



YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Alışkan yat. kav. fir. sülf.
bakır cev. kav.

Yüksek Lisans Tezi

H. Binnaaz Yoruç



TEŞEKKÜR

ÖZET

ABSTRACT

TABİHAAT LİSTESİ

ŞİMLER LİSTESİ

TEHDİTLER LİSTESİ

AKIŞKAN YATAKLI KAVURMA FIRININDA
SÜLFÜRLÜ BAKIR CEVHERİNİN KAVRULMASI

TEZ YÖNETİCİSİ : Doç. Dr. Zeki Gizmecioğlu

TEZ TESLİM TARİHİ : 30.6.1986

TEZ SAVUNMA TARİHİ: 11.7.1986

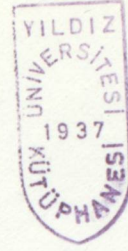
JÜRİ ÜYELERİ

Prof. Dr. Salih Dinçer

Doç. Dr. Zeki Gizmecioğlu

Yrd. Doç. Dr. Mehmet Filiz

İÇİNDEKİLER



Sayfa No

TEŞEKKÜR

ÖZET

ABSTRACT

TABLolar LİSTESİ

ŞEKİLLER LİSTESİ

SEMBOLLER LİSTESİ

1. GİRİŞ	1
2. SÜLFÜR MİNERALLERİNİN KAVURMA REAKSİYONLARI	3
2.1. Kavurmanın Mahiyeti	3
2.2. Metal Sülfürlerin Özellikleri	6
2.3. Kavurma Reaksiyonları	8
2.4. Fazlar Kaidesinin Kavurma Reaksiyonlarına Uygulanması	9
3. Cu-S-O ve Fe-S-O SİSTEMLERİNİN TERMODİNAMİK YÖNDEN İNCELENMESİ	11
3.1. Metallerin Oksijene Afinitesi	11
3.2. Metallerin Kükürde Afinitesi	13
3.3. Kesit-Alan Diyagramları	15
3.3.1. Hesaplama Örneği	17
4. AKIŞKANLAŞMA İÇİN GENEL PRENSİP VE TANIMLAR	20
4.1. Akışkanlaşma İşlemleri Karakteristikleri	25
4.2. Akışkan Yatakların Genel Davranışı	26
4.2.1. Tane Dağılımı	26
4.2.2. Minimum Akışkanlaşma	28

4.2.3. Minimum Akışkanlaşma İçin Gerekli Gaz Hızı	29
4.2.4. Akışkan Yataklarda Basınç Kaybı	31
4.2.5. Tanelerin Düşme Hızı	32
4.2.6. Akışkanlaşma Tipleri	38
4.2.7. Minimum Boşluk Oranı	39
4.2.8. Akışkan Yatakların Viskozitesi ve Akışkanlığı	41
4.3. Katı Gaz İlişkilerini Açıklayan Modeller	43
4.3.1. Davidson Modeli	43
4.3.1.1. Modelin Varsayımları	43
4.3.1.2. Sınır Şartları	44
4.3.2. Jackson Modeli	45
4.3.3. Kabarcıklı Yatak Modeli (Kunii-Levenspiel)	48
4.3.3.1. Modelin Varsayımları	48
4.3.3.2. Kabarcıklı Yataklarda Emülsiyon Fazı	51
4.3.3.3. Emülsiyon fazı için kabarcık Modelinin Varsayımları	61
4.4. Akışkan Yataklarda Gaz Akış Düzeni	63
4.4.1. Etki-Tepki Eğrileri	63
4.4.2. Diffüzyon Modeli	65

5. DENEYSEL ÇALIŞMA ve BULGULAR	69
5.1. Akışkan Yataklı Kavurma Reaktörü	69
5.1.1. Bu Çalışmada Kullanılan Akışkan Yataklı Kavurma Reaktörü	71
5.1.1.1. Cevher Besleme Sistemi	72
5.1.1.2. Akışkanlaştırma ve Kavurma Sistemi	72
5.1.1.3. Kontrol ve Ölçme Sistemi	75
5.1.1.4. Cevher Boşaltma Sistemi	76
5.2. Kullanılan Malzeme	81
5.3. Akışkanlaştırma Deneyleri	82
5.3.1. Minimum Akışkanlaştırma İçin Gerekli Gaz Hızı ve Gaz Debisi	82
5.3.2. Minimum Akışkanlaşma Hızının Tesbiti	83
5.3.3. Hava Debisinin Hesabı	86
5.3.4. Akışkan Yatakta Basınç Kaybının Hesaplanması	88
5.3.5. Basınç Düşüşü-Hız Eğrileri	89
5.4. Kavurma Deneyleri	96
5.4.1. Deneyin Yapılışı	96
5.4.2. Deney Sonuçları	97
5.4.3. Tartışma	99

5.4.4. Genel Sonuçlar 102

5.4.5. Müteakip Çalışmalara Tavsiyeler 103

KAYNAKLAR

ÖZGEÇMİŞ

TEŞEKKÜR

Tez çalışmama temel teşkil eden bilgileri edindiğim Kimya Mühendisliği Bölümü Öğretim üyelerine ve tez çalışma konumu veren Kimya Mühendisliği Bölüm Başkanına teşekkürlerimi sunarım.

Tez danışmanlığımı yapan ve çalışmalarımı en iyi şekilde yönlendiren Sayın Hocam Doç.Dr.Zeki ÇİZMECİOĞLU'na teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmamla ilgili Akışkan Yataklı Kavurma Fırının kurulması için gerekli maddi olanağı sağlayan ve her türlü kolaylığı gösteren Metalurji Mühendisliği Bölüm Başkanı Sayın Hocam Doç.Dr.Ahmet TOPUZ'a, Üretim Metalurjisi Anabilim Dalı Başkanı Sayın Hocam Doç.Dr.Müzeyyen MARŞOĞLU'na teşekkürlerimi sunarım.

Ölçme ve kontrol cihazlarının kullanımı ve temini ile ilgili yardımlarından ötürü Yard.Doç.Dr.Ahmet EKERİM'e teşekkür ederim.

Kimyasal Analizlerle ilgili her konuda yardımcı olan Uzm.Kimya Müh.Menekşe AKIN'a, cihazın kurulmasına temel teşkil eden çalışmalarından yararlandığım Makina Mühendisliği Bölümü öğrencilerinden Mehmet BOLAYIR'a, çalışmalarım sırasında her türlü yardımı gösteren Metalurji Mühendisliği Bölümü öğrencilerinden Cengiz BOZACI'ya teşekkür ederim.

ÖZET

Sülfürlü bakır cevherinin kavrulması için 10 cm. iç çaplı, 50 cm. yükseklikte, paslanmaz çelikten silindirik akışkan yataklı reaktör dizayn edilmiştir. Çeşitli laboratuvar tipindeki akışkan yataklı kavurma fırınları incelenerek, cihaz elemanlarının adaptasyonu esnasında ekonomik ve uzun süreli kullanıma uygun özellikte malzeme seçimine önem verilmiştir.

Bu reaktörde 900-1100 K sıcaklıklarında, ortalama tane boyutu 0,62 mm. olan % 9,54 Cu, % 44,23 Fe, % 32,89 S içeren küre cevheri kısmî kavurma reaksiyonuna tabî tutulmuştur.

Akışkan yataklı reaktörde optimum akışkanlaştırma ve kavurma şartları, gaz hızı, gaz basıncı ve reaksiyon sıcaklığı ölçülerek araştırılmıştır.

ABSTRACT

A fluidized bed reactor which is made from stainless steel, 100 mm. inside diameter and 500 mm. height was designed for roasting of copper ore with sulphur. By studying various fluidized-bed roasting furnaces of the laboratory type importance is given to the equipment selection of properties fitting economical and long-term use during the adaptation of the apparatus elements.

In this reactor, Küre copper ore which has 0,62 mm. average particul size, % 9,54 Cu, % 44,23 Fe and % 32,89 S content has been partially roasted at 900-1100 K temperatures.

Optimum fluidization and roasting conditions have been researched by measuring the gas velocity, gas pressure and reaction temperature.

TABLOLAR LİSTESİ

Sayfa no

Tablo 2.1. Bazı Sülfür Minerallerinin Ergime Sıcaklıkları	6
Tablo 2.2. Bazı Metal Sülfürlerin Kavurma Sıcaklıkları	7
Tablo 2.3. Üçlü Bir Sistemde Faz Sayısı ile Serbest Değişken Arasındaki İlişki	10
Tablo 3.1. Cu-O-S Dengesi İçin Standart Serbest Enerjiler	19
Tablo 3.2. P_{O_2} ve P_{SO_2} Arasındaki Bağlıntılar (Tablo 3.1.e göre)	19
Tablo 4.1. Çeşitli Araştırmacıların Verdiği (ϕ_s) Değerleri	28
Tablo 4.2. Değişik Araştırmacıların Belli (U_o) Değerleri İçin Saptadığı L_f/L_{mf} Oranları	40
Tablo 5.1. Akışkan Yataklı Kavurma Fırını Ayrıntıları	78
Tablo 5.2. Rüzgar Kutusu Ayrıntıları	80
Tablo 5.3. Fırın Gövdesi Ayrıntıları	80
Tablo 5.4. Küre Bakırlı Pirit Cevherinin Yaklaşık Kimyasal Analizi	81
Tablo 5.5. Küre Bakırlı Pirit Cevherinin Elek Analiz Tablosu	81
Tablo 5.6. Çeşitli (U_f) Değerlerine karşılık (Q) değerleri	87
Tablo 5.7. Boş Cam Akışkan Yatakta Artan Hava Hızı İle Basınç Düşüşünün Değişimi	89
Tablo 5.8. (+0,6-1) mm. Tane Boyutundaki 150 gr. Cevher İle Oluşturulan Yataktaki Basınç Düşüşünün Değişimi	90

Tablo 5.9.	(+1) mm. Tane Boyutundaki 150 gr. Cevher İle Oluşturulan Yataktaki Basınç Düşüşünün Değişimi	91
Tablo 5.10.	(+0,6-1) mm. Tane Boyutundaki 300 gr. Cevher ile Oluşturulan Yataktaki Basınç Düşüşünün Değişimi	92
Tablo 5.11.	Laboratuvar Tipi Akışkan Yataklı Kavurma Fırınında Boş Durumda Basınç Düşüşünün Değişimi	94
Tablo 5.12.	Laboratuvar Tipi Akışkan Yataklı Kavurma Fırınında 200 gr. Kalsine İle Oluşturulan Akışkan Yataktaki Basınç Düşüşü Değişimi	95
Tablo 5.13.	Kükürt Giderme Verimleri	99

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2.1. Ham Cevherden itibaren Bakır Üretim Şeması	5
Şekil 2.2. Bir Sülfür Taneciğinin Kavurma Reaksiyon Kademeleri	9
Şekil 3.1. Ellingham Diyagramı (Oksit Dönüşümünün Serbest Enerjisi)	12
Şekil 3.2. Kükürdün Ellingham Diyagramı	14
Şekil 3.3. Bazı Elementlerin Kükürt ve Oksijene Karşı Rölatif Afniteleri	16
Şekil 3.4. Cu-O-S ve Fe-O-S Denge Diyagramı	18
Şekil 4.1. Katı-Akışkan Temas Çeşitleri	21
Şekil 4.2. Kesikli, Paralel, Karma ve Ters Akımda Katı Konsantrasyonunun Değişik Durumları	22
Şekil 4.3. Gaz-Akışkan Yataklarda Temas Yöntemleri	24
Şekil 4.4. Katıların Tane Dağılımına Göre Oluşan Yatak Tipleri	27
Şekil 4.5. Hava Hızı-Basınç Düşüşü Değişimi	33
Şekil 4.6. Küresel ve Küresel Olmayan Tanelerin Terminal Hızı Grafiği	35
Şekil 4.7. U_t/U_{mf} Oranı İçin Deneysel Grafik	37
Şekil 4.8. L_f/L_{mf} ile U_0 Gaz Hızı Arasında Çizilmiş Deneysel Grafik	41
Şekil 4.9. Akışkan Yatağa Katı İlavesi ile Viskozite Değişimi	42
Şekil 4.10. Kabarcığın Fotoğrafı	45

Şekil 4.11. Çeşitli Yoğunluk Farklarına Göre (db_{max} ile dp) ile (dp) Arasındaki Değişim	47
Şekil 4.12. U_b/U_f ile U_o/U_{mf} Arasında Çizilmiş Deneysel Grafik	50
Şekil 4.13. Kabarcık Fazı Değişkenleri	51
Şekil 4.14. Akışkan Yatak İçinde Bir Tanecik Yörüngesi	53
Şekil 4.15. Katı Akısı Ölçümü	54
Şekil 4.16. Kum ve Silikajelin Karışma Akıları	56
Şekil 4.17. Katıların Eksenel Diffüzyon Katsayısı (MAY)	57
Şekil 4.18. Katıların Eksenel Diffüzyon Katsayısı (BART)	58
Şekil 4.19. Isıl Verilerden Hesaplanan Eksenel Diffüzyon Katsayıları (LEWIS)	59
Şekil 4.20. Katıların Radyal Diffüzyon Katsayıları (MORI+NAKAMURA)	60
Şekil 4.21. Kabarcık ve Kuyruk Hacimleri Arasındaki İlişki (ROVE+PARTRIDGE)	61
Şekil 4.22. Çeşitli Akış Düzenlerinde İzleyicinin Boyutsuz Çıkış Tekpileri	65
Şekil 5.1. Akışkan Yataklı Kavurma Fırını	77
Şekil 5.2. Dağıtıcı Eleğ Detayı	79
Şekil 5.3. Akışkan Yatak Gövdesi Detayı	79

Şekil 5.4. Hava Hızı-Basınç Düşüşü Eğrisi	90
Şekil 5.5. Hava Hızı-Basınç Düşüşü Eğrisi	91
Şekil 5.6. Hava Hızı-Basınç Düşüşü Eğrisi	92
Şekil 5.7. Hava Hızı-Basınç Düşüşü Eğrisi	93
Şekil 5.8. Hava Hızı-Basınç Düşüşü Eğrisi	94
Şekil 5.9. Hava Hızı-Basınç Düşüşü Eğrisi	95

SEMBOLLER LİSTESİ

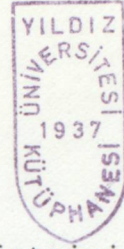
a	: Yatak Hacmine Göre Özgül Yüzey	(cm^{-1})
a'	: Tane Hacmine Göre Özgül Yüzey	(cm^{-1})
A_t	: Yatak Kesit Alanı	(cm^2)
C_d	: Sabit	
C_{p_s}	: Katıların Özgül Isısı	$(\text{cal.g}^{-1}\text{.}^{\circ}\text{C}^{-1})$
C_{p_g}	: Gazların Özgül Isısı	$(\text{cal.g}^{-1}\text{.}^{\circ}\text{C}^{-1})$
C_s	: Katıların Konsantrasyonu	(g.cm^{-3})
C_{Ab}	: Gaz Kabarcığının Konsantrasyonu	(gmol.cm^{-3})
C_{Ac}	: Bulut Fazının Konsantrasyonu	(gmol.cm^{-3})
C_{Ae}	: Emülsiyon Fazının Konsantrasyonu	(gmol.cm^{-3})
\bar{C}_A	: Ortalama Konsantrasyon	(gmol.cm^{-3})
$C(t)$: İzleyicinin Herbir Girişi İçin (t) Zamanına Göre Çıkan İzleyici Konsantrasyonu	(S^{-1})
$C(\theta)$: İzleyicinin (θ) Zamanına Göre Çıkış Konsantrasyonu	(Boyutsuz)
d_b	: Etkin Kabarcık Çapı	(cm)
d_p	: Tanecik Çapı	(cm)
d_t	: Yatak Çapı	(cm)
D_a	: Gazın Eksenel Yayınım Katsayısı	$(\text{cm}^2.\text{S}^{-1})$
D_r	: Gazın Radyal Yayınım Katsayısı	$(\text{cm}^2.\text{S}^{-1})$
D_{sa}	: Katıların Eksenel Diffüzyon Katsayısı	$(\text{cm}^2.\text{S}^{-1})$
D_{sr}	: Katıların Radyal Diffüzyon Katsayısı	$(\text{cm}^2.\text{S}^{-1})$
D	: Gazın Moleküler Diffüzyon Sabiti	$(\text{cm}^2.\text{S}^{-1})$
\mathcal{D}	: Emülsiyondaki Gazın Etkin Diffüzyon Sabiti	$(\text{cm}^2.\text{S}^{-1})$

$F(t)$: İzleyicinin (t) Zamanı İçin Boyutsuz Çıkış Tepkisi.	
$F(\theta)$: İzleyicinin (θ) Zamanı İçin Boyutsuz Çıkış Tepkisi.	
g	: Yerçekimi İvmesi	(980cm.S ⁻²)
g_c	: Düzeltme Faktörü	(980 g.cm.(g.wt) ⁻¹ S ⁻²)
h	: Yükseklik	(cm)
J	: Akı (Katılar İçin)	(g.cm ⁻² .S ⁻¹)
k_{ea}	: Etkin Isı İletkenliği Sabiti	(cal.cm ⁻¹ .°C ⁻¹)
$(K_{bc})_b$: Kabarcık ve Bulut Arasındaki Gaz İletim Sabiti	(S ⁻¹)
$(K_{be})_b$: Kabarcık Hacmine Göre Kabarcık ve Emülsiyon Fazı Arasındaki Gaz İletim Katsayısı	(S ⁻¹)
$(K_{be})_e$: Emülsiyon Fazı Hacmine Göre Kabarcık ve Emülsiyon Fazı Arasındaki Gaz İletim Katsayısı	(S ⁻¹)
L	: Yükseklik	(cm)
L_f	: Kabarcıklı Akışkan Yatak Yüksekliği	(cm)
L_{mf}	: Minimum Akışkanlaşma Şartlarındaki Yatak Yüksekliği	(cm)
L_m	: Sabit Yatak Yüksekliği	(cm)
m	: d_{ince}/d_{iri} , İnce ve İri Tanelerin Oranı	(Boyutsuz)
μ	: Gazın Viskozitesi	(g.cm ⁻¹ .S ⁻¹)
$\bar{\mu}$: Akışkanlaşmış Karışımın Viskozitesi	(g.cm ⁻¹ .S ⁻¹)

n	: Kabarcık Frekansı.	(S^{-1})
N_A	: A'nın mol sayısı	
N_P	: Yataktaki tane sayısı.	
P	: Basınç	$(g \text{ kuv.cm}^{-2} \text{ veya atm})$
ΔP	: Basınç Düşüşü	$(g \text{ kuv.cm}^{-2} \text{ veya atm})$
ΔP_d	: Dağıtıcı Üzerindeki Basınç Düşüşü	$(g \text{ kuv.cm}^{-2} \text{ veya atm})$
r	: Yarıçap	(cm)
R	: Tanenin Yarıçapı	(cm)
R_b	: Kabarcığın Yarıçapı	(cm)
R_c	: Kabarcığın Etrafındaki Bülütun Yarıçapı	(cm)
Re_p	: $dpU_o S_g / \mu$, Partikülün Reynolds Sayısı,	(Boyutsuz)
t	: Zaman	(s)
\bar{t}	: Akışkan veya Katının Reaktör İçinde Kalma Süresi	(s)
T	: Sıcaklık	$(^{\circ}C)$
U	: Hız	$(cm S^{-1})$
U_b	: Yatak İçinde Yükselen Kabarcığın Hızı	$(cm S^{-1})$
U_{br}	: Emülsiyon Fazına göre Kabarcık Hızı	$(cm S^{-1})$
U_e	: Emülsiyon Fazındaki Gazın Hızı	$(cm S^{-1})$
U_f	: Minimum Akışkanlaşma Şartlarındaki Gaz Hızı	$(cm S^{-1})$
U_{mf}	: Minimum Akışkanlaşma Şartlarındaki Yüzeysel Akış Hızı	$(cm S^{-1})$

U_s	: Emülsiyon Fazındaki Katıların Düşme Hızı	(cm S ⁻¹)
U_t	: Düşen Tanelerin Terminal Hızı	(cm S ⁻¹)
U_o	: Boş Hacim Hızı	(cm S ⁻¹)
V_b	: Gaz Kabarcığının Hacmi	(cm ³)
V_w	: Yükselen Gaz Kabarcığını Takip Eden Kuyruğun Hacmi	(cm ³)
W	: Katıların Ağırlığı	(g)
X	: Bir Karışımdaki Katıların Ağırlık Oranı	
α	: V_w/V_b , Kuyruk Hacminin Kabarcık Hacmine Oranı	(Boyutsuz)
δ	: Yataktaki Kabarcıkların Oranı	(Boyutsuz)
ϵ	: Boşluk Oranı	(Boyutsuz)
ϵ_e	: Kabarcıklı Bir Yataktaki Emülsiyon Gazının Boşluk Oranı	(Boyutsuz)
ϵ_f	: Kabarcıklı Yatağın Boşluk Oranı	(Boyutsuz)
ϵ_{mf}	: Minimum Akışkanlaşma Şartlarındaki Yatağın Boşluk Oranı	(Boyutsuz)
ϵ_m	: Sabit Yatağın Boşluk Oranı	(Boyutsuz)
θ	: Akışkan Yataklarda İçeride Kalma Zamanı	(Boyutsuz)
ρ	: Yoğunluk	(g.cm ⁻³)
ρ_g	: Gazın Yoğunluğu	(g.cm ⁻³)
ρ_{mf}	: Minimum Akışkanlaşma Şartlarındaki Yatağın Kütlesinin Yoğunluğu	(g.cm ⁻³)
ρ_s	: Katının Yoğunluğu	(g.cm ⁻³)

1. GİRİŞ
- $\bar{\rho}$: Gaz-Katı Karışımının Ortalama Yoğunluğu (g.cm⁻³)
- Φ_s : Küresellik Faktörü (Boyutsuz)
- Fr_{mf} : $U_{mf}^2/dp.g$, Minimum Akışkanlaşma-daki Froude Sayısı (Boyutsuz)



1. GİRİŞ

Günümüzde Kimya ve Metalurji Endüstrisinde kavurma işlemi gün geçtikçe önem kazanmaktadır. Cevherlerin işlenmesinde ana işlem olarak kullanılan kavurmanın mükemmel bir şekilde olması, gerek elde edilen baca gazlarının değerlendirilmesinde ve gerekse kavurma ürünlerinin iyileştirilmesinde önem kazanmaktadır. Bu nedenlerden dolayı, gaz-katı temasının mükemmel olduğu "Akışkan Yataklı Fırınlar" kavurma işlemlerinde geniş çapta kullanılmaktadır.

Akışkanlaşma prensibine dayanarak çalışan bu fırınlar, Amerika'da II. Dünya Savaşı sırasında özellikle petrol rafinasyonu alanında "Esso Research and Engineering Company" firması tarafından geliştirilmiş, daha sonraları yine Amerikan "Dorr-Oliver" firması tarafından Metalurji ve Kimya alanlarında kullanılmaya başlanmıştır.

Genel bir tanım olarak, Akışkan Yataklı Kavurma Fırını; silindir şeklinde çelik bir kap olup cevher doldurma sistemi, akışkanlaştırma ve kavurma sistemi, kontrol ve ölçme sistemi, cevher boşaltma sistemi olmak üzere dört kısımda düşünülebilir.

Akışkanlaşma ise, küçük taneli katıların bir akışkan ile temas ederek akışkan benzeri hale dönüştürüldüğü bir işlemdir. Tane ve gaz hareketinin doğurduğu yüksek ısı iletkenliği sayesinde yatak, reaktör içinde sıcaklığı her tarafta eşit tutan bir düzenleyici görevi görmektedir. Isı iletkenliğinin yüksek oluşu, beslenen malzemenin istenen sıcaklığa çabuk olarak erişmesini ve reaksiyonların ani olmasını sağlar. Tanecikleri düzgün, sıvı benzeri akışları kolay, sürekli otomatik kontrol edilebilen işlemler gerçekleştirilebilir. Tamamen kapalı bir ünite oluşu SO_2 bakımından çok az bir kayıp doğurur ve H_2SO_4 üretiminde oldukça

yüksek verim sağlar.

Bu tez'de, Küre-Bakırlı Pirit cevherinin oksitleyici ortamda kavrulması üzerinde çalışılmıştır. Çalışma genel olarak üç bölümde gelişme göstermiştir. Birinci bölümde; akışkan yataklı kavurma reaktörünün dizaynı, ikinci bölümde; yatak malzemesinin akışkanlaşma şartlarının tesbiti, üçüncü bölümde ise kavurma deneyleri yer almıştır. Akışkanlaşma şartlarının belirlenmesinde, reaktörle aynı boyutlara sahip cam akışkan yatak kullanılmıştır.

Kavurma deneyleri, değişik sıcaklık ve sürelerde yapılarak sonuçların yorumu yapılmıştır. Cevherin ve elde edilen kalsinelerin kimyasal analizleri yapılarak, kükürt giderme verimi saptanmıştır.

2. SÜLFÜR MİNERALLERİNİN KAVURMA REAKSİYONLARI

2.1. KAVURMANIN MAHİYETİ

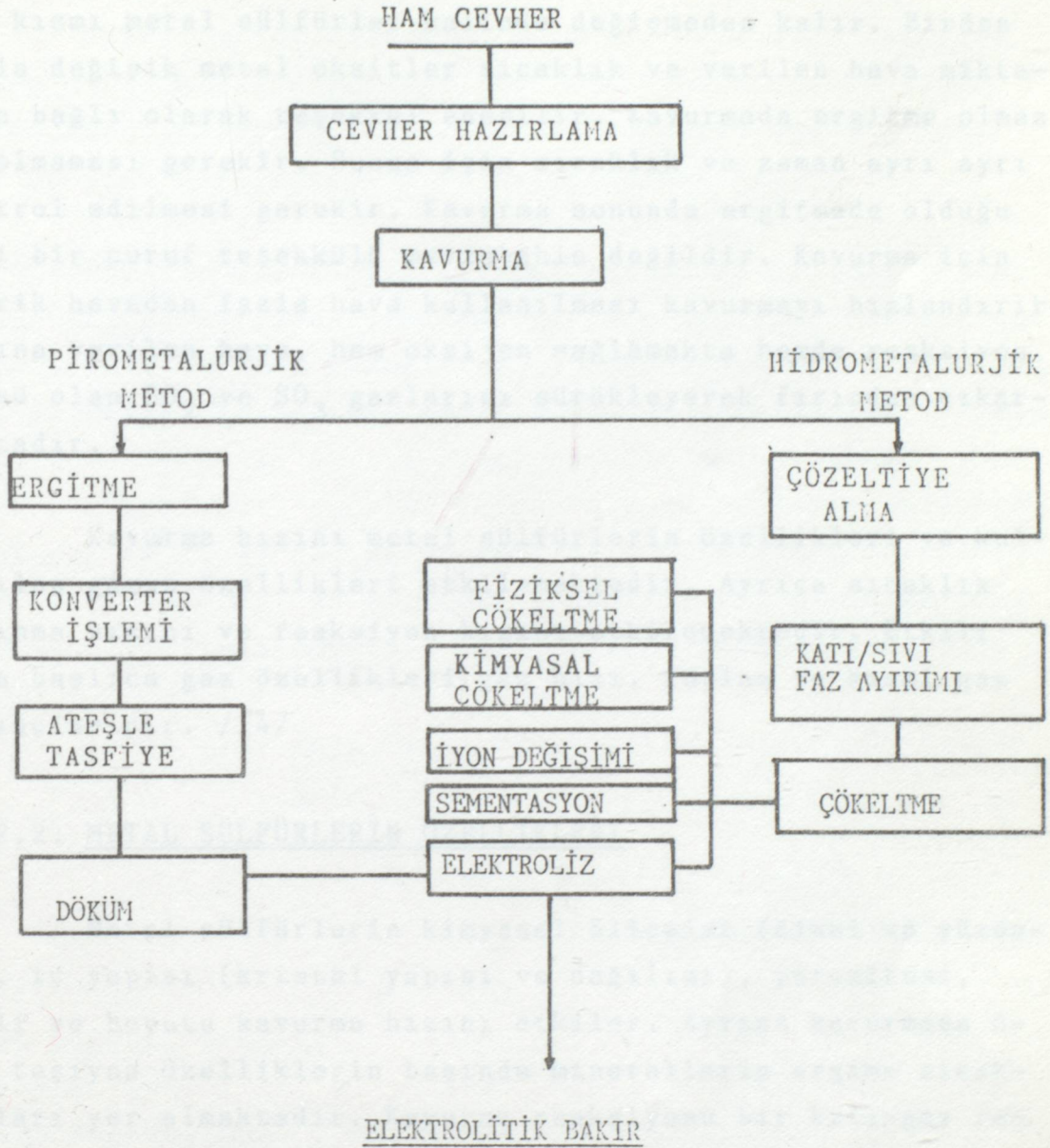
Metaller tabiatta cevher adını verdiğimiz mineral karışımları halinde bulunmaktadır. Metal mineralleri, metallerin oksit, karbonat klorür, sülfat, ve sülfür bileşikleridir. Bakır, kurşun, çinko, kobalt, bizmut, antimuan, molibden, nikel ve kalay gibi birçok metaller tabiatta sülfür mineralleri halinde bulunurlar. Cevher içerisinde ana metal minerali yanında gang adı verilen, silis, kalker vs. diğer maddeler de karışım halinde mevcuttur. Cevherden metal üretimini gerçekleştirmek için ana metal minerali bakımından fakir cevheri zenginleştirme yani cevher hazırlama işlemi yapılır. Cevher hazırlama işlemi ekonomik ve teknolojik sebeplerle uygulanır. Bu sayede gang minerallerine lüzumsuz olarak uygulanan nakliye ve metalurjik işlem masrafları azaltılır. Ayrıca bir çok değişik minerallerin elde edilmesi ve daha saf nihaî ürünün elde edilmesi mümkün olur. Cevher hazırlama kırma, öğütme, eleme, sınıflandırma ve ayırma safhalarından ibarettir. Serbestleşmiş ana metal minerali diğer minerallerden ve gang minerallerinden flotasyon (yüzdürme) manyetik ayırma ve ağırlık metodu gibi usullerle değişime uğramadan ayrılabilir. Sülfür mineralleri, genellikle flotasyon metodu ile gerek birbirinden, gerekse gang minerallerinden ayrılabilir. Zengin cevher, daha sonraki pirometalurjik veya hidrometalurjik işlemlere hazırlamak maksadıyla kavurma adı verilen bir önışleme tabii tutulur. Şekil 2.1 de ham bakır cevherinden itibaren bakır üretim akım şeması ifade edilmektedir.

Kavurma, zenginleştirilmiş cevherin belirli bir gaz ortamda, belirli bir sıcaklığa kadar ergime olmaksızın ısıtılmasıdır. Kavurma ortamının cinsine göre oksitleyici, re-

dükleyici, klorürleyici ve sülfatlayıcı kavurma tipleri gerçekleşir. Kavurma esas itibarıyla bir katı-gaz reaksiyonudur. Bu reaksiyon sırasında cevherin bileşimi değişir. Mesele oksitleyici bir ortamda sülfür minerallerinin kavrulması metal oksitlerin teşekkülüne ve kükürdün SO_2 ve / veya SO_3 halinde gaz faza geçmesine yol açar. Kavurma, sülfür mineral taneciklerinin yüzeyinde ve reaksiyon ilerledikçe derinlere doğru nüfuz ederek gerçekleşir. Sonuç olarak kavrulmuş tabaka gözenekli bir yapı meydana getirir. Oksijenin sülfürlerle reaksiyon yapmağa devam edebilmesi ve SO_2 gazının yüzeyden uzaklaşabilmesi için gazların teşekkül eden bu oksit tabakasından geçerek daha içerilere nüfuz etmesi ve açığa çıkan gazın içerilerden dışarı çıkması gerekmektedir. Böylece oksit tabakası kalınlaştıkça kavurma reaksiyonu ters yönde ilerleme meyli gösterir. Çünkü ortamda O_2 konsantrasyonu azalmış ve SO_2 konsantrasyonu artmış olacaktır. Bu yüzden kükürdün son kısmını yakmak oldukça zorlaşmaktadır. Cevherin fırından geçme zamanını ayar etmek suretiyle istenen miktarda kükürdü kavrulmuş cevher elde etmek mümkündür.

Tam kavurma, cevherin bileşimindeki kükürdün tamamen veya ekonomik bakımdan mümkün görülen miktarda yakılmasıdır. Pratik olarak bütün sülfür mineralleri ateş alıp yanmaktadır. Cevher içindeki sülfür mineralinin cinsine, yüzdesine ve kullanılan fırının cinsine bağlı olarak dışarıdan yakıt vermeden kendiliğinden kavurma işlemi gerçekleştirilebilir. Bahis konusu sülfürlerin yanması sonucu ortaya çıkan ısı, reaksiyonun ilerlemesine yeterli olmaktadır. Reaksiyonu başlatmak veya düşük yüzdeli sülfür mineralli cevherlerin kavurmasında reaksiyonu ilerletmek için herhangi bir yakıt kullanılabilir.

• Kavurma sırasında karışık halde bulunan sülfür mineralleri içerisinden bir kısmı öncelikle oksitlenir, diğer



ŞEKİL21- HAM CEVHERDEN İTİBAREN BAKIR ÜRETİMİ AKIM ŞEMASI /14/

bir kısmı metal sülfürler halinde değişmeden kalır. Birden fazla değişik metal oksitler sıcaklık ve verilen hava miktarına bağlı olarak teşekkül edebilir. Kavurmada ergitme olmaz ve olmaması gerekir. Bunun için sıcaklık ve zaman ayrı ayrı kontrol edilmesi gerekir. Kavurma sonunda ergitmede olduğu gibi bir curuf teşekkülü mevzubahis değildir. Kavurma için teorik havadan fazla hava kullanılması kavurmayı hızlandırır. Fırına verilen hava, hem oksijen sağlamakta hemde reaksiyon ürünü olan SO_2 ve SO_3 gazlarını sürükleyerek fırından çıkarılmaktadır.

Kavurma hızını metal sülfürlerin özellikleri ve kullanılan gazın özellikleri etkilemektedir. Ayrıca sıcaklık yayınma hızını ve reaksiyon hızını etkilemektedir. Etkili olan başlıca gaz özellikleri gaz hızı, toplam ve kısmi gaz basınçlarıdır. /14/

2.2. METAL SÜLFÜRLERİN ÖZELLİKLERİ

Metal sülfürlerin kimyasal bileşimi (cinsi ve yüzdesi), iç yapısı (kristal yapısı ve dağılımı), porozitesi, şekli ve boyutu kavurma hızını etkiler. Ayrıca kavurmada önem taşıyan özelliklerin başında minerallerin ergime sıcaklıkları yer almaktadır. Kavurma reaksiyonu bir katı-gaz reaksiyonu olduğundan, kavurma sıcaklığı, minerallerin ergime sıcaklıklarını aşmamalıdır. Tablo 2.1, bazı sülfür minerallerinin ergime sıcaklıklarını göstermektedir.

Tablo 2.1. Bazı Sülfür Minerallerinin Ergime Sıcaklıkları : /14/

FeS	1195°C	Ag ₂ S	892°C
Cu ₂ S	1127°C	Ni ₃ S ₂	790°C
PbS	1114°C	MnS	1530°C
ZnS	1645°C	Na ₂ S	950°C

Farklı metal sülfürler birarada bulunduğu takdirde, ortaya çıkan ötektik yapılar, saf sülfürlerden daha düşük ergime sıcaklıkları gösterirler. Bu takdirde ötektik yapılar, kavurma şartlarında sıvı halde bulunurlar.

Kavurma sıcaklığı, mineral parçalarının tane büyüklüğüne bağlı olarak değişmektedir. İnce öğütülmüş sülfür minerallerinin kavurma sıcaklıkları, kaba öğütülmüş mineralden daha düşüktür. Kullanılan metalie sülfür mineralinin mekanik parçalanma özelliği ile birlikte kavurma için lüzumlu yakıt, refrakter sarfiyatı ve elde edilen ürünün özelliği gözönünde tutularak en uygun öğütme ve kavurma şartlarını tespit etmek gerekir. Tablo 2.2. de bazı metal sülfürlerin tipik kavurma sıcaklıkları, tane boyutuna bağlı olarak verilmiştir. /14/

Tablo 2.2. Bazı Metal Sülfürlerin Kavurma Sıcaklıkları ($^{\circ}\text{C}$) /14/

	Max. 1 mm <u>tane iriliği</u>	2 mm'den büyük <u>tane iriliği</u>
Pirit, FeS_2	325	472
Nikel Sülfür, NiS	700	886
Kalkosin, CuS	430	679
Kobalt Sülfür, CoS	574	859
Antimuan Sülfür, Sb_2S_3	290	340
Sinaber, HgS	338	420
Arjantit, Ag_2S	605	875
Çinko Blend, ZnS	647	810
Galena, PbS	554	847

2.3. KAVURMA REAKSİYONLARI

Kavurma, yüksek sıcaklıkta oluşan bir katı-gaz reaksiyonudur. Genel bir ifade ile

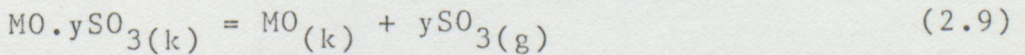
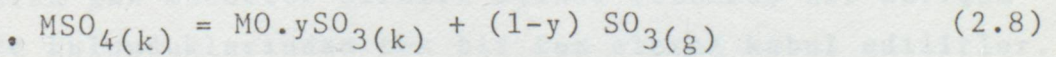
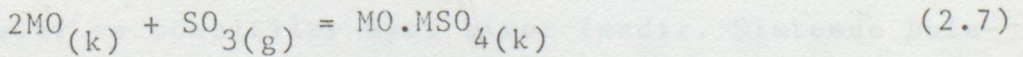
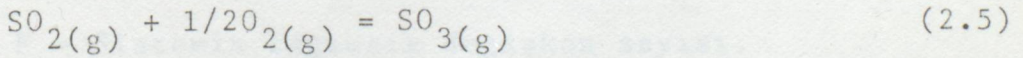
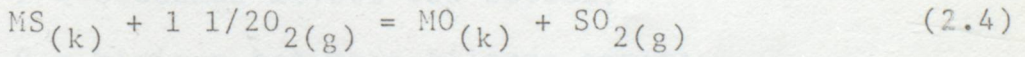
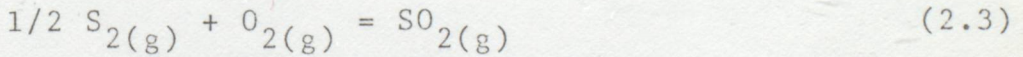


reaksiyonu ile gösterilir. Kavurma reaksiyonu üç kademede gerçekleşir.

- 1) Reaksiyona giren maddelerin ara yüzeye doğru yayınması,
- 2) Ara yüzeyde reaksiyonun gerçekleşmesi,
- 3) Ara yüzeyden reaksiyon ürünlerinin uzaklaşması.

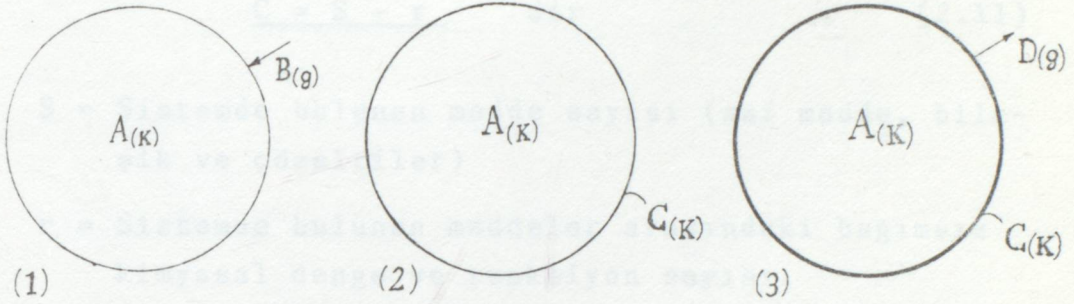
Söz konusu reaksiyon kademeleri bir sülfür mineral taneciği için Şekil 2.2 de gösterilmektedir.

Metal sülfürlerin kavurması ile ilgili başlıca reaksiyonlar, aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir. /14/



M = İki değerli bir metal, Gaz Fazı = $SO_2 + O_2 + SO_3$

Yoğun Fazlar: $MS_2, MS, MO, MSO_4, MO.ySO_3, MO.MSO_4$



Şekil 2.2- Bir Sülfür taneciğinin kavurma reaksiyon kademeleri. /14/

2.4. FAZLAR KAİDESİNİN KAVURMA REAKSİYONLARINA UYGULANIŞI

Kapalı bir sistem içinde dengede bulunan geri dönüşlü reaksiyonlara fazlar kaidesi uygulanırken aşağıdaki denklem esas alınmaktadır.

$$\underline{F = C + 2 - P} \quad (2.10)$$

Sembollerin manası :

P = Sistemde mevcut faz sayısı,

C = Minimum bağımsız bileşen sayısı,

F = Sistemin bağımsız değişken sayısı.

Bütün saf element veya bileşik halindeki katı ve sıvı maddeler ve çözeltiler ayrı birer fazdır. Sistemde bulunan bütün gaz maddeler birbiri içinde çözülmüş bir karışım halinde bulduklarından tek bir faz olarak kabul edilirler.

Sistem içinde element ve bileşik halinde maddeler yanyana ve dengede bulunduğu takdirde :

$$\underline{C = S - r} \quad \text{dir} \quad (2.11)$$

S = Sistemde bulunan madde sayısı (saf madde, bileşik ve çözeltiler)

r = Sistemde bulunan maddeler arasındaki bağımsız kimyasal denge ve reaksiyon sayısı.

Kavurma reaksiyonlarına termodinamikteki fazlar kaidelerinin uygulanabilmesi için evvela söz konusu sistemin belirtilmesi, bu sistemdeki bileşenlerin denge halinde birbirine geri dönüşlü reaksiyonlarla bağlı bulunduğunun kabul edilmesi veya bunun için gerekli şartların yerine getirilmiş olması icabeder. Bir sülfür mineralinin kavurmasında rol oynayan aslî bileşen sayısı (Metal-Kükürt-Oksijen) olmak üzere üçtür. O halde, böyle üçlü bir sistemde fazlar kaidesine göre, dengede bulunan faz sayısı ile serbest değişken sayısı arasında aşağıda Tablo 2.3 de gösterilen ilişkinin bulunması gerekir. /14/

Tablo 2.3: Üçlü Bir Sistemde Faz Sayısı ile Serbest Değişken Arasındaki İlişki /14/

<u>P</u>	<u>F</u>	<u>Grafikle Gösterme Şekli</u>
5	0	Değişken yoktur, özellikler sabittir.
4	1	Bileşimler sabittir, $\text{Log}P_t = f(1/T)$ bağıntısı
3	2	Bileşimler ve sıcaklık sabittir, $\text{Log}P_{\text{SO}_2} = f(\text{Log}P_{\text{O}_2})$ bağıntısı

3. Cu-S-O ve Fe-S-O SİSTEMLERİNİN TERNODİNAMİK YÖNDEN İNCELENMESİ

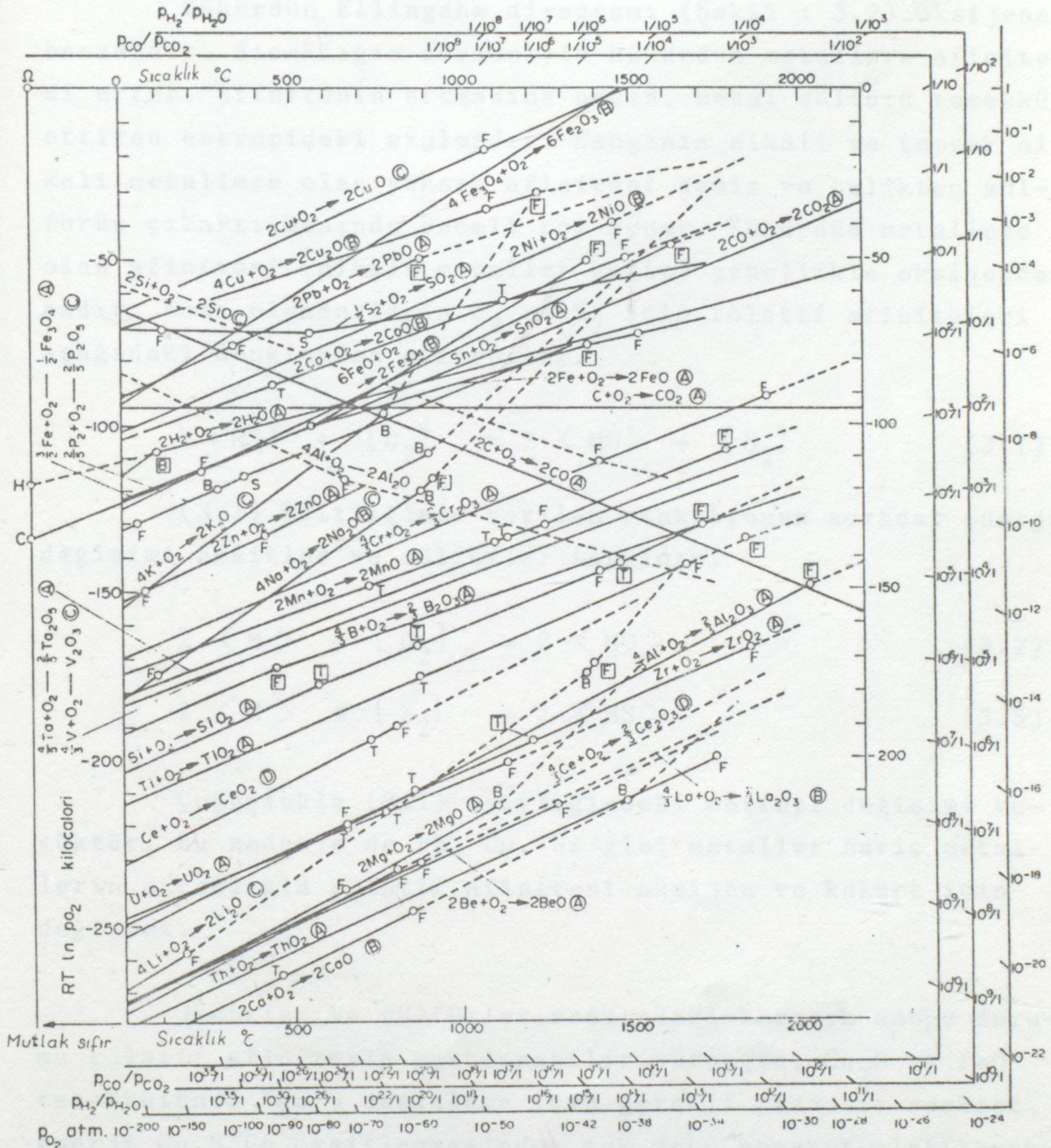
Metallerin üretiminde karbonun, kükürdün, klorun ve azotun önemli etkilerinin olduğu bilinmektedir. Bu etkide ayrıca afiniteninde önemi çok büyüktür. Kükürdün ve oksijenin afinitelerinin ayrı ayrı incelenmesi yararlı olacaktır.

3.1. METALLERİN OKSİJENE AFİNİTESİ

Oksijen bazı metallerle oksitli bileşikler yapabilir. Oksit dönüşümünün serbest enerjisi Ellingahm diyagramında (Şekil : 3.1) görülmektedir. Atmosferik ve standart şartlar altında metallerin oksijene afiniteleri kararlı altından itibaren, bizmut, civa, gümüş oksit ve karbonla redüklenabilen oksitlerden kurşun oksit, bakır oksit, demir oksit şeklinde bir sıralama yapılabilir.

Metal oksitler için redükleyici karbon kullanıldığı için oksitlerin stabilitesi ve karbonun oksitlenebilirliği çok önemlidir. Metal üretiminde özel işlem gerektiren alüminyum, titanyum, kalsiyum karbonla redüklenemezler. Karbonun redükleyebileceği metaller serbest enerji diyagramından görülebilir.

Sıcaklığın 983 K'nin altında olması halinde C_2 , CO' den daha stabildir. Entropinin azalmasıyla CO miktarıda azaldığı için CO' in teşekkülü özellikle çok önemlidir. Yüksek sıcaklıkta metal oksitten oksijeni çıkarmak mümkündür. Bu işlem için redükleyici olarak gaza yada oksijene karşı daha yüksek afinitesi olan bir metale ihtiyaç vardır.



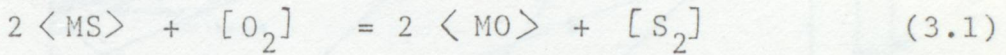
ŞEKİL 3-1. Oksitlerin Dönüşüm Serbest Enerjisi /12/

Yaklaşık sapma (25°C)

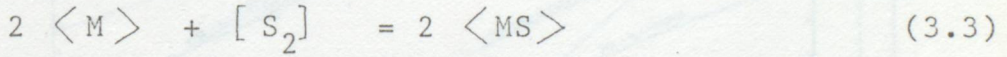
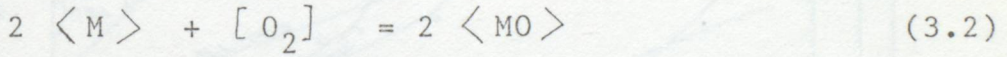
	Hal Değişimi	Element	Oksit
A	± 1 kilokalori	Erime Noktası	F
B	± 3 kilokalori	Geçiş Noktası	T
C	± 5 kilokalori	Kaynama Noktası	B
D	± 10 kilokalori		

3.2. METALLERİN KÜKÜRDE AFİNİTESİ

Kükürdün Ellingahm diyagramı (Şekil : 3.2) oksijene benzerdir. Sıcaklığın düşmesiyle kükürdün metallere afinitesi artar. Afinitenin artmasına neden, metal sülfürü teşekkül ettiren entropideki azalmadır. Manganın alkali ve toprak alkali metallere olan yüksek afinitesi demir ve çelikten sülfürün çıkartılmasında önemli rol oynar. Kükürdün metallere olan afinitesi (alkali metaller hariç) genellikle oksijenden azdır. Bazı elementlerin O_2 ve S_2 için rölatif afiniteleri aşağıdaki denklemden alınabilir.

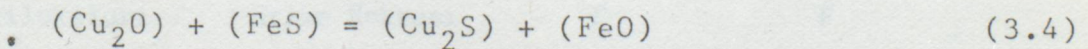


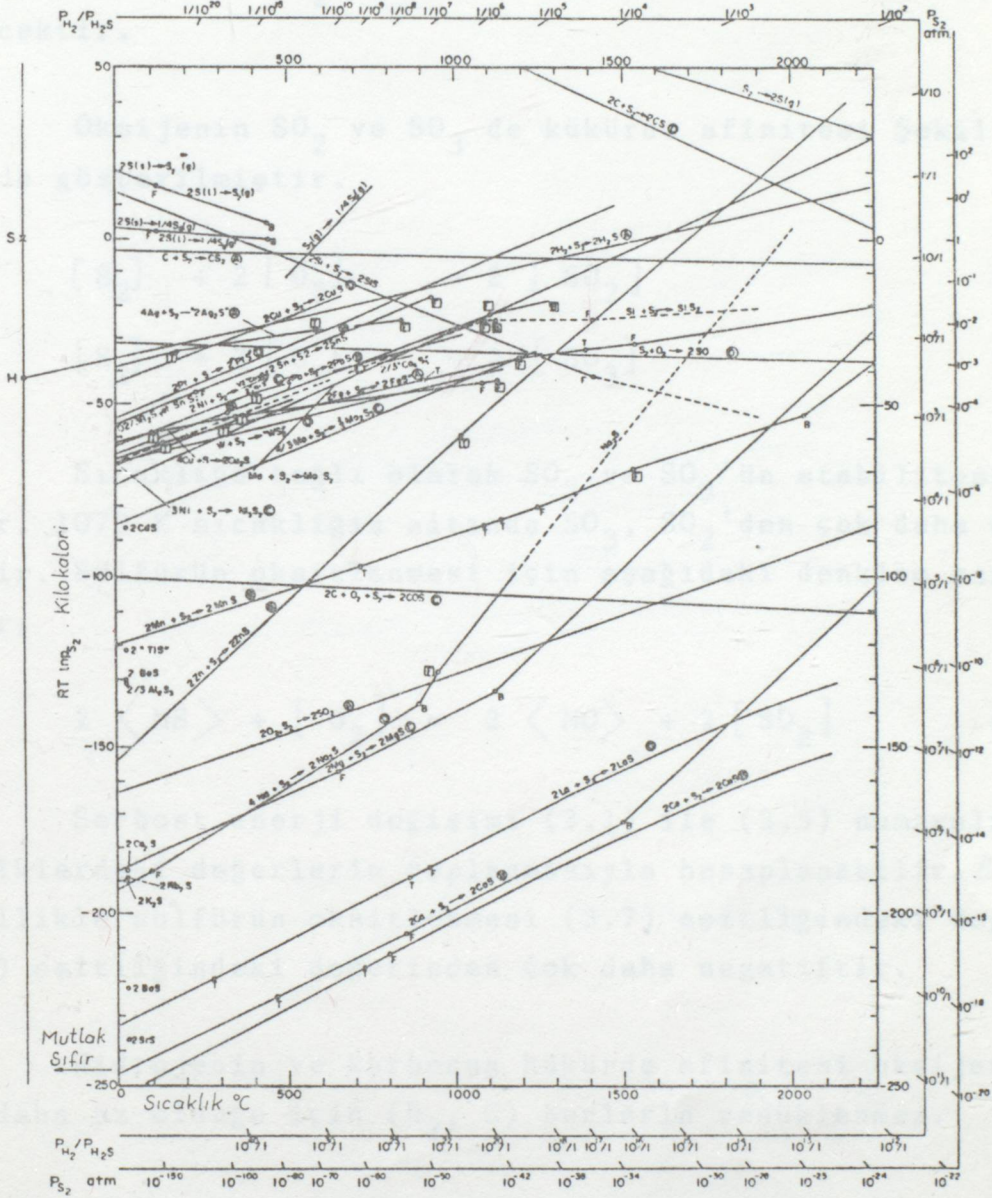
(3.1) Eşitliğinde verilen reaksiyonun serbest enerji değişimi oksitler ve sülfürler farkıdır.



Çoğunlukla (3.1) eşitliğindeki entropi değişimi küçüktür. Bu nedenle de Pb, Cu, Ni gibi metaller hariç metallerin sıcaklıkla rölatif afinitesi oksijen ve kükürt için değişmez.

Oksitler ve sülfürler arasındaki karışık denge durumu rölatif afiniteyle açıklanabilir. Örneğin, Cu_2S ve FeO teşekkülünde FeS 'ü oksitleme için gerekli standart serbest enerji Cu_2S 'ün oksitlenmesinden çok daha negatif olabilecektir.



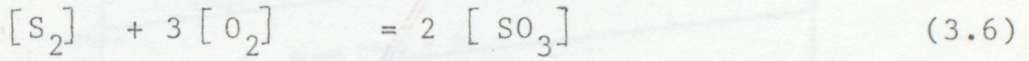
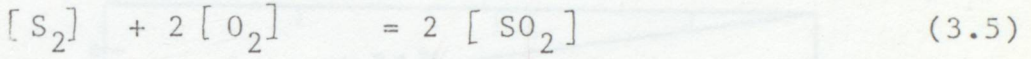


Şekil 3.2. Sülfürlerin Oluşum Serbest Enerjisi /12/

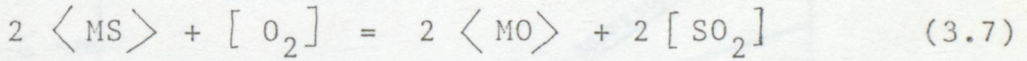
Yaklaşık sapma (25°C)	Hal Değişimi	Element	Sülfid
A ± 1 kilokalori	Erime Noktası	F	F
B ± 2 kilokalori	Geçiş Noktası	T	T
C ± 5 kilokalori	Kaynama Noktası	B	B
D ± 10 kilokalori			

Oksijenin demire afinitesi bakırdan çok daha fazladır. Kükürdün afinitesi ise bakırda ve demirde benzerdir. Bu nedenle FeS ve Cu₂S oksitlendiğinde öncelikle FeS oksitlenecektir.

Oksijenin SO₂ ve SO₃ de kükürde afinitesi Şekil : 3.3'de gösterilmiştir.



Sıcaklığa bağlı olarak SO₂ ve SO₃'ün stabilitesi değişir. 1073 K sıcaklığın altında SO₃, SO₂'den çok daha stabildir. Sülfürün oksitlenmesi için aşağıdaki denklem yazılabilir.

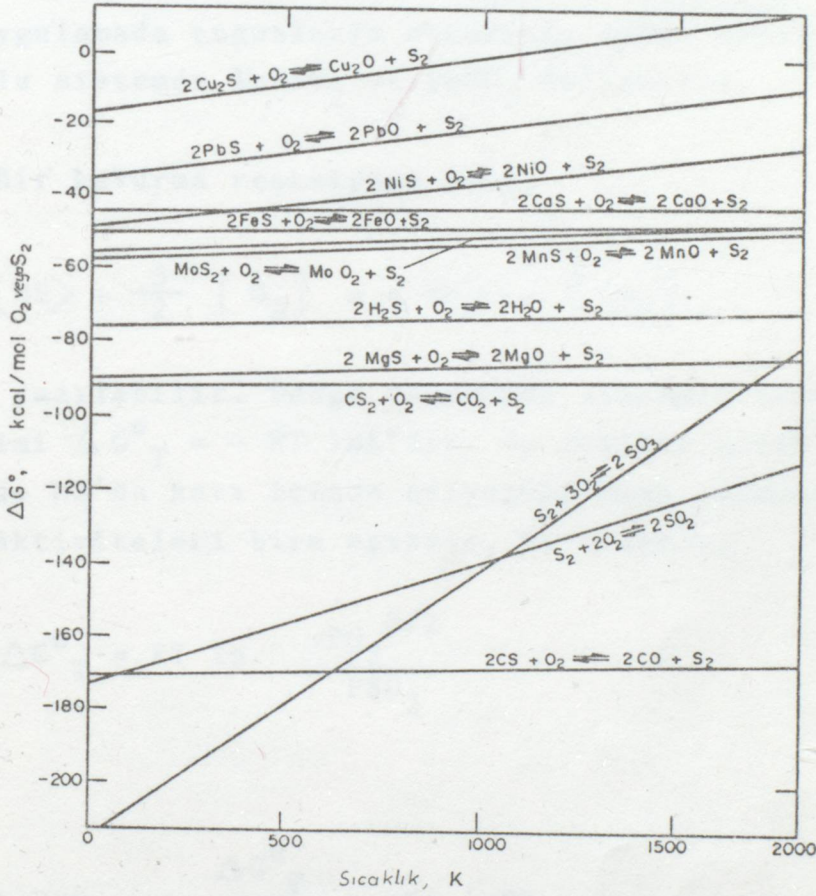


Serbest enerji değişimi (3.1) ile (3.5) numaralı eşitliklerdeki değerlerin toplanmasıyla hesaplanabilir. ΔG° , genellikle sülfürün oksitlenmesi (3.7) eşitliğindeki değeri (3.1) eşitliğindeki değerinden çok daha negatiftir.

Hidrojenin ve karbonun kükürde afinitesi oksijenden çok daha az olduğu için (H₂, C) bunlarla redüklenmez.

3.3. KESİT ALAN DİYAGRAMLARI

Sülfürlerin kavrulması sırasında O₂ ve SO₂ gazlarının mevcudiyetle pekçok faz ortaya çıkar. Bu fazlar, sülfür, sülfat, oksit yada metal olabilir. Eğer gaz fazı ile yoğun iki faz dengede ise sistemin serbest değişkeni ikiye eşittir.

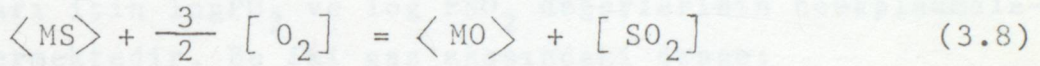


Şekil 3.3. Bazı Elementlerin Kükürt ve Oksijene Karşı Rölatif Afiniteleri. /12/

Eğer sistemin toplam basıncı ve sıcaklığı sabitse bileşenlerin kısmî gaz basınçları hesaplanabilir. Eğer üç değişken sabit ise, örneğin; T, PO₂, PSO₂ yoğun fazlardan sadece bir tanesi dengededir. Üç boyutlu PSO₂, PO₂ ve T koordinatlarıyla ifade edilen bir sistemde serbestlik derecesi üç ise bir fazın stabilite domeni tanımlanabilir.

Bu şekildeki belirleme "KELLOG" diyagramı olarak bilinir. Uygulamada çoğunlukla sıcaklığı sabit kabul ederek iki boyutlu sistemde lnPSO₂ ve lnPO₂ kullanılır.

Bir kavurma reaksiyonu için;



denklemini yazılabilir. Denge durumunda standart serbest enerji değişimi $\Delta G^{\circ}_T = -RT \ln K$ 'dir. Bu eşitlik gerek MO'in ve gerekse de MS'ün katı içinde eriyebildiğini varsayarak yazılmıştır. Aktiviteleri bire eşittir, bu nedenle;

$$\Delta G^{\circ}_T = RT \ln \frac{PO_2^{3/2}}{PSO_2} \quad (3.9)$$

ya da

$$\ln PSO_2 = - \frac{\Delta G^{\circ}_T}{RT} + \frac{3}{2} \ln PO_2 \quad (3.10)$$

yazılır. PSO₂ ile PO₂ arasındaki münasebet kesit alan diyagramında bir doğruyla ikiye ayrılmıştır. Bu ayırım oksit ve sülfürlerin stabil olduğu bölgeyi açıkça göstermektedir./15/

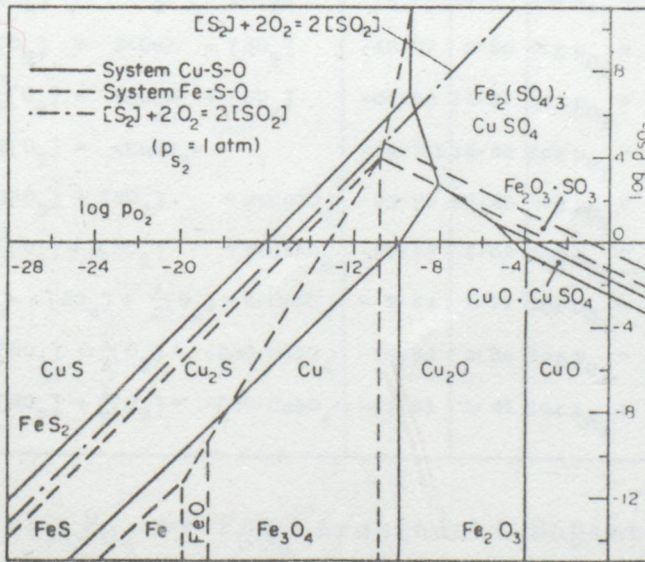
3.3.1. Hesaplama Örneği

Sıcaklığın yaklaşık 1000 K olduğu bir durumda akışkan bir yatakta Cu-S-O diyagramı (Şekil: 3.4)'de verilmiştir. SO_2 ve O_2 gazları bir atmosferik çevre basıncı ile temas halindedir. Yatak içerisinde Cu, CuS, Cu_2O , CuO, Cu_2S , $CuSO_4$ ve CuO. $CuSO_4$ şeklinde yedi bileşik olabilir.

Eğer bu yedi bileşiğin serbest enerjileri ikişer ikişer birleştirilirse PSO_2 ve PO_2 değerleri kullanılarak yirmibir çift sonuç elde edilebilir. Tabii ki belirli reaksiyonların olacağı aşıkardır. Örneğin Cu_2S/CuO dengesi mümkün değildir, çünkü Cu_2S öncelikle Cu_2O 'i oksitlemek zorundadır ve CuO sadece PO_2 çok yüksek olduğundan Cu_2S den teşekkülü mümkün olabilir. Tablo 3.1 ve Tablo 3.2 bütün denge koşulları için $\log PO_2$ ve $\log PSO_2$ değerlerinin hesaplanmalarını vermektedir. Bu iki gaz arasındaki denge;



şeklinde gösterilir. Sıcaklığın 1000 K olduğu durumda $PS_2 > 1$ atm. ve $PS_2 < 1$ atm. olduğu iki bölgeye ayrılmaktadır.



Şekil 3.4. Kesit Alan Diyagramı, 1000 K. /12/
— Cu-S-O Sistemi, --- Fe-S-O Sistemi
- - - - - $S_2 + 2 O_2 = 2SO_2$

	$\Delta G^0 = A + BT \log T + CT \text{ (cal)}$
$2\langle \text{Cu} \rangle + \frac{1}{2}[\text{O}_2] = \langle \text{Cu}_2\text{O} \rangle$	$- 40,500 - 3.92 T \log T + 20.5 T$
$\langle \text{Cu}_2\text{O} \rangle + \frac{1}{2}[\text{O}_2] = \langle 2 \text{CuO} \rangle$	$- 34,950 - 6.1 T \log T + 44.3 T$
$2\langle \text{Cu} \rangle + \frac{1}{2}[\text{S}_2] = \langle \text{Cu}_2\text{S} \rangle$	$- 34,150 - 6.2 T \log T + 28.7 T$
$2\langle \text{Cu}_2\text{S} \rangle + [\text{S}_2] = 4\langle \text{CuS} \rangle$	$- 45,200 + 54.0 T$
$[\text{S}_2] + 2[\text{O}_2] = 2[\text{SO}_2]$	$- 173,240 + 34.6 T$
$[\text{SO}_2] + \frac{1}{2}[\text{O}_2] = [\text{SO}_3]$	$- 22,600 + 21.36 T$
$\langle \text{Cu} \rangle + 2[\text{O}_2] + \frac{1}{2}[\text{S}_2] = \langle \text{CuSO}_4 \rangle$	$- 183,000 + 88.4 T$
$[\text{SO}_3] + 2\langle \text{CuO} \rangle = \langle \text{CuO} \cdot \text{CuSO}_4 \rangle$	$- 49,910 - 3.32 T \log T + 50.1 T$

Tablo 3.1. Cu-O-S Dengesi İçin Standart Serbest Enerjiler. /12/

	ΔG^0 1000 K k cal	log K	$\log p_{\text{O}_2} = f(\log p_{\text{SO}_2})$
$2\langle \text{Cu} \rangle + \frac{1}{2}[\text{O}_2] = \langle \text{Cu}_2\text{O} \rangle$	-22.76	4.97	$\log p_{\text{O}_2} = - 9.95$
$\langle \text{Cu}_2\text{O} \rangle + \frac{1}{2}[\text{O}_2] = 2\langle \text{CuO} \rangle$	- 8.95	1.96	$\log p_{\text{O}_2} = - 3.92$
$2\langle \text{CuS} \rangle + [\text{O}_2] = \langle \text{Cu}_2\text{S} \rangle + [\text{SO}_2]$	-73.72	16.1	$\log p_{\text{O}_2} = -16.1 + \log p_{\text{SO}_2}$
$\langle \text{Cu}_2\text{S} \rangle + [\text{O}_2] = 2\langle \text{Cu} \rangle + [\text{SO}_2]$	-45.27	9.90	$\log p_{\text{O}_2} = - 9.9 + \log p_{\text{SO}_2}$
$\langle \text{Cu}_2\text{S} \rangle + \frac{3}{2}[\text{O}_2] = \langle \text{Cu}_2\text{O} \rangle + [\text{SO}_2]$	-68.03	14.87	$\log p_{\text{O}_2} = - 9.91 + \frac{2}{3}\log p_{\text{SO}_2}$
$\langle \text{CuS} \rangle + 2[\text{O}_2] = \langle \text{CuSO}_4 \rangle$	-84.775	18.53	$\log p_{\text{O}_2} = - 9.26$
$\langle \text{Cu}_2\text{S} \rangle + 3[\text{O}_2] + [\text{SO}_2] = 2\langle \text{CuSO}_4 \rangle$	-95.83	20.95	$\log p_{\text{O}_2} = - 6.98 - \frac{1}{3}\log p_{\text{SO}_2}$
$\langle \text{Cu}_2\text{O} \rangle + \frac{3}{2}[\text{O}_2] + 2[\text{SO}_2] = 2\langle \text{CuSO}_4 \rangle$	-27.80	6.08	$\log p_{\text{O}_2} = - 4.05 - \frac{4}{3}\log p_{\text{SO}_2}$
$\langle \text{CuO} \cdot \text{CuSO}_4 \rangle + [\text{SO}_2] + \frac{1}{2}[\text{O}_2] = 2\langle \text{CuSO}_4 \rangle$	- 7.84	1.71	$\log p_{\text{O}_2} = - 3.43 - 2 \log p_{\text{SO}_2}$
$\langle \text{Cu}_2\text{O} \rangle + [\text{SO}_2] + \frac{1}{2}[\text{O}_2] = \langle \text{CuO} \cdot \text{CuSO}_4 \rangle$	-19.96	4.36	$\log p_{\text{O}_2} = - 4.36 - \log p_{\text{SO}_2}$
$2\langle \text{CuO} \rangle + [\text{SO}_2] + \frac{1}{2}[\text{O}_2] = \langle \text{CuO} \cdot \text{CuSO}_4 \rangle$	-11.01	2.41	$\log p_{\text{O}_2} = - 4.81 - 2 \log p_{\text{SO}_2}$

Tablo 3.2. P_{O_2} ve P_{SO_2} Arasındaki Bağıntılar /12/
(Tablo 3.1.'e göre)

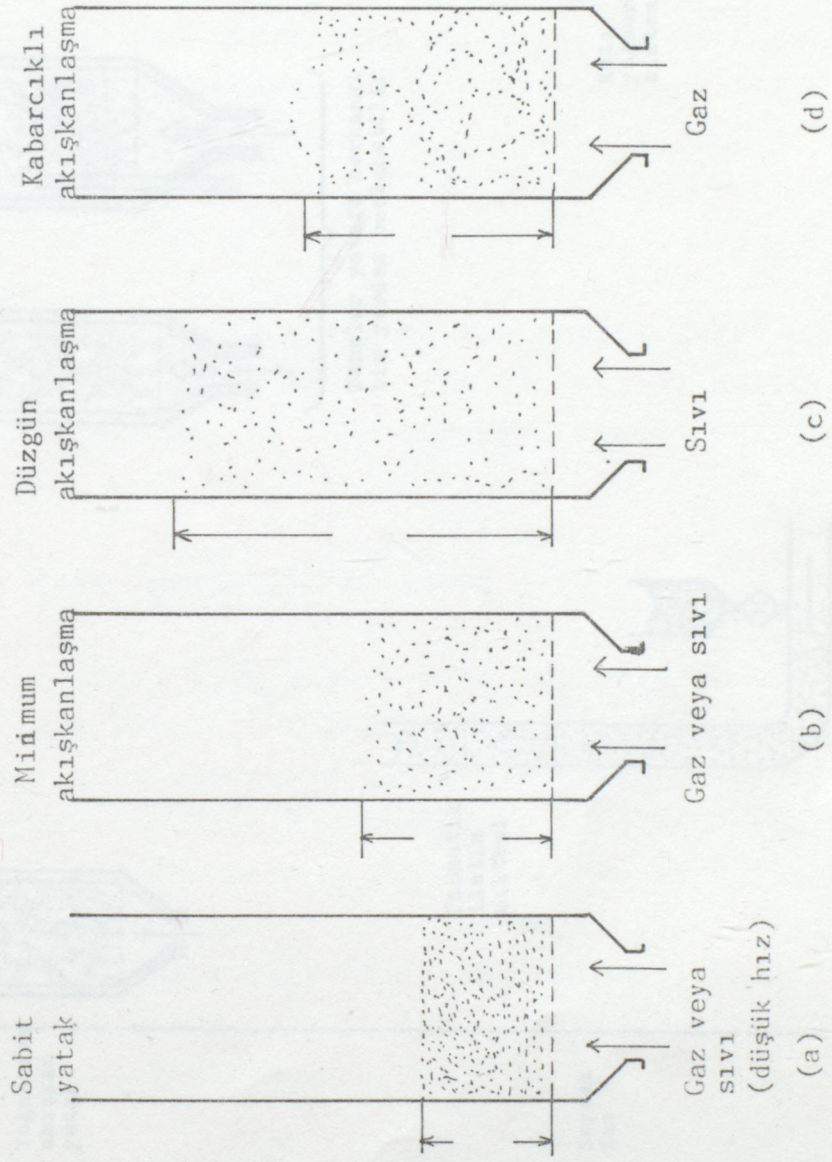
4. AKIŞKANLAŞMA İÇİN GENEL PRENSİP VE TANIMLAR

Akışkanlaşma; düşey silindirik bir kap içersinde geçirgen bir taban üzerine oturmuş ve katı tanecikler halinde ki malzemenin oluşturduğu yatak, aşağıdan yukarıya doğru uygun basınç altında yöneltilmiş bir akışkan akışına maruz bırakıldığında belirli bir akış hızında yatak yükselir ve yatağı oluşturan katı tanecikler kısmen suspensiyon halinde harekete başlarlar. /1/

İlk durumdaki hareketsiz yatak "sabit yatak", hareketli durumda ise "akışkan yatak" adını alır. Akışkanın hızı belli bir değere ulaştıktan sonra oluşan yatağa "minumum akışkanlaşmış yatak" denir. Tane boyutunun yatağın her noktasında aynı olduğu yatağa "düzgün akışkanlaşmış yatak" denir. Minumum akışkanlaşma hızının üstüne çıkıldığında gaz kabarcıkları oluşur ve artan akışkan hızı ile bu olay fazlalaşır, boşluklar oluşur ki bu durumda "kabarcıklı akışkan yatak" oluşur. Bu katı akışkan temas çeşitleri (Şekil: 4.1)'de gösterilmiştir.

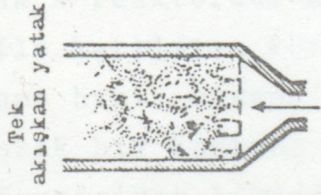
Yataktaki katı konsantrasyonu belli bir yere kadar sabit daha sonra değişiyorsa, böyle yataklara "yoğun faz", katının gaz ile birlikte sürüklendiği sistemlere "seyrek faz" denir. Kesikli, paralel, karma ve ters akımda katı konsantrasyonunun değişik durumları (Şekil: 4.2)'de gösterilmiştir.

Akışkanlaşmanın homojen veya heterojen oluşunu katı ve gazın fiziksel özelliklerinin yanısıra yatağın geometrisi, akışkanın akış hızı, akışkan dağıtıcı tipleri, akışkan yatağın içindeki bazı engellerde (yönlendirici perdeler, ısı değiştiriciler gibi) etkiler.



Şekil 4.1. KATI-AKIŞKAN TEMAS ÇEŞİTLERİ / 4 /

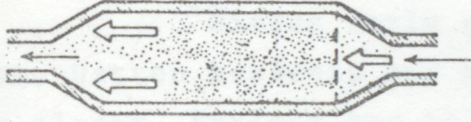
Kesikli akım



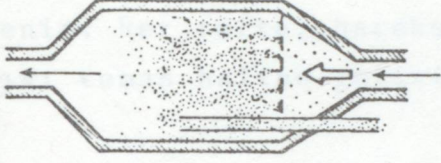
Yoğun faz
akışkan
yatak

Karma akım

Yukarı akışlı
akışkan yatak

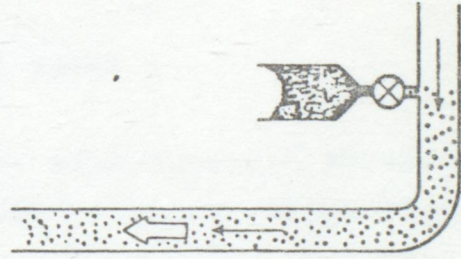
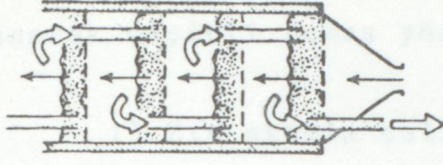


Aşağı akışlı
akışkan yatak



Taneler yatağa herhangi
bir yerden beslenebilir

Ters akım



Pnömatik
iletim
sistemi

Seyrek
faz

Katı
yağmurlu
Sistem

Gaz

Şekil 4.2. Kesikli, Paralel, Karma ve Ters Akımda Katı Konsantrasyonunun Değişik Durumları /4/

Akışkan yatakların sıvı benzerî davranışlarından yararlanarak çeşitli temas yöntemleri geliştirilmiştir:

i) Zıt akımla çalışan temas sistemi:

Gaz, dağıtıcıdan yukarı çıkarken katı üstten beslenir. Her rafta, hareket halinde kademeli olarak katı ve sıvı temas haline getirilir.

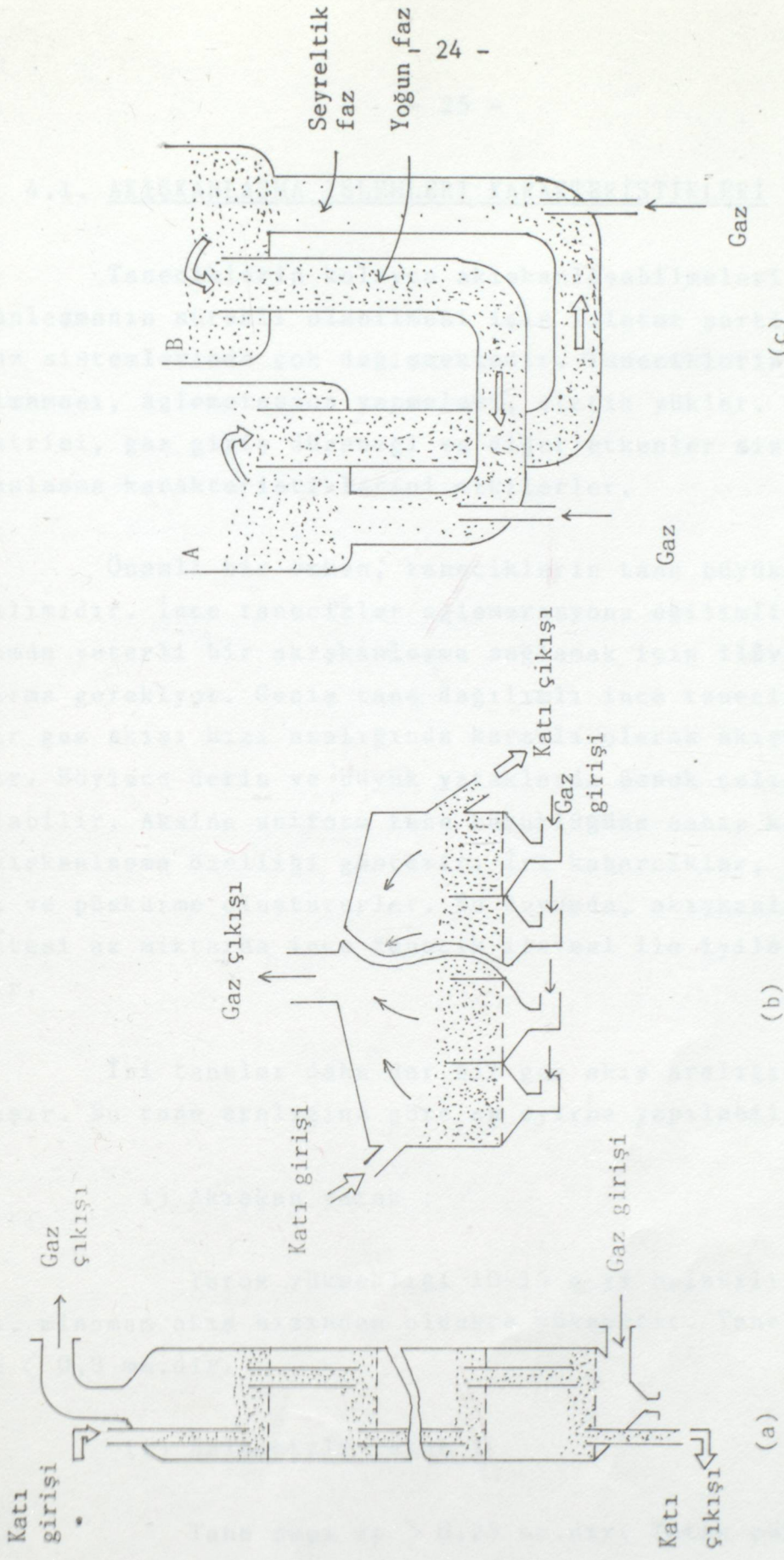
ii) Çapraz akım :

Birden fazla girişten gaz yukarı doğru çıkarken, katı, üstten beslenip bir yandan gaz ile temasa gelir ve yandan alınır. Böylece her bölümde gaz-katı teması sağlanmış olur.

iii) Katı dolaşımli iki yatak :

(Şekil: 4.3)'e göre açıklanırsa; C borusuna gaz beslenir. A'daki katıları C borusu vasıtası ile sürükler. B'deki katılar D borusuna bir gaz beslenerek ters yönde emiş yaparak A reaktörüne akış sağlanabilir. C ve D bağlantı hatları ile katıların tüm olarak sistemi dolaşması sağlanır. Sürtünme hızı, basınç farkı ile dengelenir. Uygun vanalar konularak hız kontrol edilir. Sistemin sürekli olarak dinamik süspansiyon halinde kalması istenir. Katalizörlü gaz fazı sistemlerinde kullanılır.

Bu temas yöntemleri, (Şekil: 4.3)'de gösterilmektedir. /2/ ve /4/



Şekil 4.3. GAZ AKIŞKAN YATAKLARDA TEMAS YÖNTEMLERİ

(a) Zıt akım (b) Çapraz akım (c) Katı dolaşımı iki akışkan yatak. /4/

4.1. AKIŞKANLAŞMA İŞLEMLERİ KARAKTERİSTİKLERİ

Taneciklerin kolayca akışkanlaşabilmeleri ve akışkanlaşmanın sürekli olabilmesi için işletme şartları katı gaz sistemlerinde çok değişmektedir. Taneciklerin akıcı olup olmaması, aglomerasyon yapmaları, statik yükler, reaktör geometrisi, gaz giriş düzeneği ve diğer etkenler sistemin akışkanlaşma karakteristiklerini etkilerler.

Önemli bir etken, taneciklerin tane büyüklüğü ve dağılımıdır. İnce tanecikler aglomerasyona eğilimlidir. Bu durumda yeterli bir akışkanlaşma sağlamak için ilâve bir karıştırma gerekiyor. Geniş tane dağılımlı ince tanecikler, geniş bir gaz akışı hızı aralığında kararlı olarak akışkanlaşabilir. Böylece derin ve büyük yataklarda esnek çalışma olanağı olabilir. Aksine uniform tane büyüklüğüne sahip katılar kötü akışkanlaşma özelliği gösterir. İri kabarcıklar, piston akışı ve püskürme oluştururlar. Bu durumda, akışkanlaşmanın kalitesi az miktarda ince tanecik ilavesi ile iyileştirilebilir.

İri taneler daha dar bir gaz akış aralığında akışkanlaşır. Bu tane aralığına göre şu ayırma yapılabilir:

i) Akışkan yatak :

Yatak yüksekliği 10-15 m yi bulabiliyor. Gaz hızı, minimum akış hızından oldukça yüksektir. Tane çapı $d_p < 0,8$ mm.dir.

ii) Sallantılı yatak :

Tane çapı $d_p > 0,25$ mm.dir. Yatak yüksekliği

1 m., gaz hızı minimum akış hızının 1,5-2 katıdır.

iii) Püskürtmeli Yatak :

İnce taneleri az olan sistemlerde kullanılıyor. Tanecikler 2,5-6,4 mm. çapındadır.

Katıların tane dağılımına göre oluşan yatak tipleri, (Şekil: 4.4)'de gösterilmiştir. /2/, /4/, /6/

4.2. AKIŞKAN YATAKLARIN GENEL DAVRANIŞI

4.2.1. Tane Dağılımı :

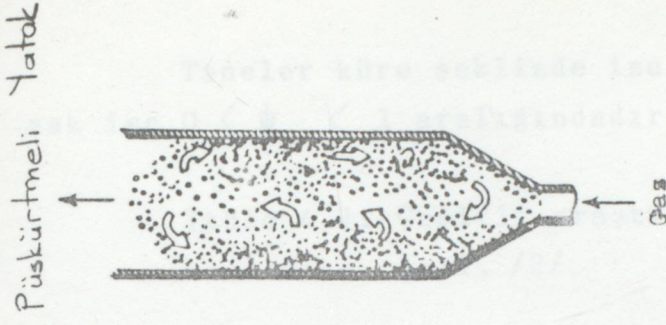
Sistemde iri taneler varsa, tane çapları mikrometreler ile direkt olarak ölçülür. Taneler 40 mikronun altında ise çökme hızı veya Brownian hareketine benzer yöntemler kullanılır. Düşme hızları veya düşme yükseklikleri ölçülerek çapları hesaplanır. Arada kalan taneler (5 mm. - 40 μ) için elekler kullanılır. Maddenin özelliğine göre kuru veya yaş yöntem kullanılır.

Küresel olmayan taneler için eşdeğer çap tanımlanmıştır. Tane çapı yuvarlağa yakınsa elek çapı kadar olacaktır. Eğer tane küreselden çok farklı ise elek çapı d_p ' den çok büyüktür. Eğer taneler küresel değilse düzgün bir geometriye sahipse, o zaman elek çapı tane çapından küçüktür.

Küresellik Faktörü (Φ_s) :

$$\Phi_s = \left(\frac{\text{Kürenin Yüzeyi}}{\text{Tanenin Yüzeyi}} \right) \quad (4.1)$$

Aynı hacim



Şematik
diyagram

Tane çapı
Boş hacim
hızı

Katıllar $d_p < 0.8 \text{ mm}$
 $u_0 = 0.1 \sim 5 \text{ m/sec}$

$d_p > 0.25 \text{ mm}$
 $u_0 = 1.5 \sim 12 \text{ m/sec}$

$d_p = 2.5 \sim 6.4 \text{ mm}$
 $u_0 = 0.3 \sim 1.8 \text{ m/sec}$

Endüstriyel
uygulama

Petrolün akışkan katalitik
krakingi, akışkan koklaşma
akışkan hidroforming
hidrojenli demir redüksiyonu
şülfür kavurması
naftalin oksidasyonu

Winkler gaz jeneratörü
Lurgi kum krakingi
Pyzel çimento prosesi
Akışkan kâvurucu

Buğday kurutulması

Şekil 4.4. Katıların Tane Dağılımına Göre Oluşan Yatak Tipleri /4/

Taneler küre şeklinde ise $\Phi_s = 1$, taneler küreden uzak ise $0 < \Phi_s < 1$ aralığındadır.

Tablo 4.1. Çeşitli araştırmacıların verdiği Φ_s değerleri. /2/

Araştırmacı	Malzeme	Φ_s
LEVA	Kum	0,6; 0,861
	Fe Katalizör	0,578
	Bitümlü Kömür	0,625
	Celite (Toprak türü)	0,861
UCHIDA ve FUSITA	Kırılmış katılar	0,63
SHIRAI	Kum	0,534;0,628
	Silika	0,554;0,628
	Kömür tozu	0,696

Özgül Yüzey (a,a') :

$$a' = \left(\frac{\text{Tanenin Yüzeyi}}{\text{Tanenin Hacmi}} \right) = \frac{\pi \cdot dp^2 / \Phi_s}{\frac{\pi}{6} \cdot dp^3} = \frac{6}{(\Phi_s \cdot dp)} \quad (4.2)$$

$$a = \left(\frac{\text{Tanelerin Yüzeyi}}{\text{Yatağın Hacmi}} \right) = \frac{N_p \cdot \pi \cdot dp^2 / \Phi_s}{N_p \cdot \frac{\pi}{6} \cdot dp^3 / (1 - \epsilon_m)} = \frac{6 \cdot (1 - \epsilon_m)}{(\Phi_s \cdot dp)} \quad (4.3)$$

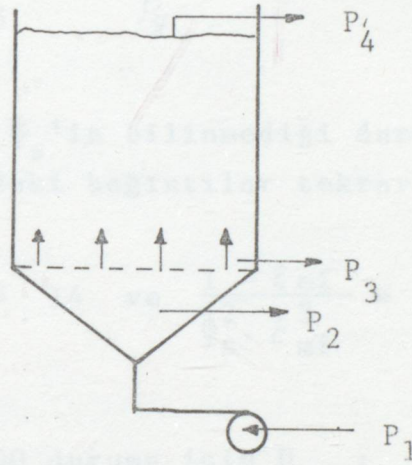
$\pi \cdot dp^2 / \Phi_s$, herbir tanenin yüzeyini ifade eder.

4.2.2. Minimum Akışkanlaşma :

Minimum akışkanlaşma, akışkanlaşmanın başlangıcıdır. Akan gazın taneleri kaldırma kuvveti, tanelerin ağırlığına eşittir.

$$\Delta P \cdot A = W = \frac{g}{g_c} \cdot A \cdot L_{mf} \cdot (1 - \epsilon_{mf}) (\rho_s - \rho_g) \quad (4.4)$$

$$\frac{P}{L_{mf}} = (1 - \epsilon_{mf}) \cdot (\rho_s - \rho_g) \cdot \frac{g}{g_c} \quad (4.5)$$



4.2.3. Minimum Akışkanlaşma İçin Gerekli Gaz Hızı :

$20 < Re_p < 1000$ durumunda U_{mf} için şu bağıntı bulunmuştur :

$$\frac{1.75}{\Phi_s \cdot \epsilon_{mf}^3} \cdot \left(\frac{dp \cdot U_{mf} \cdot \rho_g}{\mu} \right)^2 + \frac{150 \cdot (1 - \epsilon_{mf})}{\Phi_s^2 \cdot \epsilon_{mf}^3} \left(\frac{dp \cdot U_{mf} \cdot \rho_g}{\mu} \right) = \frac{dp^3 \cdot \rho_g \cdot (\rho_s - \rho_g) \cdot g}{\mu^2} \quad (4.6)$$

$Re_p < 20$ durumunda küçük taneler için U_{mf} ;

$$U_{mf} = \frac{(\Phi_s \cdot d_p)^2}{150} \cdot \frac{\rho_s - \rho_g}{\mu} \cdot g \cdot \frac{\epsilon_{mf}^3}{1 - \epsilon_{mf}} \quad (4.7)$$

$Re_p > 1000$ durumunda büyük taneler için U_{mf} ;

$$U_{mf}^2 = \frac{\Phi_s \cdot d_p}{1,75} \cdot \frac{\rho_s - \rho_g}{\rho_g} \cdot g \cdot \epsilon_{mf}^3 \quad (4.8)$$

ϵ_{mf} ve/veya Φ_s 'in bilinmediği durumlar için WEN ve YU tarafından yukarıdaki bağıntılar tekrar düzenlenmiştir.

$$\frac{1}{\Phi_s \cdot \epsilon_{mf}^3} \cong 14 \quad \text{ve} \quad \frac{1 - \epsilon_{mf}}{\Phi_s^2 \cdot \epsilon_{mf}^3} \cong 11 \quad (4.9)$$

$20 < Re_p < 1000$ durumu için U_{mf} ;

$$\frac{dp \cdot U_{mf} \cdot \rho_g}{\mu} = \left[(33,7)^2 + 0,0408 \cdot \frac{dp^3 \cdot \rho_g \cdot (\rho_s - \rho_g) \cdot g}{\mu^2} \right]^{1/2} - 33,7 \quad (4.10)$$

$Re_p < 20$ durumu için U_{mf} ;

$$U_{mf} = \frac{dp^2 \cdot (\rho_s - \rho_g) \cdot g}{1650 \cdot \mu} \quad (4.11)$$

$Re_p > 1000$ durumu için U_{mf} ;

$$U_{mf}^2 = \frac{dp \cdot (\rho_s - \rho_g) \cdot g}{24,5 \cdot \rho_g} \quad (4.12)$$

U_{mf} terimini veren (4.10), (4.11) ve (4.12) no'lu bağıntıların bulunabilmesi için 284 veri noktası kullanılmış, standart sapma $\pm 34\%$ bulunmuştur. /2/, /5/

4.2.4. Akışkan Yataklarda Basınç Kaybı :

Silindirik kap içerisindeki malzeme sütunu başlıca üç kuvvetin etkisi altındadır :

- i) Kendi ağırlığı,
- ii) Akışkanın kaba giriş ve çıkış değerleri arasındaki farka eşit bir kuvvet,
- iii) Geçirgen tabanın akışkan akışına karşı direnç kuvveti.

Akışkanın yatak içerisinde geçerken uğradığı basınç düşüşü hızına bağlıdır. Akışkanın yatağa giriş hızı, dolayısıyla basıncı artınca basınç düşüşüde artacaktır. Bununla beraber basınç düşüşündeki artış belirli bir değerde limitlenmektedir ki bu değer yatağın ağırlığına karşılık gelir. Geçirgen tabanın direnci dikkâte alınmazsa bu ifade şöyle formüle edilebilir:

$$(P_1 - P_2) \cdot A \ll [(1 - \varepsilon) \cdot \rho_s + \varepsilon \cdot \rho_g] \cdot L \cdot A \cdot g \quad (4.13)$$

Yalnız katı taneciklerden dolayı oluşan basınç düşüşü;

$$\Delta P = P_1 - P_2 - \rho_g \cdot g \cdot L \quad (4.14)$$

genel denklemi elde edilir.

Akışkanın gaz olması halinde ($\rho_s - \rho_g$) terimi yaklaşık olarak (ρ_s) olarak alınabilir. /2/, /3/, /5/

(Şekil : 4.5)'de görüldüğü gibi, u_0 hava hızı arttıkça ΔP basınç farkı artış gösteriyor ve belli bir noktada ΔP_{max} . değerine ulaşıyor. Sonra u_0 hızı azaldıkça ΔP 'de azalıyor. (Şekil : 4.5)'deki her iki doğrunun eğimide 1'dir. Hızın sabit kaldığı bölgede $\Delta P = \frac{W}{A}$ şeklindedir.

W = Tanelerin ağırlığı.

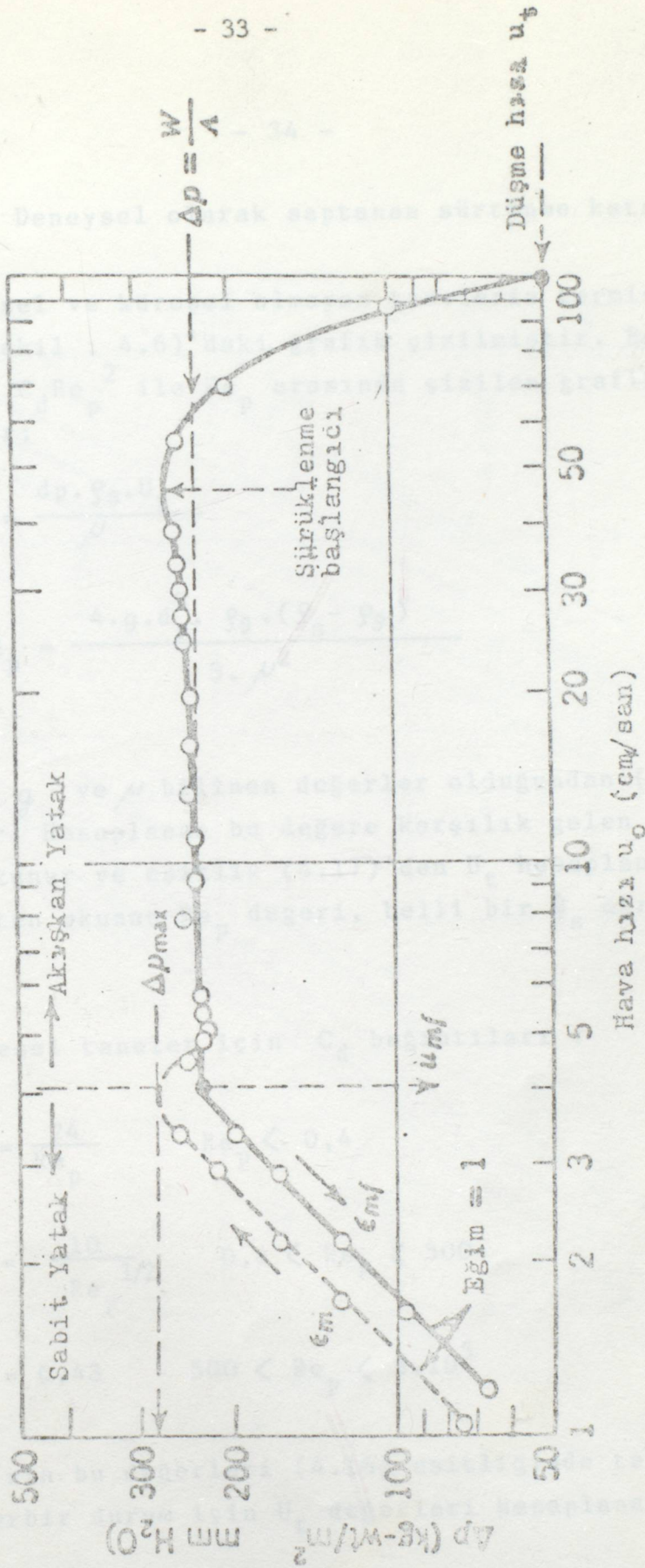
A = Kesit.

ΔP 'nin biraz artması sonucu sürüklenme başlangıcı oluşuyor ve düşme hızı, terminal hız (U_t) durumuna geliyor. /2/, /4/

4.2.5. Tanelerin Düşme Hızı :

Taneler düşerken akışkan tarafından bir direnç gösterilir. Akışkan yataktaki gaz akış hızı, bir yandan minimum akışkanlaşma hızı (U_{mf}) ile diğer yandan gaz tarafından katıların sürüklenmesi ile sınırlanmıştır. Sürüklenme oluştuğu zaman kararlı durumdaki işlemleri devam ettirmek için yeni madde ilâvesi ile bu katılar geri döndürülecek veya değiştirilecektir. Gaz akış hızının üst limitine, partiküllerin terminal veya serbest düşme hızı ile yaklaşılmıştır ki (U_t) akışkanlar mekaniğinden hesaplanabilmektedir:

$$U_t = \left[\frac{4.9.dp.(\rho_s - \rho_g)}{3.\rho_g . C_d} \right]^{1/2} \quad (4.16)$$



Şekil 4.5. P Basınç Farkının U_0 Hava Hızı İle Değişimi. 4/2/

C_d = Deneysel olarak saptanan sürtünme katsayısı.

Küresel ve küresel olmayan tanelerin terminal hızı (U_t) için (Şekil : 4.6)'daki grafik çizilmiştir. Boyutsuz gruplar olan $C_d Re_p^2$ ile Re_p arasında çizilen grafikten U_t şöyle bulunur;

$$Re_p = \frac{d_p \cdot \rho_g \cdot U_t}{\mu} \quad (4.17)$$

$$C_d Re_p^2 = \frac{4 \cdot g \cdot d_p^3 \cdot \rho_g \cdot (\rho_s - \rho_g)}{3 \cdot \mu^2} \quad (4.18)$$

d_p, ρ_s, ρ_g, g ve μ bilinen değerler olduğundan ($C_d Re_p^2$) hesaplanabilir. Hesaplanan bu değere karşılık gelen Re_p değeri grafikten okunur ve eşitlik (4.17)'den U_t hesaplanır. Buradaki grafikten okunan Re_p değeri, belli bir Φ_s eğrisi için yapılır.

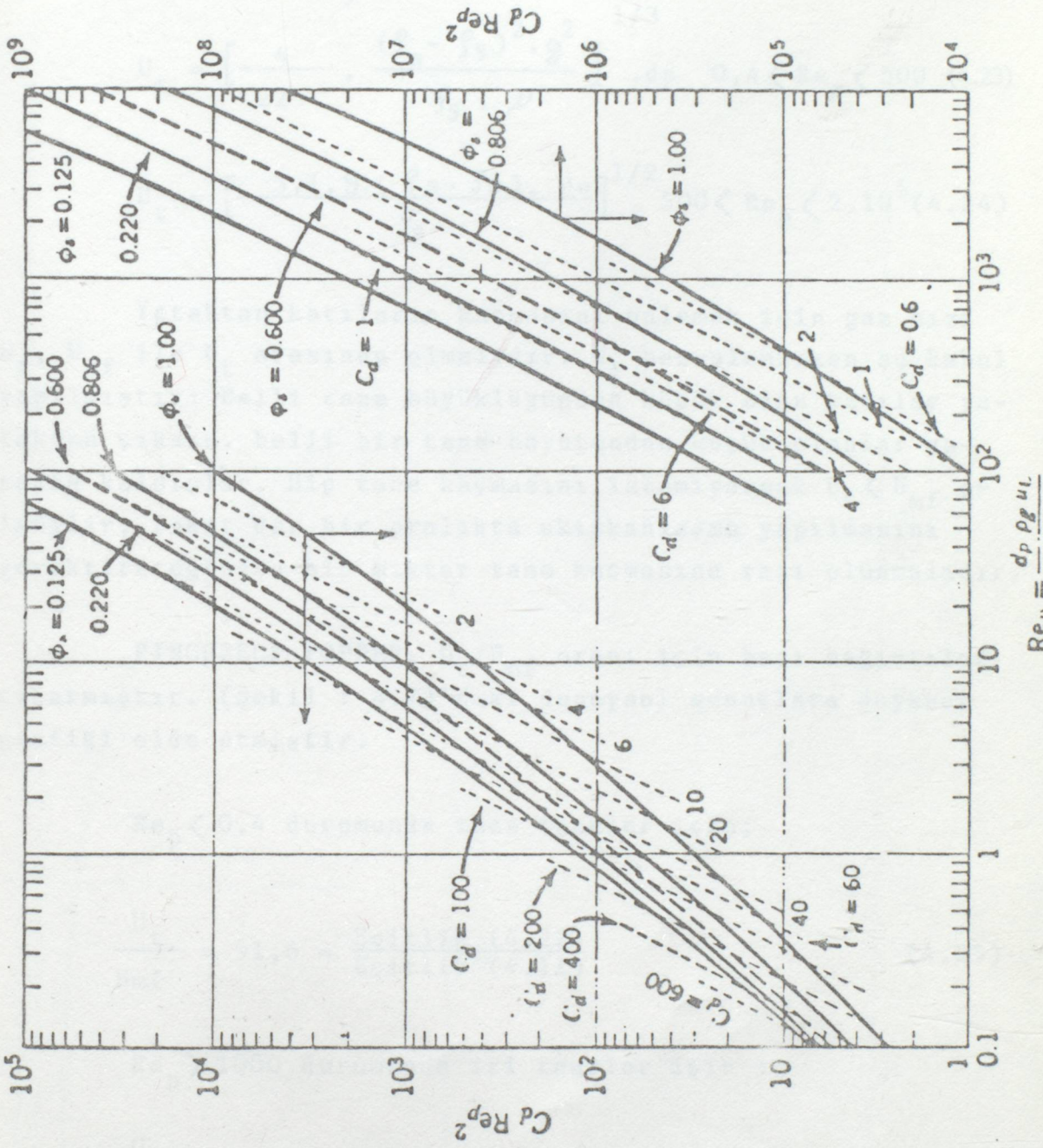
Küresel taneler için C_d bağıntıları :

$$C_d = \frac{24}{Re_p} \quad Re_p < 0,4 \quad (4.19)$$

$$C_d = \frac{10}{Re_p^{1/2}} \quad 0,4 < Re_p < 500 \quad (4.20)$$

$$C_d = 0,43 \quad 500 < Re_p < 2 \cdot 10^5 \quad (.4.21)$$

C_d 'nin bu değerleri (4.16) eşitliğinde tekrar yerine konur ve her bir durum için U_t değerleri hesaplanabilir.



Şekil 4.6. Küresel ve Küresel Olmayan Taneler İçin Terminal u Hız Değerleri. /2/

$$Re_t = \frac{d_p \rho g u_t}{\mu}$$

$$U_t = \frac{g \cdot (\rho_s - \rho_g) \cdot dp^2}{18 \cdot \mu} \quad Re_p < 0,4 \quad (4.22)$$

$$U_t = \left[\frac{4}{225} \cdot \frac{(\rho_s - \rho_g)^2 \cdot g^2}{\rho_g \cdot \mu} \right]^{1/3} \cdot dp \quad 0,4 < Re_p < 500 \quad (4.23)$$

$$U_t = \left[\frac{3,1 \cdot g \cdot (\rho_s - \rho_g) \cdot dp}{\rho_g} \right]^{1/2} \quad 500 < Re_p < 2 \cdot 10^5 \quad (4.24)$$

Yataktan katıların kaçmasını önlemek için gaz hızı U_f , U_{mf} ile U_t arasında olmalıdır. U_f hesaplanırken şu kabul yapılmıştır: Belli tane büyüklüğünden küçük olan katılar yataktan çıksın, belli bir tane boyutundan küçük olanlar yataakta kalsınlar. Hiç tane kaçmasını istemiyorsak $U_t < U_{mf}$ olabilir, fakat dar bir aralıkta akışkanlaşma yapılmasını gerektireceğinden bir miktar tane kaçmasına razı olunmalıdır.

PINCHBECK-POPPER, U_t/U_{mf} oranı için bazı bağıntılar çıkarmıştır. (Şekil : 4.7)'deki deneysel sonuçlara dayanan grafiği elde etmiştir.

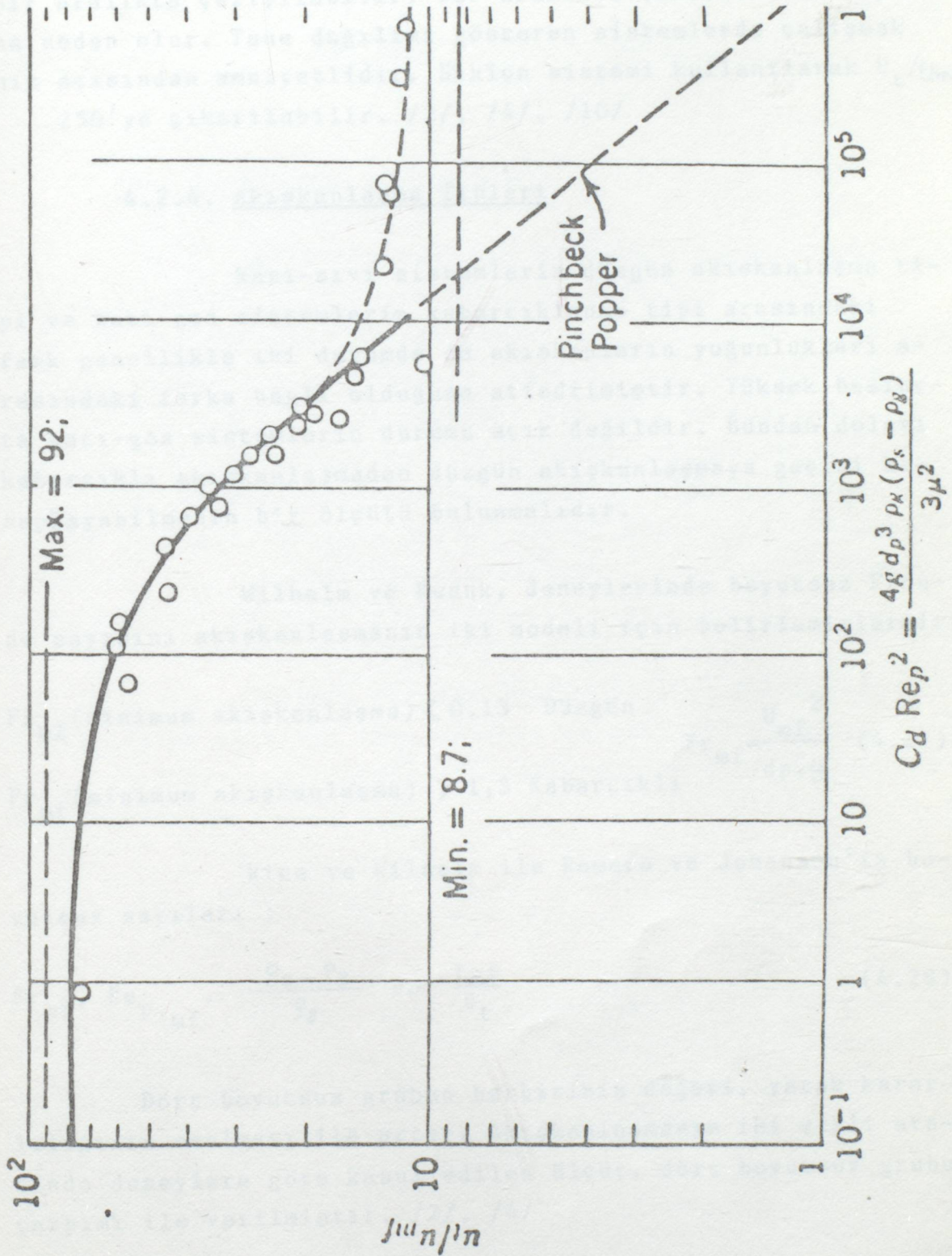
$Re_p < 0,4$ durumunda ince taneler için;

$$\frac{U_t}{U_{mf}} = 91,6 = \frac{\text{Eşitlik (4.22)}}{\text{Eşitlik (4.11)}} \quad (4.25)$$

$Re_p > 1000$ durumunda iri taneler için :

$$\frac{U_t}{U_{mf}} = 8,72 = \frac{\text{Eşitlik (4.24)}}{\text{Eşitlik (4.12)}} \quad (4.26)$$

İnce tanelerin hızı, iri tanelerin hızından fazla olmasına rağmen iri taneler ince tanelerin uzaklaşmasını engel-



Şekil 4.7. U_t / U_{mf} Oranı İçin Deneysel Bulgular /2/

ler. Daha yüksek hızlarda, tane kaybı artmadan daha geniş bir aralıkta çalışılabilir. Dar aralıkta çalışma tane kaybına neden olur. Tane dağılımı gösteren sistemlerde çalışmak hız açısından emniyetlidir. Siklon sistemi kullanılarak U_t/U_{mf} 250'ye çıkarılabilir. /2/, /4/, /10/

4.2.6. Akışkanlaşma Tipleri

Katı-sıvı sistemlerin düzgün akışkanlaşma tipi ve katı-gaz sistemlerin kabarcıklanma tipi arasındaki fark genellikle iki durumda da akışkanların yoğunlukları arasındaki farka bağlı olduğuna atfedilmiştir. Yüksek basınçta katı-gaz sistemlerin durumu açık değildir. Bundan dolayı kabarcıklı akışkanlaşmadan düzgün akışkanlaşmaya geçişi hesaplayabilmenin bir ölçütü bulunmalıdır.

Wilhelm ve Kwauk, deneylerinde boyutsuz Froude sayısını akışkanlaşmanın iki modeli için belirlemişlerdir:

$$\begin{aligned} Fr_{mf}(\text{minimum akışkanlaşma}) < 0,13 & \text{ Düzgün} \\ Fr_{mf}(\text{minimum akışkanlaşma}) > 1,3 & \text{ Kabarcıklı} \end{aligned} \quad Fr_{mf} = \frac{U_{mf}^2}{dp \cdot g} \quad (4.27)$$

Rice ve Wilhelm ile Romero ve Johanson'ın boyutsuz sayıları :

$$Fr_{mf}, Re_{p,mf}, \frac{\rho_s - \rho_g}{\rho_g} \quad \text{ve} \quad \frac{L_{mf}}{d_t} \quad (4.28)$$

Dört boyutsuz grubun herbirinin değeri, yatak kararlılığının azalması ile artar. Akışkanlaşmanın iki şekli arasında deneylere göre kabul edilen ölçüt, dört boyutsuz grubun çarpımı ile verilmiştir. /2/, /4/

$$(Fr_{mf}) \cdot (Re_{p,mf}) \cdot \left(\frac{\rho_s - \rho_g}{\rho_g} \right) \cdot \left(\frac{L_{mf}}{d_t} \right) < 100 \quad \text{Düzgün} \quad (4.29)$$
$$(Fr_{mf}) \cdot (Re_{p,mf}) \cdot \left(\frac{\rho_s - \rho_g}{\rho_g} \right) \cdot \left(\frac{L_{mf}}{d_t} \right) > 100 \quad \text{Kabarcıklı}$$

4.2.7. Minimum Boşluk Oranı

Akışkan yataklarda çalışma sırasında gözönüne alınması gereken bazı makroskopik büyüklükler (boşluk oranı gibi) vardır. Akışkan yatağı oluşturan taneciklerin, akışkan hızının etkisi altında harekete geçebilmesi için yatağın yükselerek belli bir boşluk değerine ulaşması ve akışkanın geçiş kesitini arttırması gerekmektedir. İşte, akışkanlaşmanın veya minimum akışkanlaşmanın gerçekleşmesi için gerekli olan bu boşluk değerine "minimum boşluk oranı" denir ve ϵ_{mf} ile gösterilir. ϵ_{mf} , akışkanlaşmanın başladığı anda yatak içindeki toplam boşluk hacminin yatak hacmine olan oranıdır.

Minimum akışkanlaşmadaki yatak yüksekliği (L_{mf}), yatak ağırlığı (W), akışkan ve katı yoğunlukları (ρ_a, ρ_k) ile yatak kesiti (A) bilindiğine göre ϵ_{mf} şöyle hesaplanabilir.

$$\epsilon_{mf} = 1 - \frac{W}{L_{mf} \cdot A \cdot (\rho_k - \rho_a) \cdot g} \quad (4.30)$$

Minimum boşluk oranı, katı taneciklerin boyutu ve şekline bağlıdır, bunlarla ters orantılıdır. Taneciklerin şekli küreden uzaklaştıkça ve boyutları küçüldükçe minimum boşluk oranı (ϵ_{mf}), daha büyük değerler almaktadır. /3/, /11/

Ancak, katı-gaz akışkanlaşmasında ϵ_{mf} 'in teorik (4.30) denklemi ile saptanması güç olduğundan bu değer, yaklaşık olarak hesaplanabilir. /5/

$$\text{Boşluk Oranı} = \frac{\rho_{\text{gerçek}} - \rho_{\text{görünür}}}{\rho_{\text{gerçek}}} \cdot 100 \quad (4.31)$$

Katı-gaz akışkanlaşmasında yatak yükselişinin anî olması, kabarcık teşekkülü, L_{mf} 'in saptanmasını zorlaştırmakta ve hesaplanan boşluk değerinin gerçek değerden uzak olmasına neden olmaktadır. /3/

Gaz akışkanlaşmış sistemler için laboratuvar boyutundaki cihazlarda yapılan deneylere dayanan çok sayıda korelasyonlar önerilmiştir. Aşağıdaki tabloda değişik araştırmacıların bazı verilere dayanarak yaptıkları deney sonuçları verilmiştir.

Tablo 4.2. Değişik araştırmacıların belli U_0 değerleri için saptadığı L_f/L_{mf} oranları /2/

Araştırmacı	L_f/L_{mf}	
	$U_0 = 10 \text{ cm/sn}$	$U_0 = 20 \text{ cm/sn}$
Leva	1,2	1,3
Shen ve Johnstone	1,3	1,65
Lewis	1,45	2,8
Yagi	1,45	2,85

Deney Koşulları :

$$d_p = 100 \mu$$

$$\rho_s = 2,5 \text{ g/cm}^3$$

$$\phi_s = 0,785$$

$$U_{mf} = 1,2 \text{ cm/sn}$$

$$U_t = 28 \text{ cm/sn}$$

(Şekil : 4.8)'de L_f/L_{mf} ile U_o gaz hızı arasında yukarıdaki şartlarda değişik reaktör çapları için çizilen grafikten yatak yüksekliğinin boşluk oranı üzerindeki etkisi gözlenmektedir. /2/, /3/

4.2.8. Akışkan Yatakların Viskozitesi ve Akışkanlığı

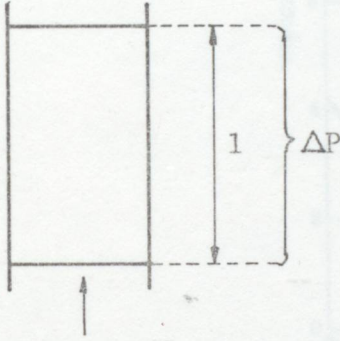
Laminer Akım için;

$$\Delta P_{\text{sürtünme}} = \frac{32 \cdot \mu \cdot U_s \cdot L}{g_c \cdot d_t^2} \quad (4.32)$$

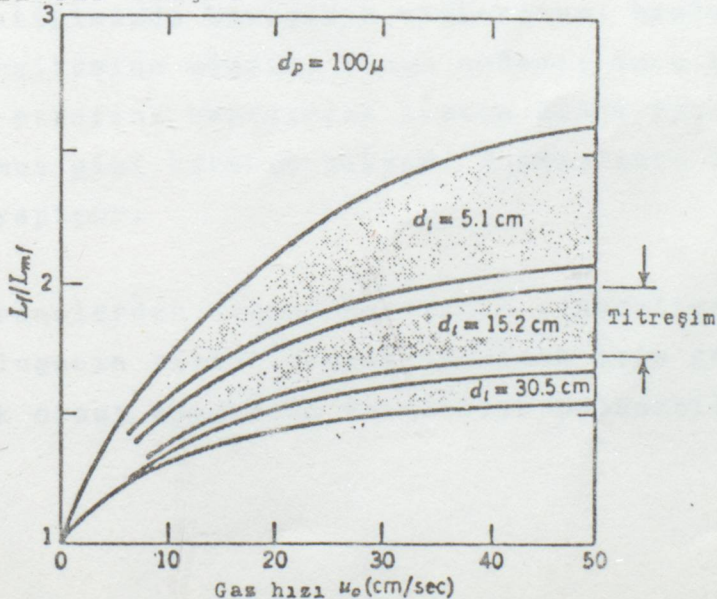
Sicmes-Hellmer'in saptadığı Re bağıntısı;

$$Re = \frac{d_t \cdot \bar{\rho} \cdot U_s}{\mu} \leq 1300-200 \quad (4.33)$$

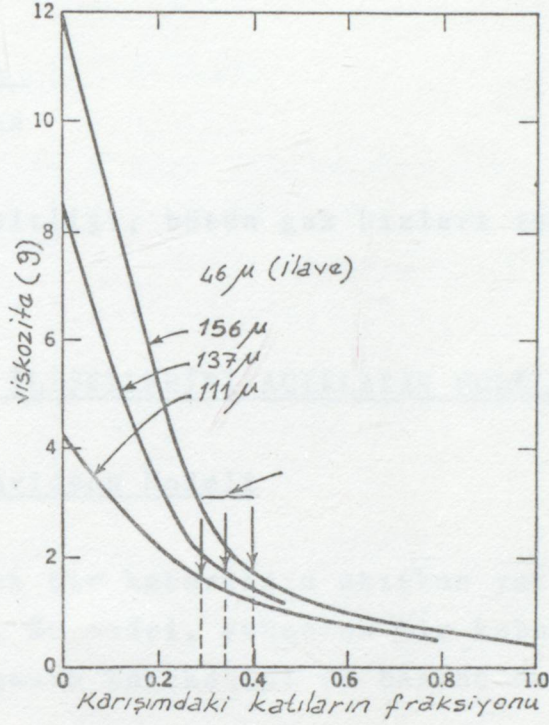
$$d_t = 4 \cdot \frac{\text{Kesit Alanı}}{\text{Çevre}} \quad (4.34)$$



Viskoziteyi, katıların dağılımı ve büyüklüğü önemli derecede etkiliyor. Karışımın viskozitesi ile tane dağılımı arasında belli bir ilişki vardır.



Şekil 4.8. L_f/L_{mf} İle U_o Gaz Hızı Arasında Değişik Reaktör Çapları İçin Elde Edilen Eğriler. /2/



Şekil 4.9. Yatağa İlave Edilen Katıların Viskoziteye Etkisi /2/

İri taneli bir malzemeye nispeten az miktarda ince tane ilâve ettiğimizde karışımın viskozitesi hızla ince tanelerin viskozitesine ulaşır. Bunun nedeni; ince taneler iri tanelerin etrafını kaplayarak sistem sanki ince tanelerden oluşuyormuş gibi hareket ediyor. Burada ince taneler yağlama görevi yapıyor.

İri tanelerden oluşan karışımın viskozitesini ince tanelerden oluşanın viskozitesine indirmek için gerekli minimum ağırlık oranı aşağıdaki eşitlikten bulunabilir :

$$(\text{İnce tanelerin minimum}) = \frac{3 \cdot (1 - \epsilon_{mf}) \cdot (m + m^2)}{1 + 3(1 - \epsilon_{mf}) \cdot (m + m^2)} \quad (4.35)$$

$$m = \frac{d_{\text{ince}}}{d_{\text{kalın}}}$$

(4.35) eşitliği, bütün gaz hızları için geçerlidir. /4/, /12/

4.3. KATI-GAZ İLİŞKİLERİNİ AÇIKLAYAN MODELLER

4.3.1. Davidson Modeli

Tek bir kabarcığın akışkan yatak içindeki hareketini inceler. Bu model, yükselen bir kabarcığın etrafındaki katının ve gazın hareketini ve basınç dağılımını öngörmektedir.

4.3.1.1. Modelin Varsayımları

- i) Bir gaz kabarcığı daireseldir ve katı içermez.
- ii) Kabarcık yükselirken etrafındaki tanecekler (emülsiyon fazı: tanecik+gaz) tıpkı $[\rho_s \cdot (1 - \epsilon_m)]$ yoğunluğuna sahip düşük viskoziteli ve sıkıştırılamaz bir akışkan gibi yanlara gider.
- iii) Gaz, emülsiyon fazda sıkıştırılamayan viskoz bir akışkan gibi davranır. Böylece katı ve gaz arasındaki bağıl hız herhangi bir x doğrultusunda Darcy bağıntısına uyar.

$$(U_{\text{gaz}} - U_{\text{katı}})_x = -K \cdot \frac{\partial P}{\partial x} \quad (4.36)$$

4.3.1.2. Sınır Şartlar

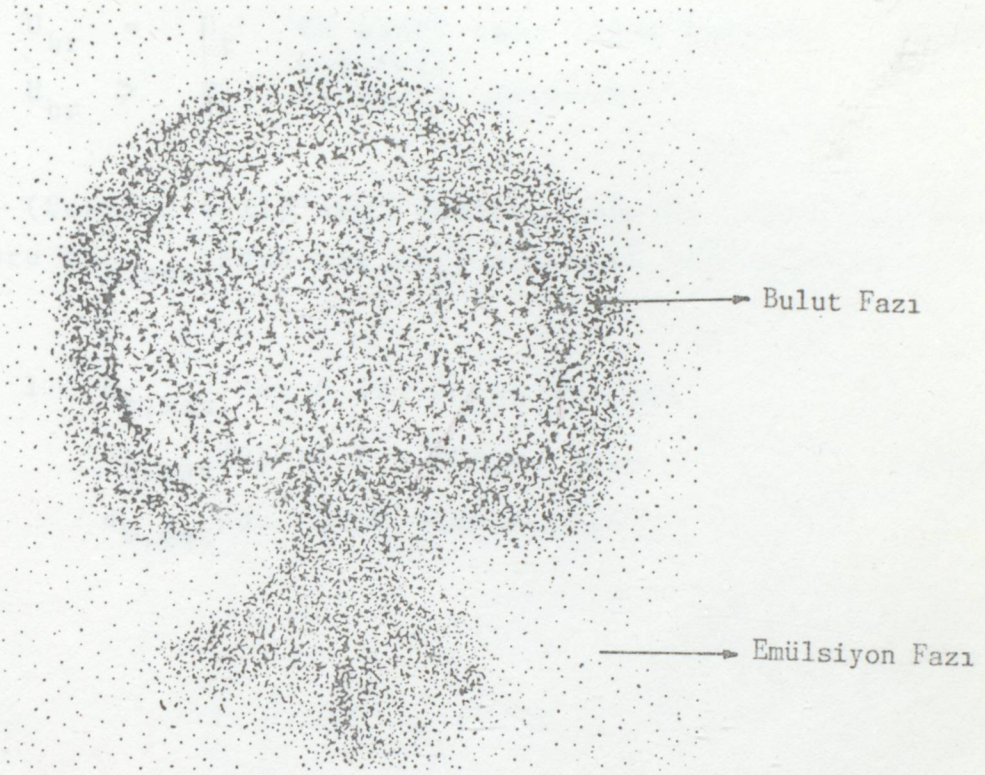
i) Kabarcıktan uzakta (kabarcığın etkilemeyeceği kadar uzak) bir basınç farkı vardır ve (4.37) eşitliği ile hesaplanabilir.

$$\frac{\Delta P}{L_{mf}} = (1 - \epsilon_{mf}) \cdot (\rho_s - \rho_g) \cdot \frac{g}{g_c} \quad (4.37)$$

ii) Kabarcık içinde basınç sabittir. Kabarcığın alt kısmında basınç düşük, üst kısmında basınç yüksektir. Bunun sonucu olarak, alt kenardan gaz girişi üst kenardan gaz çıkışı olur.

Kabarcığın alt kısmındaki basınçın, emülsiyon fazı basıncından düşük olması nedeni ile kararsız hal oluşur ve kabarcığın alt kısmında şekil bozukluğu yapar. Dolayısı ile kabarcıktan dışarıya da miktar gaz çıkar.

(Şekil: 4.10)'da kabarcığın fotoğrafı görülmektedir. Şekilde de görüldüğü gibi bulut ile emülsiyon fazı arasında kesin bir sınır vardır. Bu nedenle, buluttan emülsiyona konduksiyonla gaz iletimi çok az olmaktadır. Bunun, bulut içindeki katılardan ileri geldiği öne sürülmüştür. /4/



Şekil 4.10 Kabarcığın Fotoğrafı /4/

4.3.2. Jackson Modeli

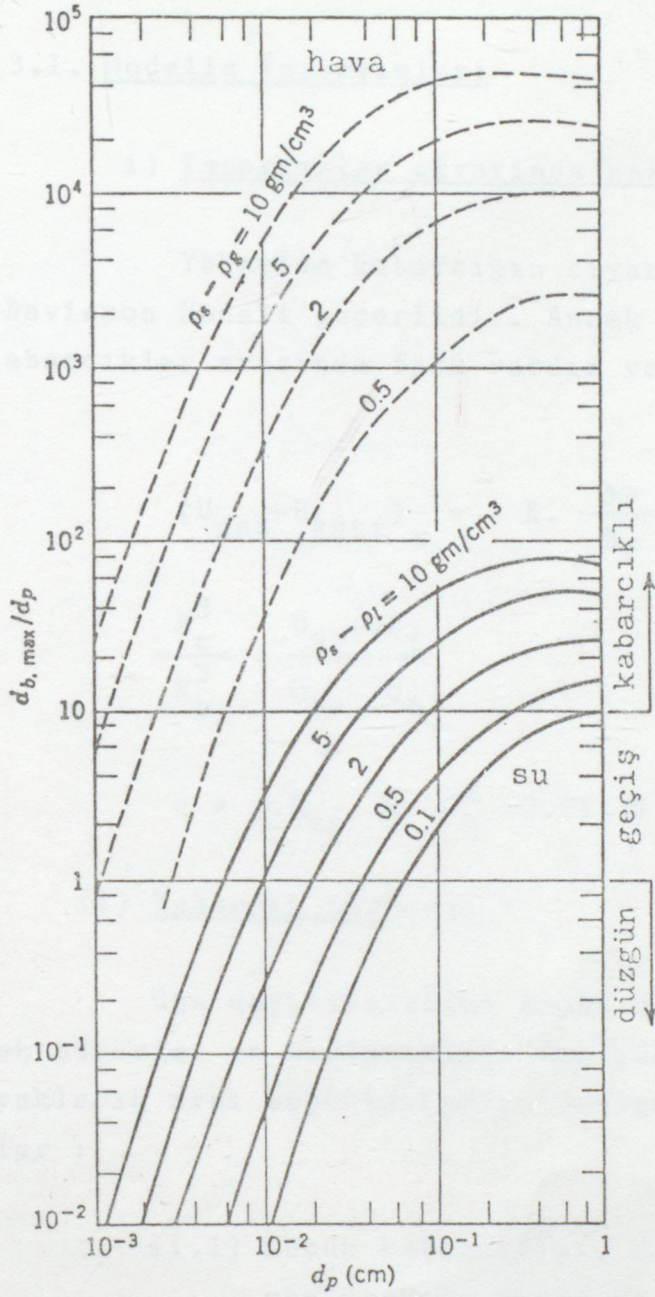
Jackson'a göre; kabarcığın ön kısmında boşluk oranı daha büyük bir faz oluşuyor ve bu fazın içindeki taneler kararsız olup sınır tabakadan içeriye doğru düşebiliyorlar. Kabarcıklar birleşebildiği gibi çok iri kabarcıklar küçük kabarcıklara parçalanabilmektedir.

Harrison, maksimum kabarcık çapını öngörmüştür. Kabarcık hızı (u_{br}), tanelerin limit hızını (U_t) aşarsa parçalanma oluşuyor, bir başka deyişle, katılar kabarcık içine çekilmeye başlıyor.

$$\begin{aligned} U_{br} < U_t & \text{ Kararlı Kabarcık} \\ U_{br} = U_t & \text{ En büyük çapa sahip kararlı kabarcık} \\ U_{br} > U_t & \text{ Kararsız kabarcık.} \end{aligned} \quad (4.38)$$

(Şekil : 4.11)'deki grafik, çeşitli yoğunluk farklarına göre $(d_{b,max.}/dp)$ ile (d_p) arasında çizilmiştir. /4/

$$\begin{aligned} 1 < d_{b,max.}/dp < 10 & \text{ Geçiş Bölgesi} \\ d_{b,max.}/dp < 1 & \text{ Düzgün Akış} \\ d_{b,max.}/dp > 10 & \text{ Kabarcıklı} \end{aligned} \quad (4.39)$$



Şekil 4.11. Çeşitli Yoğunluk Farklarına Göre $d_{b,max}$ ile d_p Arasındaki Bağını. /4/

4.3.3. Kabarcıklı Yatak Modeli (Kunii-Levenspiel)

4.3.3.1. Modelin Varsayımları

i) Kabarcıklar civarında gaz davranışı :

Yükselen kabarcığın civarındaki gaz dağılımı için Davidson Modeli geçerlidir. Ancak hızlı, yavaş ve bulutlu kabarcıklar arasında fark vardır ve şu denklemler geçerlidir:

$$(U_{\text{gaz}} - U_{\text{katı}})_x = -K \cdot \frac{\partial p}{\partial x} \quad (4.40)$$

$$\frac{R_c^3}{R_b^3} = \frac{U_{br} + 2U_f}{U_{br} - U_f} \quad (4.41)$$

$$q = 3 \cdot U_{mf} \cdot \pi \cdot R_b^2 = 3 \cdot U_f \cdot \epsilon_{mf} \cdot \pi \cdot R_b^2 \quad (4.42)$$

ii) Kabarcık büyümesi :

Gaz dağıtıcısından çıkan küçük kabarcıklar birleşerek büyürler ve hızlanırlar. Her yükseklikteki kabarcıklar yaklaşık aynı büyüklüktedir. Bunların büyümeleri üç aşamada olur :

ii.1) Küçük kabarcıklar, dağıtıcının hemen üstünde hızla birleşirler.

ii.2) Ara bölge oluşur, $U_b > U_f$ olduğundan orta büyüklükte kabarcıklar ortaya çıkar.

ii.3) Üçüncü bölge büyük, hızlı, ince ve-

ihmâl edilebilir buluta sahip kabarcıklar içerir. U_b , U_f 'ten çok büyüktür.

- iii) Bir kabarcık küresindeki kabarcığın hızı için aşağıdaki denklem geçerlidir:

$$U_b = U_o - U_{mf} + U_{br} \quad (4.43)$$

- iv) Kabarcık büyüklüğünün kontrol altında tutulabildiği yataklarda kabarcık çapı, giriş bölgesi hariç sabit alınabilir.

- v) Kabarcık ve emülsiyon fazının boşluk oranı: Yapılan gözlemlerde kabarcık içinde az da olsa katının bulunmasına rağmen bunu ihmâl edip kabarcık boşluk oranını 1 alabiliriz. δ , yataktaki kabarcıkların boşluk oranını gösterdiğine göre boşluk oranları aşağıdaki şekilde bulunabilir.

$$\epsilon_f = \delta \cdot \epsilon_b + (1 - \delta) \cdot \epsilon_e \quad (4.44)$$

$$\epsilon_b \cong 1 \text{ ise } \epsilon_f = \delta + (1 - \delta) \cdot \epsilon_e \quad (4.45)$$

ϵ_e 'yi bulamıyorsak, varsayım yaparak, emülsiyon fazının minimum akışkanlaşma da olduğunu kabul ederiz.

$$\epsilon_e = \epsilon_{mf} \text{ ve } \epsilon_b \cong 1 \text{ ise denklem(4.45)}$$

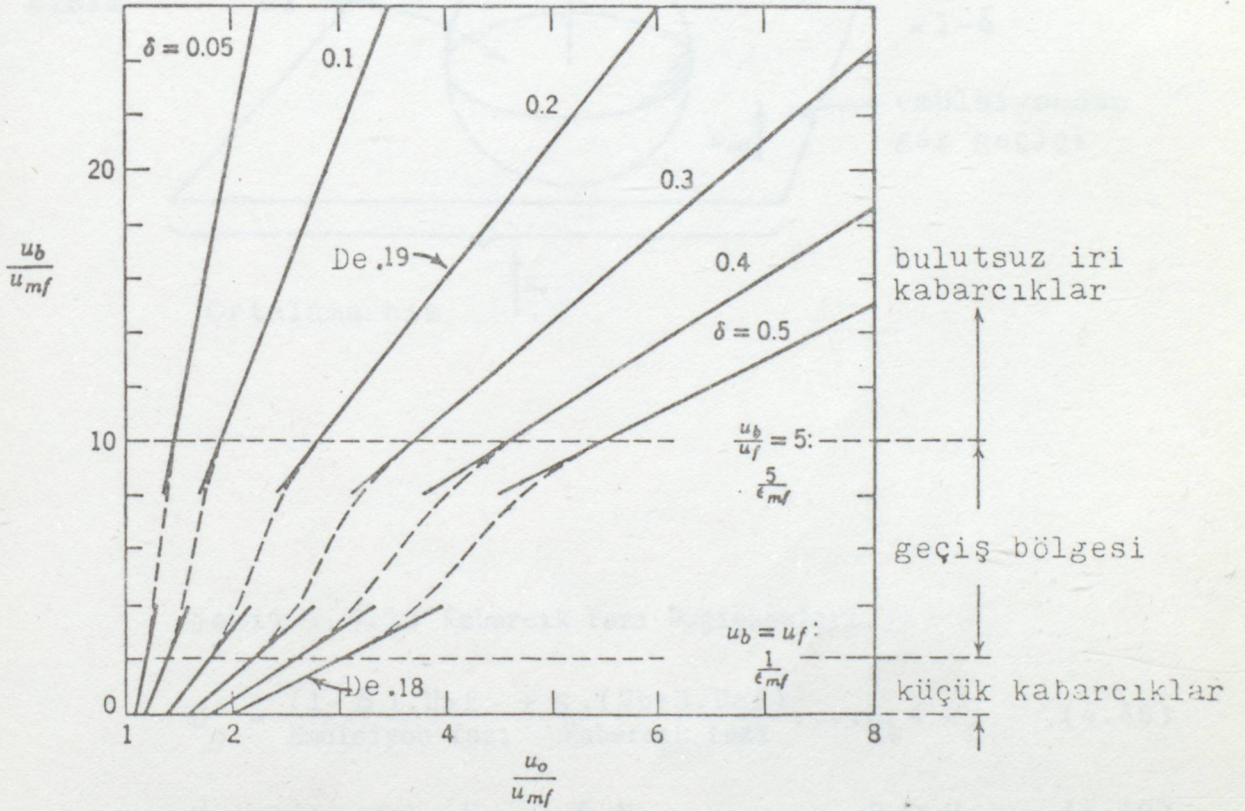
$$\text{den } \epsilon_e = \frac{\epsilon_f - \delta}{1 - \delta} \text{ bulunur.} \quad (4.46)$$

$U_b/U_f < 1$ Küçük kabarcıklar

$1 > U_b/U_f > 5$ Geçiş Bölgesi (Hızlar için interpolasyon yapılır) (4.47)

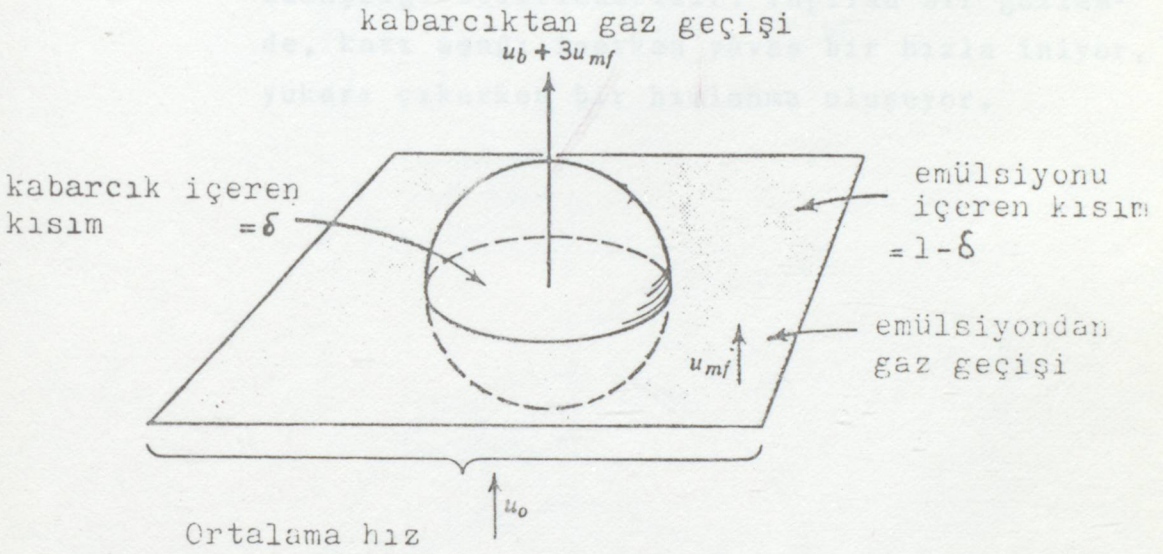
$U_b/U_f > 5$ Bulutsuz iri kabarcıklar

(Şekil: 4.12)'de U_b/U_f ile U_o/U_{mf} arasında elde edilen deneysel grafik görülmektedir.



Şekil : 4.12 U_b/U_{mf} ile U_o/U_{mf} Arasında Elde Edilen

(Şekil: 4.13)'de kabarcık fazı değişkenleri gösterilmiştir ve bu değişkenlerin hesaplanabildiği denklemler aşağıda verilmiştir. /4/, /6/, /10/



Şekil : 4.13 Kabarcık Fazı Değişkenleri. /4/

$$U_o = \begin{matrix} (1-\delta).U_{mf} & + & \delta.(U_b+3.U_{mf}) \\ \text{Emülsiyon fazı} & & \text{Kabarcık fazı} \end{matrix} \dots U_b < U_f \quad (4.48)$$

$$U_o = (1-\delta).U_{mf} + \delta.U_b \dots U_b > U_f \quad (4.49)$$

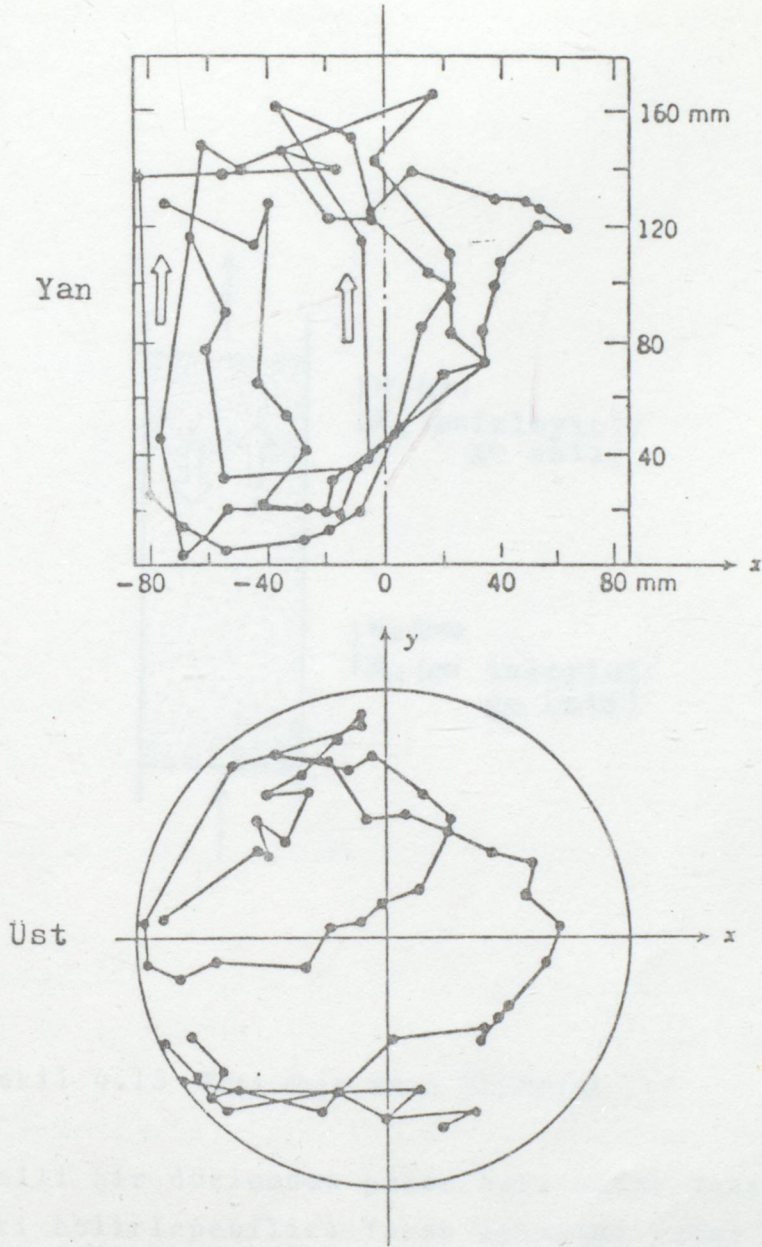
$$U_b = \frac{U_o - (1-\delta).U_{mf}}{\delta} \cong \frac{U_o - U_{mf}}{\delta} \quad (4.50)$$

4.3.3.2. Kabarcıklı Yataklarda Emülsiyon Fazı

Deneysel bulgular, katının emülsiyon fazında bulunduğunu göstermiştir. Katının hareketi sırasında izlediği yolun nasıl olduğu hakkında geliştirilmiş çeşitli teknikler vardır.

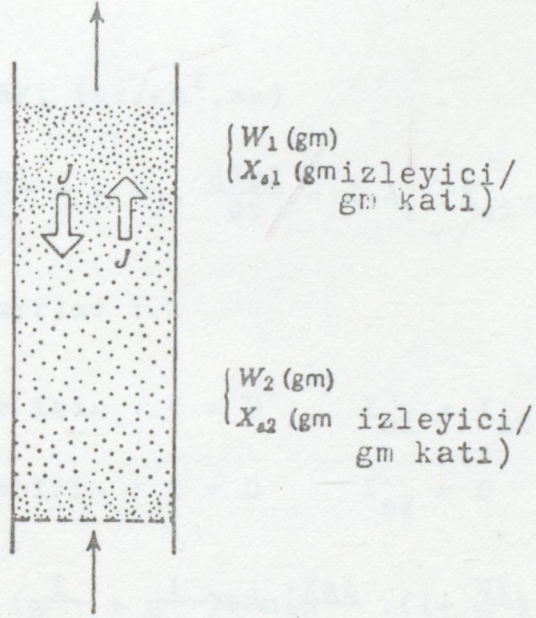
- i) (Şekil : 4.14)'de görüldüğü gibi, bir akışkan yatak içine izleyici katı verip bunun nasıl dolaştığı belirlenebilir. Yapılan bir gözlemede, katı aşağı inerken yavaş bir hızla iniyor, yukarı çıkarken bir hızlanma oluşuyor.





Şekil. 4.14 Akışkan yatak içinde bir tanecik yörüngesi.
 $\Delta t=0.5$ s , $U_o = 119$ cm/s , $u_{mf}=84$ cm/s
(KONDUKOV v.a.)/4/

ii)



Şekil 4.15 Katı Akış Akısı Ölçülmesi /4/

Belli bir düzlemden geçen katı akısı izlenerekte katı hareketi belirlenebilir. Yatak içindeki yatay bir düzlemin birim alanından birim zamanda geçen katı akısı Katz-Zenz tarafından incelenmiştir:

X_{s1} izleyici Oranları (gr katı/toplam katı)

X_{s2}

W_1 Üst ve alt bölgedeki katı ağırlığı (gr.)

W_2

J : Akı (gr/cm².sn)

$$W_1 \cdot \frac{dX_{s1}}{dt} = - W_2 \cdot \frac{dX_{s2}}{dt} = J \cdot A_t \cdot (X_{s2} - X_{s1}) \quad (4.51)$$

Sınır şartlar :

1. Bölge için : $t = 0$ $X_{s1} = X_{s0}$

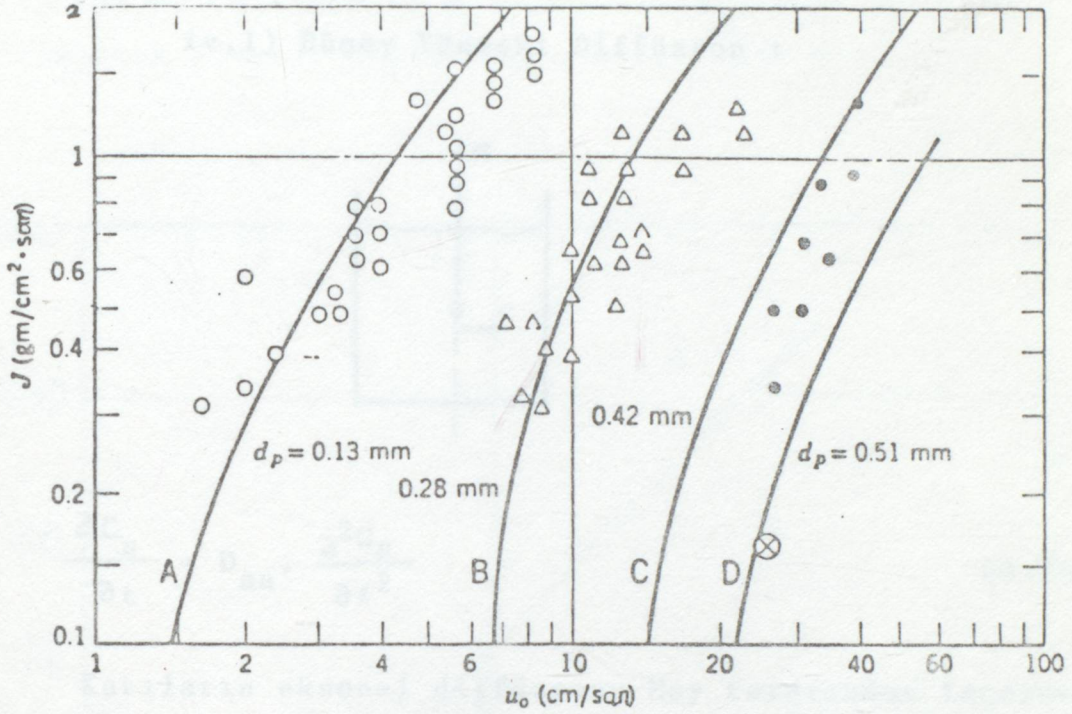
2. Bölge için : $t = 0$ $X_{s2} = 0$

$$J \cdot A_t \cdot t \cdot \left(\frac{1}{W_1} + \frac{1}{W_2} \right) = - \ln \left[\frac{X_{s1}}{X_{s2}} \cdot \left(1 + \frac{W_1}{W_2} \right) - \frac{W_1}{W_2} \right] \quad (4.52)$$

Talmor-Benenatı, (4.52) denkleminin uygunluğunu incelemişler ve aşağıdaki bağıntıyı elde etmişlerdir.

$$J = 0,785 \cdot (U_o - U_{mf}) \cdot e^{-66,3dp} \text{ (gr/cm}^2 \cdot \text{s)} \quad (4.53)$$

1. ve 2. bölgenin her yerinde izleyici konsantrasyonları eşit kabul edilmiştir. Kum ve silikajel'in karışma akı-ları, değişik tane çapları aralığı için Leva-Grummer ve Kob-le tarafından deneysel olarak incelenmiştir. Bu deneysel so-nuçlara dayanarak karışma akıları ile U_o ortalama hızları arasında (Şekil : 4.16)'daki grafik çizilmiştir.



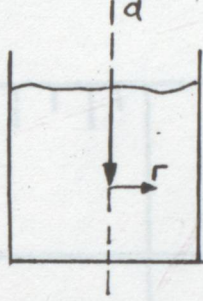
Şekil 4.16. Kum ve Silikajelin Karışma Akıları, /4/
(A) $d_p = 0,08-0,18$ mm; (B) $d_p = 0,23-0,32$ mm;
(C) $d_p = 0,38-0,46$ mm (LEVA+GRUMMER);
(D) $d_p = 0,51$ mm (KOBLE)

iii) Katıların içeride kalma zamanı ölçülerekte katıların dolaşımı izlenebilir. Sürekli çalışan bir katı yatağa beslediğimiz katının içine izleyiciden koyarak dışarı çıkışındaki konsantrasyonunu saptarız.

Tailby-Coquerel, katı akış hızı ve Lf/d_t oranının artması ile piston akış eğiliminin arttığı gözlemiştir.

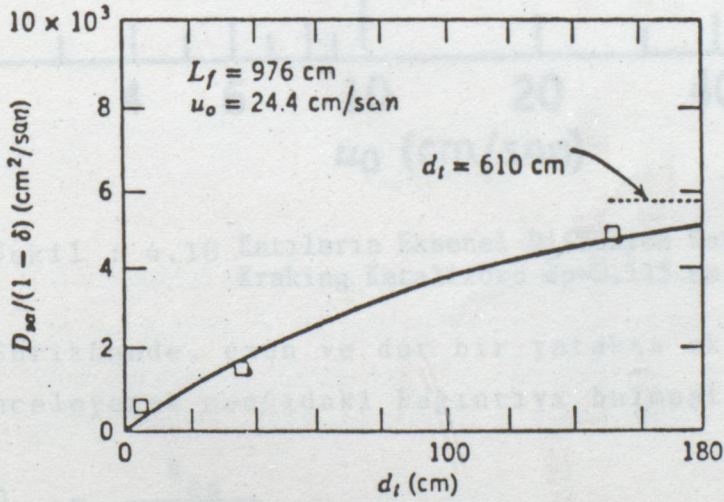
iv) Katıların dolaşım hızı, diffüzyon yöntemi ile ölçülebilir.

iv.1) Düşey Yöndeki Diffüzyon :



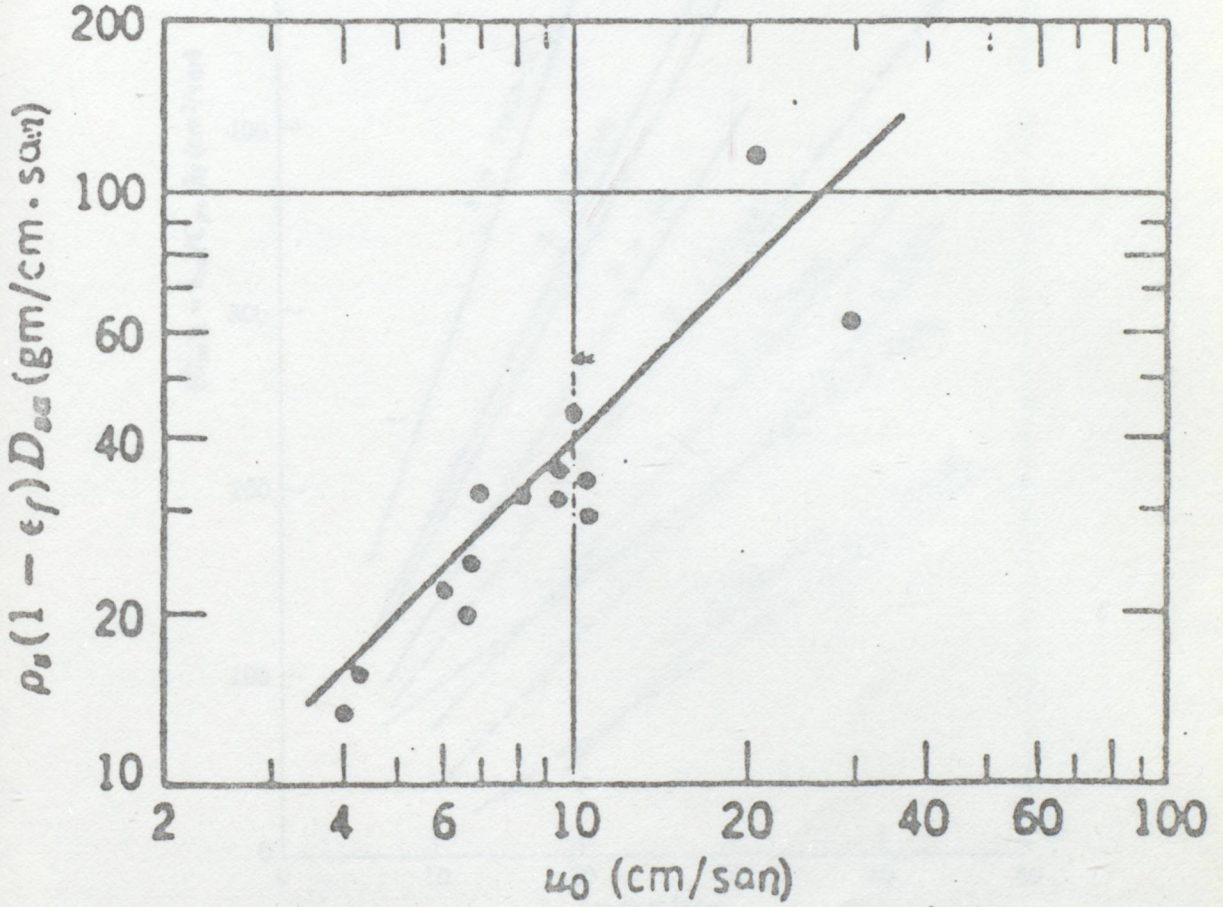
$$\frac{\partial c_s}{\partial t} = D_{sa} \cdot \frac{\partial^2 c_s}{\partial x^2} \quad (4.54)$$

Katıların aksenal diffüzyonu May tarafından incelenmiştir. Değişik reaktör çapları ile $D_{Sa}/(1-\delta)$ değişimini incelemiş ve (Şekil: 4.17)'deki grafiği elde etmiştir.



Şekil : 4.17 Katıların aksenal diffüzyon katsayısı (MAY) /4/

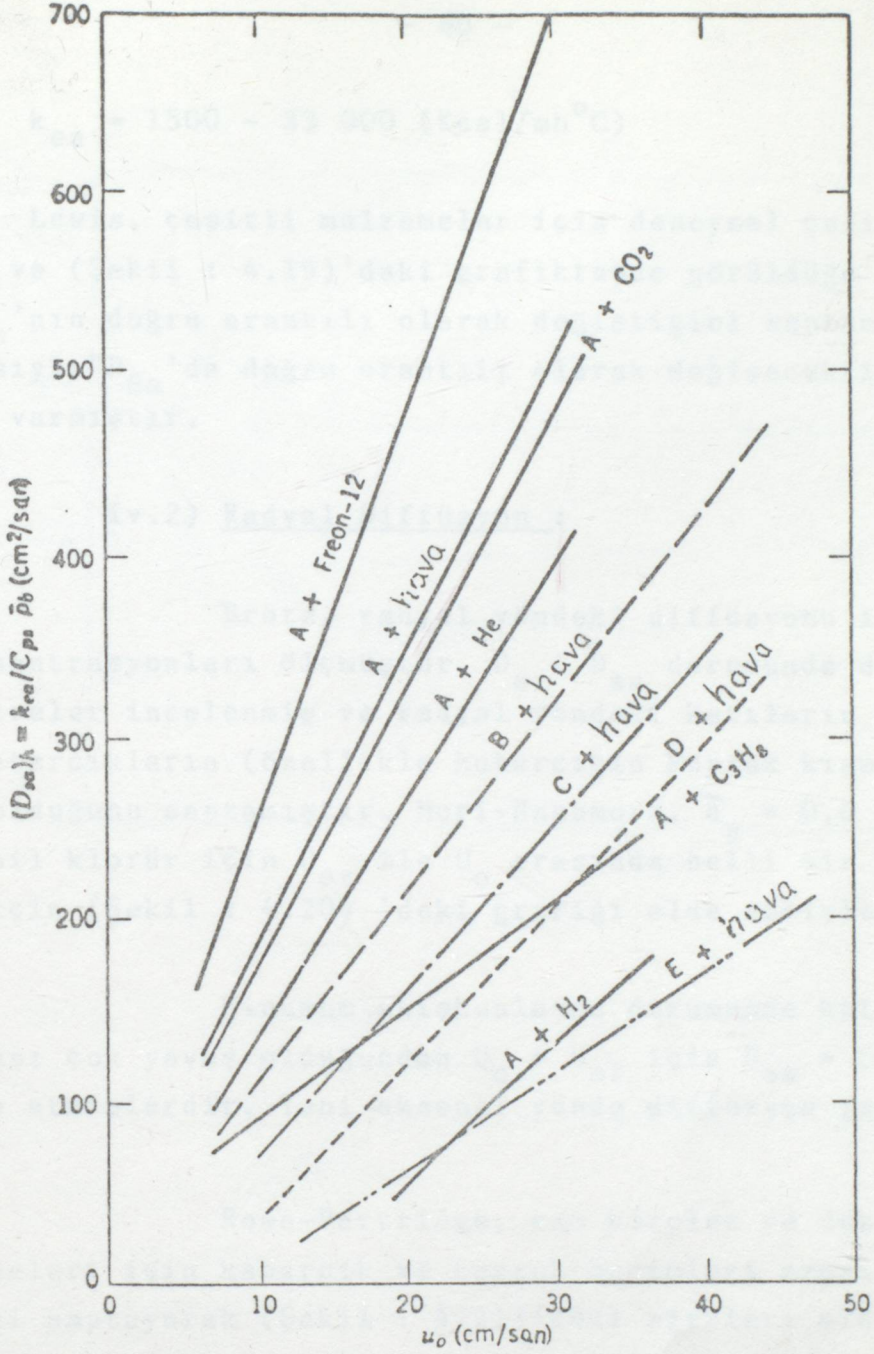
Katıların aksenal diffüzyonu Bart tarafından da incelenmiştir. Deneysel çalışmada, kraking katalizörü ($\bar{d}_p = 0,115$ mm) kullanılmış ve U_o ile $\rho_s(1 - \epsilon_f) D_{Sa}$ değişimini inceleyerek (Şekil: 4.18)'deki grafiği elde etmiştir.



Şekil : 4.18 Katıların Aksenal Diffüzyon Katsayısı, $d_t=3,18$ cm
Kraking Katalizörü $\bar{d}_p=0,115$ mm (BART)/ $4/t$

Shrikhande, uzun ve dar bir yatakta aksenal ısı iletimini inceleyerek aşağıdaki bağıntıyı bulmuştur :

$$D_{Sa} = \frac{k_{ea}}{C_{Ps} \cdot \bar{S}} \quad (4.55)$$



Şekil 4.19. Isıl verilerden hesaplanan eksenel diffüzyon katsayıları. (A) katalizör, 0,11 mm; (B) cam küre, 0,04 mm; (C) cam küre karışımı, 0,092 mm; (D) cam küreler, 0,076 mm; (E) cam küreler, 0,155 mm (LEWIS v.a.) /4/

$$k_{ea} = 1500 - 33\,000 \text{ (Kcal/mh}^{\circ}\text{C)}$$

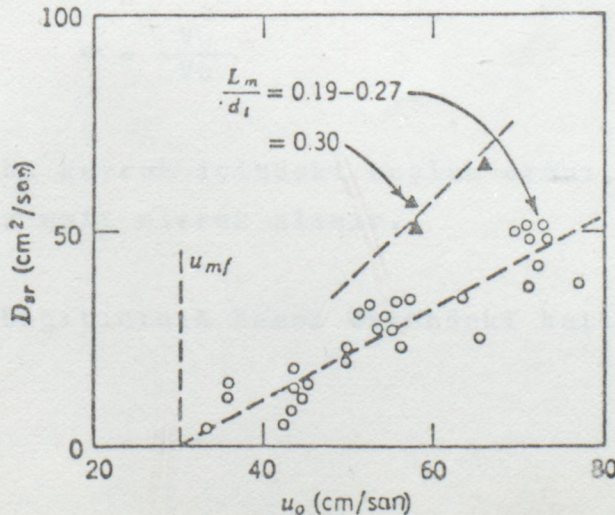
Lewis, çeşitli malzemeler için deneysel çalışmalar yapmış ve (Şekil : 4.19)'daki grafikte görüldüğü gibi U_o ile k_{ea} 'nın doğru orantılı olarak değiştiğini saptamıştır. Dolayısıyla " D_{Sa} 'da doğru orantılı olarak değişecektir" sonucuna varmıştır.

iv.2) Radyal Diffüzyon :

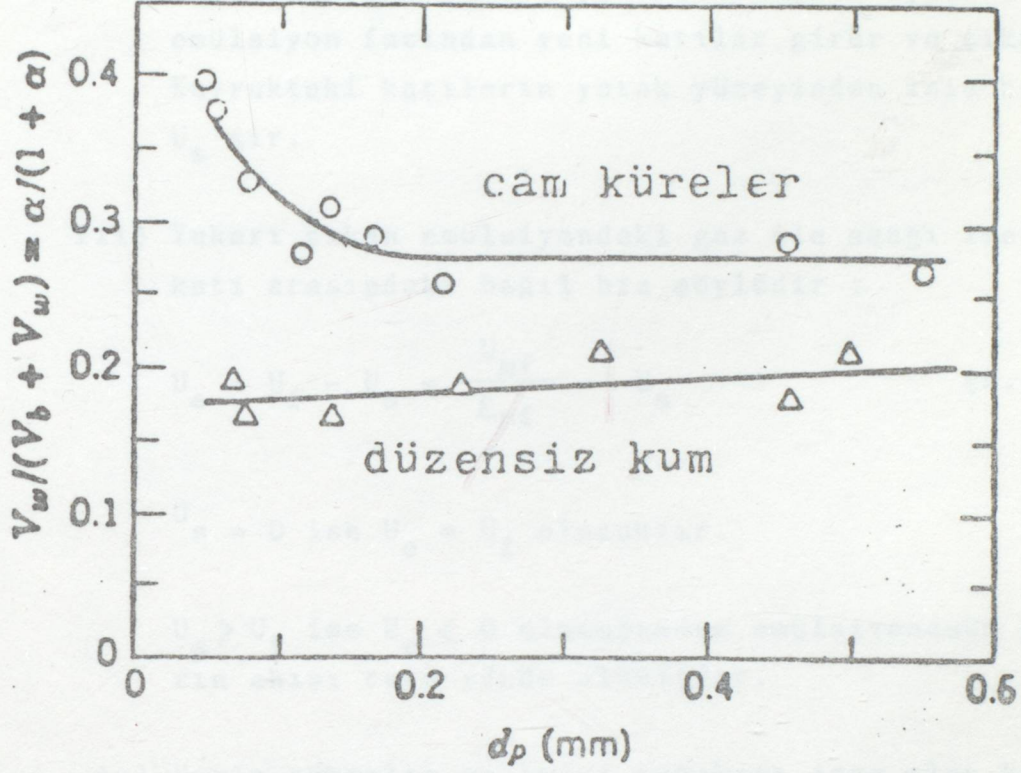
Brötz, radyal yöndeki diffüzyonu incelemiş ve konsantrasyonları ölçmüştür. $D_{sr} < D_{sa}$ durumunda değişik parametreler incelenmiş ve radyal yöndeki katıların hareketine kabarcıkların (özellikle kabarcığın kuyruk kısmının) neden olduğunu saptamıştır. Mori-Nakamura, $\bar{d}_p = 0,6$ mm olan polivinil klorür için D_{sr} ile U_o arasında belli bir L_m/d_t oranı için (Şekil : 4.20) 'deki grafiği elde etmişlerdir.

Minumum akışkanlaşma durumunda katıların karışması çok yavaş olduğundan $U_o = U_{mf}$ için $D_{sa} = 0$ sonucunu elde etmişlerdir. Yani eksenel yönde diffüzyon yoktur.

Rowe-Partridge, cam küreler ve düzensiz kum taneleri için kabarcık ve kuyruk hacimleri arasındaki ilişkiyi saptayarak (Şekil : 4.21)'deki eğrileri elde etmişlerdir.



Şekil 4.20. Katıların radyal diffüzyon katsayıları; polivinil klorür, $d_p = 0.6$ mm (MORI+NAKAMURA) /4/



Şekil 4.21 Kabarcık ve Kuyruk Hacimleri Arasındaki İlişki (ROWE+PARTRIDGE) /4/

4.3.3.3. Emülsiyon Fazı İçin Kabarcık Modelinin Varsayımları :

- i) Yükselen her kabarcık kendisi ile birlikte katı taneler içeren bir kuyruk sürükler.

$$\alpha = \frac{V_w}{V_b} \quad (4.56)$$

Bu kuyruk içindeki boşluk oranı, emülsiyonun boşluk oranına eşit olarak alınır.

- ii) Dağıtıcının hemen üstündeki katılar, kabarcığın

kuyruğu üzerinde U_b hızı ile yukarı sürüklenirler. Kabarcık yukarı çıkarken kuyruk içine emülsiyon fazından yeni katılar girer ve çıkar. Kuyruktaki katıların yatak yüzeyinden iniş hızı U_s 'dir.

iii) Yukarı çıkan emülsiyondaki gaz ile aşağı inen katı arasındaki bağıl hız şöyledir :

$$U_e = U_f - U_s = \frac{U_{mf}}{\epsilon_{mf}} - U_s \quad (4.57)$$

$U_s = 0$ ise $U_e = U_f$ olacaktır.

$U_s > U_f$ ise $U_e < 0$ olacağından emülsiyondaki gazın akışı ters yönde olmalıdır.

iv) Hızla yükselen ve bulut tabakası ince olan kabarcıklarda, kuyruktaki ve kabarcıktaki gazın aynı olduğunu düşünerek, yatay bir kesit için kütle dengesini aşağıdaki gibi yazabiliriz :

$$\left(\begin{array}{c} \text{Emülsiyon Fazındaki} \\ \text{Katıların oranı} \end{array} \right) \cdot \left(\begin{array}{c} \text{Emülsiyon Fazındaki} \\ \text{Katıların iniş hızı} \end{array} \right) = \left(\begin{array}{c} \text{Kuyruktaki} \\ \text{Katıların oranı} \end{array} \right) \cdot \left(\begin{array}{c} \text{Kuyruktaki} \\ \text{Katıların} \\ \text{Yükselme hızı} \end{array} \right)$$

$$(1 - \delta - \alpha \delta) \cdot U_s = (\alpha \delta) \cdot U_b \quad (4.58)$$

$$U_s = \frac{\alpha \delta U_b}{1 - \delta - \alpha \delta} \quad (4.59)$$

Toplam akış hızı :

$$U_o = (1 - \delta - \alpha \delta) \epsilon_{mf} U_e + (\delta + \alpha \delta) \epsilon_{mf} U_b \quad (4.60)$$

Kabarcığın hızı :

$$U_b = \frac{1}{\delta} [U_o - (1 - \delta - \alpha \delta) \cdot U_{mf}] \quad (4.61)$$

Düşük hızlarda ;

$$U_b \cong \frac{U_o - (1 - \delta)U_{mf}}{\delta} = \frac{U_o - U_{mf}}{\delta} \quad (4.62)$$

Gazın bağıl hızı için (4.60), (4.61) ve (4.62) denklemlerinden U_e hesaplanabilir :

$$U_e = \frac{U_{mf}}{\epsilon_{mf}} - \left(\frac{\alpha U_o}{1 - \delta - \alpha \delta} - \alpha U_{mf} \right) \quad (4.63)$$

$U_e \leq 0$ ise gaz ters yönde akar ve şu denklem elde edilir: /2/, /4/

$$\frac{U_o}{U_{mf}} \geq (1 - \delta - \alpha \delta) \left(1 + \frac{1}{\alpha \epsilon_{mf}} \right) \quad (4.64)$$

4.4. AKIŞKAN YATAKLARDA GAZ AKIŞ DÜZENİ

Akışkan yataklarda yapılan birçok işlemlerde yatak-taki gaz fazının akış düzenininin, kabarcık fazı ile emülsiyon fazı arasındaki gaz alış-verişinin bilinmesi gerekir. Bu gaz alış-verişinin ölçülmesi için çeşitli yöntemler vardır.

4.4.1. Etki-Tepki Eğrileri :

Akışkan yatağın içinde, bir akışkanın yoğunluğu değişmeden ve reaksiyona uğramadan aktığını varsayarsak, bu akışkan için ortalama içeride kalma süresinden bahsedebiliriz. Akış düzenine göre her bir tip tane için ortalama içeride kalma süresi dağılım gösterecektir.

$$\tau = \frac{\text{Yataktaki Boş Hacim}}{\text{Hacımsal Debi}} = \frac{\epsilon_f \cdot L_f}{U_o} \quad (4.65)$$

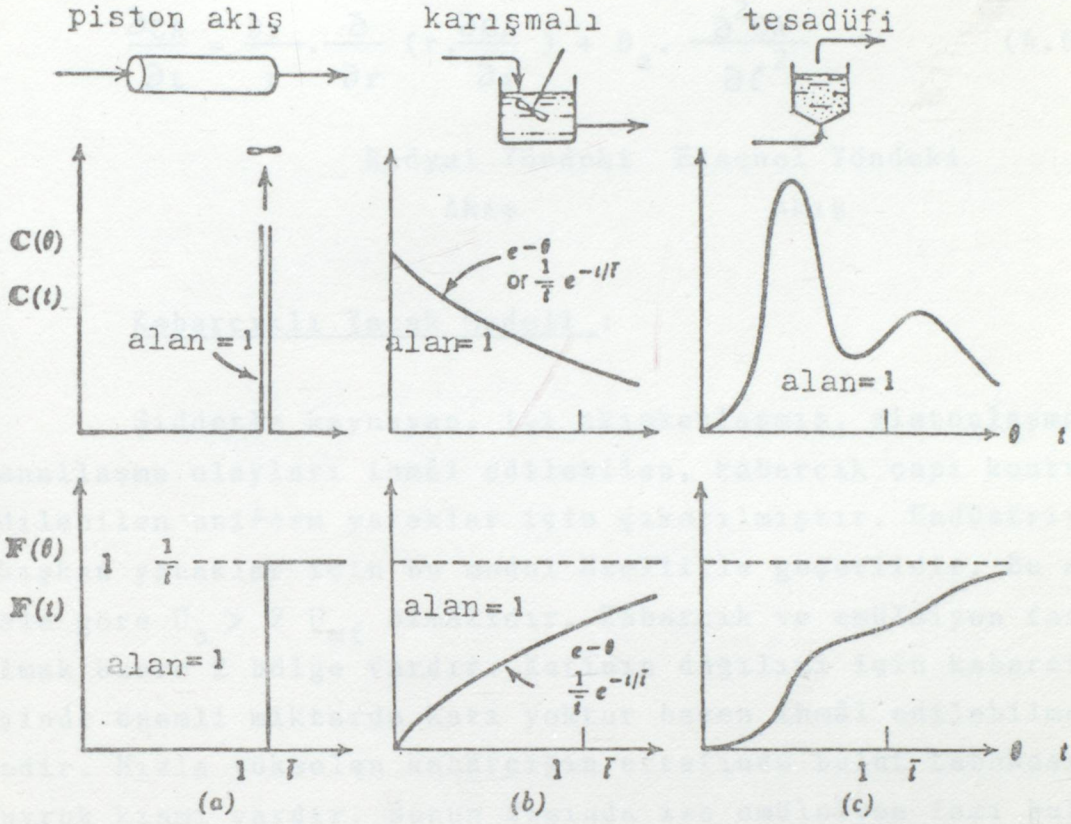
Sisteme 2 şekilde izleyici gaz verilebilir :

i) İzleyici gaz darbe ile verilir ve çıkışı izlenir. (Şekil: 4.22)'de çeşitli akış düzenlerinde izleyicinin boyutsuz çıkış tepkileri ölçülerek elde edilen grafikler görülmektedir.

ii) Basamak şeklinde birinci gazı çekip ikinci gazı vererek izleyici gaz gözlenir.

$$C(\theta) = \frac{dF(\theta)}{d\theta} \quad ; \quad F(\theta) = \int_0^{\theta} C(\theta) \cdot d\theta \quad (4.66)$$

$$C(t) = \frac{dF(t)}{dt} \quad ; \quad F(t) = \int_0^t C(t) \cdot dt \quad (4.67)$$



Şekil 4.22. Çeşitli akış düzenlerinde izleyicinin boyutsuz çıkış tepkileri /4/

4.4.2. Diffüzyon Modeli

Akışkanın akış düzeni, diffüzyon modeli ile açıklanabilir. Eksenel ve radyal yöndeki gaz akışı, deneysel çalışmalarla incelenmiştir. İzleyici gaz, tek yönde ve bir kez verilerek C, F eğrileri elde edilmiştir. Gaz, belli bir yere sürekli bir şekilde verilebilir ve hem eksenel hem de radyal yönde akış olabilir. İzleyici konsantrasyonunun zaman-

la değişimi o noktadaki konsantrasyon gradientinin türevi ile orantılıdır.

$$\frac{\partial CA}{\partial t} = \frac{D_r}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left(r \cdot \frac{\partial CA}{\partial r} \right) + D_a \cdot \frac{\partial^2 CA}{\partial t^2} \quad (4.68)$$

Radyal Yöndeki Eksenel Yöndeki
Akış Akış

Kabarcıklı Yatak Modeli :

Şiddetle kaynayan, iyi akışkanlaşmış, pistonlaşma ve kanallaşma olayları ihmâl edilebilen, kabarcık çapı kontrol edilebilen uniform yataklar için çıkarılmıştır. Endüstriyel akışkan yataklar için bu model özellikle geçerlidir. Bu modele göre $U_o > 2 U_{mf}$ olmalıdır. Kabarcık ve emülsiyon fazı olmak üzere 2 bölge vardır. Katının dağılımı için kabarcığın içinde önemli miktarda katı yoktur bazen ihmâl edilebilmektedir. Hızla yükselen kabarcığın etrafında bulut tabakası ve kuyruk kısmı vardır. Bunun dışında ise emülsiyon fazı bulunur. Bu üç fazda minimum akışkanlaşma durumundadır. Belli bir seviye için aynı çapta kabarcık ve uniform bir dağılım olduğunu varsayıyoruz.

Kabarcık çapı; sistemin bütün parametrelerini etkileyen en önemli büyüklüktür. U_{mf} , U_o ve d_b belli ise çalışma koşulları sırası ile belirlenebilir.

i) Kabarcık hızını veren denklem : (U_b)

$$U_b = U_o - U_{mf} + U_{br}$$

$$U_{br} = 0,711 [g d_b]^{1/2} \text{ Kabarcığın Yükselme hızı.}$$

ii) Herhangi bir noktadaki kabarcık frekansını veren denklem : (n)

$$d_b = \frac{1,5 U_b}{n} \frac{U_o - U_{mf}}{U_b - U_{mf}} \approx \frac{1,5}{n} (U_o - U_{mf})$$

iii) Kabarcık fazının hacim oranını veren denklem: (δ)

$$\delta = \frac{U_o - U_{mf}}{U_b}$$

iv) Emülsiyon fazı ile ilgili hesaplamalar için (α)
kuyruk oranı belli ise :

iv.1) Emülsiyondan geçen gazın hızı :

$$U_e = \frac{U_{mf}}{\epsilon_{mf}} - \left(\frac{\alpha \cdot U_o}{1 - \delta - \alpha \cdot \delta} - \alpha \cdot U_{mf} \right)$$

iv.2) Emülsiyondaki katıların aşağı iniş hızı :

$$U_s = \frac{\alpha \cdot \delta \cdot U_b}{1 - \delta - \alpha \cdot \delta}$$

v) Fazlar arasındaki gaz alış-verişi :

v.1) Kabarcık, bulut fazları arasındaki gaz iletimi :

$$(K_{bc})_b = 4,5 \cdot \frac{U_{mf}}{d_b} + 5,85 \cdot \frac{D^{1/2} \cdot g^{1/4}}{d_b^{5/4}}$$

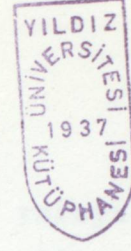
v.2) Bulut-emülsiyon fazları arasındaki gaz iletimi :

$$(K_{ce})_b = 6,78 \left(\frac{De \epsilon_{mf} U_b}{d_b^3} \right)^{1/2}$$

v.3) Kabarcık-emülsiyon fazları arasındaki gaz iletimi :

$$\frac{1}{(K_{be})_e} \cong \frac{1}{(K_{bc})_b} + \frac{1}{(K_{ce})_b}$$

Kabarcıklı Yatak Modeli; sistemdeki katıların aşağı inişlerini, aksenal ve radyal diffüzyonlarını, gazların radyal ve aksenal hareketini, ters akışını açıklayabilmektedir. /4/



5. DENEYSEL ÇALIŞMA VE BULGULAR

5.1. AKIŞKAN YATAKLI KAVURMA REAKTÖRÜ

Akışkanlaşma, yukarıya doğru hareket halindeki bir akışkan içinde katı tanecikleri kısmen gaz ortam içinde dağılmış halde bulunması olayıdır. Diğer bir tanımla, küçük taneli katıların bir akışkan ile temas ederek akışkan benzeri hale dönüştürüldüğü bir işlemdir.

Taneciklerin hızlı karışması homojen sıcaklık dağılımını oluşturur. Böylece işlem basit ve güvenilir bir şekilde kontrol edilebilir ve gaz ile katı arasındaki ısı-kütle iletim hızları diğer temas yöntemlerine nazaran çok yüksektir. Bu sayede kimyasal reaksiyonlar hızla oluşmaktadır.

Taneler her yönde gazla temas halindedirler. Yataktaki tane boyutlarının limitleri, kullanılan gazın hızına, kullanılan katının spesifik yoğunluğuna ve reaktörün boyutlarına göre değişir. Bunlar laboratuvar denemeleri ile belirlenirler. Bir deney sonucu olarak: beslemenin yandan yapıldığı reaktörlerde tane boyutları 3-5 mm, alttan besleme yapılan reaktörlerde 0,5-0,6 mm dir. İnce taneler ise yatağın üst kısmından çamur halinde beslenir.

Genel bir tanım olarak Akışkan Yatak Kavurma reaktörü, silindir şeklinde çelik bir kaptır. Isı kayıplarını önlemek ve cihazı ateşe dayanıklı duruma getirmek için silindirik gövdenin dış kısmı, cidardan başlayarak ateşe dayanıklı tuğla tozu çamuru, cam yünü, ytong ve saç levha ile sarılmıştır. Reaktörün taban kısmında akışkanlaşmayı gerçekleştiren gazın (hava-propan) toplandığı konik şekilli bir bölme ve bunun ü-

zerinde gazı yatağın tüm kesitine dağıtmaya yarayan, aynı zamanda yatağı taşıyan bir plâka vardır. Bu plâkada çok sayıda gaz giriş deliği bulunmaktadır.

Kavrulacak malzeme reaktöre çamur halinde veya kuru olarak beslenebilir. Çamur halinde besleme yapılacaksa, malzeme % 80 katı oluşturacak şekilde su ile karıştırılır ve yatağın üst kısmından püskürtülür. Çamur hali, hem homojen bir beslenme sağlamakta hem de yataktaki sıcaklık artışını önlemektedir ki böylece sıcaklığın sabit kalmasına yardımcı olur. Eğer yüksek sıcaklık gerekiyorsa, kavrulacak malzeme reaktöre kuru olarak verilir ve sıcaklık kontrolü ya kavrulmuş malzemenin tekrar beslenmesi ya da yatak içine soğutucu elemanların konulması ile yapılır.

Akışkan yatağın üst kısmında taşma çıkışı vardır. Yatakta sürekli besleme sonucunda oluşan yükselme ile, iri boyutlu katılar buradan dışarı boşalır. Çok ince boyutlu olan katılar ise gazlar ile taşındığından-endüstriyel uygulamalarda-toz tutucular kullanılarak toplanmaktadırlar.

Uygulamada kullanılan akışkan yatak kavurma reaktörleri genelde üç tiptir:

i) A- tipi reaktörler :

Bu tip reaktörlerde, flotasyon konsantreleri gibi ince boyutlu malzemeler düşük hızda akışkanlaştırılarak kavrulurlar. Yatak oluşturmak için kavrulacak malzeme ve ona eşit miktarda kavrulmuş malzeme karıştırılır. Burada kullanılan kavrulmuş kalsine sıcaklığı düşürmekte ve aglomerasyonu (kısmî ergime) önlemektedir.

ii) B-tipi reaktörler :

Kavurma ürününün kısmen yeniden dolaşımı ile çalışır ve besleme A tipine göre daha azdır. Kavrulmuş malzeme tekrar beslendiğinden yatakta oluşan oksijen konsantrasyonundaki artış, reaksiyon hızının artmasına sebep olmaktadır. Katı parçaları dibe çökmeden reaksiyon oluşur. Üst ve alt bölgeler arasındaki sıcaklık farklarına rağmen malzeme üniform işlem görür.

iii) C-tipi reaktörler :

Bu reaktörler, yüksek gaz hızlarında çalışırlar ve iri boyutlu parçaların kavrulmasını sağlarlar. Ancak, iri boyutlu inert bir malzeme veya kavrulacak maddenin kalsinesinden sun'î bir yatak oluşturulup, ince boyutlu malzemeler de kavrulabilir. Kavurma süresi kısadır, işlem sonuçlanınca ince tanecikler dışarıya üflenirler ve reaksiyon yatak üstünde tamamlanmış olur. /1/, /3/

5.1.1. Bu Çalışmada Kullanılan Laboratuar Tipi Akışkan Yatak Reaktörü :

Bu çalışma için gerekli olan akışkan yatak reaktörü, laboratuar tipinde dizayn edilmiştir. Sanayi tipi reaktörlere geçiş için, kavrulacak malzemenin akışkanlaşma karakteristiklerinin belirlenmesi amacıyla laboratuar tipi reaktörlerde deneysel çalışmalar yapılması şarttır.

Yıldız Üniversitesi Mühendislik Fak. Metalurji Müh.Böl.de kurduğumuz bu cihaz, 10 cm. iç çapında 50 cm. yüksekliğindedir. Yatağın üstü akışkanlaşmayı gözleyebilecek nitelikte atmosfere açık bırakılmıştır. Çalışma kısa süreli ve

yatak yüksekliği küçük olduğundan siklon koymaya gerek görülmemiştir. Kavurmada çıkan gazların dışarıya atılması için reaktör bacaya direk olarak bağlanmıştır. Çok miktarda zehirli gaz çıkabilecek kavurma işlemlerinde fan kullanılmaktadır. Bu çalışmada gelecekte çok amaçlı işlemlerde kullanılabilen universal, basit ve ekonomik bir tip dizayn edilmesine önem verilmiştir.

Bu fırını genel olarak dört sistem halinde düşünebiliriz:

- i) Cevher doldurma sistemi,
- ii) Akışkanlaştırma ve kavurma sistemi,
- iii) Kontrol ve ölçme sistemi,
- iv) Cevher boşaltma sistemi.

5.1.1.1. Cevher Besleme Sistemi (Şekil 51:13 nolu kısım) :

Zenginleştirilmiş bakır cevheri çamur halinde 50 dm^3 lük bir tankta toplanmaktadır. Bu tank kalın sac malzemeden yapılmış olup çelik askının üst yan tarafına monte edilmiştir. Konsantrenin beslenmesi, tank ile gövdeyi bağlayan boru hattı üzerindeki vana ile yapılmaktadır. Kullanılan boru çapı 12,7 mm.dir.

5.1.1.2. Akışkanlaştırma ve Kavurma Sistemi (Şekil 51:9 nolu kısım) :

5.1.1.2.1. Fırının çelik askısı :

Fırın gövdesinin bağlantı elemanları vası-

tası ile sabit bir kaideye oturtulması gerekir. Bu çalışmada sıcaklığa ve diğer etkenlere dayanıklı olması açısından çelik seçilmiştir.

5.1.1.2.2. Fırın gövdesi (Şekil51:10 nolu kısım ve detay şekil53) :

Akışkanlaşma ve kavurma olayı fırın gövdesi içerisinde gerçekleşmektedir. Malzeme olarak paslanmaz çelik kullanılmıştır. Fırın gövdesinin boyutları: Çap 10 cm. yüksekliği 50 cm.dir. Gövde üzerinde, cevher besleme borusu, cevher taşma ve boşaltma boruları, sıcaklık ve basınç ölçümü için gerekli borular vardır.

5.1.1.2.3. Fırın izole malzemesi (Şekil51:11 nolu kısım) :

Isı kayıplarını önlemek amacıyla gövdenin çevresi izole edilmiştir. İzole malzemesi olarak, sırası ile refrakter çamur, cam yünü ve ytong kullanılmıştır.

5.1.1.2.4. Saç astar :

İzole çamurun dağılmaması ve dış etkilere karşı korunması için gövdenin etrafı çelik saçla sarılmıştır. Çelik saç, çeşitli yerlerden tesbit edilmiştir. Koruyucu olarak saç astarın seçilmesinin nedeni, dayanıklı olması ve uzun sürede ekonomik olmasıdır.

5.1.1.2.5. Baca (Şekil51:12 nolu kısım) :

Fırından çıkan, kavurma gazlarının dışarıya atılması gerekir. Bu nedenle, gövde direk olarak boru-

larla bacaya bağlanmıştır. Ancak zehirli gazların çıktığı reaksiyonlarda fan kullanılmalıdır.

5.1.1.2.6. Dağıtıcı elek (Şekil52:2 nolu kısım) :

Cevherin akışkanlaştırılabilmesi için havanın bir elek içerisinden yatak içerisine homojen bir şekilde dağıtılması gerekir. Bu çalışmada, ısıya dayanımı, havayı homojen dağıtabilmesi, dizayn kolaylığı, nispeten ekonomikliği ve uzun ömürlü olması gözönüne alınarak çelikten yapılmış elek seçilmiştir. /3/ ve /5/

5.1.1.2.7. Rüzgâr kutusu (Şekil51:19 nolu kısım ve detay şekil52) :

Fırına üflenecek havanın sürtünme kayıplarına fazla uğramadan homojen bir şekilde eleğe oradan da yatağa girmesi istenir. Bu nedenle, rüzgâr kutusu konik olarak dizayn edilmiştir. Malzeme olarak paslanmaz çelik kullanılmıştır.

5.1.1.2.8. Vanalar (Şekil51:20 nolu kısım) :

Sisteme giren (veya çıkan) hava-propan ve cevher miktarlarının ayarlanması için kullanılmıştır. Kullanılan boruya uygun çapta vana seçilmiştir.

5.1.1.2.9. Borular (Şekil51:14 nolu kısım) :

Hava-propan üfleme ve cevherlerin sevki için çelik borular kullanılmalıdır. Ekonomik olması bakımından 25,4 ve 12,7 mm lik su boruları kullanılmıştır.

5.1.1.2.10. Bağlantı elemanları (Şekil51:15 nolu kısım) :

Fırın gövdesi ile rüzgâr kutusu birbirine, sökülebilmek kolaylığı açısından flenşlerle tesbit edilmiştir. Aynı şekilde de bu kısımlar çelik askıya adapte edilmiştir.

5.1.1.2.11. Hava üfleyicisi (Şekil51:1 nolu kısım) :

Üfleyici (kompresör) seçebilmek için yatağı akışkanlaştırmakta ne kadar debi ve basınç gerektiğini bilmemiz gerekir. Bu değerler, kavrulacak her malzeme için değişiktir. Bu dizayn sırasında çelik tanecik esas alınarak teorik bir hesaplama yapılmış ve aşağıdaki şartları taşıyan kompresör seçilmiştir:

P:8 Kg/cm², V:500 lt, Motor Gücü: 10 HP,
Q:1400 lt/dak.

5.1.1.3. Kontrol ve Ölçme Sistemi :

5.1.1.3.1. Hava debisi ayarlayıcısı (Şekil51 : 2 nolu kısım) :

Hava üfleyicisinden gelen havanın debi ve basıncındaki değişimleri sabit hale getirmek ve yine hava üfleyicisinden gelen yağların yatağa girişini önlemek için sisteme hava debisi ayarlayıcısı eklenir. Bu çalışmada çok amaçlı kullanabilme açısından 2-3 atm. lik hava üfleyicisine uygun hava akışı ayarlayıcısı seçilmiştir.

5.1.1.3.2. Yakıt akışı ayarlayıcısı (Şekil51:4 nolu kısım) :

Bu çalışmada, orta boy propan tüpü kendi ayarlayıcısı ile birlikte kullanılacaktır.

5.1.1.3.3. Hava ve gaz akış ölçerleri (Şekil51:5 ve 6 nolu kısımlar) :

Akışkan yataklı kavurma fırınında kavrulacak cevherin cinsine ve yatak yüksekliğine göre, gerekli hava debisi, hava akış hızı ve kavurma sıcaklığı değişmektedir. Bu nedenle sisteme gaz akış ölçeri yerleştirilmiştir. (Civallı manometre kullanılmıştır). Böylece yatak içindeki düzensiz akışkanlaşmalar gözlenebilmekte ve yatak basınç düşüşü ölçülmektedir.

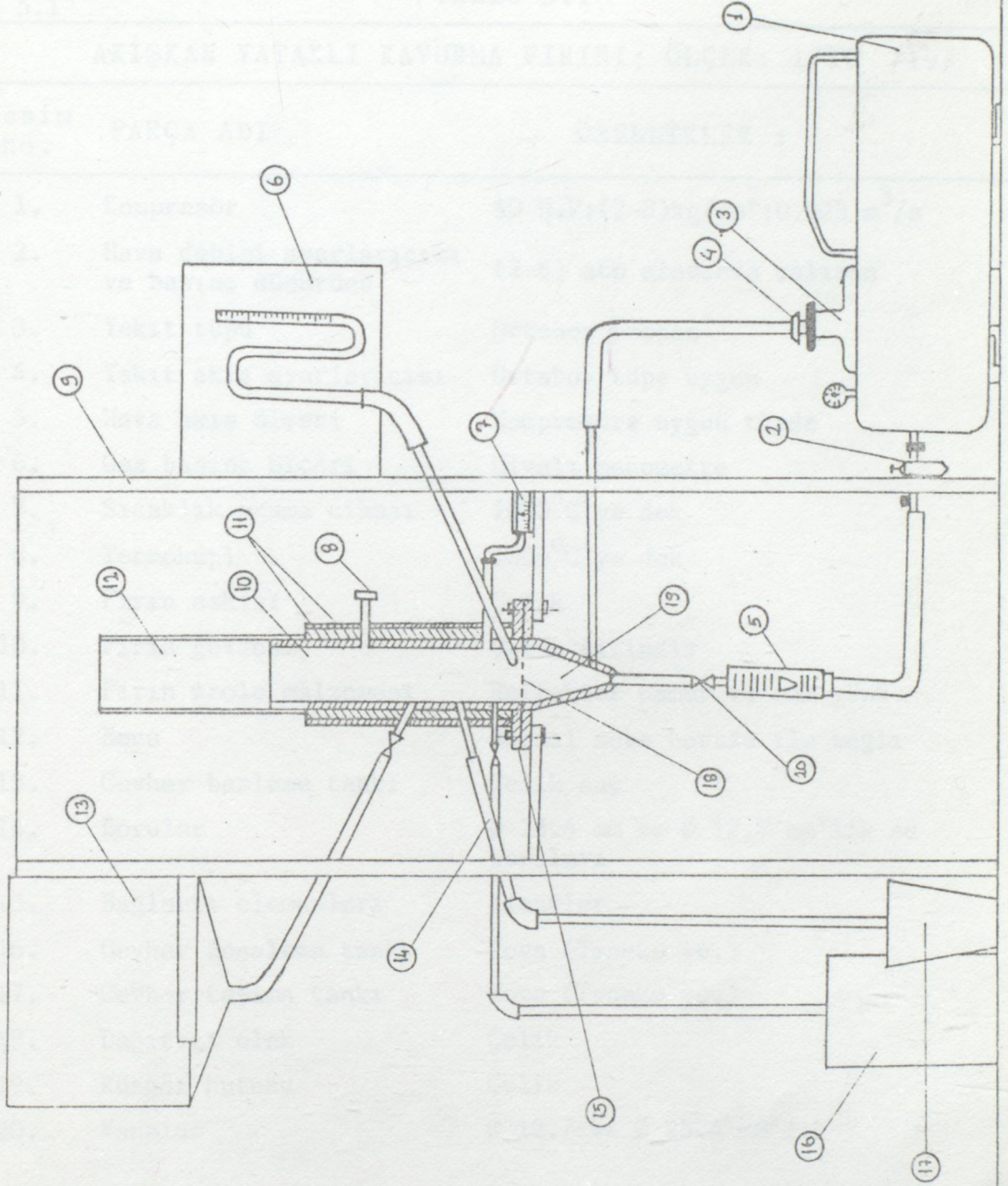
5.1.1.3.4. Sıcaklık okuma cihazı (Şekil51:7 nolu kısım) :

Yatak içindeki sıcaklık, kavurma sıcaklığını geçmemelidir. Sıcaklık artışı, istenmeyen ergime olayını oluşturacağından sıcaklık artışı kontrol edilmelidir. Bu çalışmada 1000°C a kadar sıcaklık ölçebilen dijital sıcaklık okuma cihazı seçilmiştir.

5.1.1.4. Cevher Boşaltma Sistemi (Şekil51:16 ve 17 nolu kısımlar):

Taşan ve kavrulan cevher borularla metal kaplarda toplanmaktadır. Kavrulan cevherin sistemden alınması, vana kontrolü ile yapılmaktadır. /16/, /20/

ŞEKİL 5.1



Şekil 5.1. Akışkan Yataklı Kavrurma Fırını /19/

Şekil
5.1

TABLO 5.1

AKIŞKAN YATAKLI KAVURMA FIRINI; ÖLÇEK: 1/10 /19/

Resim no.	PARÇA ADI	ÖZELLİKLER :
1.	Kompresör	10 H.P;(2-8)kg/cm ² ;0.023 m ³ /s
2.	Hava debisi ayarlayıcısı ve basınç düşürücü	(2-8) atm arasında çalışan
3.	Yakıt tüpü	Ortaboy propan
4.	Yakıt akış ayarlayıcısı	Ortaboy tüpe uygun
5.	Hava akış ölçeri	Kompresöre uygun tüpde
6.	Gaz basınç ölçeri	Civalı manometre
7.	Sıcaklık okuma cihazı	1000°C'ye dek
8.	Termokupl	1000°C'ye dek
9.	Fırın askısı	Çelik
10.	Fırın gövdesi	Çelik silindir
11.	Fırın izole malzemesi	Refrakter çamur ve cam yünü
12.	Baca	Normal soba borusu ile bağlı
13.	Cevher besleme tankı	Çelik sac
14.	Borular	Ø 25.4 mm ve Ø 12.7 mm'lik su boruları
15.	Bağlantı elemanları	Flenşler
16.	Cevher boşaltma tankı	Kova (Teneke vb.)
17.	Cevher taşıma tankı	Kova (Teneke vb.)
18.	Dağıtıcı elek	Çelik
19.	Rüzgâr kutusu	Çelik
20.	Vanalar	Ø 12.7 ve Ø 25.4 mm'lik

5.2. KULLANILAN MALZEMELER

Şekil 5.2	TABLO 5.2	Şekil 5.3.	TABLO 5.3
	RÜZGAR KUTUSU; Öl:1/2		FIRIN GÖVDESİ; Ölçek:1/5 /19/
Resim no	PARÇA ADI	Resim no	PARÇA ADI
1.	Rüzgar kutusu(konik)	1.	Fırın Gövdesi
2.	Dağıtıcı elek.	2.	Refrakter çamur (izole malzemesi)
3.	Yakıt tüpü bağlantı borusu	3.	Cam yünü (izole malzemesi)
4.	Kompresör bağlantı borusu	4.	Termokupl yerleştirme borusu
		5.	Sıcaklık ölçme cihazının bağlan- dığı boru
		6.	Basınç ölçerin bağlantı borusu
		7.	Bağlantı elemanı (Flanş)
		8.	Cevher boşaltma borusu
		9.	Cevher taşıma borusu
		10.	Cevher besleme borusu

5.2. KULLANILAN MALZEME

Kavurma Deneylerinde, Küre-Bakırlı Maden Yatağından elde edilen Bakırlı Pirit Cevheri kullanılmıştır.

Kullanılan cevherin yaklaşık kimyasal analizi Tablo 5.4 de verilmiştir.

Tablo 5.4. Küre Bakırlı Pirit Cevherinin Yaklaşık Kimyasal Analizi.

<u>Element</u>	<u>%</u>
Cu	9,54
Fe	44,23
Zn	0,32
Pb	0,086
Si.	0,0103
S	32,89

Tablo 5.5. Küre Bakırlı Pirit Cevherinin Elek Analiz Tablosu.

<u>ELEK BOYUTLARI</u> <u>(d) (mm)</u>	<u>MİKTAR</u> <u>(g)</u>	<u>% MİKTAR</u>	<u>%</u> <u>TOPLAM ELEK</u> <u>ÜSTÜ</u>	<u>%</u> <u>TOPLAM ELEK</u> <u>ALTI</u>	<u>X.d.10⁴</u>
+ 1	620	6,103	6,103	100	610,3
-1+0,6	2038	20,063	26,166	93,897	1203,78
-0,6	7500	73,833	99,999	73,834	4429,98
TOPLAM	10158	100,0			Σ 6244,06

$$D_{\text{ortalana}} = \sum x.d \quad (5.1)$$

D = Tane Çapı.
X = Ağırlık Yüzdesi
d = Elek Boyutu
D_{ort.} = 0,624 (mm)

5.3. AKIŞKANLAŞTIRMA DENEYLERİ

Akışkanlaştırma deneyleri, reaktör içinde teşkil edilecek yatağın akışkan durumdaki kalitatif ve kantitatif özelliklerin tesbiti için yapılır:

- i) Yatakta taneseli hareketin başladığı minimum hava hızı,
- ii) Akışkan yatakta basınç düşüşünün sabit kaldığı hız aralığı ve ölçülen basınç düşüşünün hesaplanan değerden olan farkı,
- iii) Hava hızındaki artışa bağlı olarak akışkan yatak yüksekliğindeki değişim,
- iv) Yatakta akışkanlaşmanın bozulduğu maksimum hava hızı saptanmaktadır.

5.3.1. Minimum Akışkanlaştırma için Gerekli Gaz Hızı ve Gaz Debisi :

Akışkanlaştırma için boş reaktör kesitine göre gaz hızı, "GÖRÜNÜR HIZ" 70-212 cm/s arasında değişir.

Minimum akışkanlaşma hızı veya gaz debisi en iyi görünme olanağı sağlayan test cihazlarında deneysel olarak saptanır. Homojen bir yatak temini için genellikle minimum akışkanlaşma hızından daha yüksek hız uygulanır. Maksimum akışkanlaşma hızı ise sürüklenen katı oranı ile belirlenir. Genellikle yatak yüksekliği 10-30 cm. ve yatağı oluşturan katı tanelerin boyutu +0,62-1 mm arasında değişir. Boyut dağılımı 10-200 μ arasında değişen taneler, akışkanlaşma için en uygundur. İri tanelerden oluşmuş yatağa ince malzeme ve ince tanelerden oluşmuş yatağa iri malzeme katmakla

daha iyi bir akışkanlaşma sağlanır.

Sabit yatakta basınç düşüşünün gaz hızına bağlı olarak değişimi (5.2) deki bağıntı ile ifade edilebilir:

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{150 \cdot \mu_g \cdot U_o \cdot (1 - \epsilon_m)^2}{(\phi_s dp)^2 \cdot \epsilon_m^3} + \frac{1.75 \cdot \rho_g \cdot U_o^2 \cdot (1 - \epsilon_m)}{(\phi_s dp) \cdot \epsilon_m^3} \quad (5.2)$$

Viskozite Kaybı Kinetik Enerji kaybı

Akışkan yatak bölgesinde yatağın genişlemesi, basınç kaybının gaz hızına bağlı olarak artışını ters yönde etkilemekte ve sonuç olarak basınç kaybı yatak ağırlığına eşit olmak üzere sabit kalmaktadır. Bu nedenle basınç kaybı, (5.3) ifadesinin (5.2)'de yerine konması ile yeniden düzenlenebilir;

$$\Delta P = (P_s - P_g) \cdot (1 - \epsilon) \cdot g \cdot L = \text{sabit} \quad (5.3)$$

(5.2) bağıntısı tekrar düzenlenirse (5.4) ifadesi elde edilir:

$$(P_s - P_g) \cdot g = \frac{150 \cdot \mu_g \cdot U_o \cdot (1 - \epsilon)}{(\phi_s \cdot dp)^2 \cdot \epsilon^3} + \frac{1.75 \cdot \rho_g \cdot U_o^2}{(\phi_s \cdot dp) \cdot \epsilon^3} = \text{sabit} \quad (5.4)$$

(5.4) denklemi, minimum akışkanlaşma şartları için yazılırsa (5.5) denklemindeki ifade elde edilir:

$$(P_s - P_g) \cdot g = \frac{150 \cdot \mu_g \cdot U_o \cdot (1 - \epsilon_{mf})}{(\phi_s dp)^2 \cdot \epsilon_{mf}^3} + \frac{1.75 \cdot \rho_g \cdot U_o^2}{(\phi_s dp) \cdot \epsilon_{mf}^3} = \text{sabit} \quad (5.5)$$

5.3.2. Minimum Akışkanlaşma Hızının (U_{mf}) Tesbiti.

U_{mf}'in tesbiti için, ortalama tane çapı 0,62 mm. olan cevher özellikleri gözönüne alınmıştır.

Cevher Tanelerinin Özellikleri :

$$d_p = 0,62 \cdot 10^{-3} \text{ (m)}$$

$$\rho_s = 5894 \text{ (Kg/m}^3\text{)}$$

$$\epsilon_{mf} = 0,4 \text{ (Kabul edildi)}$$

$$\phi_s \cong 0,6 \text{ (Kabul edildi)}$$

Kuru Baz Akımına Göre Gaz Özellikleri :

$$\rho_g = 1,54 \text{ (Kg/m}^3\text{)}$$

$$\mu_g = 3,8 \cdot 10^{-5} \text{ (Kg/m.s)}$$

$$g = 9,81 \text{ (m}^2\text{/s)}$$

Bu değerler (5.5) denkleminde yerine konup U_{mf} 'in teorik değeri hesaplanabilir:

$$(5894-1,54) \cdot 9,81 = \frac{150 \cdot 3,8 \cdot 10^{-5} U_{mf} \cdot (1-0,4)}{(0,6 \cdot 0,62 \cdot 10^{-3})^2 \cdot (0,6)^3} + \frac{1,75 \cdot 1,54 \cdot U_{mf}^2}{(0,6 \cdot 0,62 \cdot 10^{-3}) \cdot (0,6)^3}$$

$$U_{mf} = 1,7368 \text{ m/s}$$

$$U_{mf} = 178,68 \text{ cm/s}$$

U_{mf} 'in hesabı için WEN ve YU tarafından geliştirilen bağıntıdan da yararlanabiliriz:

$$\frac{d_p U_{mf}}{\mu_g} \cdot \rho_g = \left[(33,7)^2 + 0,0408 \cdot \frac{d_p^3 \cdot \rho_g \cdot (\rho_s - \rho_g) \cdot g}{\mu_g^2} \right]^{1/2} - 33,7 \quad (5.6)$$

$$\frac{0,62 \cdot 10^{-3} \cdot U_{mf}}{3,8 \cdot 10^{-5}} \cdot 1,54 = \left[(33,7)^2 + 0,0408 \cdot \frac{(0,62 \cdot 10^{-3})^3 \cdot 1,54 \cdot (5894 - 1,54) \cdot 9,81}{(3,8 \cdot 10^{-5})^2} \right]^{1/2} - 33,7$$

$$U_{mf} = 0,3166 \text{ m/s}$$

$$U_{mf} = 31,66 \text{ cm/s}$$

Hızsız Reynolds Denkleminden terminal hız (U_t) ve maksimum hız ($U_{max.}$) hesaplanabilir:

$$C_d Re_p^2 = \frac{4.g.dp^3.(P_s-P_g).P_g}{3.\mu_g^3} \quad (5.7)$$

Değerler yerine konursa ;

$$C_d Re_p^2 = 19590 \text{ olarak bulunur.}$$

Şekil: 4.6'dan $C_d Re_p^2 = 19590$ değerine karşılık $Re_p \cong 60$ olarak okunur. ($\phi_s=0,6$ kabul edildi)

(5.8) eşitliğinden terminal hız hesaplanır:

$$Re_p = \frac{dp.P_g.U_t}{\mu_g} \quad (5.8)$$

$$60 = \frac{0,62.10^{-3}.1,54.U_t}{3,8.10^{-5}}$$

$$U_t \cong 2,38 \text{ m/s (Küresel + küresel olmayan tanecikler için terminal hız)}$$

Terminal hız (U_t), (5.9) bağıntısından da hesaplanabilir:

$$U_t = \left[\frac{4.g.dp.(P_s-P_g)}{3.P_g.C_d} \right]^{1/2} \quad (5.9)$$

$500 < Re_p < 200.000$ aralığında olduğundan (4.21) eşitliği gereği $C_d = 0,43$ alınabilir.

$$U_t = \left[\frac{4.9,81.0,62.10^{-3} \cdot (5894-1,54)}{3.1,54.0,43} \right]^{1/2}$$

$$U_t = 8,49 \text{ m/s (Küresel tanecikler için)}$$

Yataktan tane kaçıışını minimum düzeyde tutabilmek için $U_{mf} < U_f < U_t$ olmalıdır.

$$1,78 < U_f < 2,38 \quad (\text{Küresel+küresel olmayan taneler})$$

$$0,31 < U_f < 8,49 \quad (\text{Küresel taneler})$$

$$\frac{U_t}{U_{mf}} = \frac{2,38}{1,78} = 1,336 \text{ veya}$$

$$\frac{U_t}{U_{mf}} = \frac{8,49}{0,31} = 27,4 \text{ olmalıdır.}$$

5.3.3. Hava Debisinin Hesabı :

Hava debisi, (5.10) eşitliği ile hesaplanabilir:

$$Q = A \cdot U_f$$

$$Q = \pi \cdot \frac{D^2}{4} \cdot U_f \quad (5.10)$$

$$D = 10 \text{ cm} = 10 \cdot 10^{-2} \text{ (m)}$$

1.78 < U_f < 2,38 aralığında çeşitli U_f değerleri seçilerek hesaplanan hava debisi değerleri tablo (5.6)'da verilmiştir.

Tablo 5.6. Çeşitli U_f değerlerine karşılık Q değerleri.

U_f (m/s)	Q (lt/dak.)
1,78	838
5,00	1415
10.00	4712
55.00	25918
80.00	37699
90.00	42411
100.00	47124
150.00	70686
200.00	94248
250.00	117810
300.00	141370
350.00	164933
398.00	187553

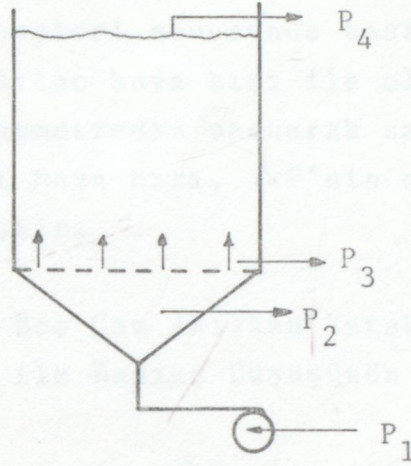
Eşitlik (5.11) dan minimum akışkanlaşma şartları için Fr_{mf} sayısı hesaplanabilir:

$$Fr_{mf} = \frac{U_{mf}^2}{d_p \cdot g} \quad (5.11)$$

$$Fr_{mf} = \frac{(1,78)^2}{0,62 \cdot 10^{-3} \cdot 9,81} = 0,019$$

$Fr_{mf} < 1,3$ olduğundan düzgün yatak oluşumuna eğilim olacaktır.

5.3.4. Akışkan Yatakta Basınç Kaybı



$$\Delta P_y = (P_s - P_g) \cdot (1 - \epsilon_{mf}) \cdot L_{mf} \cdot \frac{g}{9_c} = P_3 - P_4 \quad (5.12)$$

$$P_4 = 1 \text{ atm.}$$

$$P_1 = 1 \text{ atm.}$$

$$L_{mf} = 10 \cdot 10^{-2} \text{ m.}$$

$$\Delta P_y = (5894 - 1,54) \cdot (1 - 0,4) \cdot 10 \cdot 10^{-2} \cdot \frac{9,81}{9,81 \cdot 1033} = P_3 - 1$$

$$\Delta P_y = 0,342 \text{ atm.} = P_3 - 1$$

$$P_3 = 1,342 \text{ atm. (Yatak tabanındaki basınç)}$$

Dağıtıcıdaki Basınç Kaybı :

$$P_2 = P_3 + \Delta P_d \quad (5.13)$$

$$\Delta P_d = \Delta P_y \cdot 0,1$$

$$\Delta P_d = 0,342 \cdot 0,1 = 0,0342 \text{ atm.}$$

$$P_2 = 1,342 + 0,0342$$

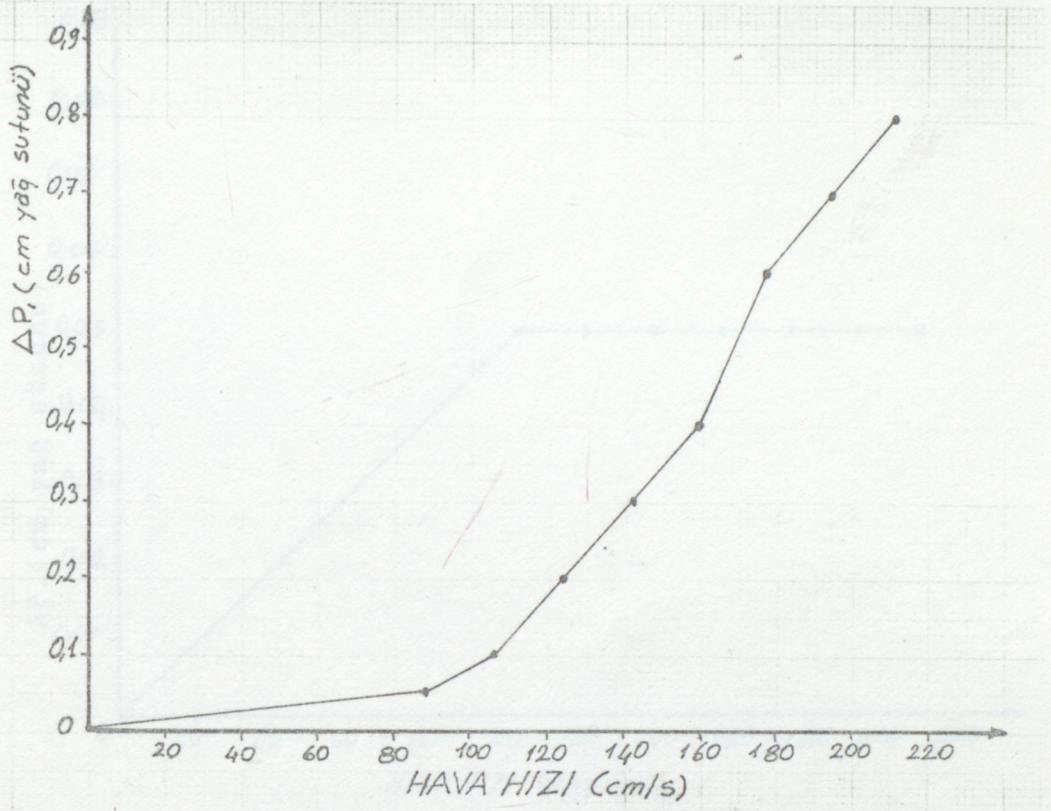
$$P_2 = 1,3762 \text{ atm. (Rüzgar kutusundaki basınç)}$$

5.3.5. Basınç Düşüşü-Hız Eğrileri

10 cm. çapındaki cam akışkan yatakta yapılan akışkanlaştırma deneyleri sonucunda basınç düşüşü hız eğrileri çizilmiştir. Artan hava hızı ile oluşan basınç düşüşleri yağlı esaslı manometreden okunarak saptanmış ve taneseli hareketin başladığı hava hızı, ΔP 'nin sabit kaldığı hız aralığı belirlenmiştir.

Tablo 5.7. Boş Cam Akışkan Yatakta Artan Hava Hızı ile Basınç Düşüşünün Değişimi.

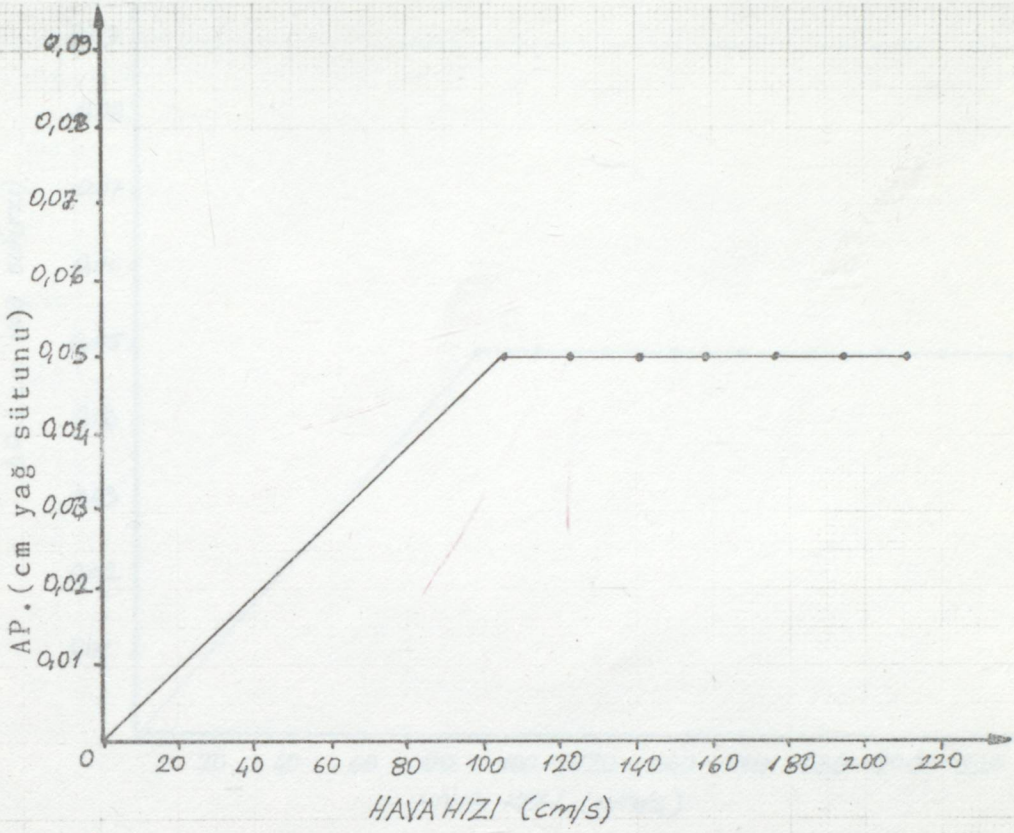
<u>U₀(cm/s)</u>	<u>ΔP_p (cm yağ sütunu)</u>
88,4	0,05
106,1	0,1
123,8	0,2
141,5	0,3
159,0	0,4
176,8	0,6
194,5	0,7
212,0	0,8



Şekil 5.4. Boş Cam Akışkan Yataкта Artan Hava Hızı ile Basınç Düşüşünün Değişimi.

Tablo 5.8. (+0,6-1) mm. Tane Boyutundaki 150 gr.Cevher ile Oluşturulan Yataktaki Basınç Düşüşünün Değişimi.

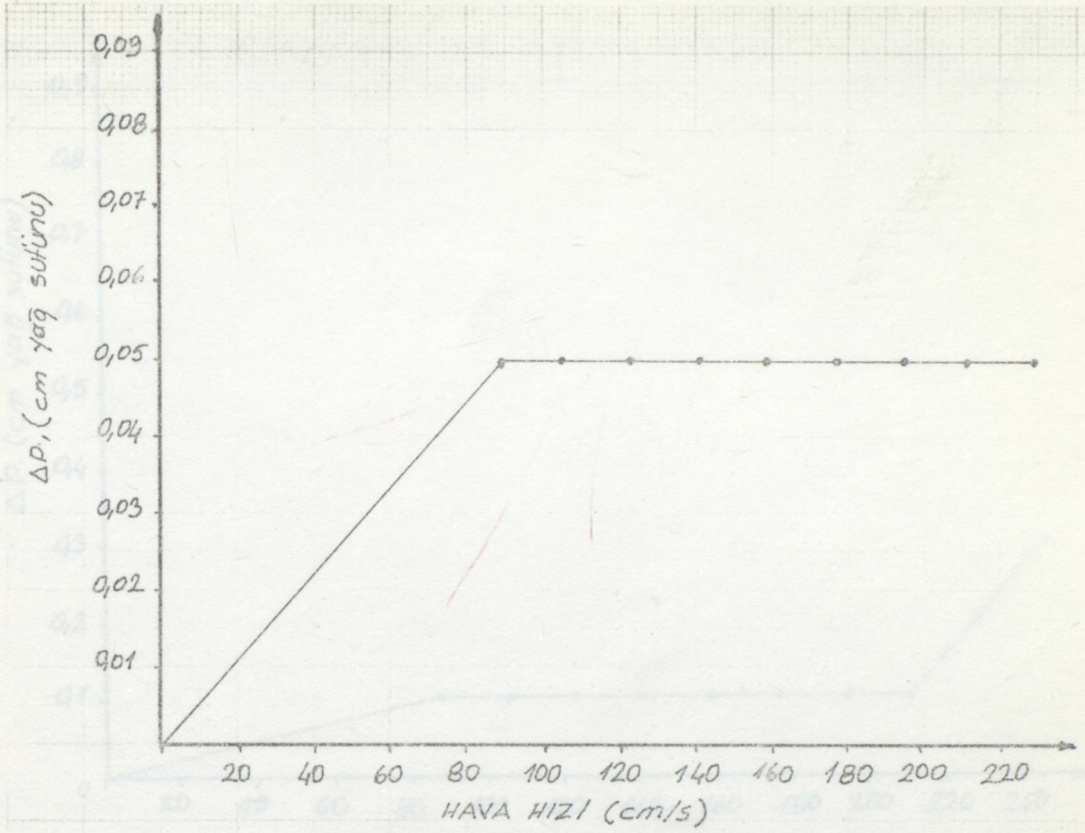
U_0 (cm/s)	ΔP_T (cm yağ sütunu)	ΔP_p (cm.yağ sütunu)	$\Delta P = \Delta P_T - \Delta P_p$ (cm.yağ süt)
106,1	0,15	0,1	0,05
123,8	0,25	0,2	0,05
141,5	0,35	0,3	0,05
159,0	0,45	0,4	0,05
176,8	0,65	0,6	0,05
194,5	0,75	0,7	0,05
212,0	0,85	0,8	0,05



Şekil 5.5. (+0,6-1) mm. Tane Boyutundaki 150 gr.Cevher ile Oluşturulan Yataktaki Basınç Düşüşünün Değişimi.

Tablo 5.9.(+1) mm.tane boyutundaki 150 gr. cevher ile oluşturulan Yataktaki Basınç Düşüşünün Değişimi.

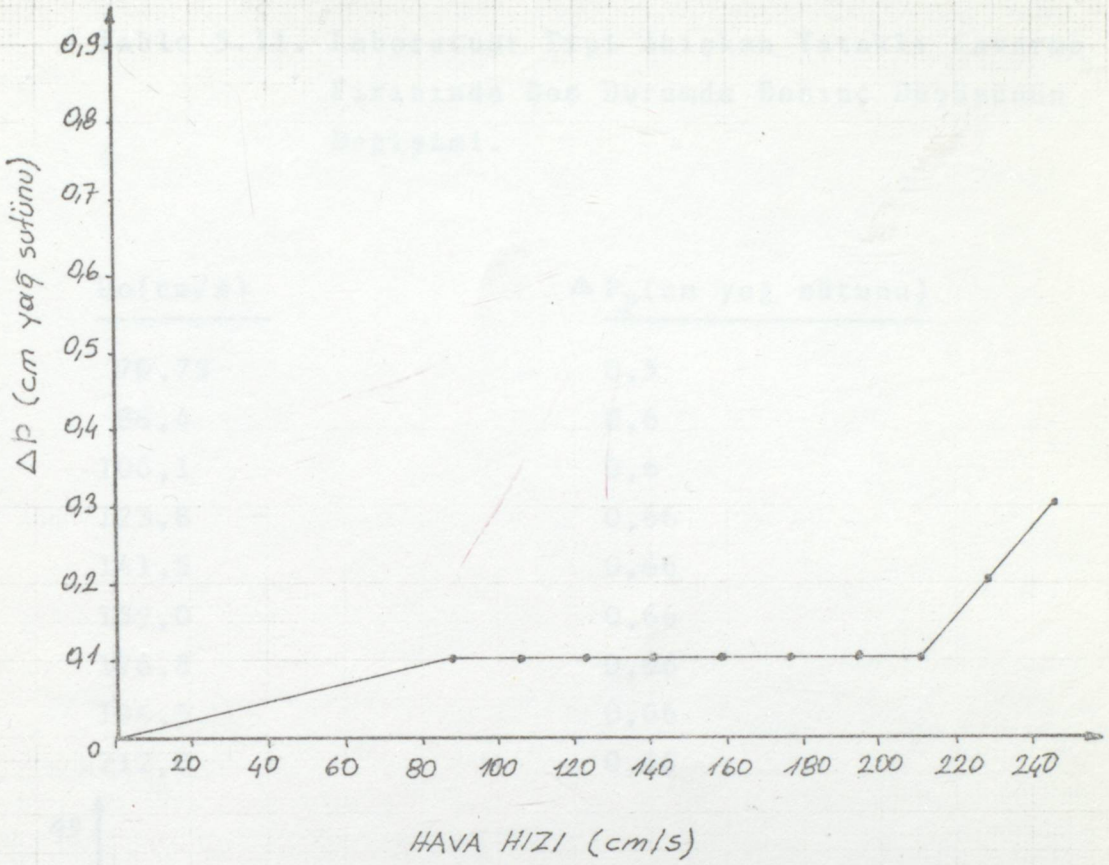
U_0 (cm/s)	ΔP_T (cm yağ sütunu)	ΔP_p (cm yağ sütunu)	$\Delta P = \Delta P_T - \Delta P_p$ (cm yağ süt)
88,4	0,05	0	0,05
106,1	0,15	0,1	0,05
123,8	0,25	0,2	0,05
141,5	0,35	0,3	0,05
159,0	0,45	0,4	0,05
176,8	0,55	0,5	0,05
194,5	0,65	0,6	0,05
212,0	0,85	0,8	0,05
229,9	0,95	0,9	0,05



Şekil 5.6. (+1) mm. Tane Boyutundaki 150 gr. Cevher ile oluşturulan Yataktaki Basınç Düşüşünün Değişimi.

Tablo 5.10. (+0,6-1) mm tane iriliğindeki 300 gr. cevher ile Oluşturulan Yataktaki Basınç Düşüşünün Değişimi.

U_0 (cm/s)	ΔP_T (cm yağ sütunu)	ΔP_P (cm yağ sütunu)	$\Delta P = \Delta P_T - \Delta P_P$ (cm.yağ.süt)
88,4	0,1	0	0,1
106,1	0,2	0,1	0,1
123,8	0,3	0,2	0,1
141,5	0,4	0,3	0,1
159,0	0,5	0,4	0,1
176,8	0,6	0,5	0,1
194,5	0,7	0,6	0,1
212,0	0,9	0,8	0,1
229,9	0,11	0,9	0,2
247,6	0,14	0,11	0,3

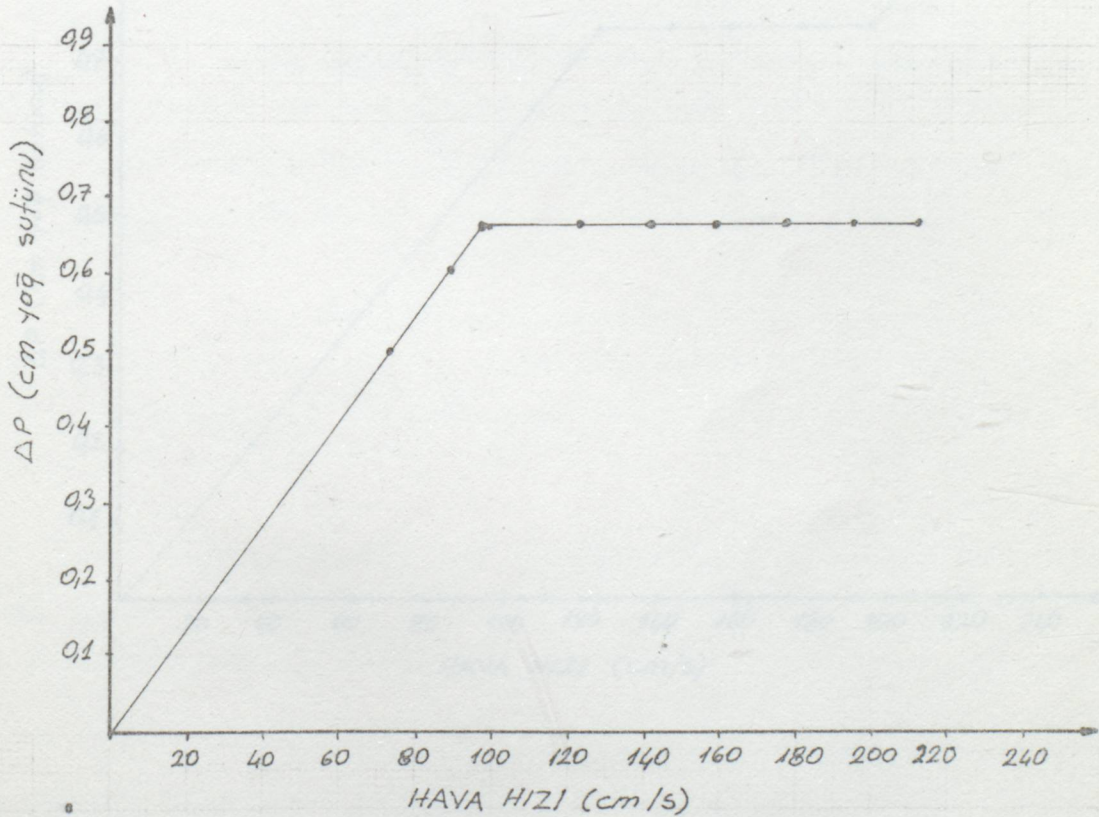


Şekil 5.7. (+0,6-1) mm tane iriliğindeki 300 gr. cevher ile Oluşturulan Yataktaki Basınç Düşüşünün Değişimi.

Cam akışkan yatakta yapılan deneyler göstermiştir ki; hava hızı 88,4 (cm/s) değerine ulaştıktan sonra yatakta basınç kaybı artan hava hızına rağmen sabit kalmakla ve 88,4-212,0 (cm/s) aralığında homojen akışkanlaşma şartları gerçekleşmektedir. 212,0 (cm/s) nin üzerindeki hava hızlarında katılar taşınmaya başlamaktadır.

Tablo 5.11. Laboratuvar Tipi Akışkan Yataklı Kavurma Fırınında Boş Durumda Basınç Düşüşünün Değişimi.

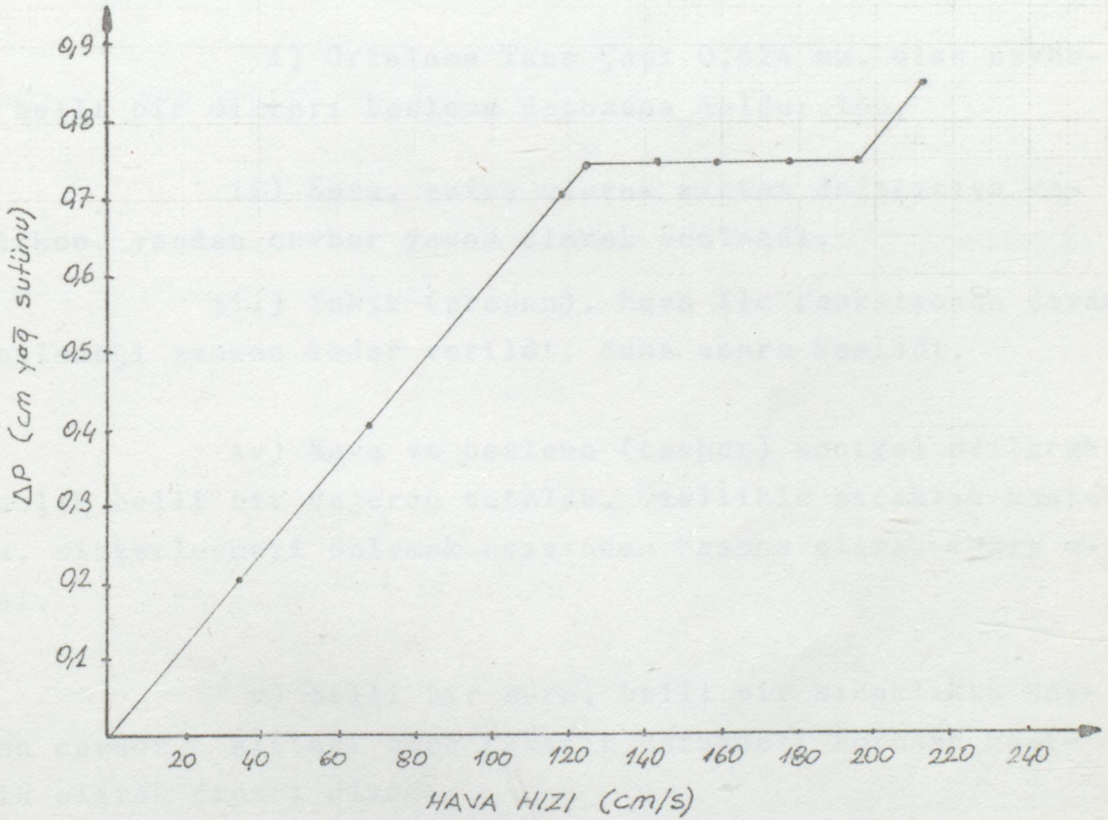
<u>U₀(cm/s)</u>	<u>Δ P_p(cm yağ sütunu)</u>
70,73	0,5
88,4	0,6
106,1	0,6
123,8	0,66
141,5	0,66
159,0	0,66
176,8	0,66
194,5	0,66
212,0	0,66



Şekil 5.8. Laboratuvar Tipi Akışkan Yataklı Kavurma Fırınında Boş Durumda Basınç Düşüşünün Değişimi.

Tablo 5.12. Laboratuvar Tipi Akışkan Yataklı Kavurma Fırınında 200 gr.Kalsine ile Oluşturulan Akışkan Yataktaki Basınç Düşüşü Değişimi.

U_0 (cm/s)	ΔP_T (cm yağ süt)	ΔP_P (cm yağ süt)	ΔP (cm yağ sütünü)
70,73	0,7	0,5	0,2
88,4	1,0	0,6	0,4
106,1	1,3	0,6	0,7
123,8	1,4	0,66	0,74
141,5	1,4	0,66	0,74
159,0	1,4	0,66	0,74
176,8	1,4	0,66	0,74
194,5	1,4	0,66	0,74
212,0	1,5	0,66	0,84



Şekil 5.9. Laboratuvar Tipi Akışkan Yataklı Kavurma Fırınında 200 gr. Kalsine ile Oluşturulan Akışkan Yataktaki Basınç Düşüşü Değişimi.

Laboratuvar tipi akışkan yataklı kavurma fırınında yapılan deneylerin sonucuna göre, (Şekil: 5.9)'dan da görüldüğü gibi, 123,8-194,5 (cm/s) aralığındaki hızlarda basınç düşüşü sabit kalmaktadır. Dolayısıyla, 0,624 mm. ortalama tane boyutundaki bakırlı cevherin homojen akışkanlaştırma şartlarına bu aralıkta ulaştığını görüyoruz. 194,5 (cm/s) nin üzerindeki hava hızına çıkmadıkça katı partiküllerin bacaya taşınmasını önlemiş olacağız.

5.4. KAVURMA DENEYLERİ

5.4.1. Deneyin Yapılışı

i) Ortalama Tane Çapı 0,624 mm. olan cevherin belli bir miktarı besleme deposuna dolduruldu,

ii) Hava, yavaş olarak aittan dağıtıcıya verilirken, yandan cevher yavaş olarak beslendi,

iii) Yakıt (propan), hava ile reaksiyonun devam edebileceği zamana kadar verildi, daha sonra kesildi,

iv) Hava ve besleme (cevher) kontrol edilerek sıcaklık belli bir değerde tutuldu. Özellikle sıcaklık kontrolü, sinterleşmeyi önlemek açısından hassas olarak takip edildi,

v) Belli bir süre, belli bir sıcaklıkta kavruktan cevher, alttaki elek tabanın üstündeki borudan kontrollü olarak dışarı alındı,

vi) Elde edilen kalsinenin kimyasal analizi yapılarak, özellikle kükürt giderilme verimi saptandı.

5.4.2. Deney Sonuçları

- i) (+0,6-1) mm. tane boyutundaki 150 gr. cevherin tümü akışkan yatak içine kondu, akışkanlaşma şartları sağlanmaya çalışılarak kavurma işlemi gerçekleştirildi.

$$U_o \cong 177 \text{ (cm/s)}$$

$$\Delta P_T = 0,65 \text{ (cm.yağ sütunu)}$$

$$T = 850 \text{ (}^\circ\text{C)}$$

$$\text{Süre} = (10 \text{ dak.})$$

Yukarıdaki şartlarda yapılan kavurma sonucunda elde edilen kalsinede % 11,92 S kalmıştır. Kısmen sinterleşmeler olmasına rağmen kükürt giderme verimi iyi sayılabilir.

- ii) Yine aynı tane boyutunda 760 gr. cevher sisteminin besleme deposuna yüklendi ve aşağıdaki şartlarda kavurma gerçekleştirildi.

$$U_o \cong 85 \text{ (cm/s)}$$

$$\Delta P_T = 0,45 \text{ (cm yağ sütunu)}$$

$$T = 750 \text{ (}^\circ\text{C)}$$

$$\text{Süre} = 10 \text{ (dak)}$$

Elde edilen kalsinenin tamamına yakın sinterleşmiş durumdaydı ve kalan kükürt miktarı oldukça yüksek olup % 32,81 S içermektedir.

Bunun nedeni; deney sırasında hava-yakıt oranının iyi ayarlanamaması ve homojen bir besleme sağlanamamasından kaynaklanıyordu. Daha sonraki kavurma deneylerinde bu iki

parametre daha iyi kontrol edilerek anı sıcaklık artışının önüne geçilmeye çalışıldı.

iii) Besleme = 500 gr. (+0,6-1) mm.
U₀ ≅ 124 (cm/s)
ΔP_T = 0,55 (cm.yağ sütunu)
T = 900 (°C)
Süre = 20 (dak.)

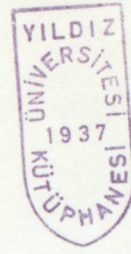
Homojen bir besleme sağlandığından ve sıcaklık kontrolu hassas olarak yapılabildiğinden elde edilen kalsine kısmen ergimeye uğramıştı. Kalsinede kalan kükürt % 29,13 S bulunmuştur.

iv) Besleme = 700 gr. (+0,6-1) mm
U₀ ≅ 85 (cm/s)
ΔP_T = 0,6 (cm yağ sütunu)
T = 950 (°C)
Süre = 30 (dak.)

Elde edilen üründe kısmî ergime çok az olmuştur. Kü-kürdün kalan kısmı % 11,61 S olarak belirlenmiştir.

Düşük hava hızında, başlangıçta yavaş besleme yapılarak yatak ısıtıldıktan sonra besleme hızı arttırılmaya başlanmıştır. Sonuçta oldukça az miktarda S içeren kalsine elde edilmiştir.

v) Besleme = 500 gr. (+0,6-1) mm
U₀ ≅ 71 (cm/s)
ΔP_T = 0,4 (cm yağ sütunu)
T = 900 (°C)
Süre = 20 (dak.)



Kalsinede % 16,23 S kalmasına rağmen kısmî ergimeye uğrayan kısımlar gittikçe azalmaktadır.

v1) Besleme = 200 gr. (+0,6-1) mm
U₀ ≅ 70 (cm/s)
ΔP_T = Okunamadı
T = 700 (°C)
Süre = 20 (dak.)

Kavurma sonucunda elde edilen kalsinede kısmî ergime olmadı ve % 14,5022 S kaldı.

Tablo 5.13. Kükürt Giderme Verimleri.

<u>Deney No.</u>	<u>% Verim</u>
1	66,00
2	0,24
3	11,50
4	65,00
5	51,00
6	56,00

5.4.3. Tartışma

Yatak malzemesi olarak 0,62 mm tane boyutundaki cevherin kullanıldığı akışkanlaştırma deneyleri, yatağın 88,4-212 cm/s hız değerleri arasında fluidize olabileceğini göstermiştir. Yüksek hızlarda, tane hareketlerinin daha hızlı ve reaksiyonların daha çabuk olacağı dikkate alınarak, kavurma deneylerinde hava hızının üst limiti 71-124 cm/s değerleri arasında tutulmaya çalışıldı.

Başlangıçta düşük hızlarda hava verilerek akışkanlaştırmaya başlanmış ve artan hava hızı ile oluşan de-

gişimler incelenmiştir. Havayı "flowmetre" yardımı ile daha kolay bir şekilde kontrol etme olanağı sağlanmıştır. Böylece kontrol verilen fazla hava yüzdesinin değişim aralığı ile hava hızı aralığının değişimi arasında çok az fark oluşacağından fluidizasyon yönünden şartların aynı kaldığını kabul edebiliriz.

Kavurma deneyleri süresince, hazırlanan cevher besleme deposundan düzgün bir şekilde beslenmeye çalışıldı. Başlangıçta cevherin kendi ağırlığı ile akarak beslenebileceği düşüncesiyle hareket edildiğinden kavurma verimi iyi olmamıştır. Daha sonra bu sakınca ortadan kaldırılmaya çalışıldı ve depoya basınçlı hava gönderilerek akışın homojen olması sağlanmaya çalışıldı. Fakat, yine de basınçlı havanın yarattığı ani beslenme durumlarından dolayı ilk deneylerde kısmî ergimelerin olması tamamen engellenemedi.

Kısmî ergimenin tek nedeni, besleme düzensizliği değildir. Aynı zamanda sıcaklığın hassas şekilde kontrol edilememesidir. Sıcaklık kontrolü, hava-yakıt oranının optimum bir değerde tutulmasıyla hassas olarak yapılabilir. Son yapılan deneylerde, hava ve yakıt vanalarını kontrollu konumuna getirerek sıcaklığı yaklaşık sabit tutmak başarıldı. Fakat sıcaklık değeri sabit bir değer olarak alınmasına rağmen $\pm 20^{\circ}\text{C}$ civarında farklar gösterebilir. Küçük çaplı reaktörlerde, bu derecede sıcaklık farkları genelde tesbit edilmektedir.

Kavurma deneyleri esnasında sıcaklık, hava hızı ve besleme hızı parametrelerini en iyi şekilde kontrol edebilmek için ölçme-kontrol cihazlarının daha hassas olarak seçilmesi gerekmektedir. Daha ileriki çalışmalarda bu tür düzeltmelere gitmek ilk hedef olmalıdır.

Ayrıca baca gazlarını değerlendirmek için bir toz tutucunun sisteme ilave edilmesi gerekmektedir.

Sonuç olarak, sürekli deneyler yapıldıkça çok sayıda değişkenin hassas olarak kontrolü gerçekleştirilecek ve bir takım aksaklıklar geliştirilmiş cihazların ilavesi ile ortadan kaldırılabilir.

Değişik sıcaklıklarda ve sürelerde yapılan deneyler sonucunda, % 32,89 S içeren Küre Bakırlı Pirit Cevheri kavurulmuş ve ortalama kükürt giderme verimi yaklaşık olarak % 50-65 aralığında değişmektedir. Deneysel parametrelerin daha iyi ayarlanması ile bu değer % 90-95 e kadar çıkabilmektedir.

Sinterleşmeyi önlemek için aşağıdaki tedbirler alınabilir:

- i) Besleme hızı, ani yığılmalara neden olmayacak biçimde ayarlanmalıdır.
- ii) Sıcaklıktaki ani artış sinterleşmeye neden olacağından yakıt ve hava oranı optimum bir değerde tutulmalıdır. Gerekirse aradan bir sisteme sadece hava verilerek soğutma işlemi uygulanmalıdır.
- iii) İnert bir malzeme veya kalsine ile cevher karıştırılarak kavurma işlemi yapılarakta sıcaklık artışı engellenebilir.

Kavurma veriminin arttırılabilmesi için, sıcaklık ve havâ miktarının düzgün bir biçimde arttırılması gerekir. Bu sayede kükürt giderme işlemi daha etkili bir biçimde ger-

çektirilebilir.

5.4.4. Genel Sonuçlar

Bu çalışma, genelde iki safhada gerçekleştirilmiştir. Birinci safhada, cihazın dizaynı ile ilgili çalışmalar yapılmış ve laboratuvar tipinde bir akışkan yataklı kavurma fırını kurulmuştur. İkinci safhada akışkanlaştırma ve kavurma deneyleri yapılmıştır. Gerek cihazın kurulması ile ilgili gerekse deneylerle ilgili genel sonuçları aşağıdaki şekilde özetleyebiliriz:

i) Bu çalışma için dizayn edilen akışkan yataklı kavurma fırını 10 cm. iç çapında, 50 cm. yüksekliğindedir. Çalışma kısa süreli ve yatak yüksekliği küçük olduğundan, başlangıçta siklon koymaya gerek görülmemesine rağmen çalışmalar sonucunda bunun gerekli olduğu saptanmıştır.

ii) Fırın gövdesi için sıcaklığa dayanım açısından paslanmaz çelik malzeme seçilmiştir. Isı kayıplarını önlemek amacıyla gövdenin çevresi izole edilmiştir.

iii) Dağıtıcı elek, cevherin hava ile akışkanlaştırılmasını sağlayan kısım olup aynı zamanda yatağı taşır. Bu nedenle ısıya dayanımı, havayı homojen dağıtabilmesi ve uzun ömürlü olması açısından çelik malzeme kullanılmıştır.

iv) Rüzgâr kutusu, fırına üflenecek havanın sütlünme kayıplarına fazla uğramadan homojen bir şekilde eleğe oradanda yatağa girmesi için konik şekilde dizayn edilmiş ve malzeme olarak çelik kullanılmıştır.

v) Akışkanlaştırma deneyleri sonucunda +0,62-1 mm. tane boyutundaki cevher için $U_{mf}=173$ cm/s olarak saptanmıştır. Basınç düşüşü-hız eğrilerinden, basınç düşüşünün sabit kaldığı hız aralığı 88-212 cm/s olarak bulunmuştur.

vi). Yatak malzemesi olarak cevherin kendisi kullanılmış olup, ortalama tane çapı 0,62 mm. olarak saptanmıştır. Yapılan akışkanlaştırma deneyleri sonucunda, bu boyuttaki malzemenin, yaklaşık olarak akışkan yatak oluşturduğu gözlenmiştir.

vii) Değişik sıcaklıklarda ve hava miktarlarıyla, yapılan kavurma sonucunda kükürt giderme verimi ortalama olarak yaklaşık % 60 civarında bulunmuştur.

viii) Yaklaşık olarak 85-177 (cm/s) hava hızında ortalama 700 ($^{\circ}$ C) da yapılan kavurma sonucunda kaliteli bir kalsine elde edilebilmiştir.

ix) Çok zehirli gazların çıkabileceği çalışmalarda fon kullanılmalıdır.

5.5.5. Müteakip Çalışmalara Tavsiyeler

Gelecekte yapılacak olan çalışmalarda özellikle önem verilmesi gereken hususları aşağıdaki gibi özetleyebiliriz:

i) Özellikle Cihaz dizaynı yapılırken ölçme kontrol sistemlerinin hassas çalışma olanağı sağlayan türden seçilmesine özen gösterilmelidir. Örneğin; flowmetre seçilirken hassas aralıklarda hava debisini gösteren tipi se-

çilmelidir.

ii) Dağıtıcı elek dizaynı yapılırken homojen dağıtımı sağlayacak biçimde delik çapı, delik sayısı ve düzenli yerleştirme yapılmalıdır.

iii) Besleme hızını ayarlı yapabilmek için besleme deposuna bağlı boru ve vanaları akışta sorun yaratmayacak cinsten seçmek gerekir. Çünkü kavurma reaksiyonlarında anî ve hızlı beslenme olması sinterleşmeye neden olup, kalsinenin uğrayacağı müteakip işlemlerde sorun yaratacaktır.

iv) Baca gazları ile birlikte çıkan cevher tozlarını değerlendirmek için sisteme mutlaka siklonlar ilave edilmelidir. Beslenen cevherde çok küçük boyutlu taneler yüksek oranda mevcut olduğundan siklon sistemi ilavesi şart olacaktır.

9. Mc Gabe-Smith., : Unit Operations I, CiHI
10. Davidson, J.F., : Fluidization, 1971
11. Yamazaki, S., Asaki,
Z., Kondo, Y., : Thermal Decomposition of Pyrite
In A fluidized Bed, Transection
of The Metallurgical Society of
AIME, Vol. 242, Mayıs 1968
12. Coudurier, L., Hopkins,
D.W, Wilkomirsky, I., : Fundamentals of Metallurgical
Processes, International Series
on Materials Science and Tech-
nology, Volume 27, 129-132, 1978
13. Biswas, A.K., Daven-
Port, W.G., : Extractive Metallurgy of Copper,
60-79, 1976
14. Çizmecioğlu, Z., : Sülfür Minerallerinin Kavurma
Reaksiyonları, Seminer, Y.Ü. Me-
talürji Müh.Böl, Mart 1986
15. Ekerim, A., : Cu-O-S ve Fe-O-S Sistemlerinin
Termodinamik Yönden İncelenme-
si, Seminer, Y.Ü. Metalurji Müh.
Böl., Mart 1986
16. Bolayır, M., : Laboratuar Tipi Akışkan Yataklı
Kavurma Fırını Dizaynı, Bitirme
Ödevi, Y.Ü. Makina Müh.Böl.,
1985

17. Frukawa, J.,
Tsutomu, O., : Liquid Like Properties of Fluidized Systems, Industrial and Engineering Chemistry, Vol.50, Mayıs 1958
18. Priestly, R.J., : How Good is Fluo-Solids Reactor, Rock Products, Temmuz 1965
19. Yoruç, H.B., : Akışkan Yataklı Kavurma Reaktörünün Tanıtılması, Seminer, Y. Ü. Metalurji Müh.Böl., Mart 1986

ÖZGEÇMİŞ

1962 yılında Kırklareli'nin Demirköy ilçesinde doğdum. İlk, Orta, Lise öğrenimimi İstanbul'da tamamladım. 1980 yılında girdiğim Yıldız Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Kimya Mühendisliği Bölümünü 1984 yılında bitirdim.

Aynı yıl Kimya Mühendisliği Bölümünde Yüksek Lisans eğitimime başladım ve 1985 Haziran ayından itibaren Yıldız Üniversitesi Metalurji Mühendisliği Bölümünde Araştırma Görevlisi olarak çalışmaya başladım. Bu görevimi halen sürdürmekteyim.

