , \text{Schmidt sayısı} = \frac{\mu}{\rho_s D_G} \quad (4.8)$$

$$\text{Re} , \text{Reynolds sayısı} = \frac{\rho_g d_p U_{mf}}{\mu} \quad (4.9)$$

$$\text{Pr} , \text{Prandtl sayısı} = \frac{C_p \cdot \mu}{k} \quad (4.10)$$

Boyutsuz sayılar arasındaki ilişki şu şekilde tanımlanabilir :

$$\text{Nu} = f(\text{Re}, \text{Pr}) \quad (4.11)$$

$$\text{Nu} = W + X \text{Re}^Y \text{Pr}^Z \quad (4.12)$$

Burada ; W,X,Y,Z sabit sayılar olup bu zamana kadar yapılan çalışmalarda alınan değerler Benson (1987) un çalışması baz alınarak Çizelge 4.3 de yer almaktadır.

Çizelge 4.3 Nusselt Sayısı İçin Bulunan Sabitler (Benson 1987)

Araştırmacılar	W	X	Y	Z
Vyrubov (1923)		0,58	0,5	0,33
Buttner (1934)	2	0,80	0,5	
Frossling (1938)	2	0,552	0,52	0,33
Joukovski (1940)		0,61	0,5	
Lyakhovskii (1940)		0,61	0,5	
Johnston et al (1941)		0,714	0,5	0,5
Williams (1942)		0,37	0,6	0,33
Kramers (1946)	3,2	0,59	0,5	

Çizelge 4.3, devam

Ranz&Marshall (1952)	2	0,6	0,5	0,33
Tang et al (1953)	2,2	0,39	0,5	
Tang et al (1953)		1,05	0,36	
Mc Adams (1958)		0,37	0,6	
Kudrayashev (1959)	1	0,181	0,67	
Tsubouchi (1960)	2	0,5	0,5	
Yuge (1960)	2	0,493	0,5	
Bird et al (1960)		1,03	0,59	0,33
Beek (1962)		3,22	0,33	0,33
Rowe et al (1965)	2	0,69	0,5	0,33
Kubanek et al (1968)		0,188	0,76	0,33
Zhitkevich (1966)	2	4,12	0,31	
Littman&Sliva (1970)		0,89	0,41	
Vortmayer&Shaefer (1973)		1,75	0,49	0,33
Wakao et al (1979)	2	1,1	0,6	0,33

4.1.4 Archimedes (Ar) Sayısı

Akışkan yatağın işletme ve dizaynı için bilinmesi gereken boyutsuz bir sayıdır. Akışın karakterini Reynolds sayısı ile birlikte belirler . Aşağıdaki ifade ile tanımlanır :

$$Ar = \frac{\rho_g (\rho_p - \rho_g) \cdot g \cdot d_p^3}{\mu_g^2} \quad (4.13)$$

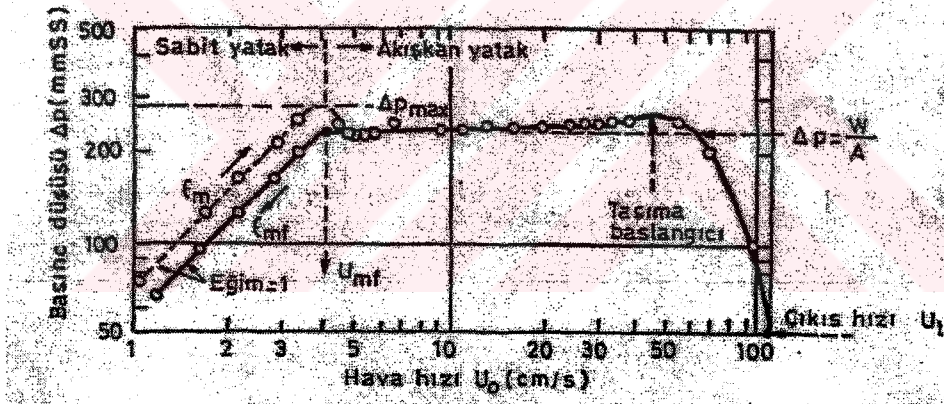
Diğer denklemlerle özetlenirse ;

$$Ar = \frac{\mu_g}{\rho_g^2} (\rho_p - \rho_g) \cdot g \cdot Re^3 \cdot \frac{\varepsilon_{mf}^3}{U_{mf}^3} \quad (4.14)$$

4.2 Minimum Akışkanlaştırma Hızı

Küçük katı taneciklerinden oluşan bir yatak içinde aşağıdan yukarıya doğru düşük hızlı bir akışkan, örneğin hava geçirildiğinde, hava hızı yavaş yavaş arttırılırsa, yatak boyunca görülen basınç düşüşü, hava akış hızı ile logaritmik olarak artar .

Hava; aşağıdan yukarıya doğru olan kaldırma kuvveti, yatağı oluşturan katı taneciklerin toplam ağırlığından doğan ve aşağıya doğru olan kuvvete eşit oluncaya kadar, tanecikler arasındaki boşluklardan geçer. Bu andan itibaren akışkan hızındaki artış katı taneciklerin hareket etmelerine, akışkan içinde asılı duruma gelmelerine neden olur ve yatak genişlemeye başlar. Bu durumda yatak minimum akışkanlaşma durumunda olup minimum akışkanlaşma hızı (U_{mf}) noktasına erişmiştir (Köse, 1995).



Şekil 4.1 Belirli Büyüklükteki Tanecikler İçin Basınç Düşüşü İle Gaz Hızı

Akışkan hızının arttırılmasına devam edilirse, akışkanın sıvı olması halinde, yatak genellikle düzgün bir genişleme gösterir ve kabarcıklaşma olmaz. Bu tür yataklar homojen akışkan veya sıvı akışkan yatak olarak adlandırılır. Akışkanın gaz olması durumunda ise hızın artması ile yatak yüksekliği fazla değişmemekle beraber yatakta kabarcıklaşma başlar. Bu tip yataklara heterojen veya kabarcıklı akışkan yatak denir. Kabarcıklar yukarı doğru birleşerek yükseldikleri ve üzerinde taşıdıkları katı tanecikleri alttakilerden ayırdıkları için verimin ve ısı transferinin azalmasına neden olurlar. Bu durum derin yataklarda daha açık görülmektedir. Kabarcıkların yatak üst yüzeyinde patlaması ile katı tanecikler şiddetle yukarıya doğru fırlatılırlar. Hava hızı arttırılmaya devam edilirse önce küçük, sonra iri tanecikler yataktan

dışarıya taşınırlar. Tanecikleri, dışarıya taşımaya başlayan akışkan hızına çıkış hızı, terminal hız U_t denir. Akışkanlaşmanın en önemli özelliği, yatağı oluşturan taneciklerin yerçekimi etkisinden kurtarılarak karasız bir hareket biçimine kavuşturulmasıdır. Akışkan hızının etkisi altında taneciklerin böyle bir harekete geçirebilmesi için yatağın yükselerek belirli bir boşluk değerine sahip olması ve akışkanın geçiş kesitini arttırması gerekmektedir. Minimum akışkanlaştırmanın gerçekleşmesi için gerekli olan bu boşluk değerine minimum boşluk oranı adı verilir. Bu oran aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$\varepsilon_{mf} = \frac{\text{toplam yatak boşluğu}}{\text{toplam yatak hacmi}} \quad (4.15)$$

Akışkan yataklarda akışkanlaştırmanın kalitesi, taneciklerin ve akışkanın özelliklerine, yatak geometrisine, akışkanın hızına, dağıtıcı eleğe ve yatak içindeki ısı değiştiricilerine bağlıdır. Bir akışkan yatakta akışkanlaştırma hızının değerlendirilmesinde tanecik şekil faktörü (küresellik) ve akışkanlaşma başlangıcındaki yatak boşluk oranı ε_{mf} özellikle önem taşımaktadır.

Şekil faktörü, taneciğin hacmine eşit hacme sahip kürenin yüzey alanının, taneciğin yüzey alanına oranı olarak verilmektedir.

Akışkan yataklı yakıcılarda taneciklerin küresel formda olduğunu kabul etmek problem çözümünü kolaylaştırdığı için yapılan çalışmalarda şekil faktörü dikkate alınmamaktadır. Gerçekte ise tanecikler küresel olmayıp değişik şekillere sahiptirler. Tanecik şekli, kullanılan öğütücü tipine ve kömürün fiziksel özelliklerine (kırılma gibi) bağlıdır. Yapılan araştırmalarda küresel taneciklerin yanma zamanının daha kısa olduğu görülmektedir.

Tanecik ve gaz özelliklerinden U_{mf} yi hesaplamak için sayısız denklemler mevcuttur. Bu denklemlerde kullanılan özellikler, tanecik ve gazın yoğunlukları (ρ_p, ρ_g), tanecik çapı (d_p), küresellik (ϕ) ve minimum akışkanlaştırma şartlarındaki boşluktur (ε_{mf}). Araştırmacıların büyük çoğunluğu ε_{mf} üzerindeki deneylerini oda sıcaklığında yapmışlardır. Bu zamana kadar sayısız korelasyonlar bulunmuş olup bunların çoğu Ergun un (1952) denklemini temel almıştır. Çeşitli çalışmalarda elde edilen denklemler Tablo II.5 de yer almaktadır. Minimum akışkanlaştırma hızı üzerine basınç ve sıcaklığın etkisini araştırmada genelde Ergun un denklemi kullanılmaktadır (1952). Bu denklem aşağıdaki şekilde de yazılabilmektedir.

$$\frac{\Delta P}{H_{mf}} = 150 \frac{(1 - \varepsilon_{mf})^2}{\varepsilon_{mf}^3} \frac{\mu_g U_{mf}}{(\phi \cdot d_p)^2} + 1,75 \frac{(1 - \varepsilon_{mf})}{\varepsilon_{mf}^3} \frac{\rho_g U_{mf}^2}{\phi \cdot d_p} \quad (4.16)$$

Minimum akışkanlaştırma hızındaki basınç düşümü ise ;

$$\frac{\Delta P}{H_{mf}} = (1 - \varepsilon_{mf}) \cdot (\rho_p - \rho_g) \cdot g \quad (4.17)$$

ile ifade edilmektedir.

Denklem boyutsuz Re ve Ar sayıları ile yeniden düzenlendiğinde ;

$$Ar = 150 A Re + 1,75 B Re^2 \quad (4.18)$$

$$A = \frac{1}{\varepsilon_{mf}^3 \cdot \phi} \quad (4.19)$$

$$B = \frac{1 - \varepsilon_{mf}}{\varepsilon_{mf}^3 \cdot \phi^2} \quad (4.20)$$

olarak ifade edilmektedir.

Şekil faktörü ve yatak boşluk oranını tahmin etmek oldukça zordur. Bunların bilindiği durumlarda Ergun (1952) denklemi oldukça doğru sonuçlar vermektedir. Wen ve Yu (1966) ise Ergun denklemini temel alarak şekil faktörü ve ε_{mf} arasındaki ilişki için A ve B katsayılarını veren denklem için $A \cong 14$ ve $B \cong 11$ olarak alınabileceğini söylemektedir. Denklem yeniden düzenlendiğinde ;

$$Re = \sqrt{K_1^2 + K_2 \cdot Ar} - K_1 \quad (4.21)$$

elde edilmektedir.

Buradaki katsayılar Çizelge 4.5 den alınmaktadır.

Akışkanlaştırıcı gazın viskozitesi, genelde basınç ve tanecik yoğunluğundan bağımsızdır. Küçük taneciklerin akışkanlaştırma hızları basınçtan pek etkilenmemekte, büyük veya yoğunluğu yüksek tanelerde ise basınç artışıyla taneciğin akışkanlaştırma hızı azalmaktadır (Köse, 1995).

Olowson ve Almstedt (1991), deneysel çalışmalarında oda sıcaklığındaki U_{mf} nin üzerine basıncın etkisini 3 değişik yatak malzemesiyle araştırmışlardır. Buldukları korelasyonları, hem Ergun hem de Wen ve Yu korelasyonlarıyla karşılaştırmış ve iyi sonuçlar almışlardır. Oda sıcaklığında, 0,1-1,6 MPa arasında basınçla yapılan çalışmada, malzemeler silika kumu olup ortalama tanecik çapları 0,31 – 0,70 – 0,98 mm ve parçacık yoğunluğu 2600 kg/m³ dür. Geldart'ın B ve D grubu yatak malzemeleri üzerinde yaptığı araştırmalarda ise artan basınçla minimum akışkanlaştırma hızının azaldığını görmüşlerdir.

Chitester et al (1984) ise yaptıkları çalışmada büyük taneciklerde artan basınçla U_{mf} in azaldığını gözlemlemişlerdir. Basıncın, U_{mf} üzerindeki etkisi büyük taneciklerde daha belirgindir. Minimum akışkanlaştırmada, emülsiyon faz boşluğunun küçük tanecikler için bağımsız olduğu, daha büyük taneciklerde ise basıncın artmasıyla ε_{mf} nin hafifçe arttığı gözlenmiştir.

Genelde yüksek sıcaklıklardaki akışkanlaştırma hakkında çok az şey bilinmektedir. Yatağın sıcaklığı değiştiğinde akışkanlaştırıcı akışkanın özelliklerindeki değişiklik açıkça gözlenir ki; U_{mf} etkilenmekte olup, sıcaklık yükselmesiyle gazın yoğunluğu azalmakta, viskozitesi artmaktadır.

U_{mf} üzerine çeşitli araştırmacıların yaptığı çalışmalar ve bulunan korelasyonlar Çizelge 4.4 de yer almaktadır.

Çizelge 4.4 U_{mf} Üzerine Yapılan Çalışmalar

Araştırmacılar	Korelasyonlar
Wen & Yu (1966)	$U_{mf} = B [(1135,7 + 0,0408 Ar)^{1/2} - 33,71]$
Davies & Richardson (1985)	$U_{mf} = B_1(7,8 \cdot 10^{-4})$
Leva et al (Wu, Baeyens 1991)	$U_{mf} = \frac{7,39 \cdot d_p^{1,82} \cdot (\rho_p - \rho_g)^{0,94}}{\rho_g^{0,06}}$
Goroshko et al (Wu, Baeyens 1991)	$U_{mf} = B \left[\frac{Ar}{1400 + 5,2\sqrt{Ar}} \right]$
Leva (Wu, Baeyens 1991)	$U_{mf} = \frac{7,169 \cdot 10^{-4} \cdot d_p^{1,82} \cdot (\rho_p - \rho_g)^{0,94} \cdot g}{\rho_g^{0,006} \cdot \mu_g^{0,88}}$
Bena (Wu, Baeyens 1991)	$U_{mf} = B \left[\frac{1,38 \cdot 10^{-3} \cdot Ar}{(Ar + 19)^{0,11}} \right]$

Çizelge 4.4, devam

Miller & Logwinuk (Adanez , Abadanes 1991)	$U_{mf} = \frac{0,00125.d_p^2(\rho_p - \rho_g)^{0,9} \rho_g^{0,1} .g}{\mu_g}$
Frantz (Adanez , Abadanes 1991)	$U_{mf} = B_1(1,065. 10^{-3})$
Baeyens & Geldart (Wu , Baeyens 1991)	$Ar = 1823 Re_{mf}^{1,07} + 21,27 Re_{mf}^2$
Pillai & Raja Rao (Wu , Baeyens 1991)	$U_{mf} = B_1(7,01. 10^{-4})$
Broadhurst & Becker (Adanez , Abadanes 1991)	$U_{mf} = B \left[\frac{Ar}{2,42.10^5 Ar^{0,85} (\rho_p / \rho_g)^{0,13} + 37,7} \right]^{0,5}$
Saxena & Vogel (Wu, Baeyens 1991)	$U_{mf} = B [(25,28^2 + 0,0571 Ar)^{1/2} - 25,28]$
Babu et al (Wu , Baeyens 1991)	$U_{mf} = B [(25,25^2 + 0,0651 Ar)^{1/2} - 25,25]$
Richardson & Da St.Jeromino (Wu, Baeyens 1991)	$U_{mf} = B [(25,7^2 + 0,0365Ar)^{1/2} - 25,7]$
Doichev & Akhmakov (Adanez , Abadanes 1991)	$U_{mf} = B(1,08. 10^{-3} Ar^{0,947})$
Thonglimp (Adanez , Abadanes 1991)	$U_{mf} = B [(31,6^2 + 0,0425Ar)^{1/2} - 31,6]$
Bourgeois & Grenier (Davidson et al 1985)	$U_{mf} = B [(25,462 + 0,03824Ar)^{1/2} - 25,46]$ $U_{mf} = B [(25,46(1+5,9 10^{-5}Ar)^{1/2} - 1]$

Çizelge 4.4, devam

Riba , Routie & Coudere (1978)	$U_{mf} = B [1,54 \cdot 10^{-2} \cdot Ga^{0,66} \cdot Mv^{0,7}]$
Horio & Wen (1978)	$U_{mf} = B [(33,7^2 + 0,0408Ar)^{1/2} - 33,7]$
Kunii & Levenspiel (1991)	$U_{mf} = B_1 [(\rho_p^2 \cdot \epsilon_{mf}^3) / (150(1 - \epsilon_{mf}))]$ $U_{mf} = d_p^2 (\rho_p - \rho_g) g / (1650 \mu_g)$
Grace (Yang et al , 1985)	$U_{mf} = B [(27,2^2 + 0,0408Ar)^{1/2} - 27,2]$
Chister et al , (1984)	$U_{mf} = B [(28,7^2 + 0,0494Ar)^{1/2} - 28,7]$
Zheng (1982)	$U_{mf} = B [(18,75^2 + 0,0313Ar)^{1/2} - 18,75]$
Nakamura et al (1985)	$U_{mf} = B [(29,5^2 + 0,0357Ar)^{1/2} - 29,5]$
Lucas (Flamant et al , 1991)	$U_{mf} = B [(29,5^2 + 0,0357Ar)^{1/2} - 29,5]$ $U_{mf} = B [(32,1^2 + 0,0571Ar)^{1/2} - 32,1]$ $U_{mf} = B [(25,2^2 + 0,0672Ar)^{1/2} - 25,2]$
Agarwal & O'Neill (1991)	$U_{mf} = B [(42,81^2 + 0,0610Ar)^{1/2} - 42,81]$
Adanez et al (1992)	$U_{mf} = B [(25,18^2 + 0,0373Ar)^{1/2} - 25,15]$
Ergun (1952)	$(1 - \epsilon_{mf})(\rho_p - \rho_g) \cdot g = 150 \frac{(1 - \epsilon_{mf})^2}{\epsilon_{mf}^3} \frac{\mu_g U_{mf}}{(\phi \cdot d_p)^2} + 1,75 \frac{(1 - \epsilon_{mf})}{\epsilon_{mf}^3} \frac{\rho_g U_{mf}^2}{\phi \cdot d_p}$
Ga	$\frac{d_p^3 \cdot \rho^2 \cdot g}{\mu_g^2}$
Mv	$\frac{\rho_p - \rho_g}{\rho_g}$

Çizelge 4.4, devam

Ar	$\frac{d_p^3 \cdot g \cdot (\rho_p - \rho_g)}{\mu_g^2}$
B	$\frac{\mu_g}{\rho_g d_p}$
B ₁	$\frac{\rho_p^2 \cdot g \cdot (\rho_p - \rho_g)}{\mu_g}$

Çizelge 4.5 Akışkanlaştırma Hızı İçin Kabul Edilen Sabitler

Araştırmacılar	Katsayılar	
	K ₁	K ₂
Wen & Yu (1966)	33,70	0,0408
Saxena & Vogel (Wu, Baeyens 1991)	25,28	0,0570
Babu et al (Wu, Baeyens 1991)	25,25	0,0650
Richardson & Da St. Jeromino (Wu, Baeyens 1991)	25,27	0,0365
Thonglimp (Adanez, Abadanes 1991)	31,60	0,0425
Bourgeois & Grenier (Riba et al, 1978)	25,46	0,03824
Horio & Wen (1978)	33,70	0,0408
Grace (Yang et al, 1985)	27,20	0,0408
Chister et al (1984)	28,70	0,0494

Çizelge 4.5, devam

Zheng ((Wu,Baeyens 1991)	18,75	0,0313
Nakamura et al (1985)	29,50	0,0357
Lucas (Flamant et al , 1991)	32,10	0,0571
	25,20	0,0672
Agarwal & O'Neill	42,81	0,0610
Adanez et al (1992)	25,18	0,0373

4.3 Kabarcık Boyutu ve Yükselme Hızı

Atmosferik basınçta, kabarcıklı bir yatakta kabarcığın yükselme hızı Davidson ve Harrison un (1963) verdiği denklemlerden hesaplanabilir.

$$U_b = U_0 - U_{mf} + 0,711 (g \cdot d_b)^{1/2} \quad (4.22)$$

$$d_b < (D_T / 3) \text{ ise ;} \quad (4.23)$$

$$U_b = U_0 - U_{mf} + 0,35 (g \cdot d_b)^{1/2} \quad (4.24)$$

Başlangıçtaki gaz hızı;

$$U_0 = U_{mf} / \epsilon_{mf} \quad (4.25)$$

denkleminde

$$\epsilon_{mf} = 0,4 \quad (4.26)$$

alınarak bulunabilir.

$$U_0 - U_{mf} < 0,711 (g \cdot d_b)^{1/2} \quad (4.27)$$

ise genelde

$$U_0 > 2 U_{mf} \quad (4.28)$$

kabul edilir.

Akışkan yatakta yanma prosesinin işletimi ve dizaynı için kabarcık boyutunun bilinmesi gereklidir. Yataktaki katıların sürüklenmesi; katı karışım kimyasal reaksiyonlarının seçimi ve dönüşümü ile yatak genişlemesi, kabarcık büyümesi ve boyutuyla etkilenmektedir.

Literatürde kabarcık boyutunun belirlenmesi için çok sayıda korelasyon bulunmaktadır. Bütün bu korelasyonlarda görüldüğü gibi kabarcık çapı d_b , işletme hızı ve U_{mf} arasındaki fark ile $(U_0 - U_{mf})$ orantılıdır.

$$d_b \propto (U_0 - U_{mf}) \text{ veya } d_b \propto U_0 / U_{mf} \quad (4.29)$$

Çizelge 4.6 da bu korelasyonlar yer almaktadır.

Yatak yeterli uzunlukta ise plug akış olabilir. Plug akışa geçiş için aşağıdaki kriter Stewart tarafından geliştirilmiştir. Stewart a göre plug akış için $h / D_T > 2$ olmalıdır. Yani ;

$$(U_0 - U_{mf}) / (0,35 (g \cdot D_T))^{1/2} > 0,2 \quad (4.30)$$

Addis et al (Davidson 1992) ise kabarcık çapı, yatak çapına eşit olduğu zaman plug akış olabilir demektedir. Deneylerinde,

$$U_0 - U_{mf} = 1,75 \text{ m/s} \quad (4.31)$$

$$D_T = 0,3 \text{ m} \quad (4.32)$$

değerini alarak aşağıdaki formülü çıkarmışlardır. Yapılan deneylerde yükseklik yatak çapından daha azdır.

plug akış için geçerli ifade ;

$$\frac{U_0 - U_{mf}}{0,35 \cdot \sqrt{g \cdot D_T}} = 1,25 \quad (4.33)$$

Bir diğer test de iki faz teorisinde yatak genişliğini gözlemektir. Buradaki miktar ise ;

$$\epsilon_b = \text{kabarcık hacmi} / \text{yatak hacmi} , \quad (4.34)$$

ile hesaplanır .

Yatak genişlemesi, kabarcık özelliğini tanımlamak için sık sık kullanılır. Bu özellikler, emülsiyon ve kabarcık faz arasındaki gaz dağılımı gibi, hız ve boyuttur (Köse , 1995).

4.3.1 Yatak Genişlemesi

Bu konu ısı değiştirici boruların yatak içine yerleştirilmesi için bilinmesi gereken önemli bir parametredir. İşletme hızı ile U_{mf} arasındaki farka, tanecik boyutuna ve yatak yüksekliğine bağlıdır. Gaz hızının artması demek, yatakta daha fazla kabarcık oluşması ve yatağın genişlemesi demektir. Bunun sonucunda artan hava hızı ile taneciklerin bir kısmı yataktan dışarıya taşınabilmektedir. Yatak genişliği için Babu et al (Bukur , Amundson 1981) aşağıdaki korelasyonu önermektedir.

$$\frac{H}{H_{mf}} = 1 + \frac{8,419(U_0 - U_{mf})^{0,738} \cdot d_p^{-1,006} \cdot \rho_p^{-0,376}}{U_{mf}^{0,937} \cdot \rho_g^{0,126}} \quad (4.35)$$

Akışkan yatak dizaynında aşağıdaki maddelere özen gösterilmesi gerekmektedir.

- Akışkanlaştırma hızına uygun tanecik ve inert malzeme çapının seçimi
- Seçilen fazla hava miktarına göre ısı değiştirici yüzeylerin hesabı
- Isı değiştiricilerin yerleştirileceği en iyi yeri belirlemek için yatak yüksekliğinin hesabı
- Gerekli yatak yüksekliğine izin veren statik yatak yüksekliğinin hesabı

Çizelge 4.6 Kabarcık Çapını Veren Korelasyonlar

Araştırmacılar	Korelasyonlar
Yasui et al (Mori, Wen 1975)	$d_b = 1,6 \rho_p d_p \left[\left(U_0 / U_{mf} \right) - 1 \right]^{0,63} \cdot z$
Whitehead et al (Mori, Wen 1975)	$d_b = 9,76 \left[U_0 / U_{mf} \right]^{0,33(0,032 \cdot z)^{0,54}}$
Kobayashi (Yates 1983)	$d_b = 1,4 \rho_p d_p \cdot (U_0 / U_{mf}) \cdot z$
Kato & Wen (Mori , Wen 1975)	$d_b = 0,14 \rho_p d_p \cdot (U_0 \cdot U_{mf}) \cdot z + d_{bo}$ $d_{bo} = \left[\frac{6(U_0 - U_{mf})}{\pi \cdot n} \right]^{0,4} \cdot g^{-0,2}$
Park et al (Mori , Wen 1975)	$d_b = 33,3 d_p^{1,5} \left[\left(U_0 / U_{mf} \right) - 1 \right]^{0,77} \cdot z$
Geldart (Bukur , Nasif 1985)	$d_b = d_{bo} + 2,05 (U_0 - U_{mf})^{0,94} \cdot z$
Geldart (Mori , Wen 1975)	$d_b = d_{bo} + 0,027 (U_0 - U_{mf})^{0,94} \cdot z$

Çizelge 4.6, devam

Chiba et al (Mori , Wen 1975)	$d_b = d_{bo1} + ((2^{7/6} - 1) (z - h_{bo}) / d_{bo1} + 1)^{2/7}$
Rowe et al (Mori , Wen 1975)	$d_b = -A + Bz + C (U_0 / U_{mf}) + Dz(U_0 / U_{mf}) + E(U_0 / U_{mf})^2$
Mori , Wen 1975	$d_b = d_{bm} - (d_{bm} - d_{bo}) \exp(-0,3.z / D_T)$ $d_{bm} = 0,652 [A_t (U_0 - U_{mf})]^{0,4}$ $d_{bo} = 0,347 [A_t (U_0 - U_{mf}) / (n_1 d)]^{0,4}$
Werther (Bukur , Nasif 1985)	$d_b = 0,00853 [1 + 27,2 (U_0 - U_{mf})]^{1/3} [1 + 6,84.z]^{1,21}$
Darton et al (Bukur , Nasif 1985)	$d_b = 1,3 (U_0 - U_{mf})^{0,4} (z + A^{1/2}_0)^{0,8} / g^{0,2}$ $d_b = 0,54 (U_0 - U_{mf})^{0,4} (z + A^{1/2}_0)^{0,8} / g^{0,2}$
Cranfield , Geldart (1974)	$d_{bm} = 0,0326 (U_0 - U_{mf})^{1,11} . z^{0,81}$
Choi et al (1988)	$d_b = \frac{1,787(U_0 - U_{mf})^{2/3} [h + 0,419.g^{1/2} . d_{bo}^{3/2} / (U_0 - U_{mf})]^{2/3}}{g^{1/3}}$
Horio , Nonaka (Shiau , Lin 1993)	$\frac{dd_b}{dz} = 0,3 . \frac{d_{bm} - d_b}{D_T} - \rho_p . d_b^{1/2}$
Eşdeğer kabarcık çapı (Shiau , Lin 1993)	$d_b = d_{bm} - (d_{bm} - d_{bo}) \exp(-0,15.h_{mf} / D_T)$

4.4 Katıların Karışımı

Yatak içindeki katı maddeleri ;

- Yatağa yakıcı olarak beslenen kömür
- SO₂ tutulmasında kullanılan kireçtaşı

- Yatak malzemesini teşkil eden kum
- Yanma sonucu açığa çıkan kül

oluşturmaktadır. Katıların karışım oranı, besleme noktasının pozisyonuna, akışkanlaştırma hızına, yatak derinliğine, yatak geometrisine ve yatağın iç dizaynına bağlıdır. Yoğun bölgeden (aktif yatak), serbest bölgeye kabarcığın parçalanması ile atılan bir grup katı tanecik ya akışkan ile taşınarak bacadan dışarı atılır ya da serbest bölge içinde belli bir yüksekliğe kadar yükselir ve yatağa geri döner. Ağırlık bazında, sıçrama bölgesinden yatağa düşen taneciklerin oranı serbest bölgede kalanların oranından daha büyüktür. Sıçrama bölgesi olarak yatağın maksimum ve minimum yükseklikleri arasındaki bölge alınabilir ve bu bölgeye düzensiz değişen yükseklik bölgesi denir. Akışkan yatakta gaz hızı minimum akışkanlaştırma hızının üzerine çıktığında, aktif yatakta tanecikler türbülanslı görünümde bir karışma hareketine başlarlar .

Adrial et al (Schutte, Wittler 1989) tarafından verilen ifadeye göre, katıların aksiyal karışım zamanı :

$$t_{kar.} = h / [(U_0 - U_{mf}) \cdot a] \quad (4.36)$$

$$t_{kar.} : \text{karışım zamanı} \quad (4.37)$$

$$h : \text{genişleyen yatak yüksekliği} \quad (4.38)$$

$$a : \text{kabarcık izinin kabarcık hacmine oranı} \quad (4.39)$$

Yapılan çalışmalar sonucu ;

Sıçrama bölgesinde üretilen ısının %70 inin katılar yoluyla yatağa geri döndüğü ve yatak yüzeyindeki kabarcıklardaki yakıt konsantrasyonunun yaklaşık %50 den büyük olması halinde yanmanın sıçrama bölgesinde tamamlanmasının mümkün olmayacağını ortaya çıkarılmıştır. Araştırmacılar, serbest bölge sıcaklığının beklenenin üzerine çıkmasını, serbest bölgede CO yanması olarak yorumlamaktadır.

Yatak yüzeyinde tanecik, parçalanmış kabarcığın hareketiyle, akışkan yatak yüzeyinde radyal olarak hareket edecektir. Üstten besleme işlemlerinde tanecik, hareketlerine yatak yüzeyinde başlar. Aşağıya inen inert partiküller, akışkan yatak cidarında tanecikleri aşağıya belli bir mesafeye kadar sürükleyecektir. Bu mesafe, kabarcık tarafından toplanıp yükselmenin yeniden başlayacağı yere kadardır. Tanecik, uçucudan ayrılma esnasında ve sonrasında bu belirlenmiş derinlik içerisinde yatak yüzeyi ile bir sirkülasyon yapacaktır. Genelde kabarcıklı akışkan yatakta katıların iyi karıştığı kabul edilir.

Katıların karışım zamanı ;

- Kömür beslemenin fiziksel ve kimyasal özelliklerine
- Yatak ve serbest bölgede açığa çıkan ısının dağılımına
- Yanma verimine

bağlı olup 10-50 s arasında değişir.



5. AKIŞKAN YATAKTA YANMA HAKKINDA LİTERATÜR ARAŞTIRMALARI

5.1 Kömürün Yanması

Kömür, verimli yakılması zor olan heterojen bir fosil yakıttır. Buna rağmen gelişmiş tekniklerle kömürü verimli ve çevreyi minimum kirletecek şekilde verimli yakmak mümkündür. Kömürün oksidasyonu, kömür tipi, boyutu, basıncı ve sıcaklık dağılımına bağlıdır.

Kömür uçucu madde ve sabit karbon olmak üzere iki yanıcı bileşenden oluşmakta olup, ısınma sonucu, karbonca zengin artık (char) ve hidrojenca zengin gazlar (uçucu maddeler) meydana gelir.

Kömür taneciği, kömürün ilk tutuşma sıcaklığından yüksek bir sıcaklıkta olan ve yanması için gerekli bol miktarda oksijen içeren bir hava akımı içerisine yerleştirilirse aşağıdaki olaylar meydana gelmektedir (Howard 1989).

- Kömür taneciğinin sıcaklığı tutuşma sıcaklığına kadar yükselir
- Kısa bir süre içerisinde uçucu madde oluşur ve kömür taneciğinin ötesinde yanar.
- Geriye kalan yanabilir madde (karbon ağırlıklı) kısmen yavaş bir şekilde oksitlenir ve ısı açığa çıkar, bu işlem kül kalıncaya kadar devam eder.

Isıtılmış yatağa bırakılan kömürde uçucu gazlar oluşmaya başlar. Yatakta oluşan bu işlem aşağıdaki şekilde ifade edilebilir ;



5.2 Uçucu Maddenin Oluşumu

Uçucu maddeyi oluşturan ana bileşenler ;

- CH₄,
- CO₂,
- CO,
- H₂,
- C₂H₄,
- Kimyasal su
- Hidrokarbonlardır.

Bu bileşenlerin miktarları kömür cinsine bağlı olarak farklılık gösterir ve çeşitli sıcaklık aralığında farklı miktarlarda açığa çıkarlar. Uçucu maddenin kömürden ayrılması ve yanması ; yatağın sıcaklık profili ile sıcak noktaların oluşmasında etkili olması nedeniyle önemlidir. Uçucu madde oluşumu yaklaşık 450⁰C den daha yüksek tanecik sıcaklığında başlar ve tamamlanması için 10 – 100 s zaman gerekir. Kömür taneciğinden kimyasal su ve CO₂ yaklaşık 100-180⁰C civarında ayrılır. Kömürdeki hidrojen ya oksijenle birleşerek su yada karbon ile birleşerek hidrokarbonları oluşturur. Sonuçta kimyasal su ve CO₂ erken olarak açığa çıkar. Hidrokarbon ve hidrojenin açığa çıkması ise daha uzun bir periyotta gerçekleşir.

Oksijen ve sıcaklık parametreleri uçucuların ayrılması ile etkilenir. Kalan kok ve oluşan uçucunun yanması , CO₂ ve CO nun değişik miktarlarının oranına bağlıdır (Köse,1995).

Kalan kokun yanması 100-2000 s arasında bir zaman alır. Bu değerler pülvarize yakıtlar için çok daha düşüktür. (0,1-1 s)

Uçucudan ayrılma işlemi, kömür taneciğinin şeklini ve yapısını etkileyebilir. Taneciklerden uçucunun ayrılması; tanecik boyut ve yoğunluğu, yatak malzemesi boyut ve yoğunluğu, kömür tipi, yatak sıcaklığı, nem miktarı ve yatak boşluğu gibi parametrelere bağlıdır.

Genel olarak; gözenek çapları daha büyük kömürlerde daha çok uçucu, daha kısa sürede açığa çıkar. Buna karşılık tanecik çapı küçüldükçe aktif yatak ile serbest bölge arasındaki sıcaklık farkı azalmakta ve uçucu daha kısa sürede çıkmaktadır. Oluşan uçucuların kabarcıkları, hava kabarcığı ile birlikte yükselir ve kabarcık fazda yanar. Yanma esnasında açığa çıkan toplam enerjinin büyük bir oranını kömürdeki uçucu dağılımını sağlar, bu ihmal edilemeyecek bir durumdur. Yine bu uçucular NO formasyonunda olduğu gibi CO emisyonuna da önemli miktarda yardım ederler.

Yapılan deneysel teorik çalışmalarda uçucudan ayrılma zamanları yarı ampirik ifadelerle verilmektedir. Borghi (1985), yaptığı deneylerde uçucu ayrılma zamanını 750⁰C de 11 s; 1050⁰C de 7 s olarak bulmuşlardır. Tanecikler tamamen karıştırıldığı zaman bu aralık 2-20 s arasındadır.

Howard (1989) a göre uçucuların gelişmesinin daha iyi anlaşılabilmesi için aşağıdaki noktalar dikkate alınmalıdır.

Uçucuların açığa çıkması, bir sıvının ısıtılmasında oluşan bir fiziksel buharlaşma işlemi değil , bir kimyasal reaksiyon sonucudur.

Ortaya çıkan uçucular, kömür ısıtıldığında meydana gelen ısıl bozunma gibi tersinmez kimyasal tepkimelerden oluşan hidrokarbon gazlarıdır.

- Uçucular kömür taneciklerinin içinden yüzeye doğru sızarak dışarı çıkarlar.
- Kimyasal reaksiyon ekzotermiktir.
- Uçucuların kömür taneciğini terk ettiğini gösteren açıkça belirlenmiş bir sıcaklık yoktur.
- Yanmalarını tamamlayamamış uçucular eğer fazla oksijen içeren bir yüksek sıcaklık bölgesinden geçerlerse yanmaları tamamlanır.
- Hidrokarbon gazları tanecik yüzeyinde veya etrafında tamamen yanmadığında , dumanlı sarı bir alev halinde gözükerek yüzeyde is olarak birikir.
- Uçucular , sıvı yakıt buharlarının yanmasına benzer bir şekilde katı madde yüzeyinin kısa bir mesafe ilerisinde bir alev şeklinde yanmaktadır. Bu alev tanecik yüzeyine ısı vererek uçucu madde çıkışının devamını sağlar ve uçucular bitene kadar devam eder.

Uçucu maddeyi meydana getiren gazların ağırlık oranları deneysel veri kullanılarak aşağıdaki bağıntılarla verilmiştir (Rajan, Wen 1980).

$$\text{CH}_4 = 0,201 - 0,469 \gamma_{\text{VM}} + 0,241 \gamma_{\text{VM}}^2 \quad (5.2)$$

$$\text{H}_2 = 0,157 - 0,868 \gamma_{\text{VM}} + 1,388 \gamma_{\text{VM}}^2 \quad (5.3)$$

$$\text{CO}_2 = 0,135 - 0,900 \gamma_{\text{VM}} + 1,906 \gamma_{\text{VM}}^2 \quad (5.4)$$

$$\text{CO} = 0,428 - 2,653 \gamma_{\text{VM}} + 4,845 \gamma_{\text{VM}}^2 \quad (5.5)$$

$$\text{H}_2\text{O} = 0,409 - 2,389 \gamma_{\text{VM}} - 4,554 \gamma_{\text{VM}}^2 \quad (5.6)$$

Emülsiyon fazda açığa çıkan uçucular, bu fazda bulunan oksijenle kontrol edilirler. Emülsiyon fazda oksijen konsantrasyonu düşük olduğu için kısmi yanma ile CO oluşmakta ve sonra kabarcık fazındaki fazla oksijenle yanma tamamlanarak CO₂ 'ye dönüşmektedir.

5.3 Uçucu Maddenin Yanması

Tanecikler; uçucunun yanma öncesi ve sonrasına göre iki ayrı davranışta bulunurlar. Tanecikler; uçucuların yanması esnasında yatağın üst kısmında birikme (toplanma), kok yanması esnasında ise yatak içinde erime eğilimindedirler. Bugüne kadar yapılan çalışmalarda uçucuların yanması ve açığa çıkması henüz tam olarak anlaşılamamıştır. Araştırmacıların çoğu, taneciklerin emülsiyon fazda yandığını kabul eder. Açığa çıkan uçucular emülsiyon faza doğru tanecik yüzeyinde oksijenle temas eder ve hemen yanar (Agarwal,1987).

Isıl verimin yüksek olması için uçucu maddenin hepsinin yatakta yanması arzu edilir.

Kömürden ayrılan uçucu maddenin yanmasını, gaz fazında kokdan daha hızlı ilerlediği için, kömür besleme noktasına yakın bölgede tamamladığı kabul edilir.

Uçucuların yatakta yanmamaları durumunda, serbest bölgede yandığı ve bu bölgenin sıcaklığını yükselttiği görüşü geçerli olmakla birlikte aşağıdaki haller istisna olarak geçerli olamamaktadır.

Düşük yatak sıcaklığında, uçucuların yanma oranı karışımın miktarıyla etkilenmeyebilir.

Serbest bölgedeki sıcaklık yükselmesi, yataktan sıçratma bölgesine atılan ve yatağa geri dönen katılar tarafından önlenir.

Günümüze kadar yapılan modellerin çoğunda uçucu maddenin yanması ihmal edilmekte, bazı modellerde ise dağıtıcı plakaya yakın veya emülsiyon faza doğru olduğu kabul edilmektedir.

Yanan uçucu maddeler ısı değerini yaklaşık %40-45 ini oluşturmaktadır.(kömürün yatağa beslenme şekline bağlı olarak) Bu da akışkan taşıyıcı ısı transferini sağlayan boruların yatak içine yerleştirilmesini etkileyen bir faktördür.

Çok küçük taneciklerde uçucudan ayrılma zamanı tanecik çapından bağımsızdır. Uçucu maddenin yanma zamanı; yatak sıcaklığına, akışkanlaştırma hızına, tanecik çapına ve cinsine bağlıdır. Çoğu sonuçlar, uçucuların yatağın alt kısımlarında ayrıldığını göstermektedir. Yatak sıcaklığının artması ile yanma zamanı azalmaktadır. Uçucu yanma zamanını veren ifade ;

$$t_b = \frac{M_{VM}}{0,061.T_b C_0} \left(\frac{1800}{T_b} \right)^{0,75} \left[R_b^2 - \left(\frac{d_p}{2} \right)^2 \right] \quad (5.7)$$

yapılan kabul:

Uçucular yanma zamanı esnasında üniform olarak açığa çıkar ve yanar .

5.4 Kok Yanması

Kok taneciğinin yanması için dış yüzeyine mutlaka oksijen gelmelidir. Oksijen karbon yüzeyine vardığında karbonla reaksiyona girmeden önce gözeneklere difüze olur. Difüzyon miktarı; gözenekli yapıya, tanecik çapına, karbonun doğal reaktivitesine ve sıcaklığa bağlıdır. Kok taneciğinin yüzeyindeki oksijen konsantrasyonu, emülsiyon fazda kütle transfer oranına ve kabarcık ile emülsiyon faz arasındaki havanın değişim oranına bağlıdır. Yanma süreci aşağıdaki gibi özetlenmiştir ;

- Tanecik, yatak sıcaklığının altında kalmak üzere belirli bir sıcaklığa kadar ısınır. Rengi yatak ortamına göre koyu olan tanecik, yaklaşık 3 s kadar devam eden bu

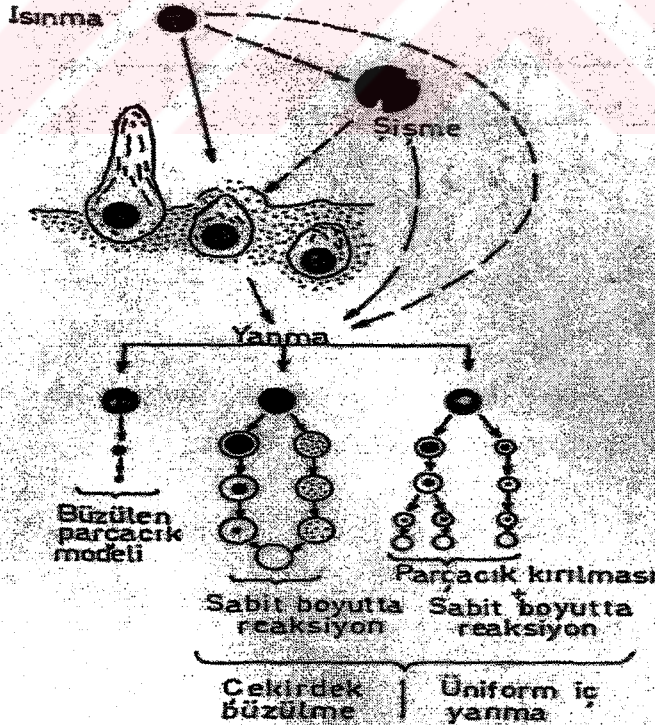
sürede kömür çeşidine bağlı olarak şişebilir.

- Uçucu maddelerin ayrılması ve yanmaya başlaması ile tanecik çevresinde alev halkaları oluşur, bu yatak malzemelerinin düşey yöndeki hareketini azaltır. Düşük uçuculu kömürler veya koklarda bu süre çok kısadır.
- Uçucu madde çıkışı biten taneciğin düşey yöndeki hareketi hızlanır. Yüzeye oksijenin difüze olduğu bu zaman esnasında, küçük bir reaksiyon olduğu kabul edilir.
- Tanecik sıcaklığı hızla artarak ortam sıcaklığını aşar .

Beslenen kömür özelliklerine bağlı olarak, fazla hava oranına, yatak malzemesi boyutuna, akışkanlaştırma hızına göre yanma aşağıdaki şekillerden biriyle sürer;

- Yanmaya paralel olarak tanecik çapı da devamlı küçülür,
- Yanma devam eder ancak tanecik çapında önemli bir değişiklik olmaz,
- Tanecik boyutu yanma süresince sabit kalmasına karşın zaman zaman daha küçük taneciklere bölünür.

Bu süreç oluşan yeni taneciklerin aynı davranışı tekrarlayarak yanmaya devam etmesi ve karbonun tükenmesine kadar devam etmektedir.



Şekil 5.1 Akışkan Yatakta Kömürün Yanması

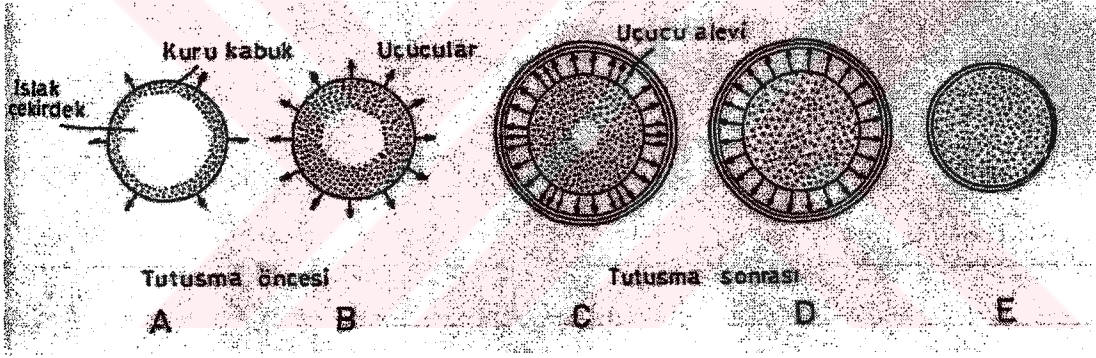
5.5 Tanecik Yanması

Yanma sisteminde yanma mekanizmasını iki önemli nokta belirler;

- Kok taneciğinin yüzeyindeki yanma ürünlerinin ne olduğu,
- O₂ ve CO₂ gazlarından hangisinin yüzeye öncelikle difüze ettiği,

Akışkan yatakta kömürün yanma mekanizması oldukça karışıktır. Kömürün yanması; kömür taneciklerinin içine atıldığı inert maddelerle karışması, uçucu maddelerin çıkışı, uçucu maddelerin yanması ve kokun yanması şeklindedir. Kömür yanmasında en önemli konu kok taneciğinin tutuşmasıdır. Genelde, daha çok uçucuya sahip büyük taneciklerde, uçucu koka göre daha kolay tutuşur. Bu olaya homojen tutuşma denir. Küçük tanecikler ve çok hızlı ısınma oranlarında, kömür yüzeyi uçuculardan daha kolay tutuşabilir. Bu olaya da heterojen tutuşma denir.

Kömür çeşidinden etkilenmeyen reaksiyonlar kok yüzeyinde gerçekleşmekte olup, aşağıda yer almaktadır.



Şekil 5.2 Büyük Kömür Taneciklerin Homojen Yanmasında Takip Edilen Adımlar

Şekil 5.2. de yer alan numaralandırma aşağıdaki şekilde temsil edilmektedir.

A: Kuruma işleminin başlaması

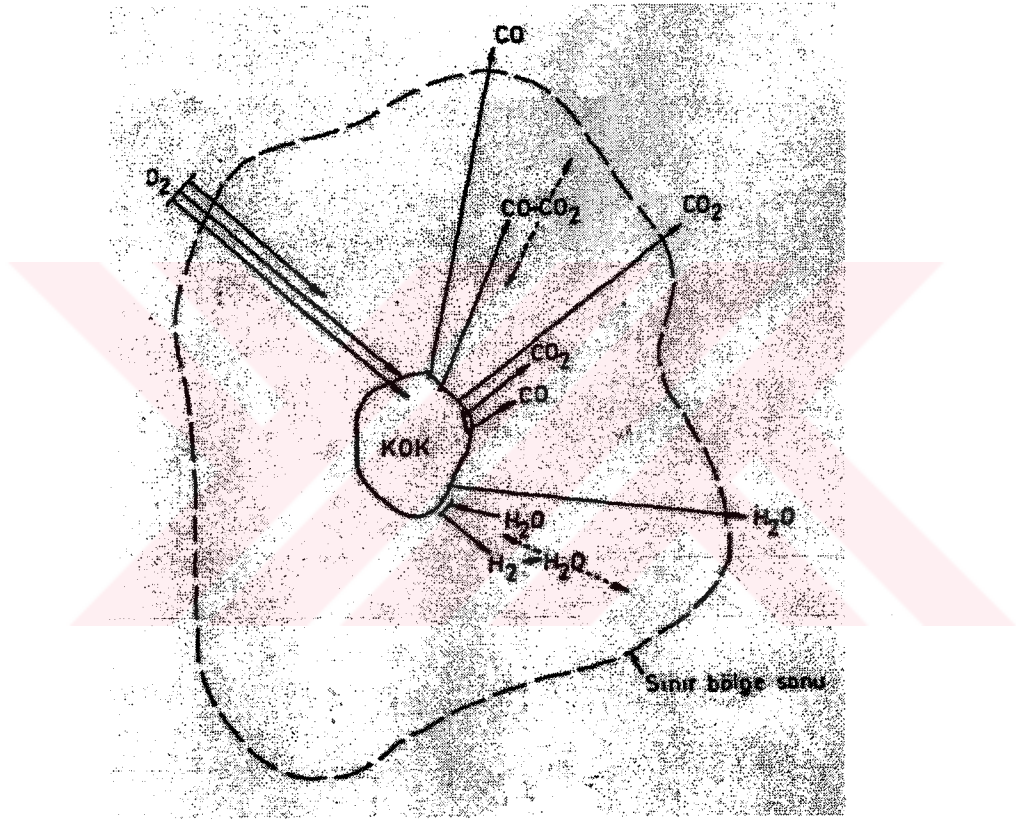
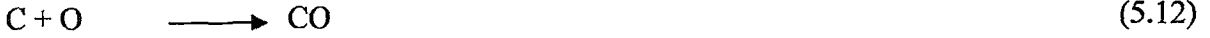
B: Kuruma işlemi devam ediyor, uçucu ayrılması başladı

C: Kuruma işlemi tamamlandı, uçucu ayrılması ve yanması devam ediyor

D: Uçucu ayrılması ve yanması devam ediyor

E: Uçucu ayrılması ve yanma işlemi tamamlandı, geriye kalan kok tutuşmaya başladı





Şekil 5.3 Yanan Kok Taneciği Üzerindeki Reaksiyonlar

Tanecik yüzeyine havadan difüze eden oksijenin, kömürün sabit karbonu ile CO ve CO₂ formları için reaksiyona girdiği kabul edilir.

Kok kömür taneciği ve gazın tutuşma sıcaklığı ile tutuşma ifadelerinden aktivasyon enerjisi E elde edilir. Aktivasyon enerjisinin a,b,c reaksiyonları ile olan ilgisi oldukça farklıdır. Genelde ;E_c > E_a > E_b olmaktadır. Aktivasyon enerjisinin ortalama değerleri bu reaksiyonların oranlarına ve tanecik sıcaklığına bağlıdır. Araştırmalar sonucu olarak bu değer 108-175 kJ mol arasında değişmekte olduğu bulunmuştur. Aktivasyon enerjisi, tanecik sıcaklığının bir fonksiyonu olup sıcaklıkla artmaktadır.

Kok yanma modelinde ana kabul, karbon yüzeyine oksijen difüzyon miktarıyla yanma oranının kontrol edilebildiğidir (Davidson,1985). Ayrıca aşağıdaki yaklaşımlar da kullanılmıştır .

CO₂ ve O₂ nin kok tanesi yüzeyindeki molar konsantrasyonları sıfırdır. Reynolds ve Grashof sayıları küçük olduğu için doğal ve zorlanmış taşınım etkisi ihmal edilir. Böylece kimyasal reaksiyonlara bağlı olarak tanecik çapındaki değişimler konsantrasyon profili ve moleküler difüzyon işlemi yoluyla tanecik etrafında kütle transferi oluşturur.

Gaz difüzyon tabakasının kok tanesi yarıçapına eşit olduğu kabul edilir. (d_p/2).Burası birinci bölge olarak tanımlanmakta olup yüzeyinde CO yanar . Farklı gaz ürünleri için moleküler difüzyon katsayısının eşit olduğu kabul edilir. Tüm ürünlerin molar konsantrasyonu aşağıdaki denklemin çözümüyle elde edilir ;

$$\frac{1}{r^2} \frac{d}{dr} \left(r^2 \frac{dX}{dr} \right) = 0 \quad (5.15)$$

X : molar konsantrasyon

r : küresel partikülün merkezinden ölçülen radyal mesafe

sınır şartları

$$r = d_p / 2 \quad X(O_2) = X(CO_2) = 0 \quad (5.16)$$

$$r = d_p \quad X(O_2) = 0 \quad (5.17)$$

$$r = \infty \quad X(CO_2) = 0 \text{ ve } X(O_2) = X_p(O_2) \quad (5.18)$$

5.5.1 Tek Film Modeli

Karbon yüzeyi etrafında oksijenin difüzyonla oksidasyon meydana getirmesi ve orada CO ve CO₂ formu oluşturması tek film modeli adını almaktadır. Taneciklerin fazla ve sürekli bulunduğu emülsiyon fazda, yeterli oksijenin olmaması nedeniyle kok tanecikleri yanarak CO e indirgenir. Emülsiyon fazındaki CO, gaz alışverişi sonucu kabarcık fazına geçer ve fazla oksijenle yanarak CO₂ meydana getirir.



5.5.2 Çift Film Modeli

Karbon yüzeyine yakın homojen gaz fazındaki reaksiyonda oksidasyonun ilk ürünü olan CO in difüze olması ve yanmasıyla CO₂ ye dönüştürülmesi çift film modeli adını almaktadır. Oksijen taneciğe doğru difüze olur ve yüzeye ulaşmadan önce tüketildiği varsayılır. Tanecikten uzaktaki CO₂ yüzeye doğru difüze olur ve reaksiyon sonucu CO formu oluşur, oluşan CO tanecik yüzeyinden uzaklaşırken O₂ ile reaksiyona girerek CO₂ ye oksitlenir. Meydana gelen CO₂ nin bir kısmı tekrar tanecik yüzeyine döner ve bir kısmı baca gazı olarak yatağı terk eder. Çift film yanma modelindeki problem, CO₂ + C reaksiyonunun hesaplanamayacak kadar yavaş olmasıdır.



5.5.3 Sürekli Film Modeli

Tek ve çift film modellerinin birleşmesinden oluşur. Yüksek sıcaklıklarda C ile O₂ reaksiyonunun ana ürünü CO dur. Düşük sıcaklıklarda ise $C + CO_2 \longrightarrow 2CO$ reaksiyonu ihmal edilebilir. Sürekli film modelinde CO in oksidasyonu; tanecik boyutuna, gaz sıcaklığına veya su buharı içeriğine bağlı olarak sınır tabakanın herhangi bir yerinde oluşabilir.

5.6 Fiziksel ve Kimyasal Reaksiyonlar

Kömür taneciği sıcak yatağın içine girdiğinde; uçucu ve nemin ayrılmasıyla boyut ve yoğunluğunda önemli değişiklikler olabilir. Akışkan yatakta karbon taneciğinin boyutlarının azalmasının 3 adımı vardır;

- 1.adım : tanecik yanmaya bağlı olarak büzülebilir.
- 2.adım : tanecik yeni bir tanecik üretmek için parçalanabilir.
- 3.adım : aşınma ile oluşan küçük taneciklerden dolayı tanecik çapı azalabilir.

Akışkan yatakta yanma modellemesinde 2 mm den daha küçük tanecikler için büzülen küre-kok yanması kabulü kullanılabilir.

Koruma ve uçucu ayrılması esnasındaki büzülme veya şişme kömür tipi ve bileşimine bağlıdır.

$$m = m_0(1-U) \quad (5.23)$$

$$U = \frac{m_0 - m_0(\rho_A / \rho_k)}{m_0} \quad (5.24)$$

$$d = d_0 (1-U)^e \quad (5.25)$$

$$\rho_A = \rho_{A0} (1-U)^f \quad (5.26)$$

m : taneciğin kütlesi

m_0 : taneciğin başlangıç kütlesi

U : yanmanın genişlemesi (büyümesi)

d : tanecik çapı

d_0 : tanecik başlangıç çapı

ρ_A : tanecik yoğunluğu

ρ_{A0} : tanecik başlangıç karbon yoğunluğu

sabit çaplı yanmada $e = 0$, $f = 1$

sabit yoğunluklu yanmada $e = 1/3$, $f = 0$

reaksiyon oranı hızlı ise, oksijenin tamamı tanecik yüzeyine ulaştığında tüketilir. Bunun sonucunda tanecik boyutu değişirken, tanecik yoğunluğu sabit kalır. Düşük hızlı reaksiyonlarda oksijen kok taneciğinin içerisine doğru ilerler. Bunun sonucunda ise tanecik boyutu sabit kalırken yoğunluğu değişir.

5.6.1 Kömürün Tutuşma Özelliği

Tutuşma karakteristiği, kömür taneciği içindeki nem ve uçucunun ayrılmasına bağlı olarak kok taneciğinin spesifik alanı veya gözeneklilik alanını gösterir. Kömürün tutuşma karakteristiği boyutsuz olan aşağıdaki ifadeyle verilmektedir.

$$F_z = (\gamma_{VM} + \gamma_W)^2 \gamma_C * 100 \quad (5.27)$$

γ_{VM} : kömür içindeki uçucu madde miktarı

γ_W : kömür içindeki nem miktarı

γ_C : kömür içindeki karbon miktarı

F_z değeri büyüdükçe kok taneciğinin tutuşması daha kolay olur ve kokun aktivitesi daha yüksektir. Yüksek neme sahip linyitler daha kolay tutuşurken, düşük uçucuya sahip antrasitler zor tutuşurlar. Farklı kömür tiplerinin tutuşmasını tahmin etmek için F_z parametresi

kullanılmaktadır. Kömürdeki, γ_{VM} , γ_W , γ_C , γ_A değerleri değişik olmasına rağmen Fz değeri aynı ise kokun tutuşma davranışı da aynıdır. Büyük Fz değeri kolay tutuşma ve kolay yanmayı sağlar. Aktivasyon enerjisi herhangi bir kömür kokunun tutuşması esnasında sabittir.

5.6.2 Tanecik Yanma Reaksiyonları

Üzerinde tartışılması gereken noktalar aşağıda yer almaktadır ;

- Yanma tanecik yüzeyinde mi yoksa tanecikle gözenegin cidarında mı oluşur,
- Oksijen aktif yüzeye ulaşır mı, reaksiyon ürünleri nedir, sınır tabakada ikinci reaksiyon oluşur mu,
- Tanecik sıcaklığı nedir, tanecik çapıyla nasıl değişir,
- Tanecik çapının reaksiyon oranına etkisi nasıldır ve bu reaksiyonlar difüzyon veya kinetik kontrollü müdür,

Kok taneciklerinin yanmasında genelde üç farklı durum görülür;

1.durum , A : Tanecik sıcaklığı yatak sıcaklığının üzerindedir. Reaksiyon hızı sabit ve çok yüksektir. Bu durumda yanma hızı, difüzyon kontrollüdür .

2.durum , B : Burada üç ayrı kok sıcaklığı mevcuttur. Başlangıçta, tanecik sıcaklığı yatak sıcaklığına yakındır. Yanma, yavaş ve kinetik kontrollüdür. Daha sonra tanecik sıcaklığı yatak sıcaklığında olup bu durum fiziksel olarak dikkate alınmaz. Sonuncusunda ise, tanecik sıcaklığı yatak sıcaklığından yüksek olup reaksiyon hızlı ve difüzyon kontrollüdür.

3.durum , C : Burada tanecik sıcaklığı yatak sıcaklığına yakındır. Reaksiyon hızı sabit ve düşüktür.

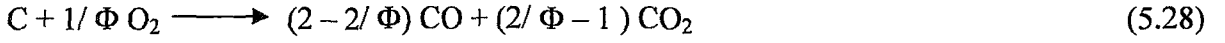
Yanma oranı; statik yatak yüksekliği, uçucu akış hızı, yatak sıcaklığı, inert malzeme ve tanecik boyutunun bir fonksiyonudur. Tanecik ve inert malzeme boyutu, hava akış hızı ve yatak sıcaklığı artışıyla, yanma oranı da artmaktadır.

Yanma işlemini difüzyon kontrollü olup olmadığı, yanma sıcaklığına ve karbon tanecik çapına bağlıdır. Eğer sıcaklık yüksek ve tanecik çapı büyükse, yanma difüzyon kontrollü, şartlar tersine dönerse kinetik kontrollü olabilir.

Tanecik sıcaklığı

Yapılan deneysel çalışmalar, tanecik sıcaklığının oksijen konsantrasyonu ve tanecik çapı ile etkilendiğini, azalan tanecik çapı ve artan oksijen konsantrasyonu ile sıcaklığın arttığını göstermektedir.

Tanecik yüzeyinde oluşan yanma reaksiyonu aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.



Φ : mekanizma faktörü 1 için CO_2 ; 2 için CO oluşur.

Küçük çaplı taneciklerde, kokun yanması ile meydana gelen CO, hızlı kütle transferi nedeniyle taneciğin dışına difüzyonla çıkar ve taneciğin dışında yanarak CO_2 meydana getirir.

Büyük çaplı taneciklerde ise, kütle transferi yavaş olduğundan CO taneciğin sınır tabakasında yanar ve CO_2 difüzyonla tanecikten dışarı taşınır. Mekanizma faktörünü veren ifadeler ise;

$$\Phi = \frac{2k_r + 2}{k_r + 2} \quad \dots d_c < 0,05 \text{ mm} \quad (5.29)$$

$$\Phi = \frac{(2k_r + 2) - k_r(d_c - 0,005)/0,095}{k_r + 2} \quad \dots 0,05 < d_c < 1,00 \text{ mm} \quad (5.30)$$

k_r : kokun yanma esnasındaki CO/CO_2 oranıdır.

5.7 SO_2 Ve NO_x Emisyonu

5.7.1 SO_2 Oluşumunun Önlenmesi

Hava kirliliğinin başlıca nedenleri fosil yakıtların yanma sonucu oluşturdukları SO_x , NO_x , CO, C_mH_n ve taşınan katı partiküllerdir. Bunların en önemlisi sayılan SO_x in yaklaşık %98 i SO_2 , %2 si ise SO_3 bileşikleridir.

Linyitlerin çevre kirliliği meydana getirmeksizin yüksek verimle yakılmasını sağlayan akışkan yataklı yakıcıların bütün tiplerinin en önemli avantajlarından birisi, yanma sonucu çıkan SO_2 gazının yanma esnasında yatağa kireçtaşı veya dolomit ekleyerek önemli ölçüde tutulmasının sağlanabilmesidir. Kazana toz halinde enjekte edilen kireçtaşı ve/veya dolomit yanma gazları içinde kalsiyum oksite (CaO) ve magnezyum oksite (MgO) dönüşür ve SO_2 ile reaksiyona girerek sülfatlı bileşikler meydana getirirler. Deneysel veriler bu reaksiyon için optimum sıcaklığın $825^{\circ}C$ civarında olduğunu, $900^{\circ}C$ den yüksek sıcaklıklarda ise SO_2 nin tutulma verimliliğinin önemli ölçüde azaldığını göstermektedir.

Akışkan yataktaki, CaO ile SO_2 reaksiyonu ve kömür yanması çok kompleks bir işlemdir. Yatakta SO_2 tutulumunun derecesini arttırmak için incelenmesi gereken birçok faktör vardır. Bunlar Ca-S mol oranı, yatak sıcaklığı, işletme hızı, minimum akışkanlaştırma hızı, kireçtaşı-dolomit özellikleri, yatak derinliği, yatak alanı, kömürün özellikleri, taneciğin çapı, hava fazlalık katsayısı, basınç, kömür besleme, kireçtaşı-dolomit besleme, serbest bölge, tanecik

geri dönüşü, akışkanlaştırma özellikleri, yatağın oksidasyonu ve redüksiyon özellikleridir. Genelde yatak derinliği arttıkça, gaz ile katıların kalma zamanı artacağı için SO₂ emisyonunun da azalacağı bilinmektedir. Kömürün özellikleri ; kül, uçucu miktarı, kül içeriği , şişme oranı, organik kükürt 'ün inorganik kükürde dönüşüm oranı v.s. ile kükürt miktarı SO₂ tutumunu etkiler.

Yapılan çalışmalar sonucu SO₂ ve NO_x için aşağıdaki korelasyonlar elde edilmiştir.

$$C_{SO_2} = 3,03 T_b + 0,035 T_b \cdot \lambda - 2047 \quad (5.31)$$

$$C_{NO_x} = 426 \lambda^2 - 726 \lambda + 0,36 T_b + 98 \quad (5.32)$$

Yapılan tüm model çalışmaları ve deneysel sonuçlar göz önüne alınarak incelendiği zaman SO₂ emisyonunu etkileyen en önemli faktörler; beslemedeki Ca/S mol oranı, yatak sıcaklığı, işletme hızı, minimum akışkanlaştırma hızı, kireçtaşı özelliği (içeriği, boyutu v.s.), akışkan yatağın özelliği (derinliği, çapı v.s), yatakta gazın kalma süresi, tanecik çapı, yataktaki O₂ konsantrasyonu, yakıttaki S miktarı, işletme basıncı, fazla hava miktarı, serbest bölgedeki katılar olarak sıralanabilmektedir.

5.7.2 NO_x Oluşumunun Önlenmesi

Yanma sonucu ortaya çıkan bir diğer istenmeyen madde olan NO_x iki kaynaktan oluşmaktadır. Bunlardan birincisi yüksek sıcaklıklarda yanma havasının içindeki O₂ ve N₂ nin oksitlenmesiyle oluşan termal şok, diğeri ise yanma havasındaki O₂ ile yakıtın içindeki azottan oluşan yakıt kaynaklı NO_x dir. Akışkan yatak yakmalarında NO_x emisyonu esas olarak kömürdeki azotlu bileşenlerden kaynaklanmaktadır.

Yapılan modelleme çalışmalarından da görülmektedir ki ; NO ve N₂O işletme şartlarından ters olarak etkilenmektedir. Bunlar ;

- yatak sıcaklığının artmasıyla NO artar, N₂O düşer
- kireçtaşı ilavesiyle NO artar, N₂O düşer
- yakıtın azot içeriğiyle NO düşer, N₂O artar
- yakıtın karbon içeriğiyle NO düşer (devamlı geçerli değil), N₂O yükselir

Bu özelliklerden hangilerinin birbirleri ile ilişkili veya tamamen bağımsız olduğu tam olarak anlaşılmamıştır.

Sonuç olarak; akışkan yataklı yakıcılarda yakıttaki azotun NO ve N₂O ya dönüşümünü etkileyen parametreleri; yatak sıcaklığı, akışkanlaştırıcı gazın O₂ içeriği, kömür tipi,

kömürdeki azotun miktarı ve formu, kömürdeki uçucu madde miktarı, ilave edilen kireçtaşı veya dolomit miktarı ve fazla hava miktarı gibi sayılabilir.

5.8 Karbon Kaybı

Karbon tanecikleri sadece yanma işlemi ile tüketilmezler. Bir kısmı aşırı akış yoluyla sürüklenerek ayrılırken bir kısmı da kül olarak atılır. Yanmamış karbon yataktan üç şekilde ayrılmaktadır.

- Yatak malzemesiyle (ihmal edilebilir – önemli değildir.)
- Yanmamış gazlarla (kaybolan miktar azdır – ileride yanabilir.)
- Sürüklenme ile

Kritik bir boyuta erişinceye kadar büzülen büyük tanecikler yatakta kalmaya devam ederler . Kritik boyutun altındaki taneciklerin büyük kısmı reaksiyonunu tamamlamadan yataktan ayrılacağı ve sürüklenme başlayacağı için önemlidir. Sürüklenme büzülmeden daha hızlı olduğunda yataktan önemli miktarda karbon kaybolmakta, yavaş olduğu zaman ise karbon kullanımı artmaktadır.

Yanmamış yakıtların kaybı; yakıcıya, işletme şartlarına ve kömür tipine bağlı olup kütlesi ise uçan küldeki kokun toplam kütesine oranıyla bulunabilir. Karbon sürüklenmesinin belirlenmesi için; serbest bölge yüksekliği, kömür besleme pozisyonu, dağıtıcı eleğin özellikleri, yatak sıcaklığı, fazla hava miktarı, yakıt ve inert malzemenin boyut dağılımı ile yatak küllerinin incelenmesi gereklidir.

Akışkan yatakta yanma ile ilgili yapılan modelleme çalışmalarında karbon taneciklerinin aşınması ihmal edilmiş, daha sonra yapılan çalışmalarda ise kabarcıklı akışkan yatakta karbon taneciklerinin sürüklenmesine aşınmanın yardım ettiği belirlenmiştir. Aşınma oranı ile diğer parametreler arasındaki ilişki çok net değildir. Kömür taneciklerinin aşınmasının başlıca nedeni olarak, kömür beslemenin hızlı olmasından dolayı ısı şok, taneciklerin yüzey çarpışması sonucu aşınma ve uçucuların hızlı oluşmasıyla kırılma gösterilebilir.

5.9 Yanma Verimi

Yanma sırasında sürüklenen tanecik miktarının fazla olması yanma verimini azaltır. Yanma verimi, beslenen karbonun CO₂ ye dönüşmesiyle belirlendiğinden, %100 den daha azdır. Yanma verimi, yakıt, dizayn ve işletme faktörleri tarafından etkilenmektedir. Bu faktörleri kısaca açıklamak gerekirse ;

- Yakıt faktörleri : kömür bileşimi, reaksiyona girme kabiliyeti, gözenek yapısı,

yanma esnasındaki davranışı (büzülme veya şişme)

- Dizayn faktörleri : kömür besleme sistemi, dağıtıcı elek, yatak içindeki boruların konfigürasyonu, uçan külün sirkülasyonu
- İşletme faktörleri : yatak sıcaklığı, yatak derinliği, akışkanlaştırma hızı, yatak malzemesi, tanecik boyutu ve dağılımı, katkı maddelerinin boyutu, fazla hava miktarı, tanecik karışımı, taneciklerin yatakta kalma zamanı olarak tanımlanmaktadır.



6. LİTERATÜRDEKİ MODEL ÇALIŞMALARI

Literatürde akışkan yatakta yanma ile ilgili çok sayıda model çalışması vardır. Bu modellerin büyük bir bölümü bir boyutludur. Son 30 yıldan beri iki boyutlu modeller için çalışmalar yapılmaktadır. Düşük işletme sıcaklığı (830°C), yüksek fazla hava oranları (%30), ortalama tanecik boyutu (1-3 mm), uzun kalma zamanı (birkaç dakika), ısı transferi ve proses reaksiyonları için büyük tanecik hareketi söz konusudur.

Bir boyutlu kabarcıklı akışkan yatak modeller, gaz akış dinamiği, tanecik akış dinamiği, kömürün uçucusundan ayrılması, kokun oksidasyonu, uçucu yanması, tanecik aşınması, tanecik sürüklenmesi (yataktan kayıplar), işletme basıncı, gazlaştırma reaksiyonları, çok farklı tanecik boyutları, yatay ve düşey konumlu ısı değiştirici borular, taşınım ve ışınlama oluşan ısı transferi, azodun okside olması, taneciklerdeki kükürdün tutulmasını (kireçtaşı ve dolomit) göz önüne alarak kurulmuştur.

Bu zamana kadar yapılan model çalışmaları aşağıdaki parametrelere göre yapılmıştır.

▪ Akışkan yatak modeli

1. iki fazlı kabarcıklı model : kabarcık ve emülsiyon faz
2. üç fazlı kabarcıklı model : kabarcık, örtü ve emülsiyon faz
3. seri modelde bölümler : her bir bölümde iki faz
4. yavaş kabarcık rejimli model : emülsiyon ve kabarcık faz arasında fark yok

▪ Yatakta gazların akışı (şekilleri)

1. kabarcık fazında tıkaç akış, emülsiyon fazında karışık akış
2. her iki fazda karışık akış
3. her iki fazda tıkaç akış, iki faz arasındaki gaz değişimi sınırlıdır.
4. yatağa doğru tıkaç akış, fazlar arasında fark yok

▪ Yatakta katıların hareketi

1. iyi karışmış
2. bölümlerin büyük kısmında iyi karışmış
3. katının dağılımı sınırlıdır. Kütle dengesi için dağılım katsayısı kullanılır.

▪ Uçucunun kömürden ayrılması

1. uçucunun ayrılması anidir. Uçucu, üniform olarak kömür besleme noktasında açığa çıkmaktadır.
2. beslenen kömürün karışımına kıyasla uçucudan ayrılma daha yavaştır. Uçucunun açığa çıkması yatağa doğru üniformdur.
3. belli değil.
4. uçucunun ayrılması kömür besleme noktasında anidir.
5. uçucunun ayrılmasında 2.ve 4.şıkların her ikisi de eşit hisselere sahiptir.
6. uçucudan ayrılma katıların difüzyonu gibi olur. Uçucular difüzyon kontrollü yanmaya uğrar.
 - Kömür yanmasının kinetiği
 1. kontrollü film difüzyonu
 2. film difüzyonu ve yüzey reaksiyon etki hızı mevcut, fakat CO in CO₂ ye homojen oksidasyonunun çok hızlı olduğu kabul edilir.
 3. CO oksidasyonunun hızı diğer reaksiyonlarla kıyaslanabilir.
 4. kül tabaka difüzyonu mevcut
 - Serbest bölgede yanma dikkate alınıp alınmadığı
 1. dikkate alınmamış
 2. dikkate alınmış

7. AKIŞKAN YATAKTA MODELLEME

Kömürün efektif kullanımındaki metodlardan biri olan akışkan yatak teknolojisi genelde diğer ülkelerin kömürlerine uygun olarak tasarımlanmış ve geliştirilmiş olduğu için farklı özelliklere sahip linyitlerimizi verimli şekilde yakmakta problemler bulunmaktadır. Tasarım ve işletme şartlarının tespiti için matematiksel modeller gereklidir.

7.1 Model Kabulleri

Akışkan yataklı yakıcılarda tüm etkileri içeren bir model geliştirmek oldukça zordur. Bu nedenle ele alınan sistemi basite indirgemek için bir takım kabuller modelleme esnasında yapılır.

Bu çalışmada yapılan ana kabuller aşağıda yer almaktadır .

- Kömür tanecikleri küresel ve başlangıçta aynı büyüklüktedir.
- Uçucu madde çıkışı yatağın başlangıç noktasından itibaren olmakta ve kinetik olarak akışkan yatağa ilave olmaktadır.
- Kömürü terk eden uçucu maddeler yandıktan sonra açığa çıkan kok yanar .
- Kok, karbon ve külden meydana gelmekte olup küresel yapıdadır.
- Kül parçacıkları da küresel olup, homojen yapıdadır.
- Yatağa kömür ve kireçtaşı devamlı beslenir, kireçtaşının besleme oranı yataktan çıkarılan ile aynı orandadır.
- Aktif yatak içindeki katı homojen olarak yatağa dağılmıştır.
- Aktif yatak içinde katı madde birikmemektedir.
- Çalışma hızı minimum akışkanlaştırma hızına yakındır.
- Ortamdaki metan ve karbon monoksit kinetik olarak yanmaktadır.
- Aktif yatak ve serbest bölge birbirine seri bağlıdır.
- Kömür nemi uçucu madde ile aynı kinetikte açığa çıkmaktadır.

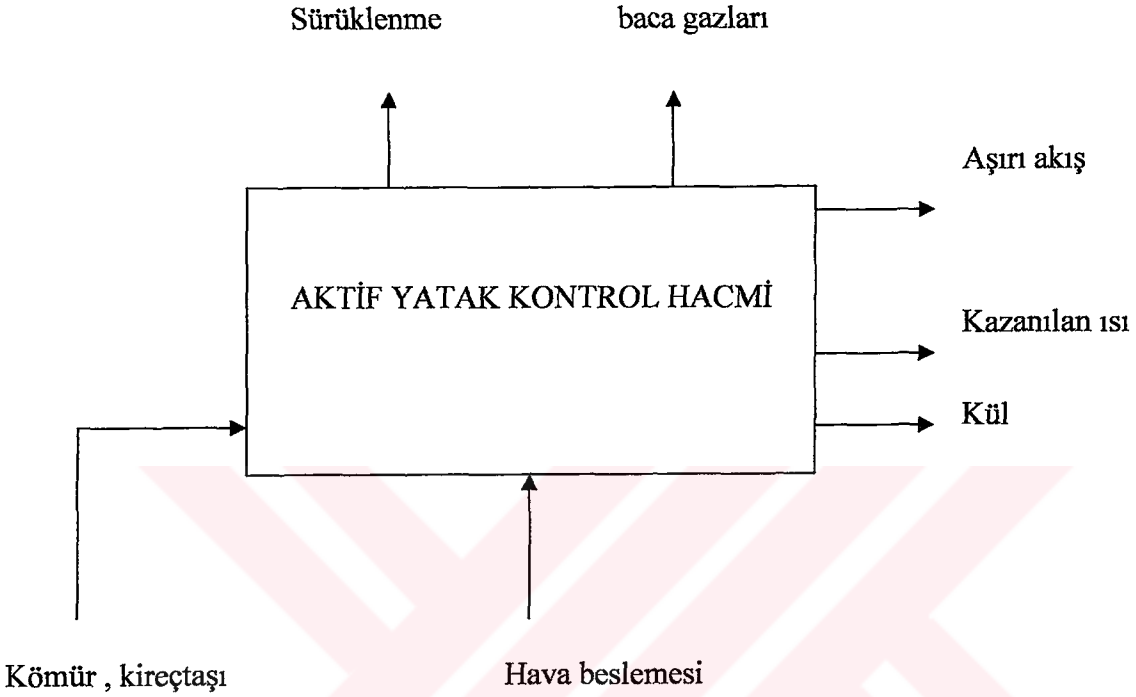
7.2 Genel Model Denklemleri ve Akışkan Özelliklerinin Modellenmesi

Modelde kütle ve enerji büyüklüklerinin zamana göre değişiminin belirlenmesi için bir kontrol hacmi seçilir. Bu kontrol hacmine birim zamanda giren miktar, bu zaman süresince dışarı çıkan miktar ile içeride değişime uğrayan miktara eşit olmalıdır.

Kontrol hacmi için genel prensip;

$$\text{Sisteme giren} + \text{sistem içinde üretilen} - \text{sistemden çıkan} = \text{sistem içindeki değişiklik} \quad (7.1)$$

Şekil 7.1. modelleme için seçilen aktif yatak kontrol hacmini göstermektedir.



Şekil 7.1 Model Aktif Yatak Kontrol Hacminin Şematik Anlatımı

Akışkan yatak içinde oluşan reaksiyonlara bağlı olarak yatağın boyu ile gazın ve bileşenlerinin mol miktarları sürekli olarak değişir. Buna bağlı olarak gazın ısı iletkenliği , viskozitesi ve özgül ısı değeri değişim halindedir. Karışım halinin ısı iletkenlik , viskozite ve özgül ısısının hesaplanmasında aşağıdaki denklemler kullanılmaktadır.

7.2.1 Viskozite Hesabı

Modelde her bir bileşen için kullanılan viskozite formülü ;

$$\mu_i = \frac{8,4401 \cdot 10^{-25} \cdot (M_i T)^{0,5}}{\Omega_i \cdot \sigma^2} \quad (7.2)$$

burada ,

$$\Omega_i = \frac{A}{T^{*B}} + \frac{C}{\exp(D.T^*)} + \frac{E}{\exp(F.T^*)} \quad (7.3)$$

$$T^* = \left(\frac{k}{\varepsilon} \right)_i T \quad (7.4)$$

$\left(\frac{k}{\varepsilon} \right)$ ve σ için Çizelge 7.1 de yer alan gazların Lennard-Jones parametreleri kullanılmıştır.

Ω_i nin hesaplanması için kullanılan katsayılar aşağıda yer almaktadır.

$$A = 1,61145$$

$$B = 0,14874$$

$$C = 0,52487$$

$$D = 0,7732$$

$$E = 2,16178$$

Çizelge 7.1 Gazların Lennard-Jones Parametreleri

Madde	$\left(\frac{\varepsilon}{k} \right)$ (K)	σ (m)
CH ₄	141,4	$3,746 \cdot 10^{-10}$
N ₂	71,4	$3,798 \cdot 10^{-10}$
O ₂	106,7	$3,467 \cdot 10^{-10}$
CO ₂	195,2	$3,941 \cdot 10^{-10}$
H ₂ O	809,1	$2,641 \cdot 10^{-10}$
CO	91,7	$3,690 \cdot 10^{-10}$
NO	116,1	$3,492 \cdot 10^{-10}$
SO ₂	335,4	$4,112 \cdot 10^{-10}$

7.2.2 Özgül Isı Hesabı

İdeal gazların özgül ısıları sıcaklığın bir fonksiyonu olarak, $C_p = f(T)$ şeklindedir.

Modelde mevcut korelasyonlar yerine Hougen ve ç.a. (1954) tarafından hazırlanan

çizelgelerden 400-900⁰C arasındaki değerler doğrusal ilişki ile ifade edilerek yeni korelasyonlar geliştirilmiştir.

Çizelge 7.2 de korelasyonda kullanılacak katsayılar yer almaktadır.

Korelasyon ifadesi ise ;

$$C_{P,i} = A.T + B \quad (7.5)$$

şeklindedir.

Çizelge 7.2 C_p Hesabında Kullanılacak A ve B katsayıları Tablosu

Gaz	A	B
CH ₄	0,0061340	6,8888
N ₂	0,0007054	6,6132
O ₂	0,0009317	6,7424
CO ₂	0,0025432	8,7960
H ₂ O	0,0014028	7,4572
CO	0,0009317	6,7913
NO	0,0008105	6,7595
SO ₂	0,021200	9,5629

7.2.3 Isıl İletkenlik Hesabı

Gazların her birinin ısı iletim katsayısı aşağıdaki ifadeyle bulunur.

$$\lambda_i = \frac{\left(\frac{C_{P,i}}{M_i} + 1,25.R \right) \cdot 10 \cdot \mu_i}{M_i} \quad (7.6)$$

7.2.4 Karışım İçin Ortalama Değerlerin Hesaplanması

Karışım için ortalama değerler her bir bileşen için hesaplanan ısı iletimlik, viskozite, özgül ısı değerlerinden ;

$$\lambda_{MII} = \sum_{i=1}^N \frac{\lambda_i}{1 + \frac{\sum_{i=1, j=1}^N y_i \cdot \phi_{ij}}{y_i}} \quad (7.7)$$

$$\mu_{MII} = \sum_{i=1}^N \frac{\mu_i}{1 + \frac{\sum_{i=1, j=1}^N y_i \cdot \phi_{ij}}{y_i}} \quad (7.8)$$

burada ;

$$\phi_{ij} = \frac{1}{\sqrt{8}} \left[\left(1 + \frac{M_j}{M_i} \right)^{-0,5} \cdot \left(1 + \left(\left(\frac{M_j}{M_i} \right)^{0,25} \cdot \left(\frac{\mu_i}{\mu_j} \right)^{0,5} \right) \right) \right]^2 \quad (7.9)$$

$$C_{pmix} = C_{p1,y1} + C_{p2,y2} + C_{p3,y3} + C_{p4,y4} + \dots \quad (7.10)$$

eşitlikleri ile hesaplanmıştır.

7.3 Uçucu Madde Yanmasının Modellenmesi

Akışkan yatağın modellenmesinde charın yatak içinde homojen yandığı kabulü yapıldığından akışkan yatak içinde belirlenmesi gereken en önemli parametre uçucu çıkışı ve yanmasıdır.

Uçucu yanması; homojen gaz-gaz reaksiyonu, char yanması ise heterojen gaz-katı reaksiyonudur. Düşük kaliteli linyitlerin en önemli özellikleri, ısı değerinin düşük ve bu ısı değerinin önemli bir kısmının uçucu madde içinde yanabilen bileşiklerden kaynaklanmasıdır. Kömür taneciklerinden uçucu çıkışı, yatak sıcaklığının ve tanecik çapının bir fonksiyonudur ve serbest bölgeyi de içerebilmektedir.

Kimyasal bir olay olan uçucu yanması iki temel yaklaşımla analiz edilebilmektedir. Termokimyasal denge veya kısaca denge kabulü ile çözüm ve kinetik çözüm. Günümüze kalan yapılan çalışmaların pek çoğu uçucu maddeyi bu uçucu çıkış kabullerine bağlı kalarak denge halinde yakmışlardır. Denge kabulünde, ortamdaki yanabilir her yakıt molekülünün oksijenle buluşup reaksiyona girmesi için gerekli sonsuz sürenin varolduğu veya reaksiyon hızlarının sonsuz olduğu dolayısıyla yanmanın sonsuz küçük bir zaman aralığında gerçekleştiği kabul edilir. Denge halindeki kabullerin geçerliliği uygulamada sınırlıdır. Yalnızca çok hızlı oluşan, hidrojen-oksijen yanması gibi hallerde gerçekçi çözümler verir. Denge çözümleri yanma olayında ulaşılabilecek son durumu ifade etmesi bakımından önemlidir.

Yanma olayı eş zamanlı olarak meydana gelen bir kimyasal reaksiyonlar bütünüdür. bir reaksiyonun herhangi bir aşamasında ürün olarak ortaya çıkan bir bileşen hemen sonra bir başka reaksiyona girerek farklı bir bileşene dönüşebilir. Tüm bu reaksiyonlar farklı hızlara sahiptir.

Denge yanma kimyası için ulaşılmaması istenen en son durum olarak düşünülebilir. pratik yanma olaylarının incelenmesinde denge kabulü hatalı sonuçlar vermektedir. Burada zamana bağlı olarak değişimi veren ve reaksiyon mekanizmasını içeren reaksiyon kinetiği önem taşımaktadır.

Yapılan çeşitli modelleme çalışmalarda; uçucunun çıkışının ani olarak kömür besleme noktasında meydana gelme kabulü eldeki deneysel verilerle ciddi sapmalar göstermiştir. Yatak içindeki sıcaklığın başlangıçta çok yükselmesine daha sonra ise hızla düşmesine neden olmaktadır. Bir diğer kabul olan uçucu çıkışının yatak içinde homojen dağılması yaklaşımı da aktif bölgede sonuç vermemiştir. Bu durumda da yatak başlangıç sıcaklıkları deneysel değerlerin altında kalmaktadır. Bu kabullerin gazların kinetik halde yanması durumuna uyum sağlamadığını göstermektedir.

Bu bilgilerle modele yeni bir parametre ilave edilerek, uçucu çıkışının yatak yüksekliğine bağlı olduğu durum incelenmiştir. Bu parametrenin model üzerinde nasıl etkisi olduğu sonuçlar bölümünde ayrıntılı olarak anlatılmıştır.

Model kabullerinde de yer aldığı üzere, modellemede kömürün uçucu maddesinin akışkan yatağın başından itibaren, kinetik olarak akışkan yatağa ilave olduğu kabul edilmiştir. Besleme noktasından itibaren gaz akımına katılan uçucu madde içindeki gazlar

$$t = a \cdot d^n \quad (7.11)$$

eşitliğine göre yatak içinde belirli bir yüksekliğe ulaşacaklardır. Yatağın başlangıcından itibaren bu süreye ulaşana kadar yatak üzerinde sıcaklıktan bağımsız olarak uçucu çıkışı gerçekleşmektedir. Uçucu maddenin yatakta ulaşacağı yükseklik Z_y ;

$$Z_y = N \cdot \left(\frac{R.T}{P.A} \right) \cdot a \cdot d^n \quad (7.12)$$

olarak hesaplanmakta ve kömürün kısa analizinden yararlanarak uçucu madde bileşimini veren korelasyon ise ;

5. bölümde (5.2), (5.3), (5.4), (5.5), (5.6), eşitliklerinde de bahsedildiği üzere ,

$$\begin{aligned}
\text{CH}_4 &= 0,201 - 0,469 \gamma_{\text{VM}} + 0,241 \gamma_{\text{VM}}^2 \\
\text{H}_2 &= 0,157 - 0,868 \gamma_{\text{VM}} + 1,388 \gamma_{\text{VM}}^2 \\
\text{CO}_2 &= 0,135 - 0,900 \gamma_{\text{VM}} + 1,906 \gamma_{\text{VM}}^2 \\
\text{CO} &= 0,428 - 2,653 \gamma_{\text{VM}} + 4,845 \gamma_{\text{VM}}^2 \\
\text{H}_2\text{O} &= 0,409 - 2,389 \gamma_{\text{VM}} - 4,554 \gamma_{\text{VM}}^2
\end{aligned}$$

şeklindedir.

Uçucu madde bileşimi içinde yanabilen gazlar metan, karbon monoksit ve hidrojenidir. Yapılan hesaplamalarda uçucu çıkışı ile yatak içinde dağılan tüm hidrojenin ani olarak yani denge halinde yandığı kabul edilmiştir. Hidrojenin oksijenle reaksiyonu denge kabulünün uygulanabileceği nadir yanma reaksiyonlarıdır.

Denge ve kinetik halde yanma ile ilgili olarak sonuçlar kısmında daha ayrıntılı bilgi yer almaktadır.

Metanın kinetik olarak yandığı basitleştirilmiş ifadeler ;

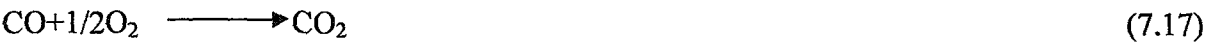
- Tek adımda yanma ;



$$\frac{d[\text{CH}_4]}{dt} = -1,3E11 \cdot \exp\left(\frac{-24358}{T}\right) [\text{CH}_4]^{-0,3} \cdot [\text{O}_2]^{1,3} \quad (7.14)$$

$$\frac{d[\text{CH}_4]}{dt} = -8,3E8 \cdot \exp\left(\frac{-15098}{T}\right) [\text{CH}_4]^{-0,3} \cdot [\text{O}_2]^{1,3} \quad (7.15)$$

- İki adımlı yanma ;



$$\frac{d[\text{CH}_4]}{dt} = -7E11 \cdot \exp\left(\frac{-30196}{T}\right) \cdot T \cdot [\text{CH}_4]^{-0,5} \cdot [\text{O}_2]^{1,5}$$

Karbon monoksit için kullanılan ifadeler ;

- İfadeler (Köse, 1995) den alınmıştır.



$$\frac{d[\text{CO}_2]}{dt} = -1,3E11 \cdot \exp\left(\frac{-15098}{T}\right) [\text{CO}_2] [\text{O}_2]^{0,5} \cdot [\text{H}_2\text{O}]^{0,5} \quad (7.19)$$

$$\frac{d[CO_2]}{dt} = -1,194E8 \cdot \exp\left(\frac{-804,7}{T}\right) \cdot [CO_2] [O_2]^{0,5} \cdot [H_2O]^{0,5} \quad (7.20)$$

7.4 Kömür Partikülünün Yanmasının Modellenmesi

Kömür partikülünün yanması sırasında ilk olarak 7.3 de bahsedilen uçucu ayrılması gerçekleşir. Uçucu ayrılmasından sonra kalan katı kütle char olarak adlandırılır. Charın oksijenle reaksiyonu sonucunda oluşan ürünlerin bileşimi ve konsantrasyonu mekanizma faktörüne bağlı olarak değişebilir.

5.6.2 tanecik yanma reaksiyonları bölümünde anlatıldığı gibi ,

Char , tanecik reaksiyon yüzeyine ve orta sıcaklığına bağlı olarak ya karbon monoksit yada karbon dioksit kadar indirgenir .

Modeldeki akışkan yatak sisteminde yakılan kömür partikül çapı 0,1 mm den büyük olduğundan akışkan yatakta char yanması ile karbon monoksit oluşmadığı kabul edilmiştir.

Modelde, char yanması genellikle oksijene göre birinci dereceden ve tersinmezdir. Bunun yanında 0,5. dereceden de ifade edilebilmektedir. Reaksiyon hızı, difüzyon ve kimyasal reaksiyon hızları dikkate alınarak bulunur. Reaksiyonlarda taneciğin dış yüzey alanına göre hesap yapılmış ve taneciklerin küresel olduğu kabul edilmiştir.

$$r = k_r \cdot C_s \quad (7.21)$$

Tanecik yüzeyindeki oksijen konsantrasyonu bilinemediğinden, reaksiyon hızında serbest akımın konsantrasyonunu kullanabilecek değişiklikler yapılmalıdır. Tanecikteki oksijen tüketim hızı, oksijenin yüzeye difüzyon hızına eşit olacağından;

$$r = k_r \cdot C_s = k_d \cdot (C_\infty - C_s)$$

ve buradan da ;

$$K = k_r (k_d / (k_r + k_d)) \quad (7.22)$$

$$r = K \cdot C_\infty \quad (7.23)$$

eşitlikleri elde edilir .

Kinetik reaksiyon sabiti k_r için kullanılan eşitlikler ;

- Char yanmasının birinci dereceden yanma reaksiyonu kabulü ve T_s yüzey sic. Olmak üzere ;

$$K_r = 596 \cdot T_s \cdot \exp(-17967/T_s) \text{ (Rajan, 1980).} \quad (7.24)$$

$$K_r = 596.T_s.exp(-149220/(R.T_s))(Sriramulu vd., 1998) \quad (7.25)$$

▪ Char yanmasının 0,5 dereceden yanma reaksiyonu kabulü ile (Sriramulu vd., 1998);

$$K_r = 3,4E5.R.T_s^{1/2}.exp(174220/(R.T_s))(Sriramulu vd., 1998) \quad (7.26)$$

$$K_d = \frac{(Sh.\Theta.D_{O_2-N_2})}{d} \quad (7.27)$$

$$Sh = 2 + 0,69.Re_c^{0,8}.Sc^{0,33} \quad (7.28)$$

$$Re_c = \frac{U.d.\rho_g}{\mu_{mix}} \quad (7.29)$$

$$Sc = \frac{\mu_{mix}}{D_{O_2-N_2}} \quad (7.30)$$

$$D_{O_2-N_2} = 5,08E-9.T^{3/2} \quad (7.31)$$

Tek bir char birim dış yüzey alanı için molar karbon tüketimi (kmol/m²s)

▪ Birinci derece reaksiyon için ;

$$r = \frac{k_r.k_d.C_{O_2}}{k_r + k_d} \quad (7.32)$$

▪ 0,5 derece reaksiyon için ;

$$r = \frac{k_r.\left\{\sqrt{k_r^2 + 4.k_d.C_{O_2}} - k_r\right\}}{2.k_d} \quad (7.33)$$

olarak ifade edilmiştir.

Reaksiyon hız sabitinin hesabında kullanılan char tanecik sıcaklığı ortamdaki gaz sıcaklığından daha yüksektir ve char taneciğinin ortam ile ısıl dengesinden yararlanılarak hesaplanabilir.

$$Nu_{c,mix}(T_s - T) / d = r H \quad (7.34)$$

$$Nu_c = 2 + 0,6Re_c^{0,5}Pr^{0,33} \quad (7.35)$$

$$Pr = C_{pmiks}.\mu_{miks} / \lambda_{mix} \quad (7.36)$$

7.5 Reaksiyon Isılarının Hesaplanması ve Modellenmesi

Reaksiyon ısılarının hesaplanmasında sıcaklığın etkisi dikkate alınmıştır. Kullanılan eşitlik,

$$H_{i,T} = H_{298} + \int_{298}^T \Delta C_{p,i} \cdot dT \quad (7.37)$$

$$\Delta C_{p,i} = C_{Pürünler,i} - C_{Pr eak tan lar,i} \quad (7.38)$$

Modellemede kullanılan reaksiyonların 298⁰C'deki yanma entalpileri Çizelge 7.3 de verilmiştir.

Çizelge 7.3 Yanma Entalpileri (Perry ve Chilton, 1973)

Bileşik	Yanma entalpisi (kj/kmol)
Karbon	-110523
Hidrojen	-285840
Karbon monoksit	-282989
Metan	890346

7.6 Tanecik Miktarı Hesaplanması

7.6.1 Aktif Yatak Tanecik Miktarı

Aktif yatağın tamamında tanecik bulunmaktadır. Modelde aktif yatak içindeki tanecik miktarını bulmak için yatakta karbon dengesi kurulmuştur. Yatak içinde karbon birikmesi olmayacağından aktif yatağa beslenen kömürle gelen karbon yatakta tüketilen karbon miktarına eşit olacaktır. Model çalışmasında hesaplama yapılan her diferansiyel elemanında karbon tüketiminin sabit olduğu kabul edilmiştir.

dz kesit alanında tüketilen karbon miktarı = beslenen kömür miktarı x kömürün karbon bileşimi / yatak boyu

$$(7.39)$$

7.6.2 Serbest Bölgeye Atılan Tanecik Miktarı

Gaz ve taneciklerin fiziksel özellikleri, akışkanlaştırma hızı ve yatak yüksekliği yatağın

hidrodinamik davranımını doğrudan etkiler. Yatağın çapı, dağıtıcı elek tipi ve yatak içinde yerleştirilen soğutucu tüp gibi diğer unsurların ise yatağın hidrodinamik davranımını üzerinde az etkisi vardır. Serbest bölgeye taşınan ilk tanecikler yatağın hidrodinamik davranımını ile doğrudan ilişkili olduğundan yataktan taşınan katı taneciklerin miktarı yatağın çalışma şartlarına bağlıdır. Yoğun yataktan serbest bölgeye, kabarcığın patlaması ile atılan bir grup tanecik ya akışkan ile taşınarak bacadan dışarı atılır yada serbest bölge içinde belli bir yüksekliğe kadar yükselir ve yatağa geri dönerler. Gaz ile taşınarak bacadan atılan katı taneciklere “**atılan**”, aktif yataktan fırlatılarak serbest bölge içinde saçılan taneciklere ise “**taşınan**” katı tanecikler adı verilir.

Modelde serbest bölge yüksekliği ile tanecik debisinin eksponansiyel olarak azaldığını kabul edilmişti. Yapılan deneysel çalışmalar göstermiştir ki; serbest bölge tanecik taşınması açısından serbest bölge yüksekliğine Z_{SB} , bağlı olarak üç farklı bölgeye ayrılır.

- Saçılma bölgesi $(Z_{SB} < 0,3)$
- Yoğun tanecikli bölge $(0,3 < Z_{SB} < 0,7)$
- Seyrek tanecikli bölge $(0,7 < Z_{SB} < 1,5)$

Bütün bu yaklaşımlar göz önünde bulundurularak serbest bölge içinde katı taneciklerin yüksekliğe bağlı olarak taşınma hızlarını veren çeşitli ifadeler elde edilmiştir.

Serbest bölge çıkışındaki madde debisi F_{∞} ve serbest bölge başlangıç debisi F_0 olmak üzere belirli bir serbest bölge yüksekliğinde yukarı doğru yükselen tanecik debisi;

$$F_y = F_{\infty} + (F_0 - F_{\infty}) \exp(-a \cdot Z_{SB}) \quad (7.40)$$

Serbest bölgede aşağı doğru inen taneciklerin debisi ;

$$F_a = (F_0 - F_{\infty}) \exp(-a \cdot Z_{SB}) \quad (7.41)$$

olarak ifade edilmiştir.

a için ;

- saçılma bölgesinde $a = 2 \quad 1/m$
- yoğun tanecikli bölgede $a = 11,8 \quad 1/m$
- seyrek tanecikli bölgede $a = 4,3 \quad 1/m$

değerleri alınabilmektedir.

Serbest bölgede mevcut tanecik miktarı G olup aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir;

$$G = \sum \frac{F_y}{U_y} + \sum \frac{F_a}{U_a} \quad (7.42)$$

Yatak minimum akışkanlaştırma koşullarında çalıştığında U_y gaz hızına U_g eşit alınmış , U_a ise aşağıdaki eşitlikten bulunmuştur.

$$U_a = U_g - U_{ter} \quad (7.43)$$

$$U_{ter} = 4 \cdot g \cdot d^3 \cdot (\rho_c - \rho_g)^2 / 225 \cdot \rho_g \cdot \mu_g \quad (7.44)$$

7.7 Kömürün Özelliklerinin Modellenmesi

Elementel analizi bilinen bir kömür için yoğunluk ve spesifik ısı ;

$$\rho_c = 1534 - 51,96 \cdot E_h + 7,375 \cdot E_o - 24,72 \cdot E_n + 3,853 \cdot E_s \quad (7.45)$$

$$C_{p,c} = 0,139 \cdot E_C + 0,874 \cdot E_h + 0,491 \cdot E_n + 0,36 \cdot E_o + 0,215 \cdot E_s \quad (7.46)$$

Külün spesifik ısısı ise 0,66 – 0,71 kJ/kg.K arasında değişmektedir (Speigh, 1994).

7.8 Kütle Dengeleri

Aktif yatak ve serbest bölgede kurulan denge denklemlerinde gaz fazı dikkate alınarak hesaplamalar yapılmıştır. Charın yanması ile gaz ortamından çekilen ve gaz ortamına ilave edilen bileşenler ve miktarları ise kaynak terimi olarak hesaplamaların yapıldığı aralığa ilave edilmiştir.

7.8.1 Aktif Yatak Kütle Dengesi

Gaz karışımını oluşturan bileşenler için molar kütle dengesi ve tüm kütle dengesi, dağılı parametrelili sistemlere klasik yaklaşım tarzı olan eksen üzerinde çok küçük bir dx kalınlığındaki kesit göz önüne alınarak yapılmıştır.

Karışım içindeki i nolu bileşen için denge denklemini yazmak istersek ;

Toplam molar akış debisinin N (kmol/s) olarak alınmasıyla ,

Diferansiyel kesite giren mol miktarı + diferansiyel kesit içinde üretilen mol miktarı = diferansiyel kesitten çıkan mol miktarı

Yani ;

$$N \cdot y_i \pm r \cdot A \cdot dx = (N \cdot y_i + d(N \cdot y_i)) \quad (7.47)$$

olarak tanımlanmaktadır. Bileşen üretiliyorsa + r.A.dx alınır. Bileşen tüketiliyorsa – r.A.dx alınır. Burada A diferansiyel kalınlıklı kesitin alanıdır ve boru reaktörünün çapı D (m) ise ;

$$A = \frac{\pi.D^2}{4} \quad (7.48)$$

olarak alınır.

Tüm denge denklemi olarak yazılmak istenildiğinde (7.47) denklemi aşağıdaki şekilde yazılır.

$$d(N) = \pm \sum r_i \cdot A \cdot dx \quad (7.49)$$

Buradan i bileşeni için mol dengesi ;

$$\frac{d(N_{y_i})}{dx} = \pm r_i \cdot A \quad (7.50)$$

$$y_i \frac{dN}{dx} + N \frac{dy_i}{dx} = \pm r_i \cdot A \quad (7.51)$$

$$\frac{dy_i}{dx} = \frac{\left(\pm r_i \cdot A - y_i \frac{dN}{dx} \right)}{N} \quad (7.52)$$

olarak kurulur.

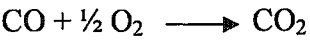
Bu denklemler sırasıyla tüm kütle, azot, oksijen, karbon monoksit, karbon dioksit, metan, su, kükürt dioksit ve azot oksit için yazılacaktır.

7.8.1.1 Tüm Kütle Dengesi

Akışkan yatak içinde meydana gelen temel reaksiyonlardan sadece karbon monoksitin yanma reaksiyonu eşit mol giriş ve çıkışı olmayan reaksiyondur. Tüm kütle dengesinde sadece karbon monoksitin değişimi önemlidir.



Şekil faktörünün 1 seçimiyle ;



$$\frac{dN}{dx} = -r_{\text{CO}} \cdot A \quad (7.53)$$

7.8.1.2 Azot Dengesi

Azot gazının ortamda tüketilen veya üretilen reaksiyonu yoktur.

$$\frac{dy_{N_2}}{dx} = \frac{\left(-y_{N_2} \frac{dN}{dx}\right)}{N} \quad (7.54)$$

7.8.1.3 Oksijen Dengesi

Ortamdaki oksijen; metan, karbon monoksit ve karbon yanması ile tüketilir. Homojen faz reaksiyonları olan metan ve karbon monoksit yanması diferansiyel eleman içinde hesaplanmış, heterojen reaksiyon olan karbon yanması ise sayısal olarak çözüm yapılan ΔZ aralığı sonunda çıkış bileşimine ilave edilmiştir.

$$\frac{dy_{O_2}}{dx} = \frac{\left(-2r_{CH_4} \cdot A - \frac{r_{CO} \cdot A}{2} - y_{O_2} \frac{dN}{dx}\right)}{N} \quad (7.55)$$

7.8.1.4 Karbon Monoksit Dengesi

Ortamdaki karbon monoksit, uçucu çıkışı ile ortama verilir ve yanma reaksiyonu ile tüketilir.

$$\frac{dy_{CO}}{dx} = \frac{\left(-r_{CO} \cdot A - y_{CO} \frac{dN}{dx}\right)}{N} \quad (7.56)$$

7.8.1.5 Karbon Dioksit Dengesi

Karbon dioksit; metan, karbon monoksit ve karbon yanması sonucunda yanma ürünü olarak açığa çıkar. Diğer taraftan kömürün uçucularından ayrılması ile uçucu maddeleri oluşturan gazlar arasındaki karbon dioksit gaz akımına verilir. Karbon yanması ile üretilen miktar ise ΔZ aralığı sonunda çıkış bileşimine ilave edilmektedir.

$$\frac{dy_{CO_2}}{dx} = \frac{\left(r_{CH_4} \cdot A + r_{CO} \cdot A - y_{CO_2} \frac{dN}{dx}\right)}{N} \quad (7.57)$$

7.8.1.6 Metan Dengesi

Uçucu maddeler ile ortama verilen metan kömür besleme noktasında gaz bileşimine katılır ve ortamdaki oksijen ve metan konsantrasyonuna bağlı olarak kinetik mekanizma ile yanar.

$$\frac{dy_{CH_4}}{dx} = \frac{\left(-r_{CH_4} \cdot A - y_{CH_4} \frac{dN}{dx}\right)}{N} \quad (7.58)$$

7.8.1.7 Su Dengesi

Akışkan yatak ortamındaki su buharı; kömürün içerdiği nemden ve uçucu madde bileşiminden kaynaklanıyorsa tamamı kömür besleme noktasında gaz akımına ilave olmaktadır. Metan yanması sonucu oluşan su buharı ise besleme noktasından itibaren açığa çıkarak gaz akımına katılmaktadır.

$$\frac{dy_{H_2O}}{dx} = \frac{\left(2r_{CH_4} \cdot A - y_{H_2O} \frac{dN}{dx}\right)}{N} \quad (7.59)$$

7.8.1.8 Kükürt Dengesi

Kömür içindeki kükürt yanarak kükürt dioksit meydana getirir. Kok yanması ile açığa çıkan kükürt miktarı dz diferansiyel kesit alanında yanan karbon miktarı ile doğru orantılı olduğu kabul edilmiştir.

7.8.1.9 Azot Oksit Dengesi

Kükürt dengesinde olduğu gibi yatak içindeki dz kesit alanında yanan azot oksit miktarı yanan karbon miktarı ile doğru orantılıdır.

7.8.2 Serbest Bölge Kütle Dengesi

Serbest bölgedeki tüm denklemler aktif yataktakilerin aynısıdır ve serbest bölge giriş koşulları aktif yatağın bittiği noktadaki koşullardır.

7.9 Enerji Dengeleri

7.9.1 Aktif Yatak Enerji Dengesi

Enerji dengesini , kütle dengesinde olduğu gibi yine sonsuz küçük dx kalınlığındaki bir kesit göz önüne alınarak bulunabilir. Bu birim eleman içinde hem ekzotermik reaksiyonlar ile ısı üretilen, hem de hacim elemanının cidarından dışarıdaki soğuk ortama ısı kaybedilecektir. Isı kaybedilen hava sıcaklığı T_C ' dir ve yakma sistemindeki potansiyel ve kinetik enerji terimleri ihmal edilebilir.

Kütle akışından dolayı x sınırından hacim elemana giren ısı enerjisi ;

$$N \cdot C_p \cdot T \quad (7.60)$$

Ekzotermik reaksiyondan ötürü hacim elemanı içerisinde üretilen ısı enerjisi;

$$R_i \cdot A \cdot H_i \cdot dx \quad (7.61)$$

Kütle akışından ötürü $x+dx$ sınırından hacim elemanından çıkan ısı enerjisi;

$$N \cdot C_p \cdot T + \Delta X \cdot (N \cdot C_p \cdot T) \quad (7.62)$$

Hacim elemanı cidarından dış ortama transfer edilen ısı enerjisi;

$$Q \cdot \pi \cdot D \cdot dx \quad (7.63)$$

Enerji dengesini toparlayacak olursak aşağıdaki şekilde kurabiliriz.

$$N \cdot C_{PMIX} \cdot T - r_i \cdot A \cdot dx \cdot H_i = N \cdot C_{PMIX} \cdot T + d(N \cdot C_{PMIX} \cdot T) + Q \cdot \pi \cdot D \cdot dx \quad (7.64)$$

Denklemdaki Q dışarıya kaybedilen ısı debisi ($\text{kJ/m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{K}$) genel olarak;

$$Q = h_{top} \cdot (T - T_c) \quad (7.65)$$

şeklinde ifade edilebilir. Burada h_{top} ($\text{j/s} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{K}$) boyutunda akışkan yataktan dış havaya olan tüm ısı iletim katsayısıdır.

Diferansiyel enerji dengesinin düzenlenmiş hali ;

$$d(N \cdot C_{PMIX} \cdot T) / dx = r_i \cdot A \cdot H_i - h_{top} \cdot \pi \cdot D \cdot (T - T_c) \quad (7.66)$$

Genel olarak verilen enerji dengesinin modellenen akışkan yatağa uygulanmasıyla;

I. Yataktaki reaksiyonlar : karbon, metan, karbon monoksit yanmasıdır.

II. Yataktaki toplam ısı iletim katsayısı

II.1. Yanmanın gerçekleştiği ortam için ısı iletim katsayısı

Yanmanın gerçekleştiği iç ortamdan cidarlara olan ısı kaybına iki temel komponent neden olur : Bunlar sıcak char taneciklerinin ve gazın yüzeye temasıdır. Sıcak bir char partikülü kısa bir süre içinde yüzeye temas eder ve ayrılır. Aynı hareket akışkan yatakta yeni partiküller tarafından sürekli olarak tekrarlanır. Partiküllerin cidara teması mikroskobik seviye bir alandadır. Partiküller ve gaz temasın tarafından meydana getirilen maksimum ısı transfer katsayısı için matematiksel bağıntı;

$$h_{max} = 35,8 \cdot \rho_c \cdot \lambda_{max}^{0,6} \cdot d^{-0,36} \quad (7.67)$$

şeklinde ifade edilmektedir.

H_{max} değerinin %70'i genellikle iç ortam ısı transfer katsayısı olarak kullanılır (Howard,

1989).

II.2. Yatak malzemesinin ısı transfer katsayısı

Modelde kullanılan malzeme paslanmaz çelik olup, ısı transfer katsayısı 43 W/Mk olarak alınmıştır.

II.3. Dış ortam ısı transfer katsayısı

Yatak malzemesi dış kısmından ısıyı doğal taşınım ve ışınım yoluyla kaybeder. Doğal taşınım için kullanılan eşitlik,

$$H_{\text{doğal}} = 1,32 \left(\frac{T_{\text{dışorta}} - T_{\text{yüzey}}}{L} \right)^{0,25} \quad (7.68)$$

Silindirik yapılı yataklarda ışınım ile kaybedilen ısı debisi için kullanılan eşitlik ise;

$$Q = \frac{5,67E - 8(T_{\text{yüzey}}^4 - T_{\text{dışorta}}^4)}{\frac{1 - \alpha}{\alpha \cdot A} + \frac{1}{A}} \quad (7.69)$$

Akışkan yatak için toplam ısı transfer katsayısı ise;

$$\frac{1}{h_{\text{top}}} = \frac{1}{h_{\text{DİŞ}}} + \frac{\Delta D_{\text{cidar}}}{k_{\text{malzeme}}} + \frac{1}{h_{\text{iç}}} \quad (7.70)$$

şeklinde ifade edilebilir.

Denklemler yerlerine koyulduğunda aşağıdaki denklem elde edilir;

$$d(N.C_{\text{pmix}}.T) / dx = r_{\text{CO}}.A.H_{\text{CO}} + r_{\text{CO}}.A.H_{\text{CH}_4} + M_{\text{TÜK}}.\Delta X / L.A.H_C - h_{\text{top}}.\pi.D.(T - T_C) \quad (7.71)$$

$M_{\text{TÜK}}.\Delta X / L$: terimi X boyunda tüketilen karbon miktarıdır ve toplam yatakta tüketilen miktarın toplam yatak boyuna bölünmesi ile bulunur.

7.9.2 Serbest Bölge Enerji Dengesi

Aktif yatakta bulunan enerji eşitliği serbest bölge içinde geçerlidir. Serbest bölge aktif yatağa seri olarak bağlı ve aktif yatağın devamıdır.

7.10 Model Denklemlerinin Çözüm Metodu

7.10.1 Sınır Şartları

Aktif yatağa giren havanın kompozisyonu mol bazında %79 azot ve %21 oksijen olarak alınmıştır. Diğer bileşenler ihmal edilmiştir. Havanın yatağa 25°C de beslendiği ve yatak

başlangıç sıcaklığı ise 477°C olduğu kabul edilmiştir. Serbest bölge için giriş değerleri aktif yatak çıkış değerleridir.

Yatak malzemesi yatağa baştan ilave edilmekte ve akışkan yatağın sürekli çalışması içinde yatağa beslenmemekte ve yataktan atılmamaktadır.

Yatağa beslenen kömürün içeriğindeki nem ve uçucu maddenin yatağın başlangıcından itibaren kinetik biçimde açığa çıktığı ve kinetik olarak yandığı kabul edilmiştir.

Yatağa beslenen kömür yatak içinde homojen olarak dağılmakta ve kömür yanması sonucu oluşan kül yatağı yatak sıcaklığında terk etmektedir.

7.10.2 Deney Düzeneği ve Çalışma Şartları

Çalışmamda kullandığım deney verileri Sn. Handan Çubuk un yapmış olduğu çalışmadan alınmış olup deney düzeneği aşağıdaki şekildedir.

Rüzgar odası , ön ısıtma sırasındaki LPG-Hava karışımının yatağa homojen olarak beslenmesini sağlar.

Rüzgar odası ile yanma odası arasında yatak malzemesini dağıtıcı elek taşır. Aynı zamanda LPG-Hava karışımının homojen bir şekilde dağılmasını sağlar. Kullanılan plaka 170 cm çaplı olup, paslanmaz çelikten yapılmıştır. Üzerindeki 1 mm çapındaki deliklerin toplam yüzeye oranı %4 dür.

Toplam 1200 mm yüksekliğindeki iki ayrı parça, yanma odası ve serbest bölge olarak görev yapmaktadır. 300 mm yüksekliğindeki ilk parça , arada dağıtıcı elek olmak üzere rüzgar odasına flanşla bağlanmıştır. Bu kısım 150 mm çaplı ve 5 mm et kalınlığında silindirik borudur.

900 mm yüksekliğindeki ikinci kısım ise serbest bölge olarak adlandırılır. Bu kısım yatak yüksekliğini arttırarak taşınmayı önlemek için yapılmıştır. Bu bölge çapı 220 mm dir. Serbest bölge çapının aktif yatağa göre büyük olması, baca gazının yatakta daha uzun kalmasını sağlamaktadır (Çubuk, 1999).

Deney düzeneği atmosferik basınçta çalışmaktadır. 2,709 kg/h debisinde kömür akışkan yatağın alt kısmından beslenmektedir. Yatağa beslenen havanın debisi ise $12 \text{ m}^3/\text{h}$ dir. Dış hava sıcaklığı 25°C alınmıştır. Hava fazlalık katsayısının 1,2 olduğu durumda çalışmaktadır. Yatağa beslenen kömür tanecikleri 1-2 mm arasındadır. Yatak çalışma sıcaklığı 850°C olarak alınmıştır. Deneyde Orhaneli linyiti kullanılmış olup , kısa analizi ve elementel analizi Çizelge 7.4 de yer almaktadır. Farklı linyitler için de bu tablodaki değerlerle hesaplama

yapılabilmektedir.

Çizelge 7.4 Akışkan yatakta kullanılabilen kömür ve kimyasal özellikleri

KÖMÜR CİNSİ	KISA ANALİZ (%)				ELEMENTEL ANALİZ (%)				
	FC	WM	NEM	KÜL	C	H2	O	N2	S
SARAY	23,18	35,60	16,65	24,57	45,51	4,19	16,67	0,89	3,80
ORHANELİ-1	22,50	29,96	25,7	21,8	50,70	4,27	20,43	0,50	1,65
ORHANELİ-2	9,43	33,18	22,29	35,10	32,54	3,19	15,24	0,95	2,90
ORHANELİ-3	23,43	32,69	21,55	22,33	45,86	4,02	18,22	1,04	2,40
ORHANELİ-4	25,46	35,84	22,06	16,64	47,90	3,74	22,64	1,86	2,50
TUNÇBİLEK	37,58	32,19	14,73	15,50	56,60	4,51	16,24	1,44	3,00
TAVŞANLI-1	25,36	31,35	10,27	33,02	36,87	3,35	17,89	1,50	3,60
TAVŞANLI-2	26,07	31,69	10,22	32,02	37,72	3,21	17,87	1,61	3,10
TAVŞANLI-3	22,82	30,07	9,51	37,60	40,90	3,70	9,16	1,45	3,30
SEYİTÖMER	29,40	36,90	23,71	10,00	55,17	5,15	24,22	1,19	1,20
YATAĞAN	20,51	36,02	30,66	12,81	49,01	4,78	23,12	0,71	3,90
ÇAN	37,00	32,30	13,00	17,70	44,50	4,80	13,20	0,90	6,00
MALKARA	24,89	35,57	21,14	18,41	47,61	4,13	19,49	1,22	4,20
SOMA	21,30	43,36	14,97	20,37	48,14	4,19	17,66	1,22	4,20

Çizelge 7.4; Akçura ve Gerger (1982), Ağabay(1987),Bilge (1988) ile Urkan (1990) nın verdiği analiz değerlerinden oluşturulmuştur. Modelde kullanılan analiz değeri ise, Orhaneli linyitlerinin analiz değeridir (Çubuk,1999). Tablodaki elementel analiz değerleri kuru bazda verilmiştir.

8. SONUÇLAR

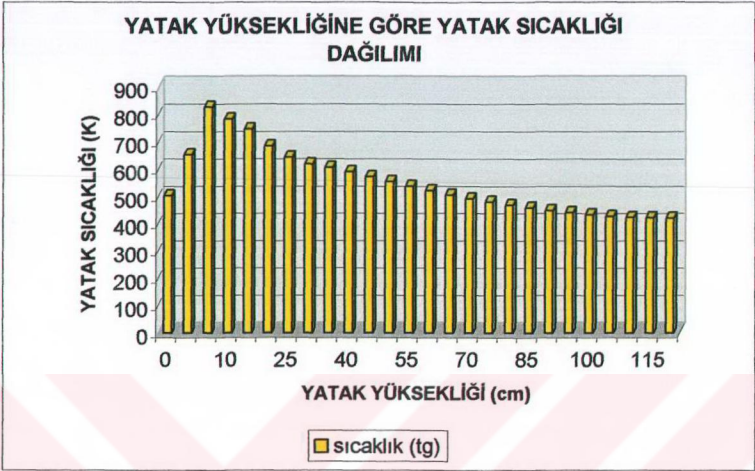
Linyitlerimizin, yüksek uçucu madde, yüksek kükürt içeriği, yüksek kül içeriği ve düşük ısı kapasiteye sahip olması yakılacağı sistem tasarımında bazı sorunlara neden olmaktadır. Oluşabilecek sorunları en az düzeye indirebilecek tasarım AYT olduğu bilinmektedir. AYY sırasında gerçekleşen temel proseslerin başında uçucu çıkışı ve yanması gelmektedir. Bölüm 7. de uçucu çıkışı ve yanması, literatürdeki kabuller detaylı olarak anlatılmıştır.

Bilgisayar programıyla hesaplanan modelde uçucu çıkışı ayrı bir parametre olarak yer almaktadır. Buradaki hesaplamalarda Sn. Handan Çubuk'un TÜBİTAK-Marmara Araştırma Merkezi Enerji Sistemleri ve Çevre Araştırma Enstitüsü Akışkan Yatak Laboratuvarında kurmuş olduğu düzeneğe göre yatak 25 mm lik kısımlara bölünmüş ve her kısım için uçucu çıkış değeri farklı tutulmuştur. Uçucu çıkış değeri için gerekli temel ise uçucu çıkışının yatağın tamamına dağıldığı durum olmuştur. Bu durum için hesaplama yapılan her 1 mm ye tüm uçucunun 1/300 oranında uçucu girişi olmaktadır. Temel olan 1/300 ün katları olarak her 25 mm ye sabit uçucu ilavesi olmaktadır. Modeldeki her 25 mm lik aralıklar için temel olan 1/300 ün çıkış katsayıları ve bu katsayıların kullanılması sonucu elde edilen aktif yatak sıcaklıkları denemeler sonucu elde edilmiştir.

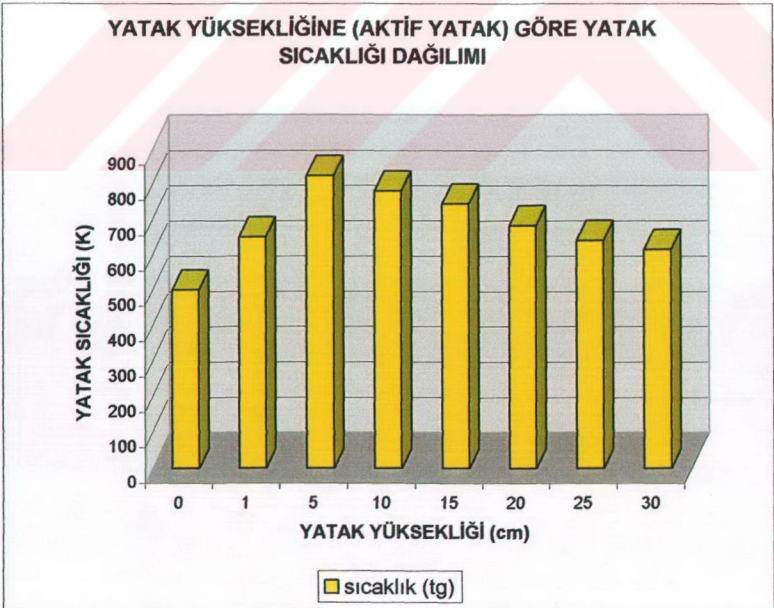
Programdan alınan bazı sonuçlara göre çizelge 8.1 de yatak yüksekliğine bağlı olarak yatak sıcaklık dağılımı çıkarılmıştır. Burada x ekseni yatak yüksekliğini temsil ederken , y ekseni ise K cinsinden yatak sıcaklığını temsil etmektedir. Buradan aktif yatak bölgesi olan ($z < 0,3$ m) yüksekliklerde yatak sıcaklığının maksimuma ulaştığı serbest bölge geçişi ile yatak içi sıcaklığının belirli seviyelerde seyrettiği görülmektedir. Çizelge 8.2. de aktif yatak bölgesi için yatak yüksekliğine bağlı sıcaklık dağılımı yer almaktadır.

Bilgisayar programı sonucu elde edilen değerlerle hazırlanan diğer grafikler ise aşağıda yer almaktadır.

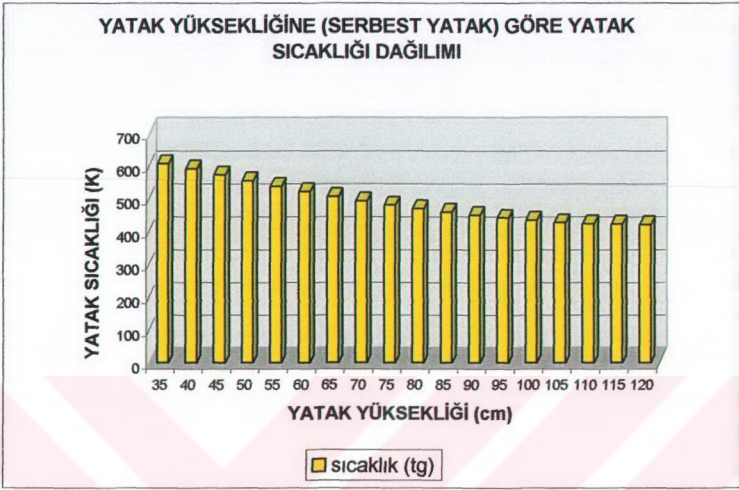
Çizelge 8.1. Yatak Yüksekliğine göre Sıcaklık Değişimi Grafiği



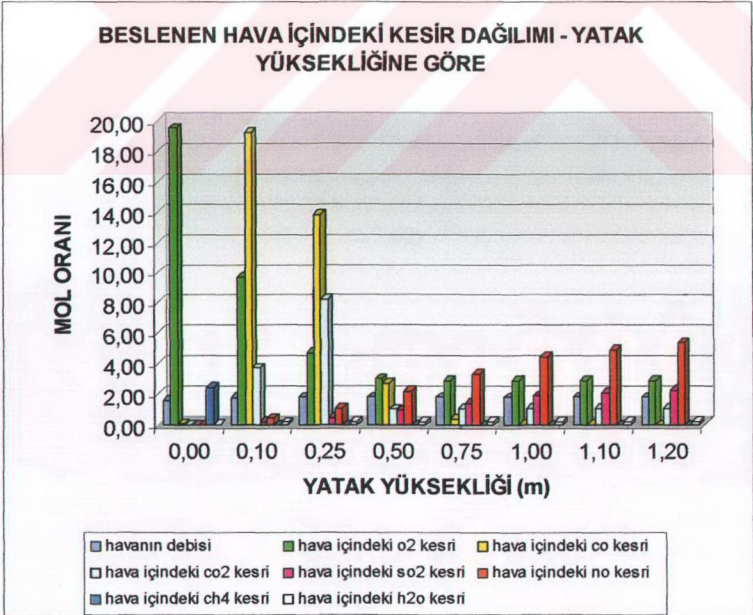
Çizelge 8.2. Aktif Yatak Bölgesi İçin Yatak Yüksekliğine Göre Sıcaklık Değişimi Grafiği



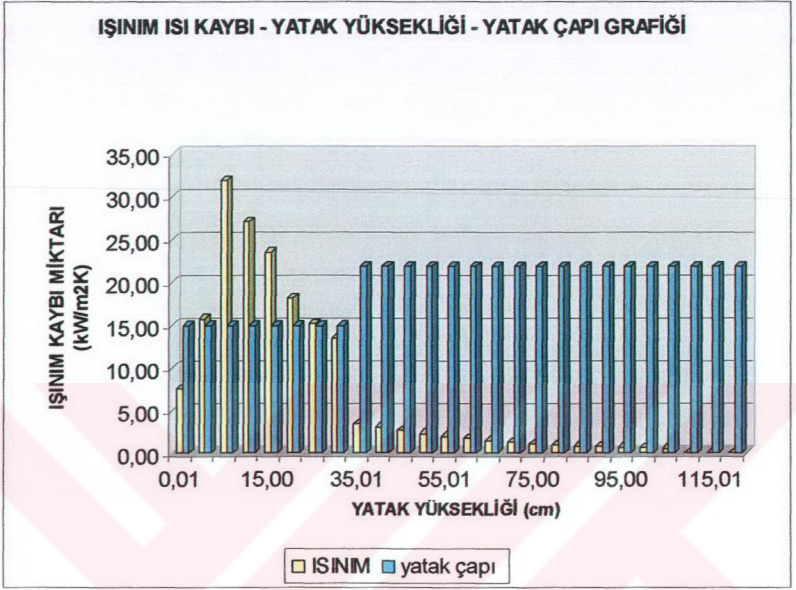
Çizelge 8.3. Serbest Yatak Bölgesi İçin Yatak Yüksekliğine Göre Sıcaklık Değişimi Grafiği



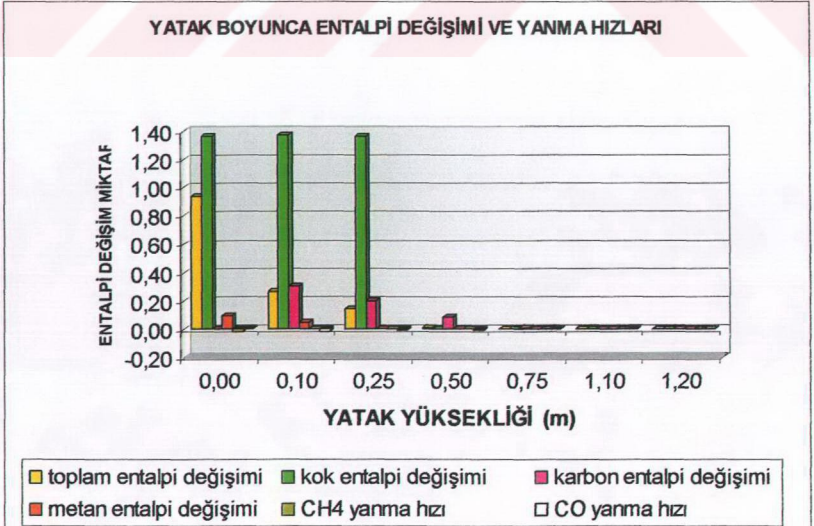
Çizelge 8.4. Yatak Yüksekliğine Göre Beslenen Hava İçindeki Bileşen Dağılımı



Çizelge 8.5. Yatak Yüksekliğine Bağlı Işınım Isı Kaybı Grafiği



Çizelge 8.6. Yatak Boyunca Entalpi Değişimi



KAYNAKLAR

- Atımtay, A., (1979), Akışkanlaştırılmış Yataklarda Linyit Kömürlerinin Yakılması, Doçentlik Tezi, İTÜ.
- Blumschein, J., (2002), Waerme und Stoffübergang in der Flüssigkeitsbedüsten Wirbelschicht, Otto-von-Guericke Universitaet, Magdeburg.
- Boles, M. A., Çengel, Y. A., (1996), Mühendislik Yaklaşımıyla Termodinamik, Literatür Yayınları, İstanbul.
- Brunello, S., Flour, I., Bruyet B., Maissa, P., (1996), "Kinetic Study of Combustion in a Fluidized Bed", Fuel, 75, 536-544.
- Cui, Y., Stubington, J.F., (2001), "A mathematical model of in-bed char combustion of Australian coals in PFBC ", Fuel 80 (2001) 2049-2056, Australia.
- Çubuk, H., (1999), Orhaneli Linyiti – Biyokütle Karışımının Akışkan Yatakta Yakılmasında Çevre Kirliliğinin İncelenmesi, Doktora Tezi, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü.
- DeWitt, D. P., Incropera, F. P., (2001), Isı ve Kütle Geçişinin Temelleri, Literatür Yayınları, 51, İstanbul.
- Davidson, J.R., (1985), Fluidization, Acedemic Pres, London
- Ekinci, E., Tolay M., Kadioğlu, E., (1983), "Akışkan Yatakta Uçucu Madde Davranımı", Uludağ Üniversitesi Birinci Yanma Sempozyumu, 63-73, Bursa.
- Helvacı, Ş. Ş., Peker, S., (2003), Akışkanlar Mekanigi Kavramlar Problemler Uygulamalar, Literatür Yayınları, 93, İstanbul.
- Hiller, A., (2002), Zirkulierende Wirbelschichtfeyerung, Technische Universitaet Dresden, Dresden.
- Howard, J.R., (1989), Fluidized Bed Technology, Adam Hilger, Bristol
- Köse, R., (1995), Akışkan Yatakta Yanmanın Modellenmesi ve Türk Linyitlerine Uyarlanması, Doktora Tezi, YTÜ.
- MİMAG-SAMKO Enerji Teknolojileri A.Ş., (2001), Akışkan Yataklı Kazan Teknolojilerine Dayalı Buhar-Elektrik Üretimi Paneli Konuşma ve Sunuş Metinleri, TÜBİTAK, Ankara.
- Oymak, O., Batu, A., (2001), "Kojenerasyon ve Akışkan Yataklı Kazanlar", Mimag-Samko , Ankara.
- Perry, R.H., Chilton, C.H., (1973), Chemical Engineers' Handbook, McGraw-Hill Book Company, New York.
- Rajan, R., (1980), "A Comprehensive Model for Fluidized Bed Coal Combustors", AlchEj.
- Rokita, D., (1991), Dynamische Modellierung Einer Komplexen Reaktion In Der Wirbelschicht, Technischen Universitaet Hamburg.
- Selçuk, N., (1999) "Akışkan Yatakta Yakma Teknolojileri", TMMOB, Türkiye 'de Kömür Politikaları ve Temiz Kömür Teknolojileri Sempozyumu, Ankara.
- Selçuk, N., (1999) "Kömürlü Termik Santrallerinde Akışkan Yatakta Yakma Teknolojisi", ODTÜ, Ankara.
- Sinn, H., Zellerfeld, C., (1987), Modellierung Der Wirbelschicht Für Einen Kohlegefeuerten Schiffs-Dampferzeuger, VDI Verlag, Reihe 6, Nr.207, Dusseldorf.
- Speigh, G.J., (1994), The Chemistry and Technology of Coal, Marcel Dekker Inc.

Sriramulu, S., Kulasekarun, S., (1998), "Mathematical Modelling of Fluidized Bed Combustion-2 Combustion of Gases", Fuel, 77, 1033-1049.

Strehlow, R.A., (1985), Fundamental Of Combustion, McGraw-Hill Book Company.

Stubington, J.F., (1985), "Comparison of Tecniquesfor Measuring the Temperature of Char Particles Burning in a Fluidized Bed", Chem.Eng.Res.Des., 63,241-249

TMMOB, (1998), Sanayi Kazanları ve Ek Donatım İşletme El Kitabı, Makine Mühendisleri Odası, 110-7, Ankara.

Werner, K. F. J., (1989), Wasserdampf-Kohle-Vergasung In Einer Druckaufgeladenen Zirkulierenden Wirbelschicht, Technischen Hochschule Aachen.

Yates, J.G., (1978), Fluidization, Cambridge University Pres, London.

Yetim, G., (2001), Kömür Yanmasının Matematiksel Modellenmesi, Yüksek Lisans Tezi, YTÜ.

INTERNET KAYNAKLARI

[1] www.tuwien.ac.at

[2] www.mg-lee.de

[3] www.dal.com.tr

[4] www.tki-cli.com

[5] www.tusiad.org

[6] www.geocities.com

ÖZGEÇMİŞ

Doğum tarihi	10.06.1979	
Doğum yeri	İstanbul	
Lise	1990-1997	Cağaloğlu Anadolu Lisesi
Lisans	1997-2001	Yıldız Teknik Üniversitesi Makine Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü
Yüksek Lisans	2002-2004	Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı Isı Proses Programı

Çalıştığı kurumlar

2001-Devam ediyor Sürücü Sigorta Acenteliği A.Ş.
Satış Danışmanı