

**KABARCIKLI KOLONDA
SODYUM METABORAT ÇÖZELTİSİNE
KARBON DİOKSİTİN ABSORPSİYONU**

Duygu UYSAL

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
KİMYA MÜHENDİSLİĞİ**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

HAZİRAN 2011

ANKARA

Duygu UYSAL tarafından hazırlanan “KABARCIKLı KOLONDA SODYUM METABORAT ÇÖZELTİSİNE KARBON DİOKSİTİN ABSORPSİYONU” adlı bu tezin Yükek Lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. Özkan Murat DOĞAN

.....

Tez Danışmanı, Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile Kimya Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Mübeccel ERGUN

.....

Kimya Mühendisliği, Gazi Üniversitesi

Prof. Dr. Baki ERDOĞAN

.....

Kimya, Gazi Üniversitesi

Prof. Dr. Özkan Murat DOĞAN

.....

Kimya Mühendisliği, Gazi Üniversitesi

Tarih : 20/06/2011

Bu tez ile G.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Bilal TOKLU

.....

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Duygu UYSAL

KABARCIKLI KOLONDA SODYUM METABORAT ÇÖZELTİSİNE KARBON DİOKSİTİN ABSORPSİYONU

(Yüksek Lisans Tezi)

Duygu UYSAL

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

Haziran 2011

ÖZET

Günümüzün en güncel problemlerinden birisi olan küresel ısınma, atmosfere salınan sera gazlarından dolayı olmaktadır ve en önemli sera gazlarından birisi de karbon dioksittir. Küresel ısınmanın engellenmesi için özellikle termik santrallerden proses sonucu çıkan CO₂'in tutulması ve uygun yerlere depolanması gerekmektedir. Karbondioksitin tutulması için endüstride genellikle amin çözeltileri ya da amonyak gibi değişik çözeltiler kullanılmaktadır. Absorpsiyon kolonlarında bu farklı çözeltilerle tutulan CO₂'in yer altında veya okyanuslara depolanması hakkında da çalışmalar sürmektedir.

Bu çalışma CO₂'in atık gazlardan tutulması üzerinedir. İlk olarak sodyum metaborat çözeltisinin CO₂ tutulmasında kullanılabileceği araştırılmış ve uygun bir tutucu olduğu kanıtlanmıştır. Ardından endüstriyel uygulamanın ilk ve basit bir örneği olan sıvıya göre kesikli kabarcıklı kolonda kimyasal reaksiyonlu absorpsiyonun gerçekleştirildiği gösterilmiştir.

Çalışmanın sonraki aşamasında ilk olarak sodyum metaborat çözeltisine CO₂'in absorpsiyonu sonucu gerçekleşen reaksiyonun kinetiği incelenmiştir ve frekans faktörü ile aktivasyon enerjisi sırasıyla $1,97 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{mol-s}$ ve 18062 J/mol olarak hesaplanmıştır. Üçüncü olarak çalışmalara sürekli kabarcıklı kolonda devam edilmiştir. Öncelikle kabarcıklı kolonda farklı gaz akış hızlarındaki gaz ve sıvı tutulmaları belirlenmiştir. Daha sonra kabarcıklı kolonda, oksijen desorpsiyonu ile sıvı fazı fiziksel kütle transferi katsayısı ve sodyum metaborat çözeltisine CO₂'in absorpsiyonu çalışmaları ile sıvı fazı kimyasal kütle transferi deneysel olarak incelenmiştir. Bunun sonucunda sodyum metaborat çözeltisine CO₂'in absorpsiyonu için kütle transfer hızında kimyasal reaksiyonun etkisini veren artış faktörü belirlenmiştir. Bu artış faktörü, önerilen sistemin endüstriye uyarlanmasındaki tasarım hesaplarında yararlı olacaktır.

Ayrıca bu çalışma ile, sodyum borhidrürden H₂ elde edildikten sonra kalan sodyum metaboratın karbon dioksit bertarafı gibi güncel bir konuda da değerlendirilmesinin mümkün olduğu gösterilmiştir. Absorpsiyon işlemi sonunda elde edilen çözeltinin kurutulması ile de sanayiide (özellikle cam sanayiinde) değerlendirilme potansiyeli yüksek olan bir karışım elde edilmiştir.

Bilim Kodu : 912.1.086

Anahtar Kelimeler : Kabarcıklı kolon, karbon dioksit, absorpsiyon, sodyum metaborat, kütle transferi

Sayfa Adedi : 99

Tez Yöneticisi : Prof. Dr. Özkan Murat DOĞAN

**CARBON DIOXIDE ABSORPTION INTO SODIUM METABORATE
SOLUTION USING A BUBBLE COLUMN REACTOR**

(M.Sc. Thesis)

Duygu UYSAL

GAZİ UNIVERSITY

INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY

June 2011

ABSTRACT

One of the most important problems of the world is global warming, which is caused by greenhouse gases emitted to atmosphere from all over the world. Preventing CO₂ emission, especially from power plants by capturing and storing, is important to decrease the effect on global warming. Today, amine or ammonia like solutions are the mostly used chemicals to capture CO₂. CO₂, captured by these solutions in absorption columns, can then be sent to some underground geological formations or to deep parts of oceans in order to store it.

This work is about capturing CO₂ from flue gases. Firstly, CO₂ capturing capability of sodium metaborate was investigated and it was proven that it can capture CO₂. Then, in bubble column absorption with chemical reaction is carried out, which is one of the simplest liquid-gas contactors used in industry, operated batchwise with respect to liquid.

As the next step of the work, kinetics of absorption of CO₂ into sodium metaborate solution was studied; frequency factor and activation energy of rate constant of this reaction were found as $1,97 \times 10^{-3}$

$\text{m}^3/\text{mol.s}$ and 18062 J/mol , respectively. Thirdly, absorption studies were performed with a bubble column operating continuously with respect to liquid and gas. Gas hold up for the system for different gas flow rates were obtained. Liquid side physical mass transfer coefficient was determined employing oxygen desorption method. Then, liquid side chemical mass transfer coefficient was obtained by experimentally employing CO_2 absorption into sodium metaborate solution. Hereat, the enhancement factor for carbon dioxide absorption into sodium metaborate solution was determined. This enhancement factor can be used in design calculations of industrial applications.

With this work, it was shown that sodium metaborate, which is the product of hydrogen generation from sodium borohydride process, can be used in a current issue like carbon dioxide removal. In addition to this, by drying of the solution obtained at the end of absorption process, a solid mixture of borax and sodium carbonate can be obtained and this has a great possibility of being used in several industries (especially in glass industry) is acquired.

Science Code : 912.1.086

Keywords : Bubble column, carbon dioxide, absorption, sodium metaborate, mass transfer

Page Number : 99

Adviser : Prof. Dr. Özkan Murat DOĞAN

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren Hocam Prof. Dr. Özkan Murat DOĞAN'a, yine kıymetli tecrübelerinden faydalandığım hocam Prof. Dr. Bekir Zühtü UYSAL'a, ayrıca XRD ve B₂O₃ analizlerini yapmamda yardımcı olan ETİ MADEN İŞLETMELERİ Genel Müdürlüğü'ne, manevi destekleriyle beni hiçbir zaman yalnız bırakmayan aileme ve çok değerli arkadaşlarım Yusuf Mert SÖNMEZ ve Duygu GÜLER'e teşekkürü borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER.....	ix
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	xiii
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xiv
RESİMLERİN LİSTESİ.....	xvi
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xvii
1. GİRİŞ.....	1
2. KÜRESEL ISINMA.....	3
2.1. Küresel Isınma ve Sera Etkisi.....	3
2.2. Küresel Isınmanın Nedenleri ve Etkileri.....	6
2.3. Küresel Isınmaya Karşı Alınabilecek Önlemler.....	12
2.4. Karbon Dioksit Tutulması ve Depolanması.....	13
2.4.1. Karbon dioksitin tutulması.....	13
2.4.2. Karbon dioksitin depolanması.....	17
3. KABARCIKLI KOLONLAR.....	19
3.1. Akış Dinamiği ve Rejim Analizi.....	20

Sayfa

4. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....	25
5. MATERYAL VE METOT.....	33
5.1. Sodyum Metaboratın Karbon Dioksit Tutulmasında Kullanılabilirliği.....	33
5.2. Sodyum Metaborat ve Karbon Dioksit Reaksiyon Kinetiğinin İncelenmesi.....	35
5.3. Kabarcıklı Kolonda Gaz ve Sıvı Tutulması.....	40
5.4. Kabarcıklı Kolonda Sıvı Fazı Bireysel Fiziksel Kütle Transferi Katsayısının Belirlenmesi.....	41
5.5. Kabarcıklı Kolonda Sıvı Fazı Bireysel Kimyasal Kütle Transfer Katsayısının Belirlenmesi.....	44
5.6. Sodyum Metaborata Karbon Dioksit Absorpsiyonu İçin Artış Faktörünün Belirlenmesi.....	46
6. DENEYSEL YÖNTEM.....	47
6.1. Sodyum Metaboratın Karbon Dioksit Tutulmasına Kullanılabilirliği.....	47
6.2. Sodyum Metaborat ve Karbon Dioksit Reaksiyon Kinetiğinin İncelenmesi	48
6.3. Kabarcıklı Kolonda Gaz ve Sıvı Tutulması.....	50
6.4. Kabarcıklı Kolonda Sıvı Fazı Bireysel Fiziksel Hacimsel Kütle Transferi Katsayısının Belirlenmesi.....	53

	Sayfa
6.5. Sodyum Metaborata Karbon Dioksit Absorpsiyonu İçin Artış Faktörünün Belirlenmesi	56
7. BULGULAR.....	58
7.1. Sodyum Metaboratın Karbon Dioksit Tutulmasında Kullanılabilirliği.....	58
7.2. Sodyum Metaborat ve Karbon Dioksit Reaksiyon Kinetiğinin İncelenmesi	61
7.3. Kabarcıklı Kolonda Gaz ve Sıvı Tutulması	65
7.4. Kabarcıklı Kolonda Sıvı Fazı Bireysel Fiziksel Hacimsel Kütle Transferi Katsayısının Belirlenmesi	72
7.5. Kabarcıklı Kolonda Sıvı Fazı Bireysel Fiziksel Hacimsel Kütle Transferi Katsayısının Belirlenmesi.....	74
7.6. Sodyum Metaborata Karbon Dioksit Absorpsiyonu İçin Artış Faktörünün Belirlenmesi	76
8. SONUÇLAR	77
9. ÖNERİLER.....	80
KAYNAKLAR.....	81
EKLER.....	86
EK – 1. Oksijen probunun kullanımı.....	87
EK – 2. Oksijen probunun kalibrasyonu.....	89
EK – 3. Rotametre kalibrasyonu.....	92

Sayfa

EK – 4. Pompa kalibrasyonu.....	93
EK – 5. Hidroklorik asit ile B ₂ O ₃ analiz yöntemi.....	95
EK – 6. Numune içindeki karbon dioksit miktarının belirlenmesi – yaş analiz metodu.....	94
ÖZGEÇMİŞ.....	97

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 3.1. Kabarcıklı kolonlarda hava-su sistemi için deneysel belirlenen geçiş hızı ve gaz tutulma değerleri.....	24
Çizelge 4.1. Kabarcıklı kolonda gaz tutulması için geliştirilen korelasyonlar.....	25
Çizelge 6.1. Sodyum metaborat – CO ₂ reaksiyon deneylerindeki parametreler.....	48
Çizelge 6.2. Gaz ve sıvı tutulması deneylerindeki parametreler.....	50
Çizelge 6.3. Fiziksel kütle transfer katsayısını belirlenmesindeki parametreler.....	55
Çizelge 6.4. Kimyasal kütle transfer katsayısı belirlemek için yapılan deneylerde çalışılan parametreler.....	47
Çizelge 7.1. Reaksiyon sonucu elde edilen katının analizi.....	59
Çizelge 7.2. Farklı sodyum metaborat konsantrasyonlarında elde Edilen reaksiyon mertebesi değerleri.....	63
Çizelge 7.3. Ortalama sodyum metaborat konsantrasyonları.....	65

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Küresel ısınma nedeniyle meydana gelen sıcaklık artışları..	5
Şekil 2.2. Yüzdelikle karbon dioksit salınımı.....	8
Şekil 2.3. Karbon dioksit tutumu için genel yaklaşımlar.....	14
Şekil 2.4. Karbon dioksitin jeolojik depolanması.....	17
Şekil 2.5. Karbon dioksitin okyanuslara depolanması.....	18
Şekil 3.1. Kabarcıklı kolonlarda olası akış rejimlerinin şematik gösterimi.....	22
Şekil 3.2. Kabarcıklı kolonlar için akış rejimi haritası.....	23
Şekil 5.1. HCO_3^- ve CO_3^{2-} konsantrasyonlarının pH ile değişimi.....	34
Şekil 5.2. Reaksiyonun mertebesini hesaplamak için çizilen grafikler	37
Şekil 5.3. Reaksiyonun mertebesinin belirlenmesi.....	38
Şekil 5.4. Reaksiyon frekans faktörü ve aktivasyon enerjisinin bulunması.....	39
Şekil 5.5. Oksijen desorpsiyonu.....	41
Şekil 5.6. Kütle transferi katsayısını belirlemek için modelleme.....	44
Şekil 6.1. Gaz ve sıvı tutulması deneylerindeki düzeneğin şematik gösterimi.....	51
Şekil 6.2. Sıvı fazı bireysel kütle transfer katsayısı hesabı deneylerinde kullanılan deney düzeneğinin şematik gösterimi.....	54
Şekil 6.3. Kimyasal kütle transfer katsayısı bulunmasında kullanılan deney düzeneği.....	56
Şekil 7.1. Reaksiyonlar sonucunda sodyum karbonat/bikarbonatın varlığını gösteren XRD spektroskopisi analiz sonucu	58

Şekil	Sayfa
Şekil 7.2. Reaksiyonlar sonucunda boraksın varlığını gösteren XRD spektroskopisi analiz sonucu	59
Şekil 7.3. Sıcaklığın sodyum metaborat – karbon dioksit reaksiyonuna etkisi.....	61
Şekil 7.4. Başlangıç sodyum metaborat çözelti konsantrasyonunun reaksiyona etkisi	62
Şekil 7.5. Reaksiyon mertebesinin bulunması (50°C, %1'lik çözelti için).....	62
Şekil 7.6. Aktivasyon enerjisi ve frekans faktörünün belirlenmesi.....	64
Şekil 7.7. Piezometreden okunan seviye farkının gaz hızıyla değişim grafiği.....	66
Şekil 7.8. Kolon boşluk kesrinin gaz hızıyla değişim grafiği.....	67
Şekil 7.9. Joshi korelasyonu ile deneysel verilerin karşılaştırılması....	68
Şekil 7.10. Koide korelasyonu ile deneysel verilerin karşılaştırılması	69
Şekil 7.11. Kawase ve Moo-Young korelasyonu ile deneysel verilerin karşılaştırılması.....	70
Şekil 7.12. Gaz tutulması için korelasyonların karşılaştırılması.....	71
Şekil 7.13. Oksijen için elde edilen kütle transfer katsayıları.....	72
Şekil 7.14. Karbon dioksit için elde edilen fiziksel kütle transfer katsayıları.....	73
Şekil 7.15. Sıvı fazı bireysel kimyasal kütle transfer katsayıları.....	74
Şekil 7.16. Deneysel ve korelasyon sonucu elde edilen katsayılar...	75
Şekil 7.17. Çalışılan sistem için belirlenen artış faktörü değerler.....	76

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 6.1. Sodyum metaborat – CO ₂ reaksiyonunun kinetik çalışmasının yapıldığı deney düzeneği.....	49
Resim 6.2. Gaz ve sıvı tutulması deneylerinde kullanılan düzenek.....	52
Resim 6.3. Bireysel fiziksel kütle transfer katsayısını bulmak için kullanılan oksijenmetre.....	53

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış bazı simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler Açıklama

a	Gaz-sıvı arayüz alanı
d_c	Kabarcıklı kolon çapı
d_b	Sauter ortalama kabarcık çapı
g	Yer çekimi ivmesi
h	Piezometreden okunan seviye farkı
H	Kabarcıklı kolon yüksekliği
$K_L a$	Kütle transfer katsayısı
P_a	Dağıtıcı orifisteki basınç
P_G	Gaz giriş gücü
P_s	Sıvı yüzeyindeki basınç
Q_G	Standart sıcaklık ve basınçta gaz akış hızı
U_b	Kabarcık yükselme hızı
u_G	Gaz hızı
$U_{G,geçiş}$	Geçiş bölgesindeki boş kolon hızı
u_L	Sıvı hızı

Yunan Harfleri	Açıklama
ε_G	Kolondaki gaz tutulması
$\varepsilon_{G,geçiş}$	Geçiş bölgesindeki kolondaki gaz tutulması
ε_L	Kolondaki sıvı tutulması
μ_L	Sıvı viskozitesi
ρ_G	Gaz yoğunluğu
ρ_L	Sıvı yoğunluğu
σ	Gaz-sıvı yüzey gerilimi
ν_L	Sıvının kinematik viskozitesi

Kısaltma	Açıklama
Fr	Froude sayısı
Re	Reynolds sayısı
XRD	X – Ray Diffraction

1. GİRİŞ

Dünya 21. yüzyıl içerisinde ilerlerken, çevresel problemlerin uluslar arası boyutları ve önemi açıkça artmaktadır. Ekonominin küreselleşmesi, dünya çapında haberleşmenin ve bilgi ağlarının gerekli hale gelmesi, biyo ve nanoteknolojinin hızlı bir şekilde gelişmesi hepsi çevreyi etkilemektedir ve önemli sonuçlar doğurmaktadır. Bu yüzyılın ortasında, nüfus 10 milyar insanın üzerine çıkacaktır ve daha fazla çevresel problemler yaratıp doğal kaynakların azalmasına neden olacaktır. Aslında, gelecekteki sorun yalnızca doğal kaynakların tükenmesi değil, ayrıca bu kaynakların tüketilmesinden dolayı ortaya çıkan etmenlerdir. Daha fazla uygulandıkları takdirde yeni geliştirilen teknolojiler (verim artırmaya yönelik çalışmalar, maliyet verimliliği gibi) çevreye verilen bu zararı azaltabilir [Dincer ve ark, 2010]

IPCC'nin (Intergovernmental Panel on Climate Change) yayımladığı son raporuna göre, son 50 yıl boyunca gözlenen ısınmanın büyük oranda insan aktivitelerinden kaynaklandığına dair yeni ve güçlü kanıtlar bulunmaktadır ve insanoğlunun etkilerinin 21. yüzyıl boyunca atmosfer bileşimini değiştirmeye devam edeceği sanılmaktadır. İnsan aktivitelerinden kaynaklanan sera gazına en büyük katkısı CO₂ yapmaktadır. Fosil yakıtların yakılması ya da biyokütlenin yakıt olarak kullanılması, yakılması (örneğin arazi genişletme sırasında ormanların yakılması) ve bazı endüstriyel ve kaynak çıkarma işlemleri ile karbon dioksit salınır. 21. yüzyıl boyunca atmosferdeki CO₂ konsantrasyonlarının değişiminde, fosil yakıtlarının yakılmasına bağlı olarak oluşan CO₂ emisyonları baskın etkidir ve bütün senaryolarda ortalama küresel sıcaklığın ve deniz seviyesinin yükseleceği tahmin edilmektedir [IPCC, 2007].

Bu yüksek lisans tezinde baca gazlarından salınan karbon dioksitin çevreye zarar vermemesi için sodyum metaborat çözeltisi ile tutulması çalışılmıştır. Konvansiyonel sistemlerde, karbon dioksitin tutulması amin çözeltileriyle yapılmaktadır. Fakat amin çözeltileriyle tutma prosesinde karbon dioksitin

tutulması ve amin çözeltisinin rejenerasyonu üniteleri, sürekli basınç yükselmesi, düşürülmesi ve benzer şekilde sıcaklığın da yükseltilip düşürülmesinden dolayı çok fazla enerji harcamaktadır. Bu nedenle, yeni teknolojiler araştırılmaktadır. Sodyum metaborat buna bir çözüm olarak sunulabilir. Aynı zamanda, sodyum metaborat, sodyum borhidrürden hidrojen eldesi prosesinde ürün olarak ortaya çıkmaktadır. Sodyum metaborat ya sodyum borhidrüre yeniden dönüştürülmelidir ya da başka bir alanda değerlendirilmesi gerekmektedir. Karbon dioksitin tutulması, sodyum metaboratın değerlendirilmesi konusunda bir alan olabilir.

Bu çalışma kapsamında, sodyum metaboratın öncelikle karbon dioksitin tutulmasında kullanılıp kullanılamayacağı araştırılmış ve kullanılabileceği kanıtlanmıştır. Ardından, literatürde sodyum metaboratın karbon dioksitle olan reaksiyonu hakkında bir bilgi olmadığından, bu reaksiyon incelenecektir ve reaksiyonun mertebesi, aktivasyon enerjisi ve frekans faktörü hesaplanacaktır.

Reaksiyonun kinetik incelemesinin ardından absorpsiyon işlemlerine geçilmiştir. Absorpsiyon kabarcıklı kolonda yapılmıştır. Bu nedenle absorpsiyon işlemlerinden önce kabarcıklı kolonun karakterizasyonu için kolondaki gaz tutulmasına bakılmıştır. Ardından oksijen desorpsiyonu yöntemiyle fiziksel kütle transfer katsayısı hesaplanmıştır ve elde edilen değerler karbon dioksit için olan transfer katsayılarına çevrilmiştir. Son olarak, kimyasal kütle transferi hesaplanmıştır ve bu kimyasal işlemin absorpsiyon işlemine ne kadar katkısının olduğunu görebilmek için de artış faktörü hesaplanmıştır.

2. KÜRESEL ISINMA

2.1. Küresel Isınma ve Sera Etkisi

Küresel ısınma, yer yüzüne yakın olan yüzeyin ve okyanusların ortalama sıcaklığındaki artıştır ve 20. yüzyılın ortalarına doğru bu artış hızlanmıştır. IPCC'nin en son yayımlanan raporuna göre, küresel yüzey sıcaklığı 20. yüzyıl boyunca $0,74 \pm 0,18^{\circ}\text{C}$ artmıştır. Bu artışın en büyük nedeni, atmosferdeki sera gazlarının oranının artmasıdır. Sera gazlarının artması ise fosil yakıtların yakılması, ormanların kesilmesi gibi insan aktiviteleri sonucu olmuştur.

21. yüzyılda küresel yüzey sıcaklığı $1,1-6,4^{\circ}\text{C}$ daha artacaktır. Sıcaklıktaki bu kadarlık artış, deniz seviyesinin yükselmesine ve ekolojik dengenin bozulmasına neden olacaktır.

Sera etkisi, bazı gazların dünyanın atmosferine hapsolup ısı artışı meydana getirmesi olayına verilen isimdir. Gazlar, ışığın geçmesine izin verirken tıpkı seralarda olduğu gibi ısının kaçmasını engellerler. Önce, güneş ışığı dünyanın yüzeyine ulaşır, bir kısmı dünya tarafından soğurulurken bir kısmı da ısı olarak atmosfere yansır. Atmosferdeki sera gazları, bu ısının bir kısmını tutar ve geri kalan kısmı da uzaya gider. Atmosferdeki sera gazlarının oranı arttıkça, tutulan ısı da artar.

Bilimadamları, sera etkisini 1824'ten beri, Joseph Fourier atmosferin olmadığı takdirde dünyanın çok daha soğuk olacağını hesapladığından beri bilmektedirler. Dünyayı yaşanabilir yapan da bu sera etkisinin varlığıdır. 1895'te ise Svante Arrhenius, sera gazlarından en önemlisi olan karbon dioksitin miktarının insanlar tarafından artırıldığını ve şimdiki küresel ısınmanın en büyük nedeni olacağını söylemiştir [IPCC, 2007].

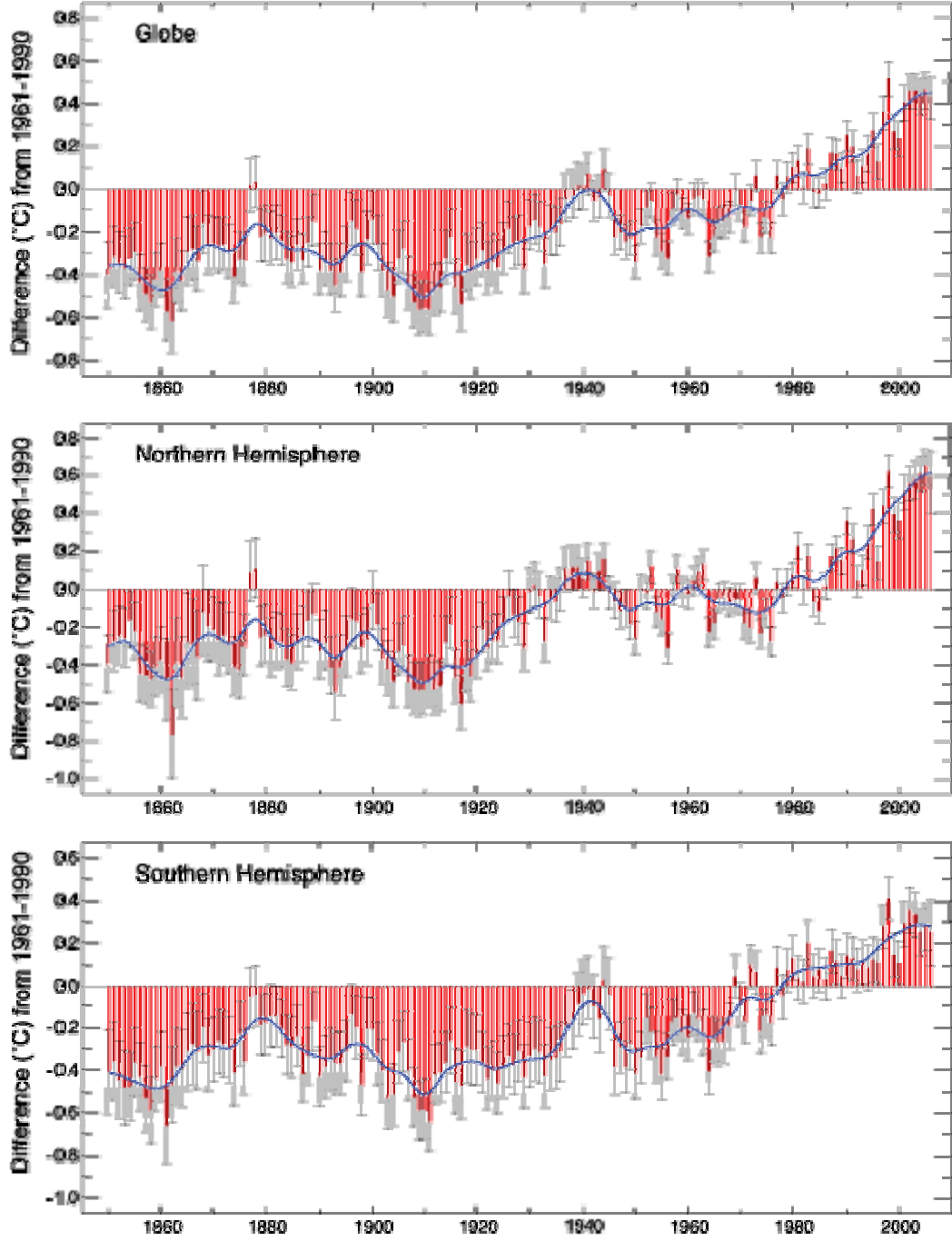
Sera gazlarının miktarı, dünya tarihi boyunca artıp azalmıştır, fakat geçen bin yılda yaklaşık olarak sabit kalmıştır. Küresel ortalama sıcaklık da yaklaşık olarak aynı kalmıştır. Fakat son zamanlarda bu düzen bozulmuştur. Fosil yakıtların yakılması ve başka sera gazlarının salınımından dolayı, insanlar sera gazı etkisini ve dünyanın ısınmasını artırmışlardır.

Bilimadamları, “küresel ısınma” terimi yerine “iklim değişikliği” terimini kullanmayı tercih etmektedirler. Çünkü, dünyanın ortalama sıcaklığı yükselirken, rüzgar ve okyanus hareketleri ısıyı küresel olarak değiştirir. Bunun bir sonucu olarak da bazı yerler soğurken bazı yerler ısınır ve bir noktaya düşen yağmur ve kar miktarı farklılaşır. Sonuç olarak, değişik yerlerde farklı iklim değişiklikleri meydana gelir.

Su buharı, diğer sera gazlarından farklı olarak güneşten gelen radyasyonun şiddetine ve gezegenin ortalama ısısına göre sabit olan bağlı bir değişkendir. Dolayısıyla küresel ısınma konusunda pasif etkiye sahiptir. Ancak diğer sera gazları, yer yer bağımsız değişken olarak küresel ısınma üzerinde aktif bir etki yaratabilirler. Örneğin karbondioksit, yoğun volkanik etkinlik sonucu ya da insanlar tarafından fosil yakıtların yakılmasıyla yoğun olarak atmosfere salınabilir. Bu durum, gezegenin ortalama ısısından bağımsız olarak ortaya çıkabilen ve ortalama ısının artması sonucunu doğuran bir etken olarak işlev görür.

Başta kömürün, yağın ve gazların yanmasından ortaya çıkan karbondioksit miktarı, atmosferde, insan aktiviteleri nedeniyle gün geçtikçe artmaktadır. Sanayi devriminden önce havadaki CO₂ miktarı yaklaşık olarak 280 ppmv iken şu anda bu miktar 380ppmv'a çıkmıştır ve 2000'den beri yılda 1.9 ppm artmaktadır. IPCC Special Report on Emission Scenarios'a göre, 21. yüzyılın sonunda CO₂ miktarının 490 ile 1260 ppm arasında olması beklenmektedir. Bu da sanayi öncesi olan miktarların %75-350'sine karşılık gelmektedir [IPCC, 2007].

Şekil 2.1'de ise meydana gelen sıcaklık değişimi görülmektedir.



Şekil 2.1. Küresel ısınma nedeniyle meydana gelen sıcaklık artışları [IPCC, 2007].

2.2. Küresel Isınmanın Nedenleri ve Etkileri

Küresel ısınmaya dikkatleri ilk çeken olay dünyanın ozon tabakasının bozulması, delinmesi olmuştur. Ozon, oksijenin moleküler bir formudur ve ozon tabakası da stratosferin en alt tabakasını oluşturan molekül setidir. Ozon tabakasının delinmesinin bir sonucu olarak, dünya yüzeyine ulaşan mor ötesi ışınlar artmıştır. Bunun sonucu olarak aslında ısınma olmamış, aksine stratosferde ve troposferde soğuma meydana gelmiştir. Küresel ısınma konusunda bahsedilmesinin nedeni de dünyaya ulaşan zararlı radyasyonun ve havanın, suyun sıcaklığının artmasını durdurma isteğimiz arasındaki dengeyi bozmuş olmasıdır. Küresel ısınma, bir çok olayın içinde bulunduğu bir zincir gibi düşünülebilir.

Küresel ısınmanın nedenleri doğal nedenler ve yapay nedenler olarak iki başlık altında incelenebilir. Doğal nedenler güneşin etkisi, dünyanın prezyon hareketi ve El Niño etkisi olarak sayılabilir [EIA, 2006].

İklim bilimciler, güneş beneklerinin 11 yıllık döngüsel hareketini ve güneşin yüzyıllık süreçler içinde parlaklık değişimini incelediklerini belirtmiştir. Bunun sonucunda güneşin manyetik alanı ve protonlar ile elektronlar biçiminde ortaya çıkan güneş rüzgarının, güneş sisteminde kozmik ışımalarla karşı bir kalkan görevinde olduğu açıklanmaktadır. Güneş'in değişken aktivitesiyle zayıflayabilen bu kalkan, kozmik ışınları geçirmektedir. Kozmik ışınların fazla olması bulutlanmayı arttırmakta, güneşten gelen radyasyon oranını değiştirerek küresel sıcaklık artışına neden olmaktadır. Güneşten gelen UV ışınları aynı zamanda kimyasal reaksiyonların meydana geldiği ozon tabakası üzerinde de değişikliğe yol açmaktadır.

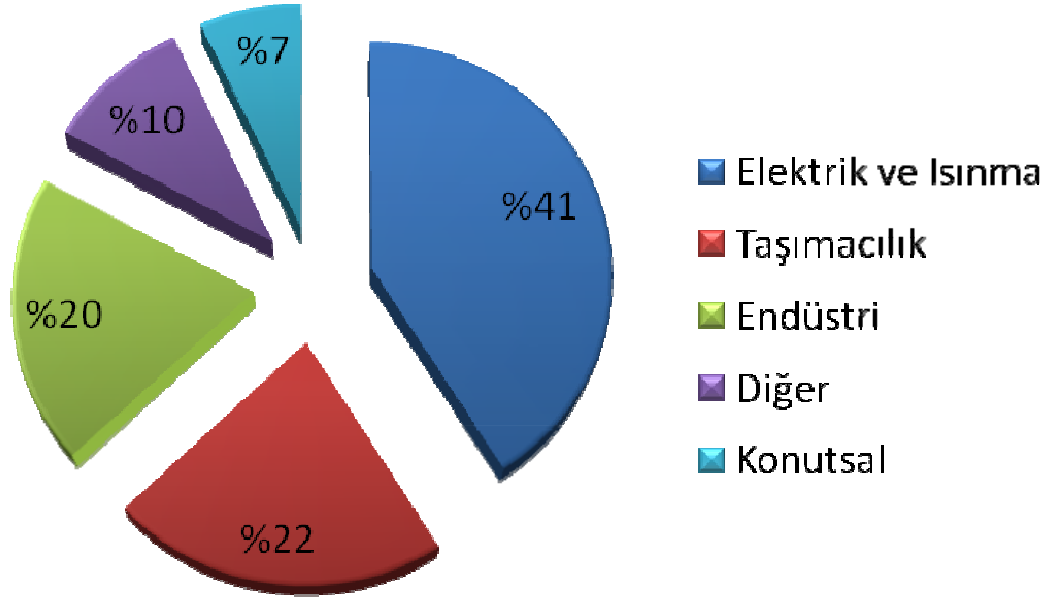
Dünyanın konumsal hareketinin etkisini ise şöyle açıklanmaktadır. 1930 yılında Sırp bilim adamı Milutin Milankovitch dünyanın güneş çevresindeki yörüngesinin her 95000 yılda biraz daha basıklaştığını göstermiştir. Bunun dışında her kırkbin yılda Dünya'nın ekseninde doğrusal bir kayma ve her

yirmi üç bin yılda dairesel bir sapma bulunduğunu belirtmiştir. Günümüz bilim adamlarının bir çoğu dünyanın bu hareketlerinden dolayı zaman zaman soğuk dönemler yaşadığını ve bu soğuk dönemler içindeyse yüz bin yıllık periyotlarda on bin yıl süreyle sıcak dönemler geçirdiğini bildirmektedir. Bu da dünyanın doğal ısınmasının bir nedenini oluşturmaktadır.

Doğal sebeplerden sonuncusu olarak sayılan El Niño hareketi, güney salınımı sıcak olayı olarak tanımlanabilir. Bu hareket, 1990-1998 yıllarında tropikal doğu Pasifik Okyanusu'nda deniz yüzeyi sıcaklıklarının normalden 2-5°C daha yüksek olmasına neden olmuştur. Özellikle 1997 ve 1998 yıllarındaki rekor düzeyde yüzey sıcaklıklarının oluşmasında, 1997-1998 kuvvetli El Niño olaylarının etkisinin önemli olduğu kabul edilmektedir. 1998'deki çok kuvvetli El Niño bu yıllardaki küresel rekor ısınmasına neden olan doğal ana etmen olarak değerlendirilebilir .

Yapay nedenler fosil yakıtlar ve sera gazlarıdır. Fosil yakıtlardan kömür, petrol ve doğalgaz dünyanın bugünkü enerji ihtiyacının büyük bir kısmını karşılamaktadır. Yapılarında karbon ve hidrojen içeren fosil yakıtlar çok uzun süreçlerde oluşmaktadırlar; fakat tüketimleri çok hızlıdır. Dünyanın belirli bölgelerinde toplanmış bu yakıtların günümüz teknolojisiyle yarısının çıkarılması imkansızdır; diğer yarısının ise çıkarılması teknik olarak pahalıdır. Bu nedenlerden dolayı fosil yakıtlar yenilenemeyen ve sınırlı yakıtlar sınıfına girmektedir [IPCC, 2007].

Küresel ısınmanın başlıca nedeni önceden de belirtildiği gibi karbon dioksit emisyonlarıdır. Dünyada atmosfere yılda 29,4 milyar ton karbon dioksit salınımı olmaktadır. Elbette bu rakamın bir kısmı volkanik patlamalar ya da insanların, hayvanların solunumu gibi doğal aktivitelere aittir; fakat doğal etkenler dünyanın absorbe etme kapasitesi içindedir. Küresel ısınma, fosil yakıtların yakılması ve çok fazla miktardaki karbon dioksitin atmosfere salınımıyla başlamıştır.



Şekil 2.2. Yüzdelilerle karbon dioksit salınımı [IPCC, 2007].

Şekil 2.2’de de görüldüğü üzere, dünyaya salınan toplam karbon dioksitin %41’i elektrik ve ısınmadan, yani direkt olarak güç santrallerinden çıkmaktadır. Güç santralleri, kömür, petrol, doğalgaz ve dizel yakıt kullanılmaktadır. Bazıları çöp yakarken, bazıları da çöpten elde ettikleri metanı yakarlar. Sonuç olarak, bütün gün santrallerinden karbon dioksit salınımı olmaktadır.

Toplam miktarın %22’si ise taşımacılık alanındadır. İçten yanmalı motorlarda kullanılan fosil yakıtın, mazotun ve dizelin kullanılması sonucunda ortaya yine karbon dioksit salınımı olur. Ayrıca, hava taşımacılığında karbon dioksit direkt olarak troposfere bırakılır. Bir günde dünya çapında olan uçuşlar göz önünde bulundurulursa, hava taşımacılığından ortaya çıkan karbon dioksit hiç de azımsanmayacak bir miktardır.

%20'lik pay, endüstriye aittir. Endüstriyel prosesler sonucu ortaya çıkan karbon dioksitin atmosfere direkt olarak bırakılması sonucunda yüksek bir oran da endüstriye ait olmuştur.

%7'lik pay ise konutsaldır. Geriye kalan %10'luk kısım ise, yukarıda da bahsedildiği gibi doğal nedenler sonucu ortaya çıkan karbon dioksit miktarıdır.

Küresel ısınmaya neden olan diğer gazlar ise aşağıda incelenmiştir.

Metan (CH₄)

Oranı binlerce yıldan beri değişmemiş olan metan gazı, son birkaç yüzyılda iki katına çıkmış ve 1950'den beri de her yıl %1 artmıştır. Yapılan son ölçümlerde ise metan seviyesinin 1,7 ppm'e vardığı görülmüştür. Bu değişiklik CO₂ seviyesindeki artışa göre az olsa da, metanın CO₂ 'den 21 kat daha kalıcı olması nedeniyle en az CO₂ kadar dünyamızı etkilemektedir [EIA, 2006].

Amerika ve birçok batı ülkesinde çöplüklerin büyük yer kaplaması sorun yaratmaktadır. Organik çöplerden pek çoğu ayrışarak büyük miktarda metan salgılamakta, bu gaz da özellikle iyi havalandırması olmayan ve kontrol altında tutulmayan eski çöplüklerde patlamalara ve içten yanmalara neden olmaktadır. Daha da önemlisi atmosfere salınan metan oranı artmakta ve bunun sonucu olarak da sera etkisi tehlikeli boyutlara varmaktadır [EIA, 2006].

Azot oksitler (NO_x)

Azot ve oksijen 250°C sıcaklıkta kimyasal reaksiyona giren azot oksitleri meydana getirir. Azotoksit, tarımsal ve endüstriyel etkinlikler ve katı atıklar ile

fosil yakıtların yanması sırasında oluşur. Arabaların egzozundan da çıkmakta olan bu gaz, çevre kirlenmesine neden olmaktadır.

Kloroflorokarbonlar (CFC's)

Kloroflorokarbonlar klorin, florin, karbon ve çoğunlukla da hidrojenin karışımından oluşur. Bu gazların çoğunluğu 1950'lerin ürünü olup günümüzde buzdolaplarında, klimalarda, spreylere, yangın söndürücülerde ve plastik üretiminde kullanılmaktadır. Bilimadamları bu gazların ozonu yok ederek önemli iklim ve hava değişikliklerine neden olduklarını kanıtlamışlardır. Bu gazlar DDT, dioksin, cıva, kurşun, vinilklorid, PCB'ler, kükürtdioksit, sodyumnitrat ve polimerlerdir [EIA, 2006].

DDT : 1940-1950 yılları arasında dünya çapında tarım alanlarındaki böcekleri zehirlemek için kullanılmıştır. Kimyasal adı 'diklorodifeniltrikloroetan'dır. Klorin içeren bu gazın insan dahil diğer canlılar için de öldürücü olduğu fark edildikten sonra üretimden kaldırılmıştır .

Dioksin : 100'ün üstünde çeşidi vardır. Bitkilerin ve böceklerin tahribatı için kullanılır. Çoğu çeşidi çok tehlikelidir; kansere ve daha birçok hastalığa neden olmaktadır.

Cıva : Cıvanın en önemli özelliği diğer elementler gibi çözünmemesidir. 1950-1960 yılları arasında etkisini önemli ölçüde göstermiş, Japonya'da birkaç yüz balıkçının ölümüne neden olmuştur. Bir ara kozmetik ürünlerinde kullanılmışsa da daha sonra son derece zehirli olduğu anlaşılıp vazgeçilmiştir.

Kurşun : Günümüzde kalemilerin içinde grafit olarak kullanılmaktadır. Vücudun içine girdiği takdirde çok zehirleyicidir; sinir sistemini çökertip beyne hasar verir.

Vinilklorid : PVC elde etmek için kullanılan bir gaz karışımıdır. Solunduğunda toksik etkilidir.

PCB'ler : PCB, 'polychlorinated biphenyls' ten gelmektedir. Bu endüstriyel kimyasal toksik ilk olarak 1929'da kullanılmaya başlanmış ve 100'ün üstünde çeşidi olduğu tespit edilmiştir. Bunlar büyük santrallerdeki elektrik transformatörlerinin yalıtımında, birçok elektrikli ev aletlerinde aynı zamanda boya ve yapıştırıcıların esneklik kazanmasında kullanılmaktadır. Bunun yanında kansere yol açtığı bilinmektedir.

Sodyum nitrat : Füme edilmiş balık, et ve diğer bazı yiyecekleri korumak için kullanılan bir çeşit tuzdur. Vücuda girdiğinde kansere yol açtığı bilinmektedir.

Kükürt dioksit (SO₂) : Bu gaz sülfürün, yağın, çeşitli doğal gazların ve kömürle petrol gibi fosil yakıtların yanması sonucu açığa çıkar. Kükürtdioksit ve azotoksidin birbiriyle reaksiyonu sonucunda asit yağmurlarını oluşturan sülfürik asit (H₂SO₄) oluşur.

Polimerler : Doğal ve sentetik çeşitleri bulunmaktadır. Doğal olanları protein ve nişasta içerirler. Sentetik olanlarıysa plastik ürünlerinde ve el yapımı kumaşlarda bulunup naylon, teflon, polyester, spandeks, styrofoam gibi adlar alırlar.

Ozon : Ozon tabakasının incelmesi "Küresel Isınma"yı dolaylı yoldan arttırmaktadır. USNAS'ın 1979'da yayınladığı raporda, ozon tabakasında azalma olduğu gözlemlendiği öne sürülmüştür. Oysa bundan bir yıl önce Kasım 1978'de uzaya fırlatılan Nimbus-7 uydusundan alınan verilere göre toplam atmosferik ozon seviyesi 1979-1991 yılları arasında orta enlemlerde %3-%5, yukarı enlemlerde %6 ila %8 arasında azalmıştır. 1992 yılında Antartika'daki ozon seviyesi ise 1979'daki seviyenin basıncına inmiştir. 1950 ve 60'lı yıllardaki ozon kalınlığı da 1990'lı yıllardan sonra 1/3'üne kadar inmiştir. "The National Research Council"ın 1982 Mart raporuna göre CFC

salınımı bu şekilde devam ederse 21. yüzyılın sonunda stratosferdeki ozon miktarı %5 azalacaktır.

Atmosferdeki karbondioksit (CO₂) ve metan (CH₄) oranlarındaki artış dünya yüzeyinin sıcaklığını yükseltmektedir. CO₂ oranındaki artış dünyanın yüzeyini ısıtmakta ve kutuplara yakın buzların erimesine yol açmaktadır. Buzlar eridikçe yerlerini kara veya sular almaktadır. Kara ve suların buza oranla daha az yansıtıcı olması güneş ışınımı emilimini arttırmakta ve dolayısıyla buzullarda daha fazla erimeye yol açmaktadır [EIA, 2006].

2.3. Küresel Isınmaya Karşı Alınabilecek Önlemler

Küresel ısınmanın başlıca nedeni atmosfere yayılan, verilen sera gazlarıdır. Bu nedenle küresel ısınmaya karşı alınacak önlemlerin de atmosfere salınan sera gazlarını azaltacak yönde olmalıdır. Çalışmalar sonucu ortaya çıkan çözüm önerileri;

- Fosil yakıt tüketimini asgari düzeyde tutmak,
- Yenilenebilir enerjiye yönelmek,
- Enerji üretiminde pulverize kömür santrallerinde süper kritik teknolojilerle ve doğal gaz kombine çevrim santrallerinde gaz sıcaklıklarını yükselterek daha verimli üretim yapmak,
- Teknolojileri daha az enerji tüketebilir hale getirmek,
- CO₂'in tutulması ve depolanmasını sağlamak.

Bu çözüm önerilerini aktif bir şekilde gerçekleştirebilmek için bazı ülkelerin yönetiminde çeşitli örgütlenmeler gerçekleşmiştir. Bunların başında Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Konvansiyonu gelmektedir. Bunu takiben bu organizasyon çerçevesinde imzalanan Kyoto protokolü CO₂ salınımı konusunda bazı tedbirlerin alınmasına ön ayak olmuştur [IPCC, 2007].

2.4. Karbon Dioksit Tutulması ve Depolanması

Karbon dioksit tutulması depolanması, elektrik üretiminde olduğu gibi fosil yakıtların yakılmasından ya da doğalgaz işletmelerinde olduğu gibi fosil yakıtların hazırlanmasından kaynaklanan karbon dioksitin tutulmasını kapsamaktadır. Ayrıca biyokütle bazlı kaynakların yakılmasında ve hidrojen, amonyak, demir çelik ve çimento üretimi gibi bazı endüstriyel işlemlerde de uygulanabilir. Karbon dioksit tutumu, karbon dioksitin diğer gazlardan ayrılması işlemini gerektirir. Ardından karbon dioksitin atmosferden çok uzun zaman dilimi boyunca depolanarak uzaklaştırılacağı depolama sahasına taşınması gerekmektedir.

2.4.1. Karbon dioksitin tutulması

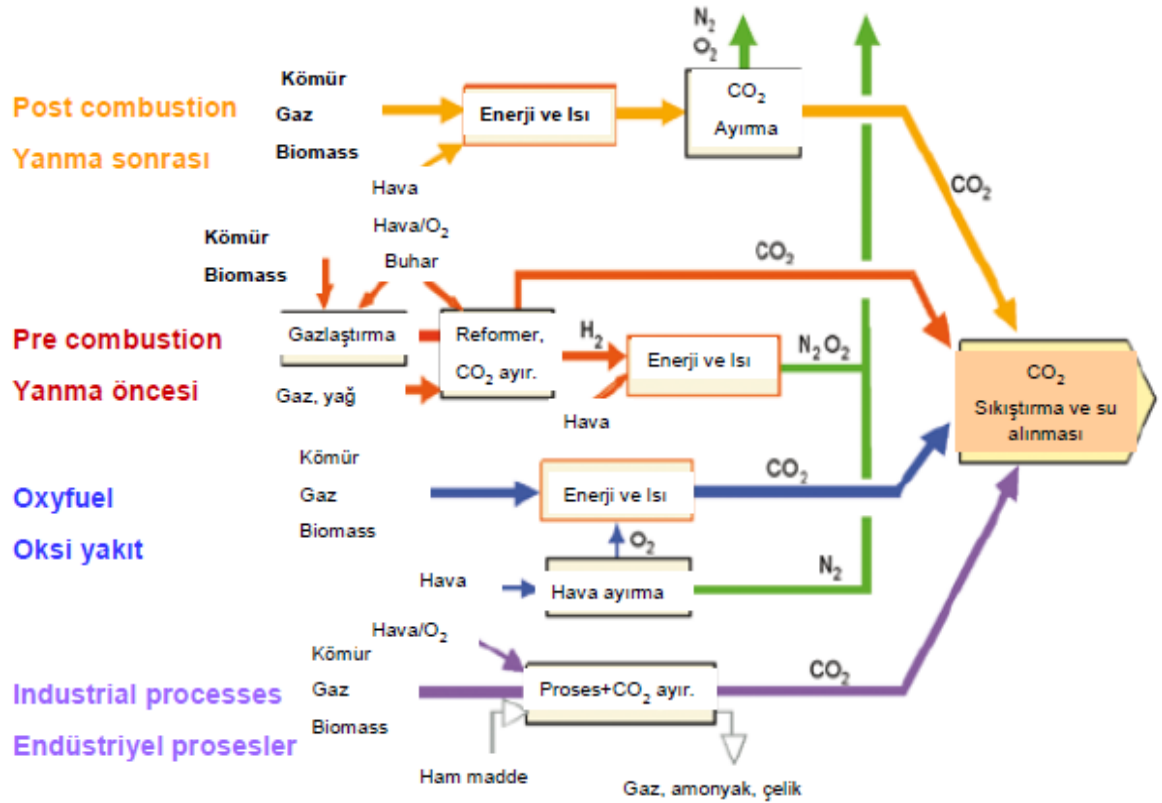
Karbon dioksit tutumunun amacı, bir depolama sahasına kolaylıkla taşınabileceği yüksek basınçta yoğunlaştırılmış karbon dioksit akımı meydana getirmektir. Pratikte, düşük karbon dioksit içerikli tam gaz akışı, taşınarak yeraltına edilebilse de, enerji maliyeti ve ilişkili diğer masraflar genellikle bu uygulamayı güçleştirmektedir. Bu nedenle hemen hemen saf bir karbon dioksit akışının sağlanması, taşıma ve depolama için gereklidir. Şu anda, karbon dioksit tipik olarak diğer endüstriyel gaz akışını temizlemek için uzaklaştırılmaktadır. Uzaklaştırma, sadece bir kaç durumda depolama amaçları için yapılmaktadır. Çoğu durumda karbon dioksit atmosfere bırakılır. Tutum işlemleri, ticari olarak kömür veya doğalgaz yakımı ile oluşan gaz akımlarından kullanışlı karbon dioksit toplamı sağlamak için de kullanılır. Yine de halen hiç bir büyük elektrik santralinde karbon dioksit tutum uygulamaları yapılmamaktadır.

Karbon dioksit tutumunun esas uygulamaları fosil yakıt elektrik santralleri, yakıt kullanan santraller ve özellikle demir, çelik, çimento üreten diğer endüstriyel işlemler gibi büyük kaynak noktalarında mümkündür. Taşıma ve yerleşim ve ticari yapı sektöründeki küçük ve hareketli kaynaklardan direkt

olarak karbon dioksitin tutulmasının ise büyük kaynak noktalarından daha pahalı ve zor olacağı sanılmaktadır. Bu nedenle küçük ölçekli tutum, burada anlatılmamıştır [IPCC, 2007].

Fosil yakıt ve/veya biyokütle kullanımından karbon dioksit tutumu için üç temel yaklaşım vardır (Şekil 2.3);

- Yakma sonrası karbon dioksitin tutulması
- Yakma öncesi karbon dioksitin tutulması
- Oksi yanma sistemlerinde karbon dioksitin tutulması



Şekil 2.3. Karbon dioksit tutumu için genel yaklaşımlar [IPCC, 2007].

Yakma sonrası karbon dioksit tutulması

Biyokütle ya da fosil yakıt yakımı ile üretilen baca gazlarından karbon dioksitin tutulması, yakma sonrası tutum olarak ele alınır. Baca gazları,

direkt atmosfere salınmak yerine gaz akımındaki mevcut karbon dioksitin (tipik olarak hacimce %3-15) çoğunluğu bu gazdan ayrılır. Karbon dioksit bir depo haznesine sevk edilir ve geriye kalan baca gazları da atmosfere salınır. Genel olarak karbon dioksit ayrışımı için kimyasal, sıvı bir çözücü kullanılır. Modern bir pulverize kömür santrali ya da doğalgaz santrali için bugünkü yanma sonrası tutum sistemleri monoetanolamin gibi organik çözücü kullanılır. Bundan başka teknikler de düşünülmektedir ancak henüz gelişim döneminde.

Yakma öncesi karbon dioksit tutulması

Yakma öncesi sistemleri, esas olarak karbon monoksit ve hidrojen içeren bir karışımı üretmek için buhar ve hava ya da oksijen ile temel yakıtı reaktörde işlemlerden geçirir. Karbon dioksit ile birlikte biraz daha hidrojen, ikinci bir reaktörde (shift – dönüşüm reaktöründe) buharlı karbon monoksitin reaksiyonu ile üretilir. Hidrojen ve karbon dioksitten oluşan karışım daha sonra karbon dioksit gazı buharına ve hidrojen buharına ayrıştırılabilir. Karbon dioksit depolanırsa, hidrojen, elektrik ve/veya ısı üretmek için yakılan karbonsız enerji taşıyıcısına dönüştürülebilir. İlk yakıt dönüşüm basamaklarının yanma sonrası sistemlerinde daha ayrıntılı ve masraflı olmasına rağmen, dönüşüm reaktörü ile elde edilen karbon dioksitin yüksek konsantrasyonları (tipik olarak kuru temelde hacimce %15-60) ve bu uygulamalarda rastlanan yüksek basınç, karbon dioksit ayrışımı için daha elverişlidir. Yanma öncesi sistemlerinden gazlaştırma üniteli kombine çevrim santrali teknolojisi kullanılan güç santrallerinde de yararlanılabilir.

Oksi yanma sistemlerinde karbon dioksitin tutulması

Bu tip sistemlerde, çoğunlukla su buharı ve karbon dioksit olan bir baca gazı elde etmede temel yakıtın yakılması için hava yerine oksijen kullanılır. Böylece yüksek karbon dioksit konsantrasyonlu (hacimce %80'den fazla) bir baca gazı elde edilir. Sonrasında su buharı, gaz akımının soğutulması ve

sıkıştırılması ile ortadan kaldırılır. Oksi yanma, bugün çoğu projelerde yerine getirilen %95-99 saflıkta, havadan oksijenin ayrılması işlemi gerekmektedir. Eğer yakıt saf oksijende yakılırsa sıcaklık çok fazla olur, ancak karbon dioksit ve/veya su bakımından zengin baca gazları, daha hafifletilmesi için yakıcılarda tekrar kullanılabilir. Oksijen genellikle düşük derecede havanın ayrıştırılması ile üretilir ve membran gibi yakıtta oksijen sağlayacak teknikler geliştirilmektedir.

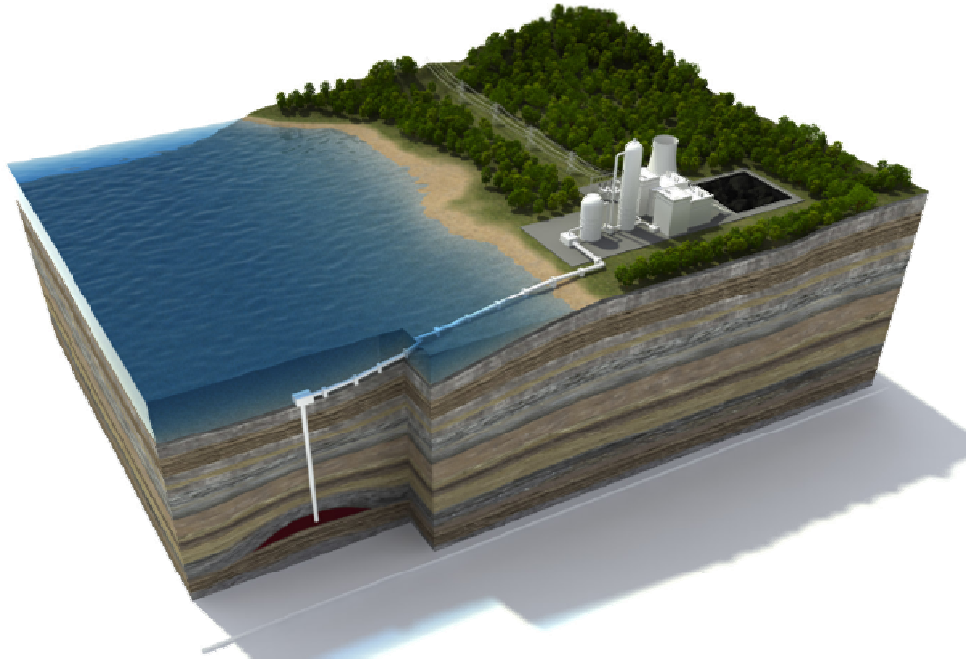
Endüstriyel işletme akımlarından karbon dioksitin tutulması

Yukarıca bahsedilen üç temel yaklaşımın dışında bir sistem olarak kabul edilen endüstriyel işletmede gaz akımlarından karbon dioksit tutumu, 80 yıldan beri yapılmasına rağmen tutulan karbon dioksitin çoğunluğu depolamaya yönelik hiçbir dürtü veya gereksinim olmadığı için atmosfere bırakılmaktadır. Karbon dioksit tutumunun işletme akımlarındaki günümüz örnekleri, doğal gazın arıtılması ve amonyak, alkol ve sentetik likit yakıtlar için hidrojen içerikli sentetiklerin üretimi olarak gösterilebilir. Bu bahsedilen örneklerde, karbon dioksitin tutumu için kullanılan çoğu teknoloji, yakma öncesi tutumda kullanılan teknoloji ile de benzer türdendir. Karbon dioksit kaynağı olan diğer endüstriyel işletme akımları, demir ve çelik üretimi, yiyecek ve içecek imalatında fermantasyon işlemlerini kapsamaktadır. Bu işlemlerde de genel olarak yakma sonrası tutum, oksi yanma ve yakma öncesi tutum için uygulanan benzer teknikler söz konusudur.

2.4.2. Karbon dioksitin depolanması

Jeolojik depolama

Karbon dioksitin jeolojik depolanması için üç çeşit jeolojik formasyondan söz edilebilir : Petrol ve gaz rezervleri, derin tuz formasyonları ve işletilmeyen kömür yatakları. Her üç durumda da karbon dioksitin yeryüzünün altındaki bir kaya formasyonuna jeolojik depolanması, yüksek basınçta enjekte edilmesi ile başarılmıştır (Şekil 2.4). Doğalgaz, petrol ya da tuzlu su barındıran veya önceden barındırmış gözenekli kaya formasyonları, karbon dioksit depolanması için muhtemel adaylardır. Uygun depo formasyonları hem kıyıda hem denizden açıkta oluşabilir (içerisi sedimentlerle dolmuş, kabukta oluşan büyük ölçekli doğal çöküntü alanları). İleride işletilmesi mümkün olmayan kömür yatakları da karbon dioksit depolanması için uygun olabilir ve yeterli geçiciliği sağlayabilirler. Kömür yataklarında karbon dioksit depolama yöntemi ile metan üretimi gelişimi halen deneme aşamasındadır.

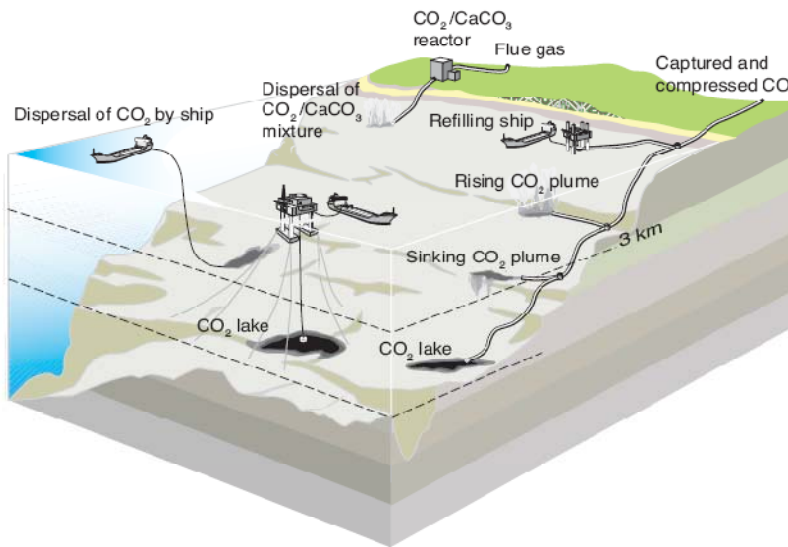


Şekil 2.4. Karbon dioksitin jeolojik depolanması [Bellona Report, 2009]

Karbon dioksitin jeolojik depolaması, üç endüstriyel ölçekli projede sürdürülmektedir (1Mt CO₂/yıl ve üzeri projeler) : Kuzey Denizi'ndeki Sleipner Projesi, Kanada'daki Weyburn Projesi ve Cezayir'deki In Salah Projesi. Atmosfere salınacak ortalama 3-4 Mt CO₂/yıl tutulmuş ve jeolojik formasyonlarda depolanmıştır [IPCC, 2007].

Okyanuslara depolama

Muhtemel bir karbon dioksit depolama yöntemi de, karbon dioksitin yüzyıllar boyunca atmosferden uzaklaştırılacağı derin okyanuslara (1000 m'den daha büyük derinliklere) direkt olarak enjekte edilmesidir. Bu da karbon dioksitin borular ya da gemiler aracılığıyla, su sütununda veya deniz tabanında enjekte edileceği depolama sahasına taşınmasıyla başarılabilir (Şekil 2.5). Dağılmış ve çözülmüş karbon dioksit, sonradan küresel karbon döngüsünün bir parçası haline gelebilir. Okyanusal depoalama, henüz bir pilot ölçekte konumlandırılmamış veya denenmiştir. Halen araştırma safhasındadır. Ancak küçük ölçekli saha deneyimi ile karbon dioksitin okyanuslara depolanmasının 22 yıllık teorik, laboratuvar ve modelleme çalışmaları bulunmaktadır [IPCC, 2007].



Şekil 2.5. Karbon dioksitin okyanuslara depolanması [Bellona Report, 2009]

3. KABARCIKLI KOLONLAR

Kabarcıklı kolonlar, çok fazlı reaktör olarak sayılır; çok fazlı reaktörler, genel üç kategoriye ayrılır : Sabit yatak reaktörler, akışkan yatak reaktörler ve kabarcıklı kolon reaktörler. Kabarcıklı kolon basitçe, tabanında gaz dağıtıcısı bulunan silindirik bir tank gibi düşünülebilir [Degaleesan ve ark., 2001]. Kabarcıklı kolonların yükseklik/çap oranı genelde 1,5-20 aralığında değişir [Harriot, 2003]. Gaz, dağıtıcıdan bir sıvı fazın içine ya da sıvı-katı süspansiyonunun içine dağıtılır. Bu reaktörler, katı fazla çalışılıyorsa çamur faz kabarcıklı kolon olarak anılır. Kabarcıklı kolonlar, çok fazlı kontaktör olarak değerlendirilir ve kimyasal, petrokimyasal, biyokimyasal ve metalurjik endüstrilerde sıkça kullanılır [Degaleesan ve ark., 2001]. Genellikle, oksidasyon, klorinasyon, alkilasyon, polimerizasyon, hidrojenasyon, sentetik yakıtların eldesi gibi reaksiyon içeren kimyasal proseslerde ve fermantasyon, biyolojik atıksu arıtımı gibi biyokimyasal proseslerde kullanılırlar [Shah ve ark., 1982; Prakash ve ark., 2001]. Bazı çok iyi bilinen kimyasal uygulamaları, ulaşım için yakıt elde etmek için kullanılan indirekt kömür gazlaştırılması, yani Fisher-Tropsch prosesi, metanol sentezi, petrol türevi yakıtlara göre çevresel olarak çok daha fazla avantajlı olan diğer sentetik yakıtların üretilmesidir [Degaleesan ve ark., 2001].

Kabarcıklı kolonlar, gerek tasarımda gerek de işletmede olsun diğer reaktörlerle karşılaştırıldığında daha fazla kullanım alanına sahiptir ve avantajlıdır. İlk olarak, mükemmel bir ısı ve kütle transferi karakteristiğine sahiptirler, yani yüksek kütle ve ısı transfer katsayıları sağlarlar. Hareketli kısım az olduğundan ve kompakt bir sistem olduğundan bakım ve işletme maliyetleri düşüktür [Degaleesan ve ark., 2001]. Endüstriyel öneminden ve geniş uygulama alanından dolayı, kabarcıklı kolonların tasarımı ve ölçek ayarlamasını yapmak, operasyonunu karakterize edecek hidrodinamik ve işletme parametrelerini araştırmak son 20 yılda büyük önem kazanmıştır [Kantarıcı ve ark., 2005].

Son zamanlarda kabarcıklı kolonlar üzerinde yapılan çalışmalarda daha çok gaz tutulması çalışmalarına, kabarcık karakteristikleri belirlenilmesine, akış rejimi ve sayısal akışkanlar dinamiği araştırmalarına, lokal veya ortalama ısı transferi ve kütle transferi konularına odaklanılmıştır. Kolon boyutlarının etkisi, kolon içi tasarımları, işletme koşulları (sıcaklık ve basınç), gaz hızının etkisi, sistemde varsa katının tipi ve konsantrasyonlar parametre olarak alınmıştır ve bunların üzerinde çalışmalar yürütülmüştür [Kantarıcı ve ark., 2005].

3.1. Akış Dinamiği ve Rejim Analizi

Akışkanlar dinamiğinin karakterizasyonu, kabarcıklı kolonların çalışması ve performansı açısından çok önemlidir. Literatüre göre, parametre araştırmasında elde edilen deneysel sonuçların kolondaki akış rejimine oldukça bağlıdır. Kabarcıklı kolondaki akış rejiminin sınıflandırılması ve ayarlanması, kolonda uygulanan gaz akış hızına bağlı olarak yapılır [Kantarıcı ve ark., 2005]. Genel olarak kabarcıklı kolonlarda üç tip akış rejimi gözlemlenir : homojen rejim (kabarcıklı akış), heterojen rejim (churn türbülantı) ve slag akış rejimi [Hyndman ve ark., 1997]. Ayrıca, “köpüklenme rejimi” olarak adlandırılan bir rejim de vardır, fakat bu rejime kabarcıklı kolonlarda pek rastlanmaz [Kantarıcı ve ark., 2005].

Kabarcıklı akış rejimi, yani homojen akış rejimi, yarı kesikli kabarcıklı kolonlarda 5 cm/s'den daha düşük gaz hızlarında elde edilmektedir [Hills, 1974; Fan, 1989]. Bu akış rejimini, düşük boyutlu ve yükselme hızına ship kabarcıklar karakterize eder [Schumpe ve Grund, 1986]. Kolon kesit alanının tümünde üniform kabarcık dağılımı ve göreceli olarak daha nazik bir karışma söz konusudur [Hyndman ve ark., 1997]. Pratikte, kabarcıkların birleşip büyük bir kabarcık oluşturması veya kabarcıkların bölünmesi yoktur; dolayısıyla sistemdeki kabarcık boyutu tamamen dağıtıcı tasarımı ve sistem şartlarına bağlıdır [Thorat ve Joshi, 2004]. Kawagoe ve arkadaşları (1976),

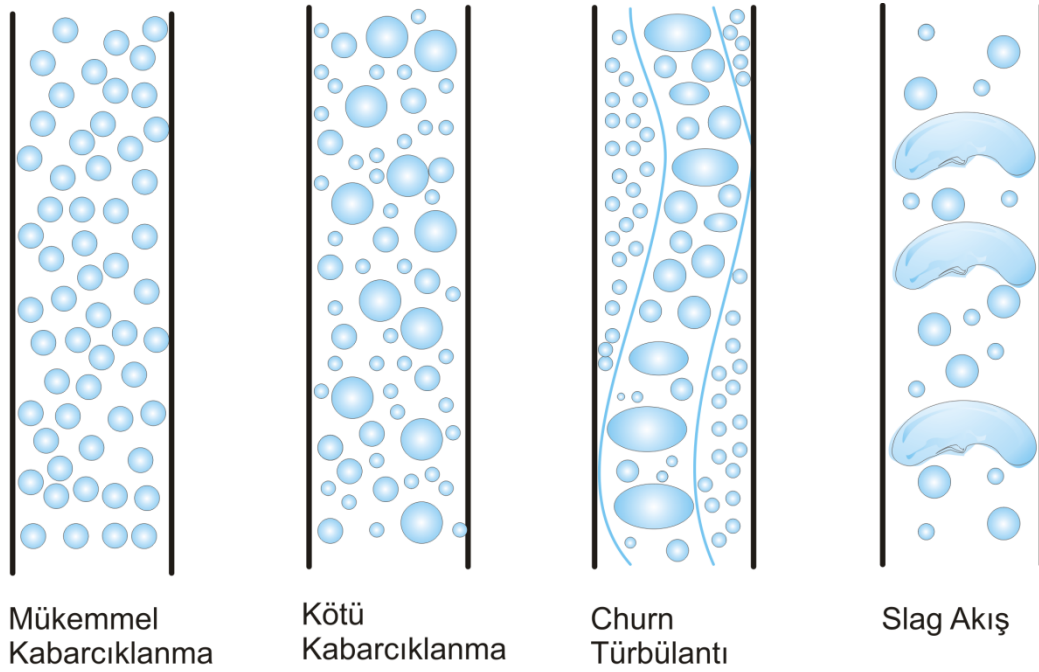
kabarcıklı akış rejiminde gaz tutulmasının artan gaz hızıyla doğrusal olarak arttığını bulmuşlardır.

Churn türbülant rejimi, yani heterojen rejim, kesikli kolonlarda 5 cm/s'den daha yüksek gaz hızlarında gözlemlenir. Bu rejim, bozulmuş homojen gaz-sıvı sisteminin gelişmiş türbülant hareketinden ve sıvının devridaiminden meydana gelir. Bunun sonucu olarak da yüksek gaz akış hızından dolayı yatışkın olmayan akış modelleri ve birleşme sonucunda oluşan alıkonma süresi düşük büyük kabarcıklar oluşur. Kabarcık boyutları çok değişkendir [Schumpe ve Grund, 1986]. Kabarcıkların birleşmesi ve bölünmesinden dolayı çok geniş bir kabarcık boyutu dağılımı vardır. Ortalama kabarcık boyutu, birleşme ve bölünme tarafından kontrol edilir; bu da meydana gelen enerji kaybı hızı kontrolündedir [Thorat ve Joshi, 2004]. Kuvvetli karışma, kabarcıkların kümelenmesi ve geniş kabarcık boyutu aralığı da Hyndman ve arkadaşları (1997) tarafından gösterilmiştir. Matsuura ve Fan (1984), bu rejimdeki küçük ve büyük kabarcıkların boyutlarının bir kaç milimetreden bir kaç santimetreye kadar değiştiğini söylemişlerdir. Şu ana kadar, kabarcıkların birleşme ve bölünmesi bağlantılı taşınım eşitliklerini nümerik olarak çözerek çalışılmıştır [Wu ve ark., 2001; Millies ve Mewes, 1999; Hibiki ve Ishii, 2000; Olmos, 2001]. Churn türbülant akışı daha çok endüstriyel boyutlardaki büyük çaplı kolonlarda gözlenir [Hyndman ve ark, 1997]. Gaz-sıvı kütle transfer katsayısının bu akış rejiminde (heterojen), homojen akış rejimine göre daha düşük olduğu gösterilmiştir. Fakat, buna rağmen, kabarcıklı kolonlar kimyasal endüstride daha çok heterojen akış şartlarında çalıştırılır ve etkili arayüz alan ölçümlerinin, tasarım parametrelerinin tahminlerinin ve reaktör modellemelerinin yorumlanması farklı iki kabarcık sınıfı baz alınarak yapılır [Schumpe ve Grund, 1986]. Bu modellerde, küçük ve büyük kabarcıkların tutulma oranlarına, kolonda yükselme hızlarına ve gaz hızı kesirlerine ihtiyaç duyulmaktadır.

Slag akış rejimine yalnızca laboratuvarlardaki küçük çaplı kolonlardaki yüksek gaz hızlarında rastlanır [Hyndman ve ark, 1997]. Hills ve Miller'a göre,

kabarcık slaglarının oluşumuna 15 cm'ye kadar çapı olan kolonlarda rastlanır [Hills, 1976; Miller 1980]

Şekil 3.1'de, anlatılan bu rejimler arasındaki fark açıkça görülmektedir.

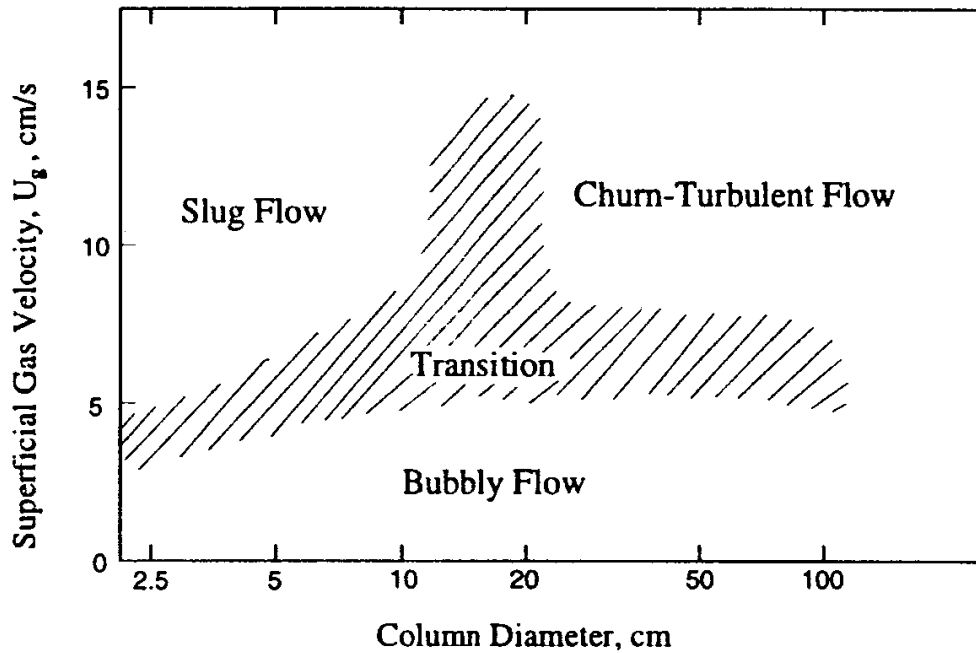


Şekil 3.1. Kabarcıklı kolonlarda olası akış rejimlerinin şematik gösterimi

Thorat ve Joshi, geçiş bölgesindeki gaz hızı, kolon ebatına (çapı, dağılma yüksekliği), dağıtıcı tasarımına ve sistemin fiziksel özelliklerine bağlı olduğunu söylemiştir [Thorat ve Joshi, 2004]. Yazarlar ayrıca, kritik gaz tutulmasını da (yani geçiş bölgesindeki tutulma) incelemişlerdir ve kritik gaz tutulmasının azalan en-boy oranı ve dağıtıcı delik çapıyla arttığı sonucuna varmışlardır. Krishna ve çalışma arkadaşları ise, gaz yoğunluğunun akış rejimi geçişine etkisini incelemişlerdir ve artan gaz yoğunluğuyla birlikte, rejim geçiş hızının da arttığını söylemişlerdir [Krishna ve ark, 1994].

Akış rejimlerini karakterize etmek için belirli gaz hızı aralıkları verebilmek mümkün değildir. Değişik koşullarda çalışan sistemlerde farklı çalışmalar yapılmıştır ve hepsi de rejim sınırları ve rejim geçişleri için farklı sonuç

vermiştir [Kantarıcı ve ark., 2005]. Örneğin Hyndman ve çalışma arkadaşları, gaz hızının 4 cm/s'nin altında olduğu durumlarda akış rejiminin kabarcıklı olduğunu söylemişlerdir [Hyndman ve ark., 1997]. Pino ve çalışma arkadaşları da aynı rejim için aynı hızı önermişlerdir [Pino ve ark., 1992]. Schumpe ve Grund, homojen (kabarcıklı) açık rejiminin hızın 5 cm/s'nin altında olduğu durumlarda gözlemlendiğini söylemişlerdir. Bukur ve Daly, churn-türbülant akış rejiminin gaz hızının 2-5 cm/s olduğu durumlarda meydana geldiğini açıklamışlardır [Schumpe ve Grund, 1986; Daly, 1987]. Literatürde olası akış rejimlerinin sınırlarını belirleyen bir kaç çalışma yapılmıştır [Shah ve ark., 1982; Fan ve ark., 1985; Deckwer ve ark., 1980]. Şekil 3.2'de Deckwer ve çalışma arkadaşları tarafından önerilen akış rejimi haritası verilmiştir [Deckwer ve ark., 1980]. Burada, düşük viskoziteye sahip sıvının kullanıldığı ve sıvıya göre kesikli olan kabarcıklı kolon sistemindeki akış rejiminin nicelik olarak kolon çapına ve gaz hızına bağlı olduğu görülmektedir. Şekilde kesikli olarak gösterilen yer, rejimler arasındaki geçiş bölgesini temsil eder. Fakat, kesin sınırlar çalışılan sisteme bağlıdır [Kantarıcı ve ark., 2005].



Şekil 3.2. Kabarcıklı kolonlar için akış rejimi haritası

Hyndman ve çalışma arkadaşları, gerçekte kabarcıklı akışkan churn türbülant akışına geçiş artan gaz hızında aşamalı olduğunu söylemişlerdir [Hyndman ve ark, 1997]. Fakat, kabarcıklı kolonların karmaşık hidrodinamiğini modellerken bu aşamalı proses yerine geçiş noktası belirlemek daha kullanışlı olacaktır [Kantarıcı ve ark., 2005]. Çizelge 3.1’de hava-su sistemi için literatürde yapılan bazı çalışmaların rejim geçiş özellikleri verilmiştir.

Çizelge 3.1. Kabarcıklı kolonlarda hava-su sistemi için deneysel belirlenen geçiş hızı ve gaz tutulma değerleri [Joshi ve ark., 2001]

Araştırma Grubu	$U_{G,geçiş}$ (m/s)	$\varepsilon_{G,geçiş}$
Bach ve Pilhofer (1978)	0,046	0,277
Oels ve arkadaşları (1978)	0,039	0,178
Krishna ve arkadaşları (1991)	0,033	0,198
Yamashita ve Inoue (1975)	0,040	0,234
Hyndman ve arkadaşları (1997)	0,037	0,137

4. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Gaz tutulması, kabarcıklı kolonlardaki taşınım olaylarını karakterize eden tasarım amaçları için kullanılan boyutsuz bir parametredir [Luo ve ark., 1999]. Temel olarak, gaz kabarcıklarından meydana gelen gaz fazının hacim oranıdır. Benzer olarak sıvı fazı için de karakterize edilebilir. Bütün çalışmalarda gaz tutulması da çalışılır; çünkü kabarcıklı kolonların tasarımı ve analizinde önemli rol oynamaktadır [Kantarci ve ark., 2005]. Havalandırılmalı sistemlerde çalışılırken, kütle transferini hesaplamak da ($k_L a$) zorunludur. Bunun için bir çok korelasyon mevcuttur ve bu korelasyonların çoğu için de sıvı tutulmasının bilinmesi gerekmektedir. Kabarcıklı kolonlarda gaz tutulması için de çeşitli korelasyonlar geliştirilmiştir ve bu korelasyonlar sayesinde kolondaki gaz tutulmasını hesaplamak mümkündür. Çizelge 4.1'de gaz tutulması için geliştirilen korelasyonların bir kısmı verilmiştir [Dudley, 1995].

Çizelge 4.1. Kabarcıklı kolonda gaz tutulması için geliştirilen korelasyonlar

İsim	Korelasyon	Referans
Joshi	$\varepsilon_G = \frac{U_G}{0,3 + 2U_G}$	Joshi ve Sharma (1979)
Koide	$\varepsilon_G = \frac{U_G}{31 + \beta(1-e)\sqrt{U_G}}$ $\beta = 4,5 - 3,5 \exp(-0.064.d_c^{1,3})$ $e = -0,18 U_G^{1,8} / \beta$	Joshi ve Shah (1981)
Lockett	$U_G(1 - \varepsilon_G) + U_L \varepsilon_G = U_b \varepsilon_G(1 - \varepsilon_G)^{2,39} + (1 + 2,55 \varepsilon_G^3)$	Lockett ve Kirkpatrick (1975)

Çizelge 4.1. (Devam) Kabarcıklı kolonda gaz tutulması için geliştirilen korelasyonlar

Schugeri	$\varepsilon_G = 0,91 U_G^{0,19} / \sqrt{g.d_b}$	Winkler (1981)
Kulkarni	$\frac{U_G}{\varepsilon_G} + \frac{U_L}{1 - \varepsilon_G} = \frac{3.U_b(1 - \varepsilon_G)/(1 - \varepsilon_G^{5/3})}{1 + (2 + 3\gamma/\mu_L)(1 - 0,628/\sqrt{\text{Re}})}$ $\text{Re} = \rho_L.U_b.d_b / \mu_L$	Kulkarni ve ark. (1987)
	$\varepsilon_G = 1,07 Fr^{1/3}$	Kawase ve Moo-Young (1987)
	$\varepsilon_G = 0,32(1 - \varepsilon_G)^4 Bo^{0,21} Ga^{0,086} Fr(\rho_G / \rho_L)^{0,068}$	Sada ve ark (1984)
	$\frac{\varepsilon_G}{1 + \varepsilon_G} = 0,0625 \left(\frac{U_G}{\nu_L g} \right)^{1/4}$	Kawase ve ark. (1992)
	$\varepsilon_G = 0,505 U_G^{0,47} \left(\frac{0,072}{\sigma} \right)^{2/3} \left(\frac{0,001}{\mu_L} \right)^{0,05}$	Hikita ve Kikukawa (1974)
	$\varepsilon_G = 0,009 + 296 U_G^{0,44} (\rho_L \text{ veya } \rho_{sl})^{-0,98} \sigma_1^{-0,16} \rho_G^{0,19}$	Reilley ve ark. (1986)
	$\varepsilon_G = \frac{1}{2 + (0,35/\nu_G)(\rho_L \sigma / 72)^{1/3}}$	Hughmark (1967)

Kabarcıklı kolonlar için bir çok korelasyon geliştirilmiştir. Bu korelasyonların bazılarında kabarcık boyutuna ihtiyaç duyulmaktadır. Kabarcık boyutu, Calderbank korelasyonu ile hesaplanabilir [Joshi ve Sharma, 1979].

$$d_b = 4,15 \frac{\sigma^{0,6}}{\left(\frac{P_G}{U_L}\right)^{0,4} \rho_L^{0,2}} \sqrt{\varepsilon_G} + 9.10^{-4} \quad (4.1)$$

Bu korelasyon bir bölmeli tanktaki 6 kanatlı disk türbin için geliştirilmiştir, fakat Joshi ve Sharma tarafından difüze hava sistemleri için önerilmiştir [Joshi ve Sharma, 1979].

Gaz giriş gücü aşağıdaki denklemle hesaplanır.

$$P_G = Q_G P_a \ln \frac{P_a}{P_s} \quad (4.2)$$

Gaz-sıvı arayüz alanı;

$$a = \frac{6\varepsilon_G}{d_b} \quad (4.3)$$

Kabarcığın serbest yükselme hızı [Winkler, 1981];

$$U_b = \sqrt{\frac{2\sigma}{\rho d_b} + 0,5.g.d_b} \quad (4.4)$$

Kawase ve Moo-Young ise, çalışmalarında sıvı tutulma oranının (ε_L) Froude sayısı ile değiştiğini söylemişlerdir [Kawase ve Moo-Young, 1987s]. Froude sayısının tanımı;

$$Fr = \frac{U_G}{\sqrt{gH}} \quad (4.5)$$

Olduğuna göre gaz tutulmasının, gaz hızıyla ve yükseklikle değiştiğini kabul etmişlerdir.

İtyokumbul ve çalışma arkadaşları ise, gaz tutulma oranının direkt gaz hızıyla değiştiğini söylemişlerdir ve farklı akış hızlarında farklı katsayılarla denklemler türetmişlerdir [İtyokumbul ve ark, 1994].

$$\varepsilon_L \propto U_G^n \quad (4.6)$$

Burada n, farklı akış rejimlerine göre değişen bir üstür.

Deneylerden elde edilen sonuçlara göre, gaz hızı 0-0,008 m/s aralığındayken gaz tutulması sıvı hızından bağımsızdır. Gaz hızı 0-0,025 m/s aralığında olduğunda ise, gaz tutulması aşağıdaki gibi tanımlanabilir;

$$\varepsilon_L = 5,9U_G \quad (4.7)$$

Bu sonuç, literatürde gözenekli gaz dağıtıcılı farklı sistemlerde elde edilen sonuçlarla uyum içerisindedir [Deckwer ve ark., 1974; Schulman ve Molstad, 1950; Argo ve Cova, 1965]. Bu sistemlerde elde edilen sonuç ise aşağıdaki gibidir;

$$\varepsilon_L = 5,6U_G \quad (4.8)$$

Bu referanslarda kullanılan kolonların çapları, İtyokumbul ve çalışma arkadaşlarının kullandığı kolonun çapından daha yüksektir ve kolon çapının 0,06 m'den daha fazla olduğu durumlarda, kolon çapının gaz tutulmasında ihmal edilebileceği söylenmiştir [İtyokumbul ve ark, 1994]. Bu Hughmark'ın sonuçlarıyla da uyum göstermektedir [Hughmark, 1967].

Dhaoudi ve çalışma arkadaşları, kabarcıklı kolonlardaki gaz-sıvı kütle transferi davranışını incelemişlerdir. Deneylerde kullandıkları kabarcıklı kolon, 6 m uzunluğundadır ve iç çapı 0,15 m'dir. Çözünmüş oksijen profilini

elde edebilmek için desorpsiyon yöntemini kullanmışlardır. Değişik gaz hızlarında, oksijenin konsantrasyon değişimini verecek analitik bir yöntem uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlar literatür ile karşılaştırılmıştır [Dhaouadi ve ark, 2008].

Dhaouadi ve çalışma arkadaşları, çalışmalarına gaz tutulmasının hesaplamayla başlamışlardır. Gaz hızını 5, 8, 15 cm/s olarak değiştirirken, sıcaklığı 15, 25 ve 30°C olarak seçmişlerdir. Ardından, oksijen desorpsiyonu yöntemiyle hacimsel kütle transfer katsayılarını elde etmişlerdir. MODEST yazılımıyla elde edilen sonuçlar, literatür ile karşılaştırılmıştır. Literatürde yer alan iki denklem kullanılmıştır. Bunlardan bir tanesi Deckwer ve çalışma arkadaşlarının elde ettiği korelasyon, diğeri ise Takavoli ve çalışma arkadaşlarının elde ettiği korelasyondur [Deckwer ve ark, 1983; Takavoli ve ark, 1995]. Deckwer ve çalışma arkadaşlarının kütle transferi hesabında önerdikleri denklem aşağıdadır Dhaouadi ve ark, 2008].

$$k_La = 0,467u_G^{0,82} \quad (4.9)$$

Eşitlik 4.9'dan da görüldüğü gibi Deckwer ve çalışma arkadaşlarının hacimsel kütle transfer katsayısı için önerdikleri korelasyon gaz hızına bağlıdır. Dhaouadi ve çalışma arkadaşlarının makalelerinde sunduğu sonuçlar, bu korelasyon ile uyum içindedir. Takavoli ise, Deckwer'in önerdiği korelasyona bir terim daha eklemiştir, o da viskozitedir. Takavoli'nin geliştirdiği korelasyon ise aşağıdadır.

$$k_La = 0,014u_G^{0,66}\mu^{-0,5} \quad (4.10)$$

Dhaouadi ve çalışma arkadaşlarının elde ettikleri deneysel ve nümerik sonuçlarla, Takavoli'nin korelasyonundan elde ettikleri sonuçlar uyum içerisinde değildir. Bu korelasyonla elde edilen değerler, normal değerlere göre çalışılan aralıkta daha yüksek çıkmıştır [Dhaouadi ve ark, 2008].

Cerri ve çalışma arkadaşları, havalı sistemlerde ortalama kabarcık çaplarının hesaplanması için çalışmalar yapmışlardır. Yeni bir metodoloji önermişlerdir. Yarı-teorik metod, Higbie'nin penetrasyon teorisine dayalıdır. Deneysel olarak elde edilen gaz tutulması (ε) verileri ve hacimsel kütle transfer katsayı değerleri ($k_L a$) kullanılmıştır. Hem gaz tutulması hem de kütle transferi katsayı değerleri farklı havalı sistemler için elde edilmiştir. Bunlar, üç farklı skalaya sahip eş eksenli havalı tüp reaktörler ve üç değişik havalı biyoreaktörlerdir (eş eksenli havalı tüp reaktör, kabarcıklı kolon reaktör, split havalı reaktör). ($k_L a$) parametresi, k_L ve a komponentlerine ayrılmıştır. Ortalama kabarcık çapı ve taşınımlı oksijen transfer katsayısının kabarcıklı kolonlar için gaz hızına (u_G) bağlı olmadığı ispatlanmıştır [Cerri ve ark., 2009].

Cerri ve çalışma arkadaşları, çalışmalarında 2 dm^3 hacme sahip kabarcıklı kolon kullanmışlardır. Akışkanlar, sıvı fazı için 28°C sıcaklığa sahip distile su ve gaz fazı içinse hava seçilmiştir. Kullandıkları kabarcıklı kolonda, gaz dağıtıcısı olarak 0,5 mm deliklere sahip plaka kullanılmıştır. Gaz hızı, 0-0,12 m/s arasında değiştirilmiştir. Kolonun karakterizasyonu için gerekli olan gaz tutulması hesaplandıktan sonra, kütle transfer katsayısı Higbie'nin penetrasyon teorisine bağlı olarak elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlara bakıldığında, yalnızca kabarcıklı kolonlarda değil, çalışılan aralıkta bütün reaktörlerde meydana gelen oksijen transferinin gaz hızına bağlı olmadığı gösterilmiştir. Ayrıca, gerekli denklikler elde edilerek, ortalama kabarcık çapının bulunması için de aşağıdaki denklik elde edilmiştir Cerri ve ark., 2009].

$$d_b = \left(\frac{4D_L 0,694}{\pi(1-\varepsilon)(\frac{k_L}{d_b})^{2/5}} \right) \left(\frac{g\Delta\rho}{\rho_L} \right)^{1/5} \quad (4.11)$$

Abu-Zahra ve çalışma arkadaşları, yaptıkları çalışmada 600 mWe gücünde bitümlü şist ile çalışan bir güç santralinden çıkan karbon dioksitin,

monoetanol amin çözeltisinin absorpsiyon/desorpsiyon yoluyla tutulmasını ASPEN PLUS ve RADFRAC Subroutine programlarını kullanarak optimize etmişlerdir. Bu optimizasyonla, monoetanol amin (MEA) çözeltisinin rejenerasyonunda gerekli olan enerji ihtiyacının azaltılması amaçlanmıştır. Karbon dioksit bertarafı yüzdesinin etkisi, MEA konsantrasyonu, zayıf çözeltinin yüklenmesi, sıyırıcı çalışma basıncı ve zayıf çözeltinin sıcaklığı parametreleriyle çalışılmıştır. Majör enerji tasarrufunun, zayıf çözelti yüklemesinin, amin çözeltisinin konsantrasyonunun ve sıyırıcı çalışma basıncının optimize edilmesiyle sağlanabileceği ortaya çıkmıştır [Abu-Zahra ve ark., 2007].

Dhanasekaran ve Karunanithi ise, yeni bir tekniğe sahip kabarcıklı kolondaki hacimsel kütle transfer katsayısını elde etmek için teorik ve deneysel çalışmalar yapmışlardır. Bu çalışmada, hibrid kabarcıklı kolon döner ve pistonlu delikli plakalara sahiptir. Sistem ters akımlı olarak çalıştırılmıştır. Çalışmada, oksijensiz suya oda sıcaklığında ($27\pm1^{\circ}\text{C}$) oksijenin absorpsiyonu yapılmıştır. Karıştırma hızı, gaz hızı, sıvı hızı ve plaka aralıklarının hacimsel kütle transferi üzerindeki etkisi incelenmiştir ve hepsinin önemli olduğu belirtilmiştir. Örneğin, sabit gaz ve sıvı hızlarında karıştırma hızında yapılan bir artış, gaz kabarcıklarının parçalanmasını belirgin kılar ve oksijenin kütle transferi oldukça artar. Ayrıca, sıvı hızı arttıkça, kütle transfer hızı da önemli derecede artmıştır. Kolonun içindeki rafların arasında boşluk, raf sayısını artırmak suretiyle azaltıldığında, kütle transferi yüksek gaz hızlarında artmıştır. Hacimsel kütle transferi için, deneysel verilere uygun bir korelasyon geliştirilmiştir ve geliştirilen bu korelasyon, herhangi bir hibrid kolonda hacimsel kütle transferinin bulunmasında bu çalışmada çalışılan aralıklarda %95'lik bir doğruluk payı içerisinde kullanılabilir [Dhanasekaran ve Karunanithi, 2010].

Dhanasekaran ve Karunanithi, çalışmalarında 10 cm iç çapa sahip, 120 cm uzunluğunda bir kabarcıklı kolon kullanmışlardır. Gaz hızını, 2,12, 3,18 ve 4,24 cm/s olarak değiştirirken, sıvı hızını 0,035, 0,07 ve 0,105 cm/s olarak

seçmişlerdir. Akışkan olarak sıvı için oda sıcaklığında, oksijeni giderilmiş su ve gaz içinse hava kullanmışlardır. Yapılan deneyler sonucunda hacimsel kütle transfer katsayısı için regresyon yoluyla bir korelasyon geliştirmişlerdir. regresyon katsayısı 0,96 olan bu korelasyon aşağıda verilmiştir [Dhanasekaran ve Karunanithi, 2010].

$$k_L a = 0,0075(u_L)^{1,031}(\epsilon)^{0,2539} \quad (4.12)$$

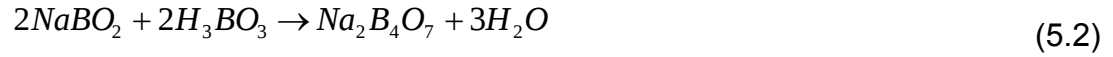
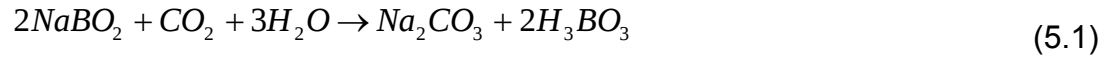
Deney sonuçlarına bakıldığında, artan gaz hızıyla gaz tutulmasının arttığı görülmektedir. Ayrıca, sıvı hızının artmasıyla da kütle transferi katsayısının keskin bir şekilde arttığı belirtilmiştir. Elde edilen bu korelasyonun, sıvı hızının 0,105 cm/s'ye kadar olduğu durumlarda kullanılabileceği belirtilmiştir [Dhanasekaran ve Karunanithi, 2010].

5. MATERYAL VE METOT

5.1. Sodyum Metaboratın Karbon Dioksit Tutulmasında Kullanılabilirliği

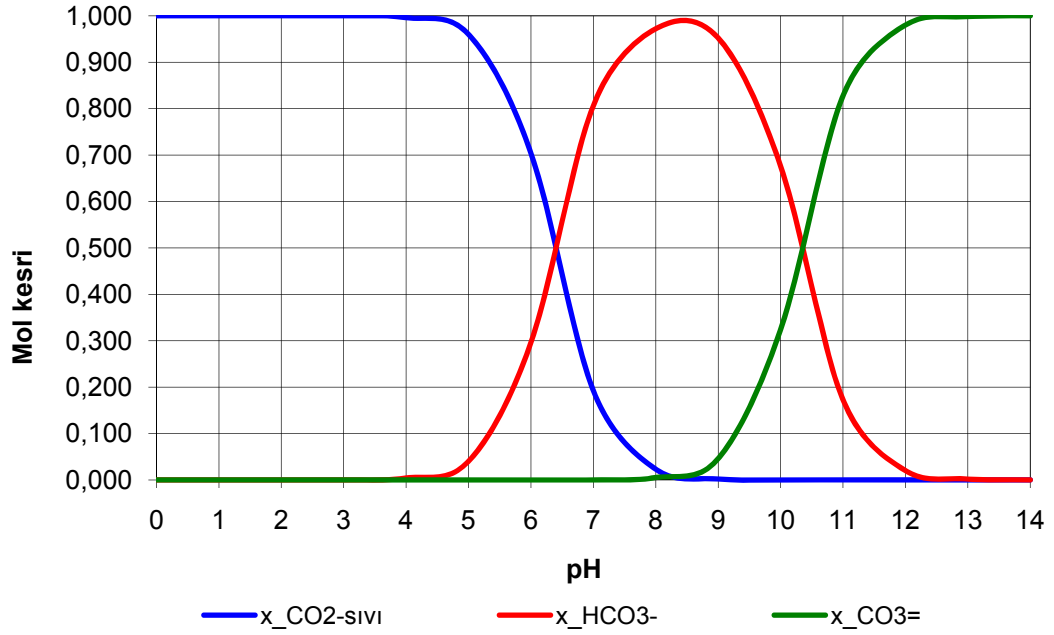
Sodyum metaborat çözeltisinin karbon dioksitle verdiği reaksiyon ya da reaksiyon mekanizması hakkında literatürde bir bilgi yoktur. Dolayısıyla, her şeyden önce sodyum metaboratın karbon dioksit tutulmasında kullanılabilirliği araştırılmıştır.

Çalışmalara başlamadan önce, karbon dioksitin sodyum metaborat çözeltisinden geçirildiğinde aşağıda verilen reaksiyonların olacağı öngörülmüştür.



Yani, öngörülen sisteme göre, sodyum metaborat çözeltisi içerisinde karbondioksit reaksiyona girerek sodyum karbonatı (veya bikarbonatı) ve borik asidi oluşturmaktadır. Daha sonra, sodyum metaborat ve borik asit de reaksiyona girerek boraksı oluşturmaktadır.

İlk reaksiyonda, sodyum karbonatın veya bikarbonatın olacağı ortamın pH'ına bağlıdır. Şekil 5.1'den de görüldüğü üzere, pH'ın 8,2'deyken karbonat iyonları oluşmaya başlar ve pH arttıkça, karbonat miktarı artarken bikarbonat miktarı azalır. Bikarbonat iyonlarının en fazla olduğu nokta ise pH'ın 8.2 olduğu zamandır.



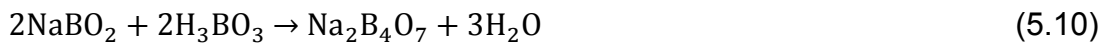
Şekil 5.1. CO_2 , HCO_3^- ve $\text{CO}_3^{=}$ konsantrasyonlarının pH ile değişimi

Ek olarak, karbonat ve bikarbonat iyonlarını numune içinde tespit edebilmek için iki farklı indikatör kullanılabilir. Bunlar metil oranj ve fenolftalein indikatörleridir. Metil oranjın kullanılabileceği minimum pH değeri 4'tür. Dolayısıyla, metil oranj ile bikarbonat iyonlarının takibi yapılabilir. Fenolftalein indikatörünün kullanılabileceği minimum pH değeri ise 8,2'dir. Şekil 5.1'e bakıldığında, bu pH değerinde karbonat iyonlarının oluşumu başlamaktadır. Bu nedenle, fenolftalein indikatörü de karbonat iyonlarının takibinde rahatlıkla kullanılır.

5.2. Sodyum Metaborat ve Karbon Dioksit Reaksiyon Kinetiğinin İncelenmesi

Yukarıda da belirtildiği gibi, literatürde sodyum metaborat ve karbon dioksitin reaksiyonuyla ilgili bir bilgi yoktur. Asıl çalışma, kimyasal reaksiyonlu absorpsiyon olduğu için reaksiyon kinetiğinin de incelenmesi gerekmektedir. Bu nedenle reaksiyonun sıcaklıkla ve başlangıç sodyum metaborat konsantrasyonu ile nasıl değiştiği incelenmiştir. Bunun için farklı sıcaklık ve konsantrasyon değerleriyle deneyler yapılmıştır.

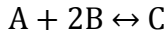
Sodyum metaborat ve karbon dioksit arasında gerçekleşen reaksiyonun mekanizması aşağıdaki gibidir.



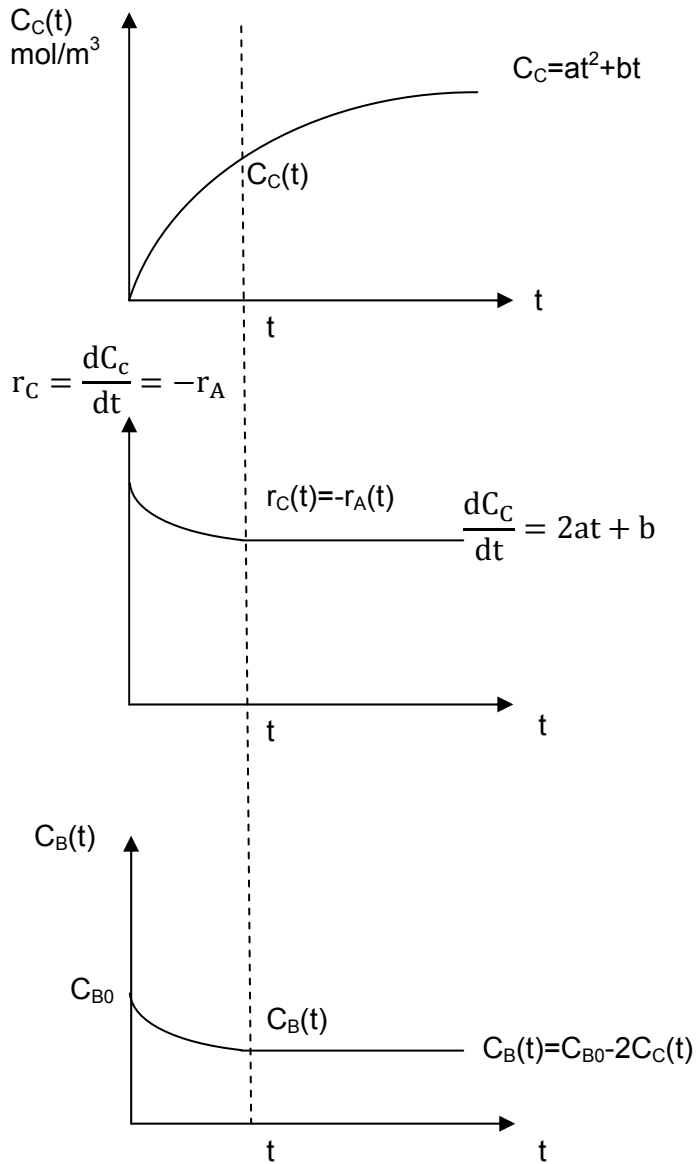
Çıkarılan bu mekanizmaya göre, su öncelikle disosiyasyon olmaktadır. Ardından sodyum metaborat suyun içerisinde sodyum ve metaborat iyonlarına ayrılmaktadır. Çözeltinin içerisinde geçirilen karbon dioksit, gaz fazından sıvı faza geçer. Çözelti içinde çözünür. Bu noktada reaksiyonlar olmaya başlar. Karbon dioksit ve suyun disosiyasyonundan gelen hidroksit iyonları, bikarbonat iyonlarını oluşturur. Daha önceden de anlatıldığı gibi ortamın pH'ına bağlı olarak, oluşan bikarbonat iyonları yeniden hidroksit iyonlarıyla

birleşerek, karbonat iyonlarını ve suyu oluşturur. Ardından oluşan karbonat iyonları ve sodyum metaboratın iyonlaşmasından ortaya çıkan sodyum iyonları birleşir ve sodyum karbonatı oluştururlar. Yine sodyum metaboratın iyonlaşmasından ortaya çıkan metaborat iyonları, suyun disosiyasyonu olmasından gelen hidrojen iyonları ve su birleşerek borik asit oluşturur. Oluşan borik asit ve sodyum metaborat da reaksiyona girerek boraksı ve suyu oluşturur.

Toplu reaksiyonlar önceki kısımda Eş. 5.1 ve 5.2 ile verilen reaksiyonlardır. Bu reaksiyonlarla ilgili literatürde hiçbir çalışma bulunmamaktadır. Dolayısıyla ana reaksiyonun (Eş. 5.1) mertebesinin belirlenmesi gerekmektedir. Bunun için Eş. 5.1, aşağıdaki gibi yeniden yazılmıştır. Burada A karbon dioksit, B sodyum metaborat, C ise sodyum karbonattır.



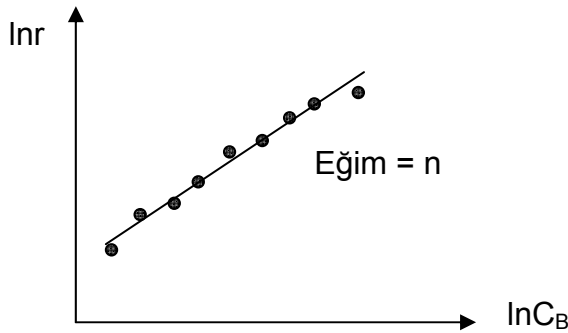
Farklı başlangıç sodyum metaborat konsantrasyonlarındaki reaksiyon hızları hesaplanarak reaksiyonun mertebesini belirlemek mümkündür. Bunun için, her bir başlangıç sodyum metaborat konsantrasyonunda yapılan deneylerde, oluşan sodyum karbonat-bikarbonat miktarı hesaplanmıştır. Reaksiyona göre, oluşan bir mol karbonat için iki mol sodyum metaborat harcanmaktadır. Reaksiyonun hız ifadesi, oluşan karbonat miktarının zamana göre değişimi ile elde edilir. Dolayısıyla, reaksiyon sonucunda oluşan sodyum karbonat miktarlarının verileriyle zamana karşı çizilen bir grafikten uygun eğilim çizgisi geçirildiğinde ve bu eğilim çizgisinin türevi alındığında, reaksiyonun hız ifadesi elde edilmiş olur.



Şekil 5.2. Reaksiyonun mertebesini hesaplamak için çizilen grafikler

Şekil 5.2'ye bakıldığında, hesaplamalarda çizilen grafikler görünmektedir. İlk grafik reaksiyon sonucu oluşan sodyum karbonat miktarının zamanla değişimini vermektedir. Buradaki verilerden uygun eğilim çizgisi geçirildiğinde polinomik bir denklem elde edilir. Bu polinomik denklemin türevi alındığında ikinci grafikte gösterilen veriler elde edilir. Yani, reaksiyon hızının zamanla değişimi elde edilir. En alttaki grafik ise sodyum metaborat konsantrasyonunun zamanla değişimini göstermektedir.

Her bir başlangıç sodyum metaborat konsantrasyonu için hız ifadesi elde edildiğinde ve bunlarla logaritmik grafik çizildiğinde, grafiğin eğiminden reaksiyonun o sodyum metaborat konsantrasyonundaki mertebesini bulmak mümkündür. Bütün konsantrasyonlar için bulunan mertebelerin de ortalaması alınır ve reaksiyonun asıl mertebesi bulunur.



Şekil 5.3. Reaksiyonun mertebesinin belirlenmesi

Reaksiyonun reaksiyon sabitini veren denklemini bulabilmek için frekans faktörüne ve aktivasyon enerjisine ihtiyaç vardır. Bunları bulabilmek için farklı sıcaklıklarda aynı sodyum metaborat konsantrasyonunda yapılan deney verileri kullanılmalıdır. Buna göre de oluşan sodyum karbonat miktarının ölçümlerinden reaksiyon hızı elde edilir ve aşağıdaki eşitliklerden reaksiyon hız sabitine ulaşılır.

$$r_C(t) = kC_A C_{B(t)} \quad (5.11)$$

Burada C_A denilen, karbon dioksitin sıvıdaki çözünürlüğüdür ve sıcaklık değişmediği takdirde çözünürlük de değişmez.

$$C_A = C_{A_S}$$

Dolayısıyla, Eşitlik 5.11 aşağıdaki gibi (Eş. 5.12) yazılabilir.

$$r_C(t) = k C_{A_S} C_{B(t)} \quad (5.12)$$

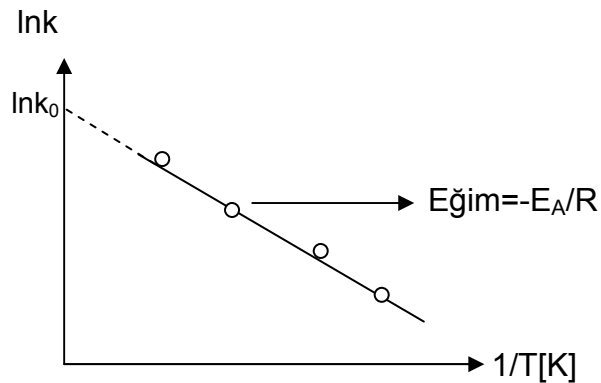
Reaksiyon hız sabiti, Eşitlik 5.12'nin yeniden düzenlenmesiyle hesaplanır. Bir sıcaklıktaki verilerden elde edilen hız sabitlerinin ortalaması alınır ve o sıcaklık için ortalama hız sabiti değeri hesaplanmış olur.

$$k(t) = \frac{r_C(t)}{C_{A_S} C_{B(t)}}$$

Diğer sıcaklıklar için de hız sabiti değeri hesaplandıktan sonra k_{T1} , k_{T2} , k_{T3} ve k_{T4} elde edilir. Arrhenius denklemi uygulanarak (Şekil 5.4) frekans faktörü (k_0) ve aktivasyon enerjisi (E_A) hesaplanır.

$$k = k_0 e^{-E_A/RT} \quad (5.13)$$

$$\ln k = \ln k_0 + \left(-\frac{E_A}{RT}\right) \quad (5.14)$$



Şekil 5.4. Reaksiyon frekans faktörü ve aktivasyon enerjisinin bulunması

5.3. Kabarcıklı Kolonda Gaz ve Sıvı Tutulması

Çalışmada kullanılan 0,08 m iç çapa, 0,6 m sıvı yüksekliğine sahip kolonun karakterizasyonu için ilk adım gaz ve sıvı tutulmasının ölçülmesidir. Kolondaki gaz tutulmasının incelenmesi kolon karakterizasyonu içindir. Sonuç olarak da kolonda çalışma aralığı belirlenmiş olur.

Kabarcıklı kolon konusunda anlatıldığı gibi, gaz hızı belli bir seviyeye ulaştığında kolonda slag akış görülmeye başlar. Bu çalışmada slag akış bölgesine geçilmeyeceği için sınırının belirlenmesi gerekmektedir. Bu da farklı hızlardaki gazın kolona gönderilmesi ve gaz tutulmasının ölçülmesiyle belirlenmelidir.

Gaz tutulması, kolona bağlı piezometreden okunan seviye farkından hesaplanabilir. Piezometreden okunan seviyenin kolondaki sıvı yüksekliği seviyesine oranı sıvı tutulmasını, piezometre ile kolon sıvı yüksekliği farkının sıvı yüksekliği seviyesine oranı ise gaz tutulmasını verir.

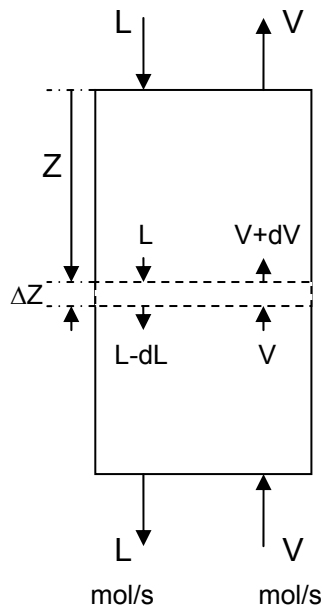
$$\varepsilon_L = \frac{H_{\text{piezometre}}}{H_{\text{kolon}}} \quad (5.15)$$

$$\varepsilon_G = \frac{H_{\text{kolon}} - H_{\text{piezometre}}}{H_{\text{kolon}}} = 1 - \varepsilon_L \quad (5.16)$$

5.4. Kabarcıklı Kolonda Sıvı Fazı Bireysel Fiziksel Kütle Transferi Katsayısının Belirlenmesi

Kabarcıklı kolonda sıvı fazı bireysel fiziksel kütle transfer katsayısını bulabilmek için oksijen desorpsiyonu yöntemi kullanılmıştır.

Oksijen desorpsiyonu yoluyla kütle transferi katsayısı hesaplanması da aşağıda verilen yolla yapılır.



Yapılan Varsayımlar

- Seyreltik sistem
- $L \approx \text{sabit}$, $V \approx \text{sabit}$

S_c = kesit alanı

Şekil 5.5. Oksijen desorpsiyonu

Desorpsiyon için Madde Denkliği;

$$d(Lx) = N_A dA \quad Ldx = N_A dA \quad (5.17)$$

$$N_A = k_x (x - x_i) \quad (5.18)$$

$$dA = a S_c dz \quad (5.19)$$

$$-Ldx = k_x(x - x_i)aS_c dz \quad (5.20)$$

$$\int_0^{Z_T} dz = \frac{-L}{S_c} \frac{1}{(k_x a)} \int_{x_{giris}}^{x_{cikis}} \frac{dx}{(x - x_i)} \quad (5.21)$$

$$x_i \approx \text{sabit}$$

Gaz tarafında O_2 konsantrasyon sabit olduğundan ($y=0,21$) bunun ile dengede bulunabilecek x_i sabit kalır. x_i sıcaklığa bağlı bir değerdir ve EK-2'de verilen tablodan okunmuştur.

$$Z_T = \frac{L}{S_c} \frac{1}{k_x a} \ln \left(\frac{x_{giris} - x_i}{x_{cikis} - x_i} \right) \quad (5.22)$$

$$\boxed{(k_x a) = \frac{L}{Z_T S_c} \ln \left(\frac{x_{giris} - x_i}{x_{cikis} - x_i} \right)} \quad (5.23)$$

$$N_A = k_x(x - x_i) \quad (5.24)$$

$$N_A = k_L(C_{A_L} - C_{A_i}) \equiv k_L C(x - x_i) \quad (5.25)$$

C : suyun toplam konsantrasyonu

$$C = \frac{\rho}{MW} = 55555,56 \text{ mol} / m^3$$

$$\boxed{k_x = k_L C} \quad (5.26)$$

$$(k_x a) = (k_L a) C \quad \Rightarrow \quad (k_L a) = \frac{(k_x a)}{C} \quad (5.27)$$

Oksijenin desorpsiyonu hesaplandıktan sonra, karbon dioksit için düzeltme yapılması gerekmektedir.

Yüzey yenileme teorisine göre kütle transferi katsayısı, difüzyon katsayısının kareköküyle orantılıdır [Uysal, 2003].

$$\overline{k_L} = \sqrt{D_{AB}s} \quad (5.28)$$

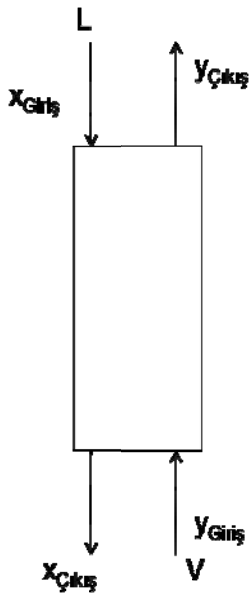
Burada s, yüzey yenileme hızıdır.

Dolayısıyla, oksijen için hesaplanan kütle transfer katsayılarını karbon dioksit'e çevirmek için kullanılan düzeltme faktörü difüzyon katsayılarının oranının kareköküdür.

$$D. F. = \sqrt{\frac{D_{AB,CO_2}}{D_{AB,O_2}}} \quad (5.29)$$

5.5. Kabarcıklı Kolonda Sıvı Fazı Bireysel Kimyasal Kütle Transferi Katsayısının Belirlenmesi

Kabarcıklı kolonda sıvı fazı bireysel fiziksel kütle transfer katsayısının bulunmasının ardından kimyasal kütle transfer katsayısını belirlenmelidir. Bunun için de çalışma sisteminde, yani kabarcıklı kolonda karbon dioksitin sodyum metaborat çözeltisine absorpsiyonu gerçekleştirilmelidir.



Şekil 5.6. Kütle transferi katsayısını belirlemek için modelleme

Kütle transfer katsayısını bulabilmek için, absorbe olan karbon dioksit miktarından gidilir. Reaksiyona bakıldığında, absorbe olan 1 mol karbon dioksite karşılık olarak 1 mol de sodyum karbonat oluşacaktır. Tank girişi ve çıkışından örnekler alınarak ve yaş analizleri yapılarak absorbe olan karbon dioksit miktarını belirleyebilmek mümkündür. Absorbe olan miktara W denirse,

$$(5.30)$$

Absorbe olan miktarı akı cinsinden de yazmak mümkündür.

$$W \left[\frac{\text{mol}}{\text{s}} \right] = N_A \left[\frac{\text{mol}}{\text{m}^2 \text{s}} \right] a \left[\frac{\text{m}^2}{\text{m}^3} \right] (S_C Z_t) [\text{m}^3] \quad (5.31)$$

Kesit alanı ve yüksekliğin çarpılması hacme eşittir (Eş. 5.32).

$$S_C Z_t = V \quad (5.32)$$

Eşitlik 5.31 ve 5.32 kullanılarak;

$$N_A a = W/V \quad (5.33)$$

Akının tanımından yararlanılarak [Uysal,2003] ve reaksiyonun çok hızlı olduğu kabulü yapılarak, hacimsel kütle transfer katsayısını hesaplayabilmek için aşağıdaki eşitlikler elde edilir.

$$\overline{k_C} (x_i - x_{yığın}) a = \overline{k_C} (x_i - 0) a = W/V \quad (5.34)$$

$$(\overline{k_C} a) = W/V / x_i \quad (5.35)$$

5.6. Sodyum Metaborata Karbon Dioksit Absorpsiyonu İçin Artış Faktörünün Belirlenmesi

Sodyum metaborata karbon dioksitin absorpsiyonu kimyasal reaksiyonlu bir absorpsiyondur. Dolayısıyla, bu kimyasal reaksiyonun absorpsiyona ne kadar katkısının olduğunu görebilmek için artış faktörü belirlenmelidir.

Artış faktörü, kimyasal kütle transfer katsayısının fiziksel kütle transfer katsayısına oranıdır.

$$E = \frac{(k_L a)_{kimyasal}}{(k_L a)_{fiziksel}} \quad (5.30)$$

6. DENEYSEL ÇALIŞMA

6.1. Sodyum Metaboratın Karbon Dioksit Tutulmasında Kullanılabilirliği

Sodyum metaboratın karbon dioksit tutulmasında kullanılabilirliğinin gösterilmesi için doymuş bir sodyum metaborat çözeltisi hazırlanmıştır ve içinden uzun bir süre karbon dioksit geçirilmiştir. Yaklaşık yarım saat geçtikten sonra karbon dioksit geçişi durdurulmuştur ve çözelti 50°C'lik etüvde sabit sıcaklıkta kurutulmuştur. Kurutulurken amorf yapının oluşmasını engellemek için 60°C'nin üzerine çıkılmamıştır. Elde edilen katının XRD spektroskopisi ile analizi yaptırılmıştır. Analizde Bölüm 5.1'de verilmiş olan öngörülen reaksiyonlar sonucu oluşması beklenen sodyum karbonat, bikarbonat ve boraksın varlığına bakılmıştır.

Bu kısımda sodyum metaboratın karbon dioksit tutulmasında kullanılabilirliğinin yalnızca kalitatif olarak gösterilmesi amaçlanmıştır. Yani asıl amaç, öngörülen reaksiyonların doğru olup olmadığının gösterilmesi, bu reaksiyonlar sonucunda ortaya çıkan ürünlerin deney sonucunda elde edilen katının analizi sonucunda ortaya çıkıp çıkmayacağının araştırılmasıdır. Bu nedenle hazırlanan çözelti içerisindeki sodyum metaborat miktarı ya da bu çözeltiden geçirilen karbon dioksitin hızı önemli değildir.

Elde edilen katının XRD spektroskopisi analizinin yanısıra, içindeki karbonat/bikarbonat, borik asit, boraks miktarlarına da bakılmıştır. B₂O₃ analizi için EK – 5'te verilen yöntem uygulanmıştır. Kızdırma kaybı da göz önünde bulundurularak sonuçlar elde edilmiştir.

6.2. Sodyum Metaborat ve Karbon Dioksit Reaksiyon Kinetiğinin İncelenmesi

Sodyum metaborat ve CO₂ reaksiyonunun, sıcaklıkla ve sodyum metaborat çözeltisinin kompozisyonuyla nasıl değiştiği incelenmiştir. Bunun için farklı parametrelerle çalışılmıştır. Çalışılan parametreler Çizelge 6.1’de verilmiştir.

Çizelge 6.1. Sodyum metaborat – CO₂ reaksiyon deneylerindeki parametreler

Sıcaklık (°C)	17	30	40	50
Sodyum Metaborat Konsantrasyonu (Ağırlıkça)	% 0,5	%1	%2,5	

Deneylerde kullanılan düzeneğin fotoğrafı Resim 6.1’de verilmiştir. Burada, reaktörün içine farklı kompozisyonlarda metaborat çözeltisi konulmuştur ve sıvının üzerinden saf karbon dioksit geçirilmiştir. Karbon dioksit, sıvının içinden geçirilmediği için reaksiyon yavaş olmuştur, yani yalnızca difüzyon yoluyla olmuştur. Dolayısıyla farklı sıcaklıklarda ya da farklı başlangıç metaborat konsantrasyonlarında, bu iki parametrenin reaksiyonu nasıl etkilediği daha rahat görülmüştür. Ayrıca, sıvı manyetik karıştırıcı kullanılarak karıştırılmıştır. Sıvı yüzeyinde karıştırmadan meydana gelebilecek herhangi bir vorteksin oluşmasından kaçınmak için çok yavaş bir karıştırma sağlanmıştır. Bu karıştırma sayesinde, sıvı yüzeyindeki ürün konsantrasyonu ile reaktör dibindeki konsantrasyon aynı olmuştur, homojen bir konsantrasyon dağılımı vardır. Bu sayede reaktör, sürekli karıştırmalı reaktör olarak varsayılmıştır.

Deneyde, reaksiyon bitene kadar belirli aralıklarda çözeltiden numune alınmıştır ve analizi yapılmıştır.



Resim 6.1. Sodyum metaborat – CO₂ reaksiyonunun kinetik çalışmasının yapıldığı deney düzeneği

Deneylerin analizinde ıslak metot uygulanmıştır (EK – 6). Titrimetrik yöntemle alınan numune içindeki sodyum karbonat-bikarbonat miktarı belirlenmiştir. Reaksiyonlara göre numune içindeki sodyum karbonat-bikarbonat miktarı, çözeltiliye absorbe olan karbon dioksit miktarını vermektedir.

6.3. Kabarcıklı Kolonda Gaz ve Sıvı Tutulması

Kabarcıklı kolonda gaz ve sıvı tutulmasının incelenmesi için içi su dolu kolondan 4 L/dk'dan 40 L/dak'ya kadar değişen hızlarda hava geçirilmiştir. Kolonun içerisindeki sıvı ve kabarcık seviyesi sabit tutulmuştur ve kolona bağlanan bir piezometre sayesinde de sıvı seviyesi farkından kolondaki boşluk kesri hesaplanmıştır. Deneyler sırasında ortam sıcaklığı ve basıncında bir değişiklik olmamıştır.

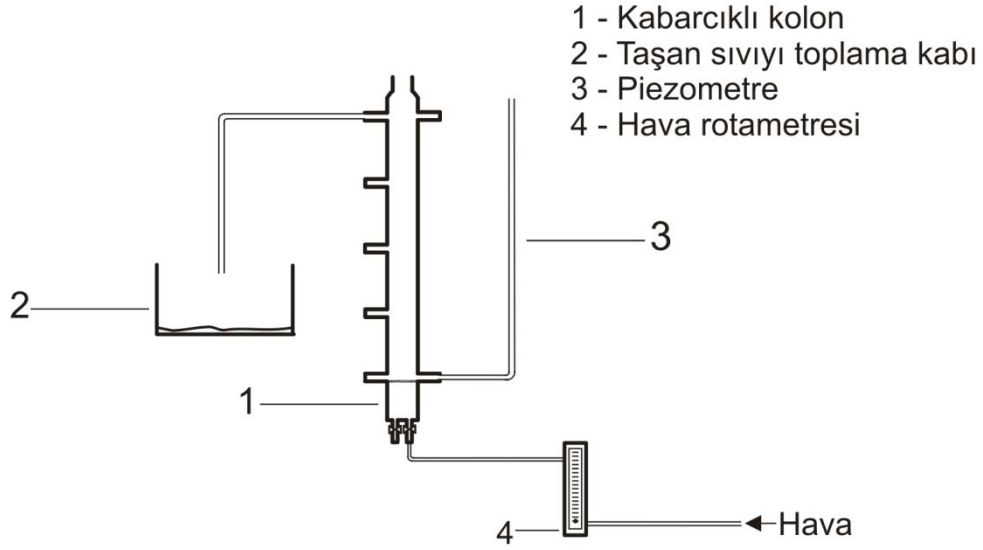
Sıvı seviyesi okumaları iki farklı şekilde yapılmıştır. İlk olarak kolondan geçen gaz hızı artırılmıştır, ikincisinde ise yüksek hızla başlanmıştır ve gaz hızı giderek düşürülmüştür. Dolayısıyla ikinci basamakta gaz hızı düşürüldükçe, kolon içindeki gaz hacmi azalacağından her gaz hızı düşürülüşünde kolon yüksekliğinin sabit kalması için gerekli miktarda su eklenmiştir.

Deneyde uygulanan parametreler Çizelge 6.2'de verilmiştir.

Çizelge 6.2. Gaz ve sıvı tutulması deneylerindeki parametreler

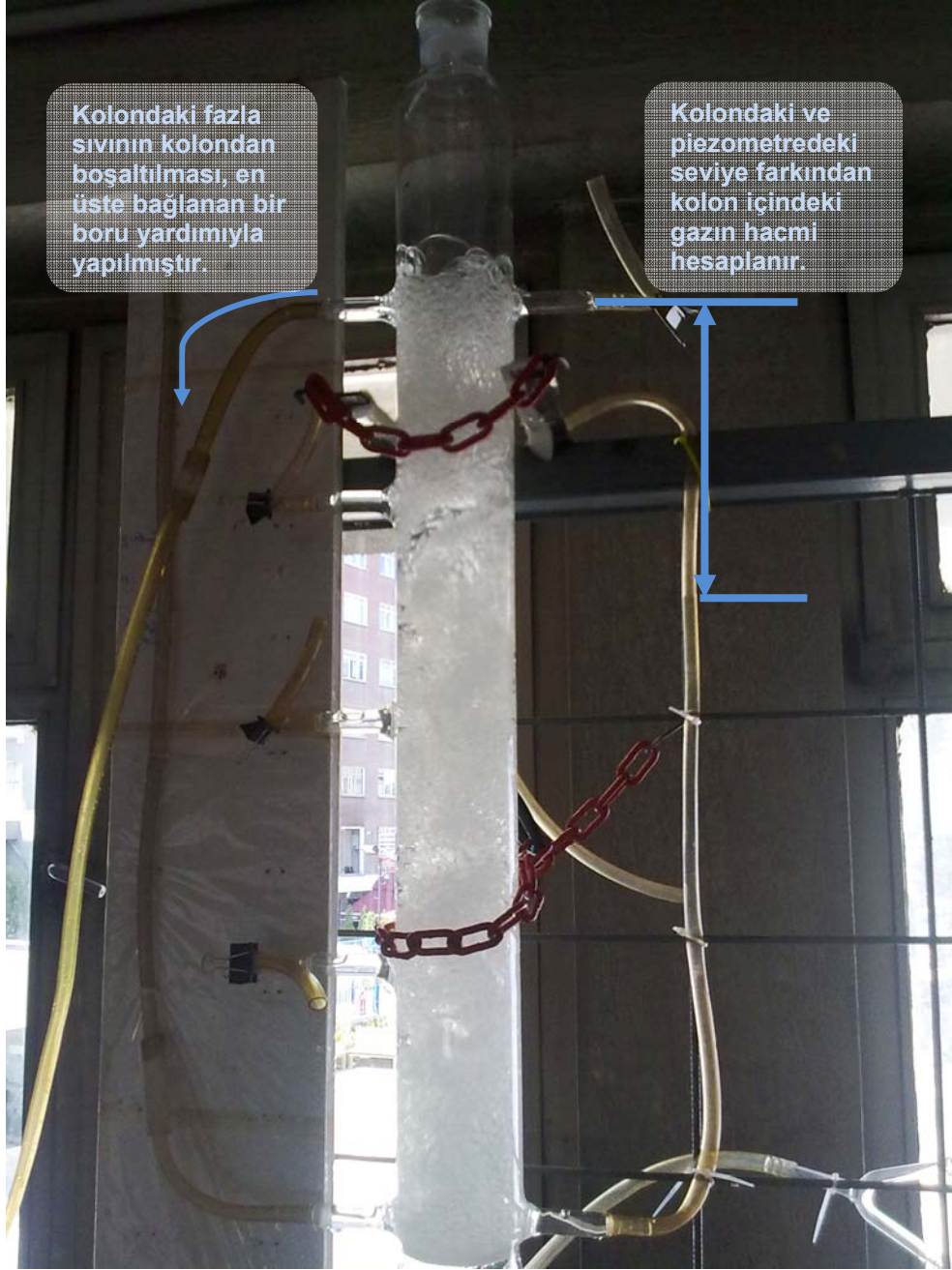
Gaz Hızı, Q (L/dk)	Düşük Yüksek Deneyler	Hızdan Hıza Olan	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22
			24	26	28	30	32	34	36	38	40	
	Yüksek Düşük Deneyler	Hızdan Hıza Olan	30	26	22	18	14	10	6	4		

Deneyde kullanılan düzeneğin şematik gösterimi ve resmi sırasıyla Şekil 6.1 ve Resim 6.2'de sunulmuştur.



Şekil 6.1. Gaz ve sıvı tutulması deneylerindeki düzeneğin şematik gösterimi

Deneylerde sıvı seviyesinin aynı kalması için, Şekil 6.1 ve Resim 6.2’de gösterildiği gibi, kolonun en yüksek noktasına bir deşarj borusu bağlanmıştır. Bu sayede gaz hızı arttırıldığında, kolondaki gaz hacminin artmasından kaynaklanan sıvı seviyesinin yükselmesi, kolondaki fazla sıvının bu şekilde dışarı atılmasıyla önlenmiş olur. Benzer şekilde, gaz hızı azaltıldığında sıvı seviyesinde azalma meydana gelmektedir, bunu önlemek için de kolona sıvı takviyesi yapılır. Bu durumda da fazla sıvı eklendiğinde, eklenen sıvının fazlası dışarı alınabilir. Her iki durumda da bu yolla sıvı seviyesi sabit tutulur.

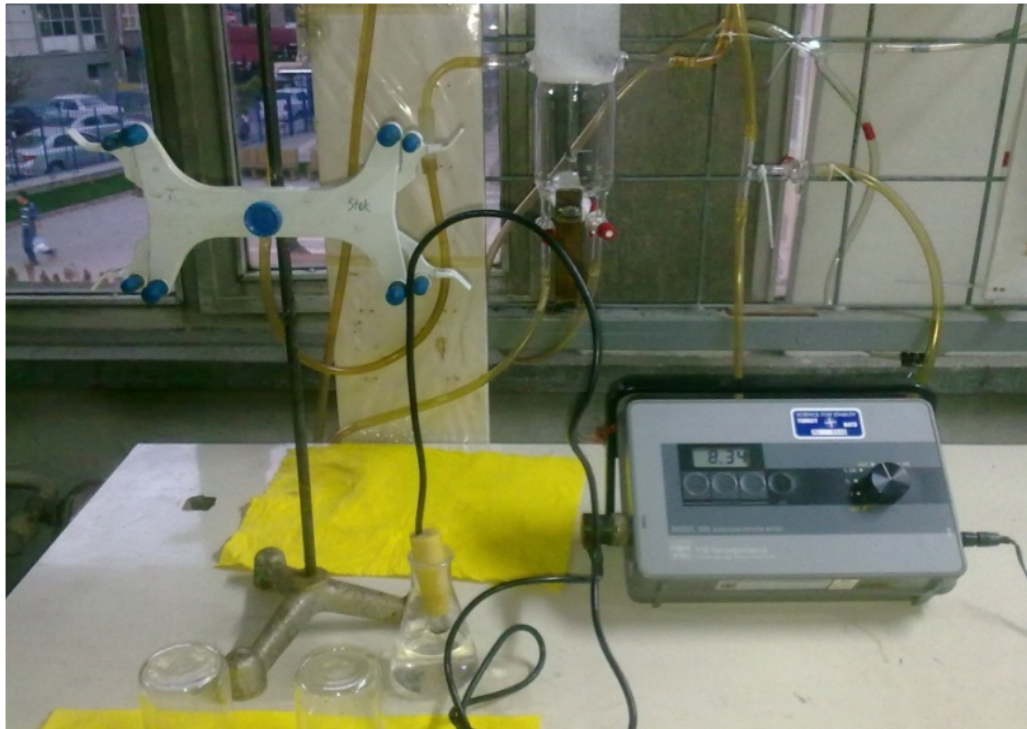


Resim 6.2. Gaz ve sıvı tutulması deneylerinde kullanılan düzenek

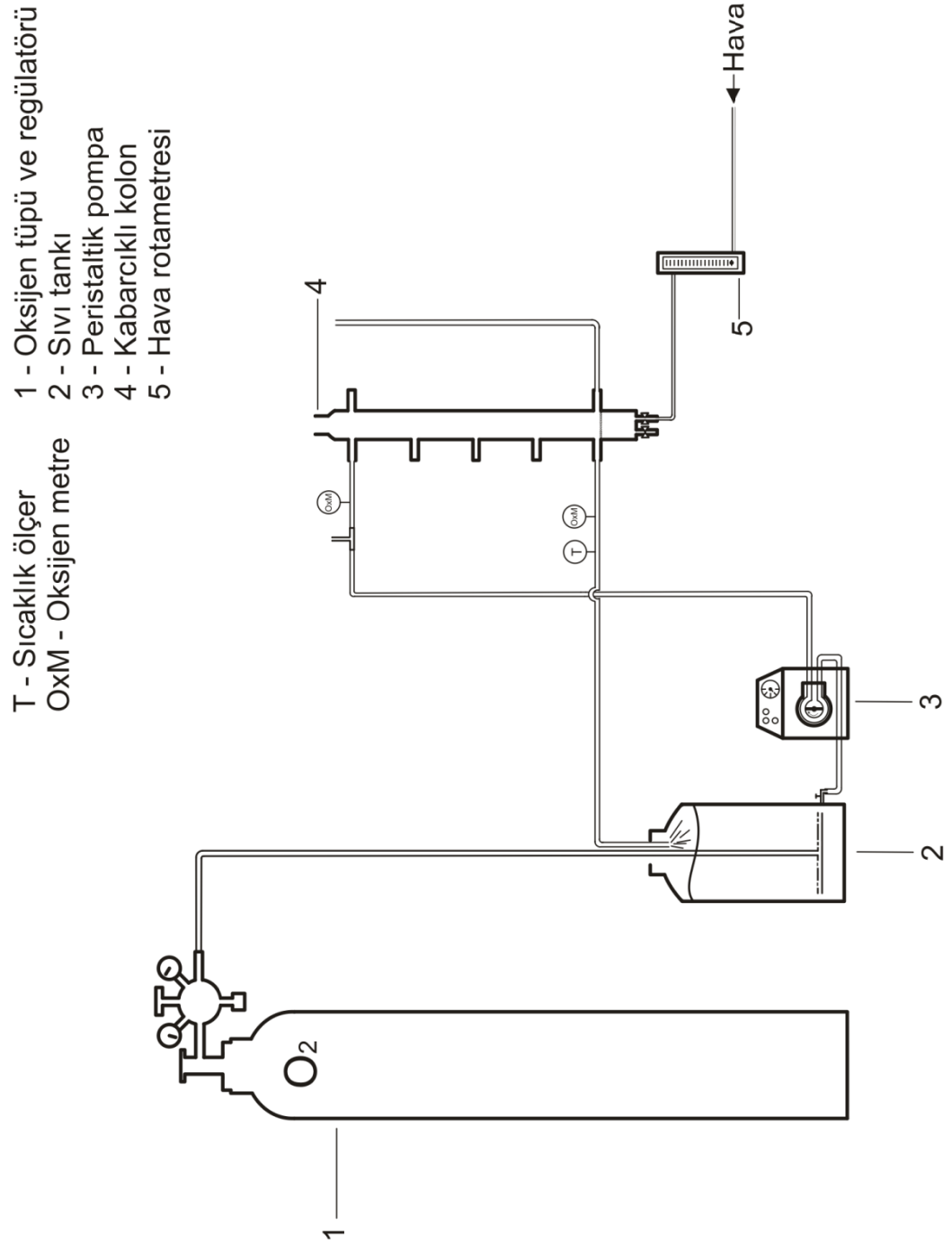
6.4. Kabarcıklı Kolonda Sıvı Fazı Bireysel Fiziksel Kütle Transferi Katsayısının Belirlenmesi

Sıvı fazı bireysel fiziksel kütle transferi katsayısının bulunması için kurulan düzenek  ekil 6.2’de verilmiştir.

Kabarcıklı kolonda sıvı fazı bireysel fiziksel hacimsel kütle transfer katsayısının belirlenmesi için yapılan deneylerde oksijen desorpsiyonu yöntemiyle çalışılmıştır. Sıvı tankı su ile doldurulmuştur ve suyun içinden saf oksijen geçirilmiştir. Yani su oksijene do urulmu tur. Ardından, kolona değişik hızlarda hava gönderilmiştir ve oksijenin desorpsiyonu sağlanmıştır. Kolon girişi ve çıkışından sıvı numuneleri alınarak oksijenmetre ile numune içindeki oksijen miktarı     lm  t r (Resim 6.3).



Resim 6.3. Bireysel fiziksel kütle transfer katsayısını bulmak için kullanılan oksijenmetre



Şekil 6.2. Sıvı fazı bireysel kütle transfer katsayısı hesabı deneylerinde kullanılan deney düzeneğinin şematik gösterimi

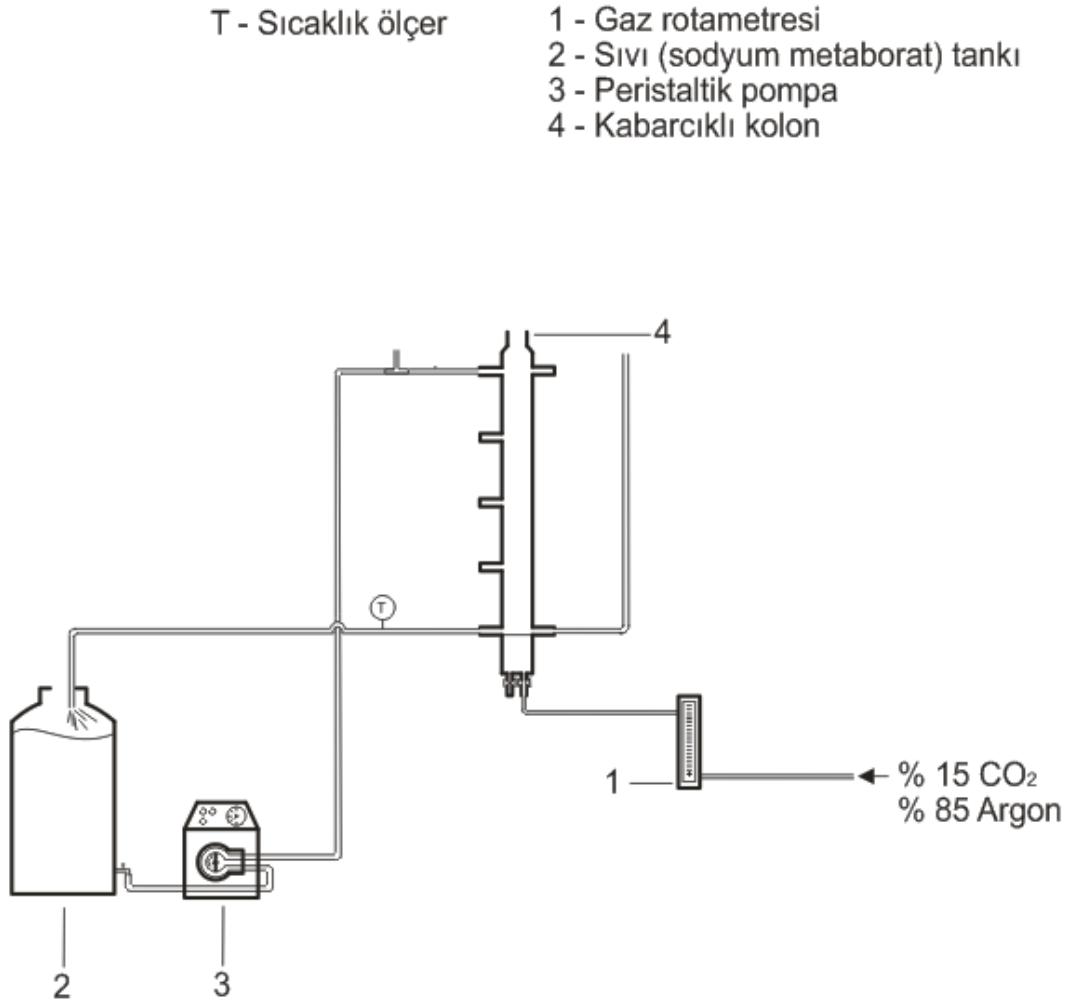
Deneyler hem sıvıya hem de gaza göre sürekli olarak yapılmıştır. Yani kolon içerisindeki sıvıdan değişik hızlarda hava geçirilirken, kolona gönderilen sıvı hızı da değiştirilmiştir. Bu yöntemle sıvı hızının ve gaz hızının sıvı fazı bireysel kütle transfer katsayısına etkisi incelenmiştir. Deneyde çalışılan parametreler Çizelge 6.3'te verilmiştir.

Çizelge 6.3. Fiziksel kütle transfer katsayısını belirlenmesindeki parametreler

Gaz Hızı, m/s	Sıvı Hızı, m/s				
0,0185	0,0017	0,0029	0,0042	0,0055	0,0068
0,0385	0,0017	0,0029	0,0042	0,0055	0,0068
0,0584	0,0017	0,0029	0,0042	0,0055	0,0068
0,0784	0,0017	0,0029	0,0042	0,0055	0,0068
0,0983	0,0017	0,0029	0,0042	0,0055	0,0068

6.5. Kabarcıklı Kolonda Sıvı Fazı Bireysel Kimyasal Kütle Transferi Katsayısının Belirlenmesi

Burada kolona ağırlıkça %4,5'luk doymuş sodyum metaborat çözeltisi değişik sıvı hızlarında gönderilmiştir. Sıvı hızı sabit tutularak, farklı hızlarda da gaz gönderilmiştir. Gaz olarak CO₂-azot karışımı seçilmiştir. Karışım içindeki CO₂ yüzdesi hacimce %15 olarak seçilmiştir. Bunun nedeni, endüstride baca gazındaki karbon dioksit oranının yaklaşık olarak maksimum %15 seviyesinde olmasıdır. Deney düzeneği Şekil 6.3'te verildiği gibidir.



Şekil 6.3. Kimyasal kütle transfer katsayısı bulunmasında kullanılan deney düzeneği

Deneyde çalışılan parametreler Çizelge 6.4'te verilmiştir.

Çizelge 6.4. Kimyasal kütle transfer katsayısı belirlemek için yapılan deneylerde çalışılan parametreler

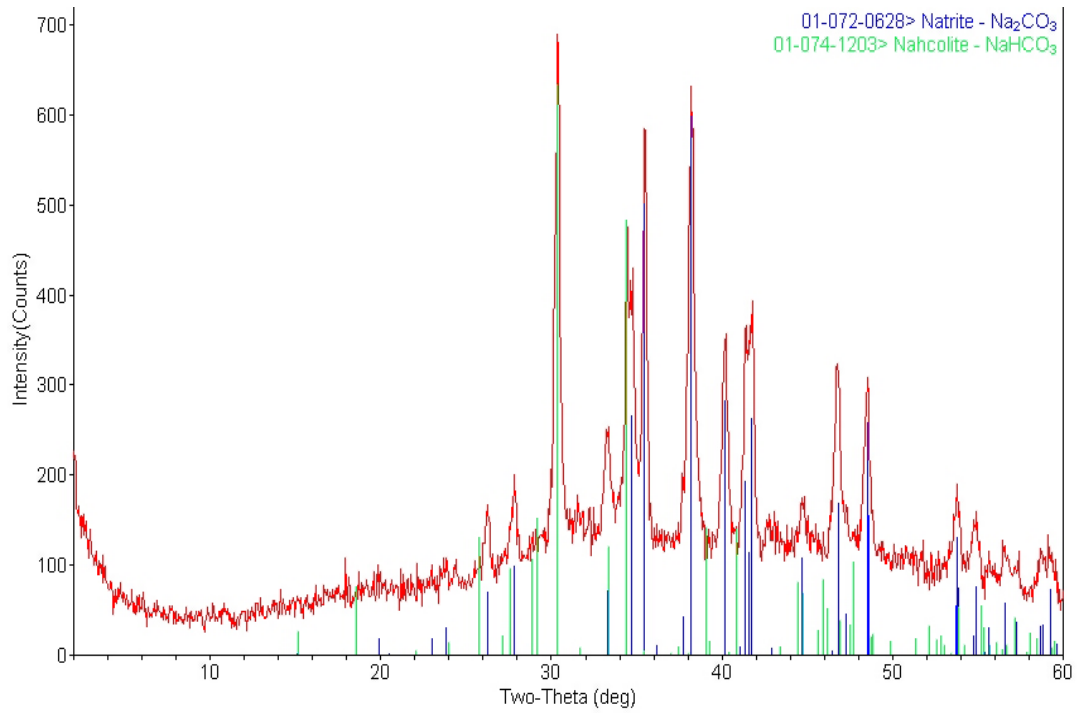
Sıvı Hızı, m/s	Gaz Hızı, m/s						
0,0017	0,0052	0,0119	0,0185	0,0252	0,0318	0,0385	0,0518
0,0029	0,0052	0,0119	0,0185	0,0252	0,0318	0,0385	0,0518
0,0042	0,0052	0,0119	0,0185	0,0252	0,0318	0,0385	0,0518
0,0055	0,0052	0,0119	0,0185	0,0252	0,0318	0,0385	0,0518

Deney sırasında kolon girişi ve çıkışından her bir sıvı akış hızında bütün gaz akışları için numune alınmıştır ve bu numunelerin yaş analizi (EK – 6) yapılmıştır.

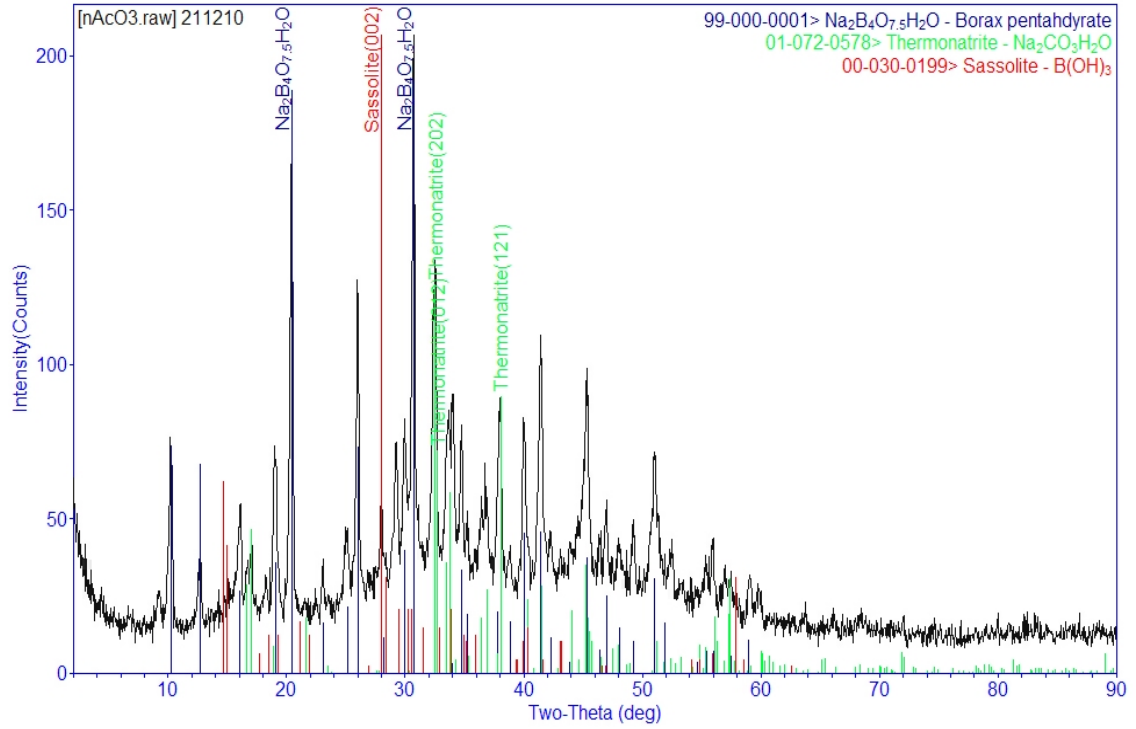
7. BULGULAR ve TARTIŞMA

7.1. Sodyum Metaboratın Karbon Dioksit Tutulmasında Kullanılabilirliği

Deneyden sonra elde edilen katının XRD spektroskopisi analizleri yapılmıştır. Bunlar Şekil 7.1 ve 7.2’de gösterilmiştir. Şekil 7.1 ile gösterilen analizde sodyum karbonat ve bikarbonatın varlığına bakılırken, Şekil 7.2’de boraksın varlığı incelenmiştir.



Şekil 7.1. Reaksiyonlar sonucunda sodyum karbonat/bikarbonatın varlığını gösteren XRD spektroskopisi analiz sonucu



Şekil 7.2. Reaksiyonlar sonucunda boraksın varlığını gösteren XRD spektroskopisi analiz sonucu

Ayrıca numune içindeki karbonat/bikarbonat miktarı belirlenmiştir ve B_2O_3 analizi de yaptırılmıştır. Numune içerisindeki B_2O_3 miktarı %37,68 olarak bulunmuştur. Kızdırma kaybı düzeltilmesi de yapılarak sodyum metaborat çözeltisinden karbon dioksit geçirildikten sonra kurutulup elde edilen katının analizinden Çizelge 7.1’de verilen sonuçlar elde edilmiştir.

Çizelge 7.1. Reaksiyon sonucu elde edilen katının analizi

Madde	Miktar
Boraks : $Na_2B_4O_7 \cdot 5H_2O$	%62,09
Sodyum Karbonat : Na_2CO_3	%24,72
Borik Asit : H_3BO_3	%13,19

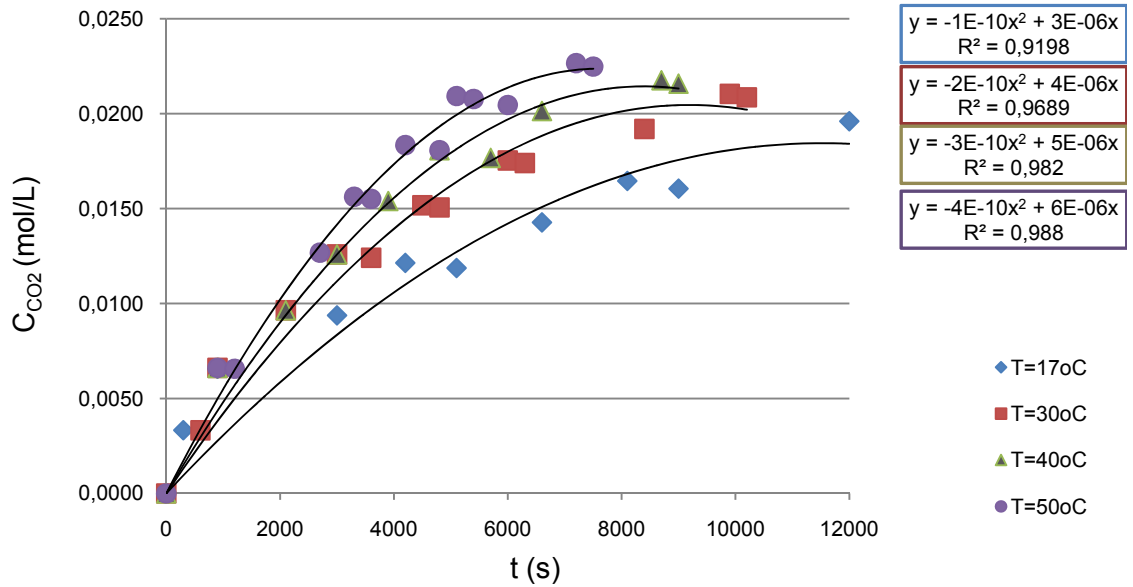
Bu çalışma yapılırken sodyum metaborat çözeltisinin içinden CO₂ gazı geçirildikten sonra farklı şekilde kurutmalar denenmiştir. Öncelikle denenen yöntem, reaksiyon sonrasındaki çözeltinin sıvı kısmının tamamen bek aleviyle uçurulup, katıyı analiz için elde etmektir. Fakat bu yöntemle kurutulan katıların XRD analizleri yapıldığında amorf yapılar gözlenmiştir. Bu analizler sonrasında işlem sırasında yüksek sıcaklıklara çıkılmaması gerektiği sonucuna ulaşılmıştır. Deneyler tekrar edilmiştir ve bu sefer sıvının tamamı 50°C'lik etüvde uçurulmuştur. Bu yöntemle elde edilen katının XRD spektroskopisi analiz sonuçları verilmiştir.

Bölüm 5.1'de anlatılan ve verilen eşitliklerden de görüleceği gibi, sodyum metaboratın karbon dioksitle reaksiyonu sonucunda sodyum karbonat veya bikarbonat ve borik asit ortaya çıkmaktadır. Bu ilk reaksiyonda ortaya çıkan borik asit, ortamdaki sodyum metaboratla reaksiyona girerek boraksı vermektedir. Şekil 7.1, reaksiyonlar sonucunda sodyum karbonat/bikarbonatın oluştuğunu kanıtlarken, Şekil 7.2, ikinci reaksiyonu, yani sodyum metaboratla borik asitin reaksiyonu sonucunda boraksın oluştuğunu göstermektedir.

Bu çalışma sonucunda, öngörülen reaksiyonların doğru olduğu kalitatif olarak gösterilmiştir.

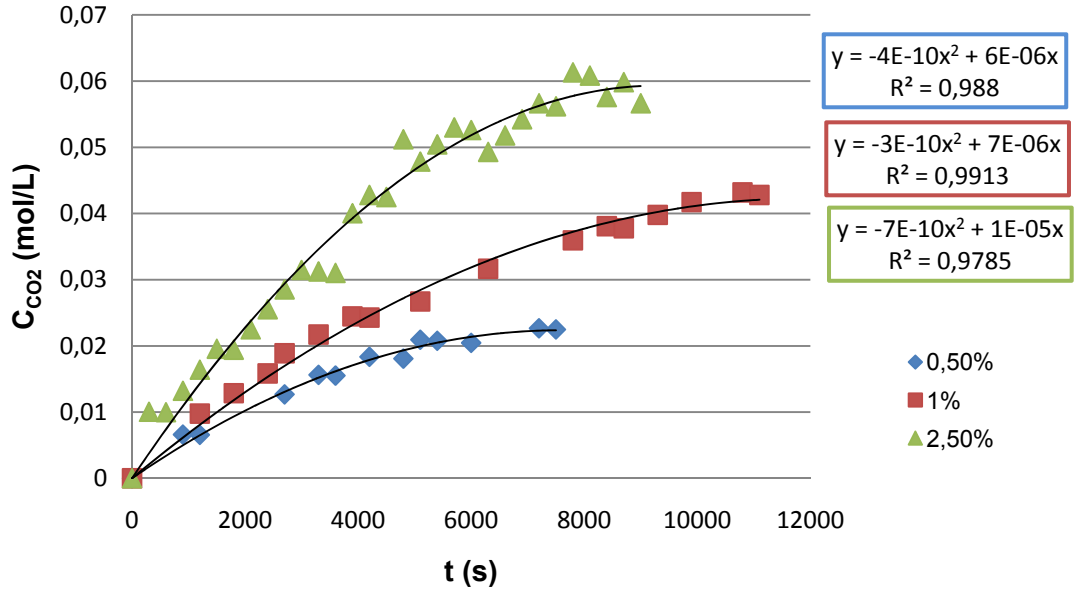
7.2. Sodyum Metaborat ve Karbon Dioksit Reaksiyon Kinetiğinin İncelenmesi

Reaksiyon kinetiği için iki farklı parametrenin incelendiği daha önce belirtilmişti. Bunlardan ilki, sıcaklığın reaksiyona etkisidir. Deneylerde 17, 30, 40 ve 50°C’lerde çalışılmıştır. Şekil 7.3’ten de görüldüğü gibi, sıcaklık arttıkça, absorbe olan karbon dioksit miktarı da artmaktadır. Her bir sıcaklık için karbon dioksit değişimini veren eşitlik daha sonraki hesaplamalarda kullanılmak üzere elde edilmiştir.



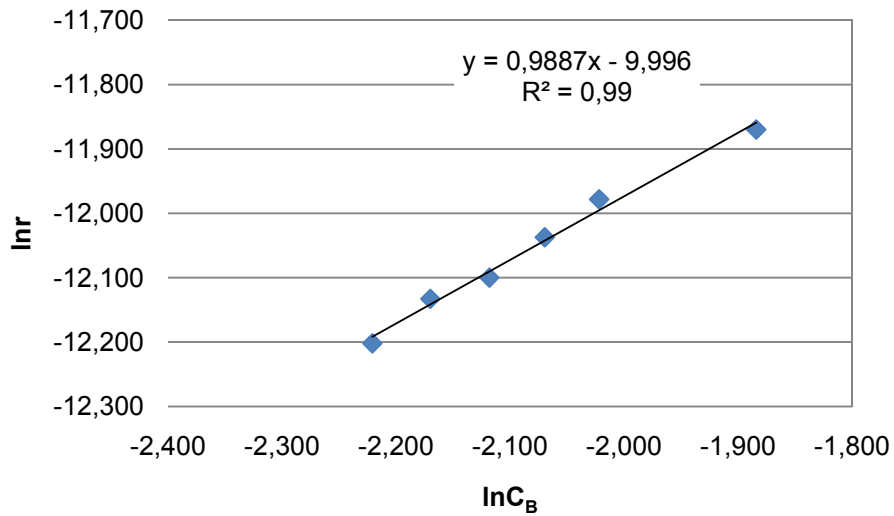
Şekil 7.3. Sıcaklığın sodyum metaborat – karbon dioksit reaksiyonuna etkisi

Reaksiyonun başlangıç sodyum metaborat konsantrasyonundan nasıl etkilendiği de incelenmiştir. Burada da, başlangıç sodyum metaborat konsantrasyonu arttıkça, tutulan karbon dioksitin miktarı artmıştır. Her konsantrasyon için tutulan karbon dioksitin değişimi için eşitlikler elde edilmiştir. Deney sonuçları Şekil 7.4’te görülmektedir.



Şekil 7.4. Başlangıç sodyum metaborat çözelti konsantrasyonunun reaksiyona etkisi

Bu grafikler ve eşitlikler elde edildikten sonra, reaksiyonun mertebesini bulabilmek için çalışmalar yapılmıştır. Yani, sodyum metaborat konsantrasyonunun reaksiyon kinetiğine etkisi incelenmiştir. Kısım 5.2’de anlatılan metotla reaksiyonun derecesi bulunmuştur. Örnek bir grafik Şekil 7.5’te verilmiştir.



Şekil 7.5. Reaksiyon mertebesinin bulunması (50°C, %1’lik çözelti için)

%1'lik çözelti için reaksiyonun mertebesi, Şekil 7.5'ten de görüldüğü gibi 0,9887 çıkmıştır. Aynı hesaplamalar %0,5 ve %2,5'luk (ağırlıkça) çözeltiler için de yapıldığında elde edilen sonuçlar Çizelge 7.2'de verilmiştir.

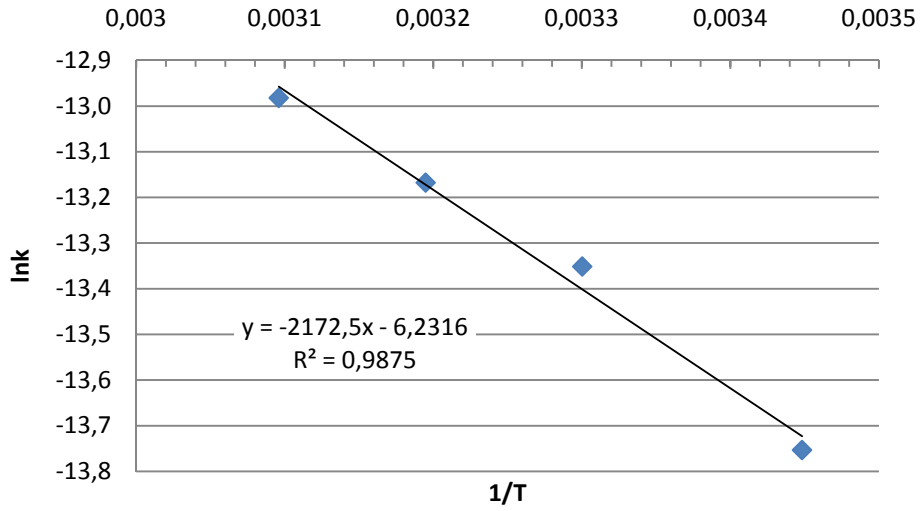
Çizelge 7.2. Farklı sodyum metaborat konsantrasyonlarında elde edilen reaksiyon mertebesi değerleri

Sodyum Metaborat Çözeltisi	Mertebe
%0,5	1,1071
%1	0,9887
%2,5	0,7894
ORTALAMA : $0,96 \approx 1$	

Çizelge 7.2'den de görüldüğü gibi, reaksiyonun mertebesinin ortalama değeri "1" olarak çıkmıştır.

Reaksiyonlarda, sodyum metaboratın konsantrasyonu (C_B) çok büyüktür. Dolayısıyla, C_B 'nin üssü kinetik ifadede önemini yitirmektedir ve elementer reaksiyon davranışı göstermemektedir.

Sodyum metaborat konsantrasyonunun reaksiyon kinetiğine etkisi incelendikten sonra, sıcaklığın kinetik üzerine etkisi incelenmiştir. Kısım 5.2'de anlatılan metoda uygun olarak (başlangıç sodyum metaborat konsantrasyonu sabit tutulup sıcaklık 17, 30, 40 ve 50°C olarak değiştirilerek) yapılan deneylerin sonucunda sodyum metaborat ve karbon dioksit arasında olan reaksiyonun aktivasyon enerjisi ve frekans faktörü hesaplanmıştır.

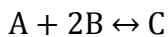


Şekil 7.6. Aktivasyon enerjisi ve frekans faktörünün belirlenmesi

Buna göre aktivasyon enerjisi (E_a) 18062 J/mol-K, frekans faktörü ise $1,97 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{mol-s}$ olarak hesaplanmıştır. Bu verilerden elde edilen reaksiyon sabiti eşitliği ise aşağıdaki gibidir.

$$k = 1,97 \times 10^{-3} e^{\left(\frac{-18062}{RT}\right)} \quad (7.1)$$

Ortalama sodyum metaborat konsantrasyonunu bulabilmek için, oluşan sodyum karbonat verilerinden yararlanılmıştır. Kısım 5.2'de de anlatıldığı gibi, sodyum metaborat (B) ve CO_2 (A) arasındaki reaksiyon aşağıdaki gibi ifade edilirse, harcanan 2 mol sodyum metaborata karşılık olarak 1 mol sodyum karbonat (C) oluşması gerekmektedir.



Buna göre her bir sıcaklıktaki reaksiyon sırası boyunca olan sodyum metaborat konsantrasyonun ortalama değerleri hesaplanmıştır (reaksiyonlarda sodyum metaborat fazla konulduğu için konsantrasyonunda

önemli bir değişiklik olmamaktadır). Bu ortalama değerler Çizelge 7.3'te verilmiştir.

Çizelge 7.3. Ortalama sodyum metaborat konsantrasyonları

Sıcaklık (°C)	Ortalama C_B (mol/m ³)
17	54,04
30	57,27
40	55,20
50	54,45

Bu değerlere göre de ortalama sodyum metaborat konsantrasyonu değeri hesaplanabilir.

$$\overline{C_B} = \frac{54,04+57,27+55,20+54,45}{4} = 55,24 \text{ mol/m}^3 \quad (7.2)$$

Önceden de belirtildiği gibi, sodyum metaboratın reaksiyonlardaki konsantrasyonu çok büyük olduğundan, reaksiyon psödo birinci dereceden (pseudo first order reaction) kabul edilebilir.

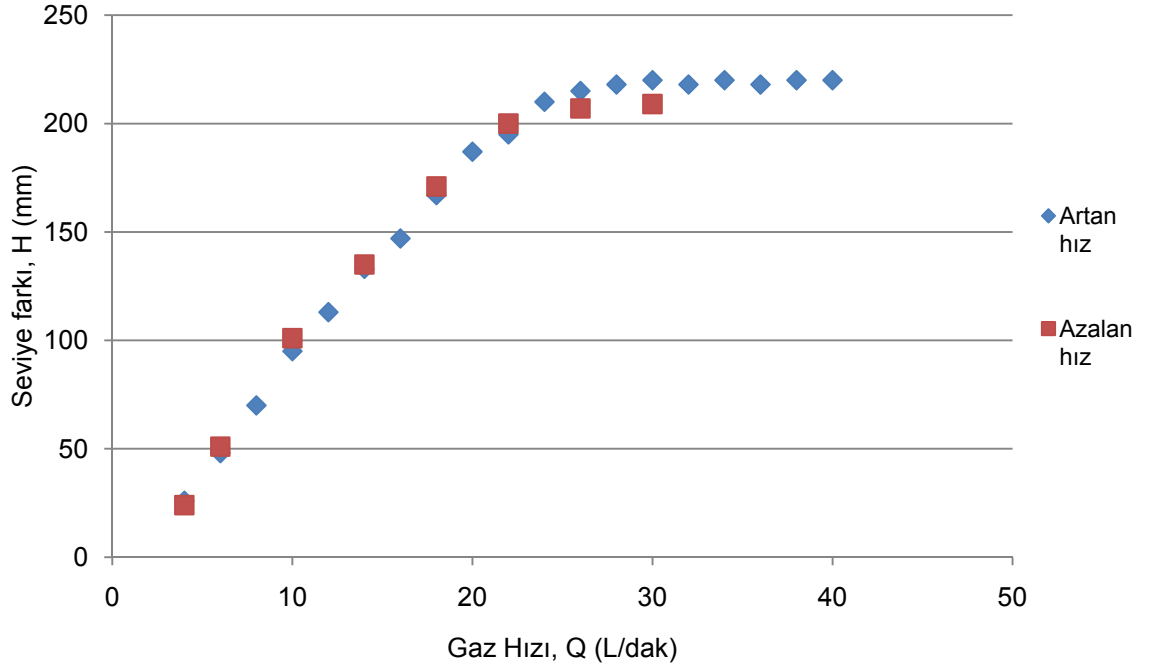
$$r_C = kC_B C_A = k' C_A \quad (7.3)$$

Burada, k' psödo birinci derece reaksiyon sabitidir. Buna göre reaksiyon sabiti için Eşitlik 7.1 tekrar düzenlenip aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$k' = 1,97 \times 10^{-3} e^{\frac{-18062}{RT}} (55,24) = (0,11) e^{\frac{-18062}{RT}} \quad (7.4)$$

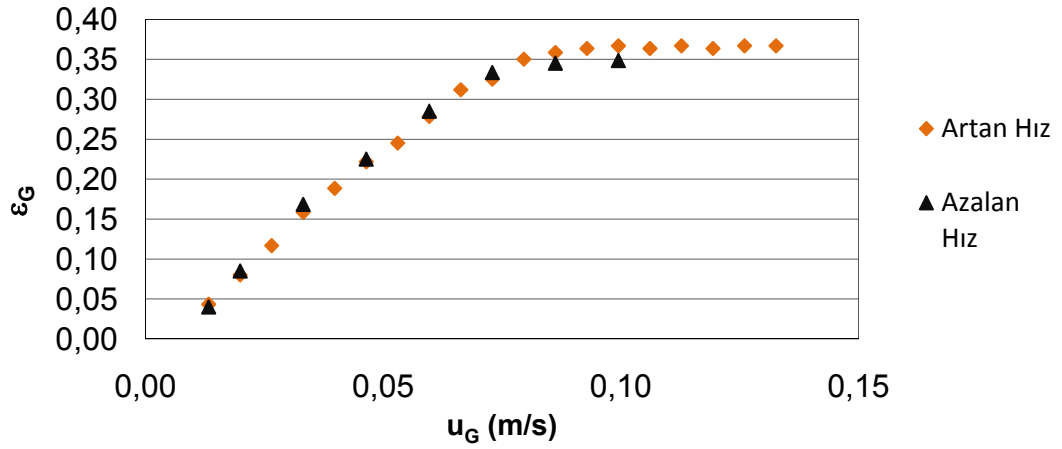
7.3. Kabarcıklı Kolonda Gaz ve Sıvı Tutulması

Piezometreden okunan değerler kullanılarak, farklı gaz akış hızlarında seviye farkları okunmuştur. Bulunan değerler Şekil 7.7'de verilmiştir.



Şekil 7.7. Piezometreden okunan seviye farkının gaz hızıyla değişim grafiği

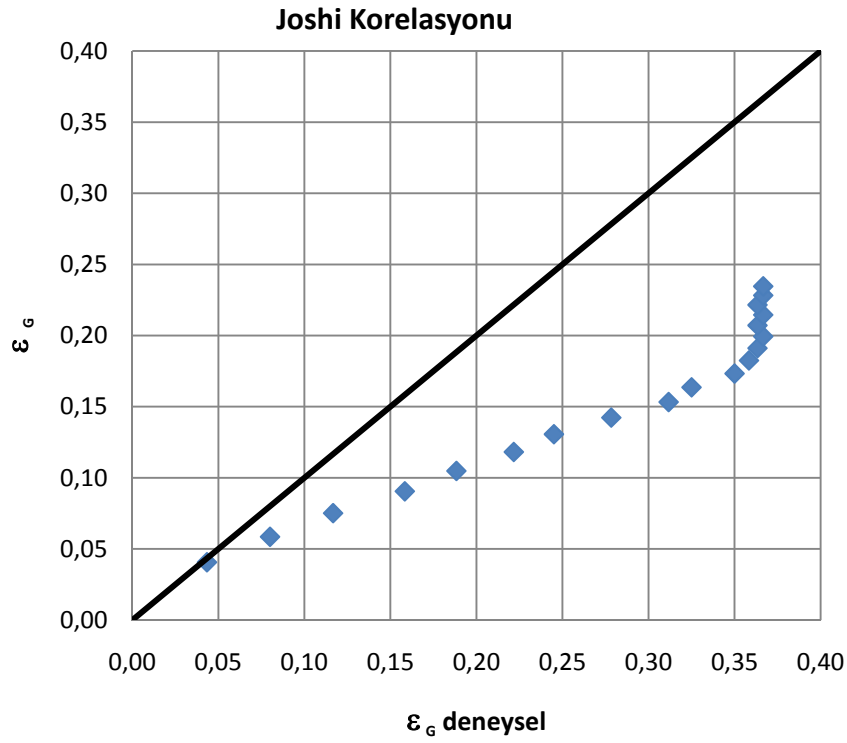
Piezometreden okunan değerler kullanılarak, farklı gaz akış hızlarında kolon boşluk kesri hesaplanmıştır. Bulunan değerler Şekil 7.8'de verilmiştir.



Şekil 7.8. Kolon boşluk kesrinin gaz hızıyla değişim grafiği

Elde edilen sonuçlar literatürdeki Çizelge 4.1'de verilen korelasyonlarla karşılaştırılmıştır. Joshi korelasyonu olarak bilinen korelasyonun denklemi uygulandığında ve deneysel verilerle karşılaştırıldığında Şekil 7.9'da grafik halinde gösterilen sonuç ortaya çıkmıştır.

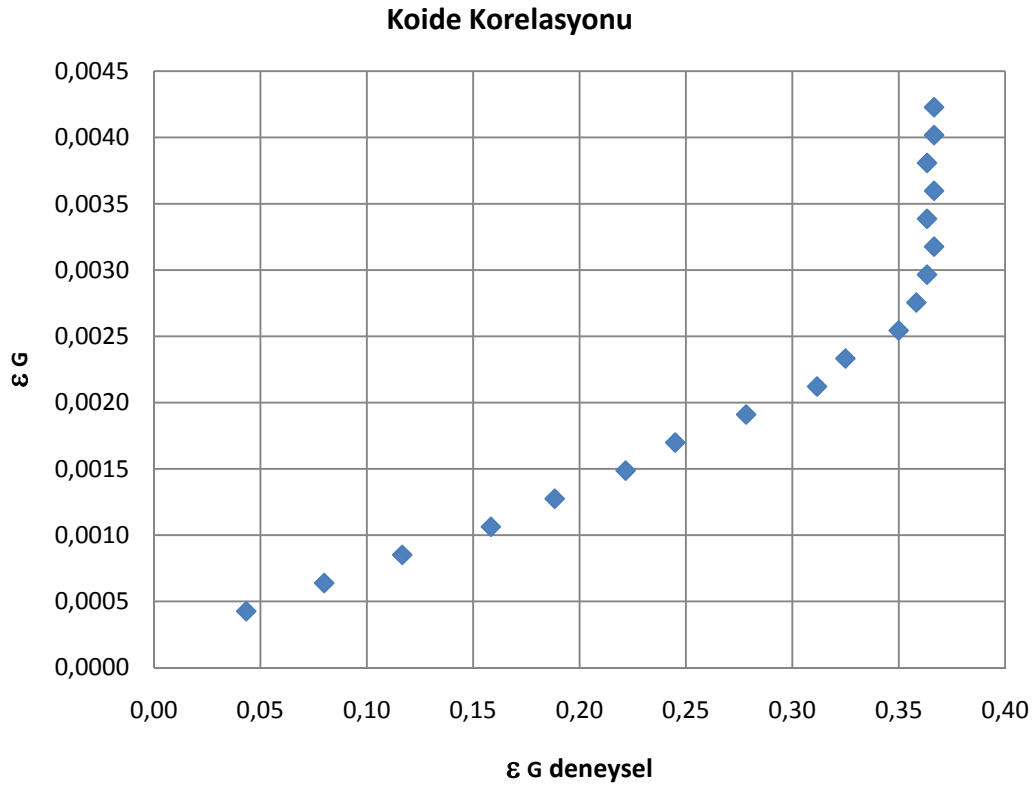
Ayrıca Şekil 7.7'de açıkça görülebildiği üzere bir süre sonra gaz tutulması gaz hızından bağımsız hale gelmiştir. Bunun nedeni, kolondaki akış rejiminin slag akış rejimine geçmesidir. Dolayısıyla slag akışa geçiş yeri çalışmalarda gaz akış hızı sınırını belirlemiştir.



Şekil 7.9. Joshi korelasyonu ile deneysel verilerin karşılaştırılması

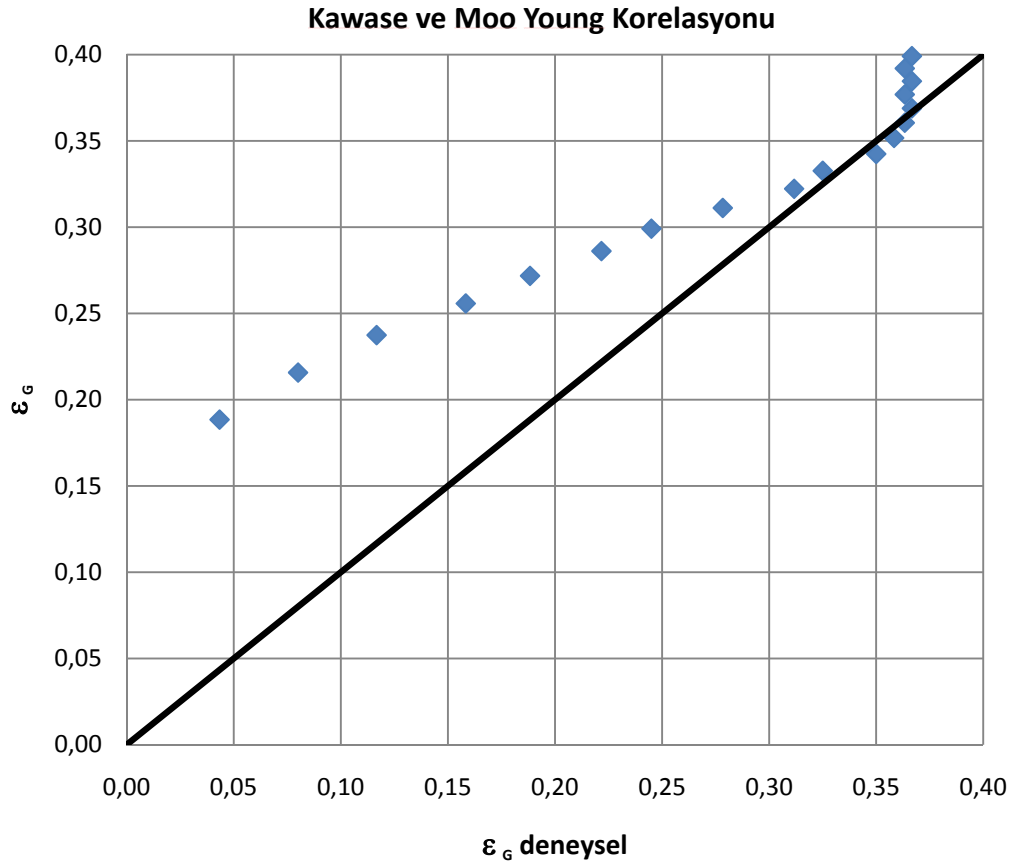
Şekil 7.9'a bakıldığında, düşük gaz hızlarında elde edilen tutulma kesri ile Joshi korelasyonundan elde edilen gaz tutulma oranı değerleri uyum göstermektedir. Fakat, gaz hızı arttıkça bu uyum ortadan kalmaktadır.

Çizelge 4.1'de Koide korelasyonu olarak ifade edilen denklemle, deneysel olarak elde edilen gaz tutulma oranlarına bakıldığında, korelasyonun bu sistem için kullanılamayacağı açıktır. Hiç bir gaz hızında Koide korelasyonundan elde edilen gaz tutulma oranı ve deneysel veriler uyuşmamaktadır (Şekil 7.10).



Şekil 7.10. Koide korelasyonu ile deneysel verilerin karşılaştırılması

Ayrıca, yine Tablo 4.1’de verilen korelasyonlardan Kawase ve Moo-Young’ın Froude sayısı ile gaz tutulmasının hesapladığı korelasyon da mevcuttur. Deneyde kullanılan hızlarla bu korelasyon kullanıldığında ve deneysel verilerle karşılaştırıldığında Şekil 7.11’de görülen grafik ortaya çıkmaktadır. Bu korelasyon düşük hızlarda deneysel verilere uyum sağlayamazken, yüksek gaz akış hızlarına (dolayısıyla yüksek gaz tutulma oranlarına) çıkıldıkça deneysel veriler ve korelasyondan elde edilen değerler uyum göstermektedir. En yüksek hızlarda ise kolondaki gaz tutulması değişmemektedir. Bu Şekil 7.8’den de açıkça görülmektedir.

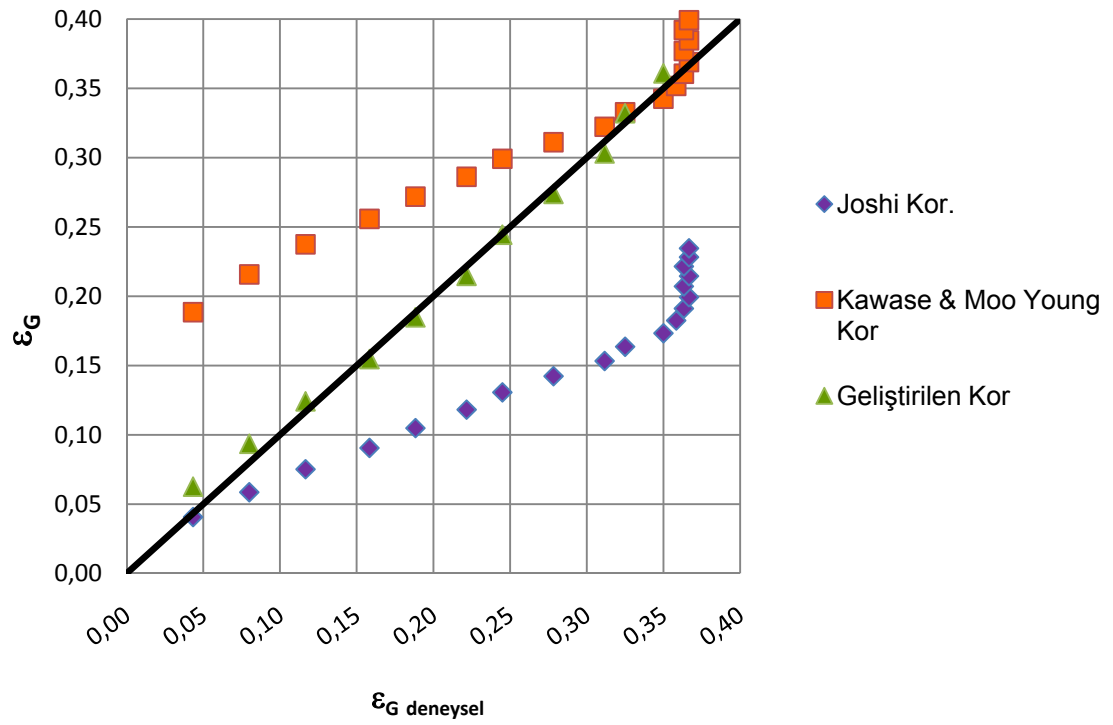


Şekil 7.11. Kawase ve Moo-Young korelasyonu ile deneysel verilerin karşılaştırılması

Çizelge 4.1’de literatürdeki başka korelasyonlara da yer verilmiştir. Fakat bu korelasyonlar ek hesaplama gerektirmektedir. Bu ek hesaplamalardan gelebilecek olan hatalar da vardır; dolayısıyla buradan gelecek olan hatalarla asıl hesaplamak istenilen parametre çok değişken olabilir. Ayrıca, korelasyonlar, çalışılan sistemlere özel olarak çıkarılmıştır. Her sisteme uygulanması yanlış olur. Bu nedenle, literatür ile karşılaştırma yapılırken hataları ve sapmaları en aza indirmek için en basit korelasyonlar kullanılmıştır.

Literatürdeki korelasyonlarla karşılaştırmalar sonucunda, deneysel olarak elde edilen verilerle korelasyonlardan hesaplanan değerler tam olarak tutmamaktadır. Deneysel veriler daha yüksek ya da düşük çıkmaktadır. Dolayısıyla, kolonun karakterizasyonunun yapılabilmesi için gaz tutulmasına ait bir korelasyon geliştirilmiştir. Regresyon yoluyla elde edilen korelasyon aşağıda verilmiştir. Bu korelasyonun formatı, literatürde en fazla kullanılan Joshi korelasyonunun formatındadır.

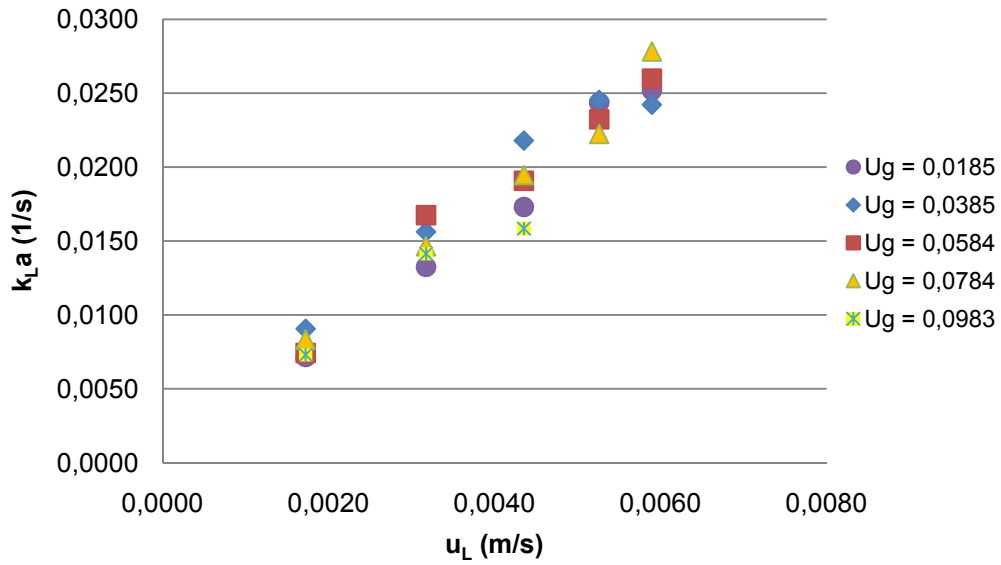
$$\varepsilon_G = \frac{15,14 u_G}{3,18 + 2u_G} \quad (7.5)$$



Şekil 7.12. Gaz tutulması için korelasyonların karşılaştırılması

7.4. Kabarcıklı Kolonda Sıvı Fazı Bireysel Fiziksel Kütle Transferi Katsayısının Belirlenmesi

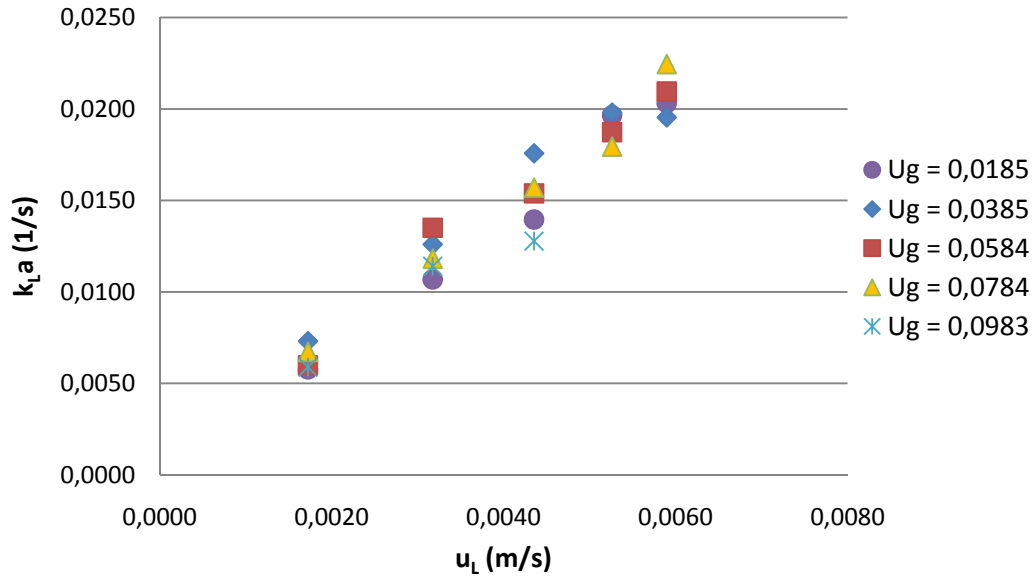
Oksijen desorpsiyonu yoluyla farklı gaz hızlarında değişik sıvı hızları için elde edilen sıvı fazı bireysel fiziksel kütle transfer katsayıları aşağıdaki grafikte verilmiştir. Bu kütle transfer katsayıları oksijen içindir (Şekil 7.13).



Şekil 7.13. Oksijen için elde edilen kütle transfer katsayıları

Deneylerde oksijenin desorpsiyonu analizinden yararlanılarak, oksijen için olan kütle transfer katsayısı bulunmuştur. Karbon dioksit için gerekli düzeltme yapıldıktan sonra elde edilen bulgular ise Şekil 7.14'te verilmiştir. Bu kütle transfer katsayısı değerleri, karbon dioksit içindir. Karbon dioksit için düzeltme faktörü aşağıdadır [Perry, 2008].

$$D.F. = \sqrt{\frac{D_{AB,CO_2}}{D_{AB,O_2}}} = \sqrt{\frac{1,6 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}}{2,5 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}}} = 0,807 \quad (7.6)$$



Şekil 7.14. Karbon dioksit için elde edilen fiziksel kütle transfer katsayıları

Deney verilerine uygun olarak fiziksel kütle transferini verecek bir korelasyon regresyon yöntemiyle elde edilmiştir. Buna göre, çalışılan sistemin fiziksel kütle transfer katsayılarını verecek olan korelasyon aşağıda verilmiştir.

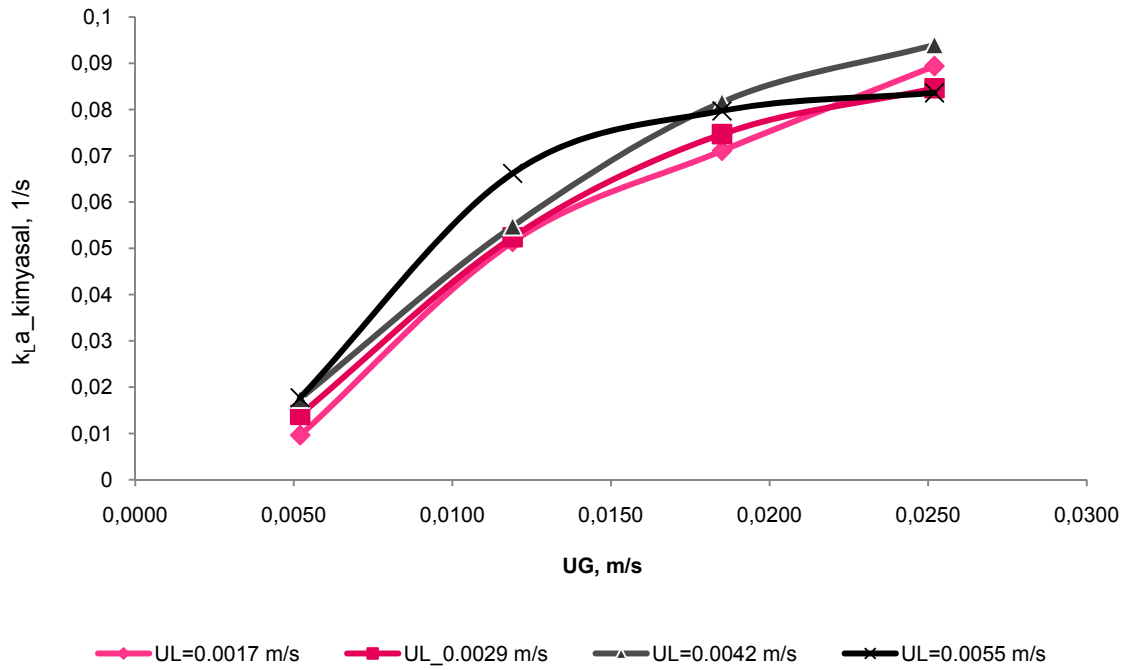
$$(k_L a)_{CO_2} = 2,67 u_L^{0,95} \quad (7.7)$$

Literatürdeki diğer çalışmalara bakıldığında, hacimsel kütle transfer katsayısının genelde sıvı hızına değil gaz hızına bağlı olduğu korelasyonlar mevcuttur. Fakat, literatürdeki sistemlerde, bu çalışmadaki sistemin aksine, sıvıya göre kesikli çalışılmıştır. Literatürde, kütle transferi katsayısının gaz hızına değil, sıvı hızına bağlı olduğu başka bir çalışma ile de [Cerri ve ark, 2009] kanıtlanmıştır.

Benzer şekilde Dhanasekaran ve Karunanithi de çalışmalarında sıvı hızının, hacimsel kütle transferi katsayısına etkisinin büyük olduğunu bulmuşlardır. Kütle transferi katsayısı için regresyon yöntemiyle (Eş. 4.12) sıvı hızına ve gaz tutulmasına bağlı bir korelasyon elde etmişlerdir [Dhanasekaran ve Karunanithi, 2010].

7.5. Kabarcıklı Kolonda Sıvı Fazı Bireysel Kimyasal Kütle Transferi Katsayısının Belirlenmesi

Kabarcıklı kolonda sıvı fazı bireysel kimyasal hacimsel kütle transferi katsayısının belirlenmesi için, farklı gaz ve akış hızlarında sodyum metaboratın karbon dioksit absorpsiyonuna bakılmıştır ve her sıvı akışında bütün gaz hızları için sistem çalıştırılıp, alınan numunelere yaş analiz yapılmıştır. Yapılan analiz sonucunda elde edilen verilerden hesaplanan kimyasal kütle transferi katsayıları Şekil 7.15'te verilmiştir.

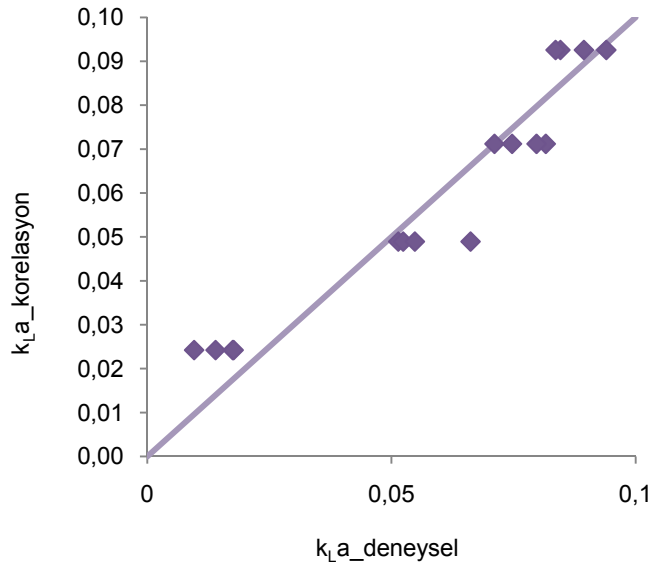


Şekil 7.15. Sıvı fazı bireysel kimyasal kütle transfer katsayıları

Elde edilen veriler için, kimyasal kütle transferi hesabında kullanılacak bir korelasyon geliştirilmiştir. Regresyon yoluyla elde edilen korelasyon aşağıda verilmiştir.

$$(k_L a)_{CO_2, kimyasal} = 2,12 u_G^{0,85} \quad (7.8)$$

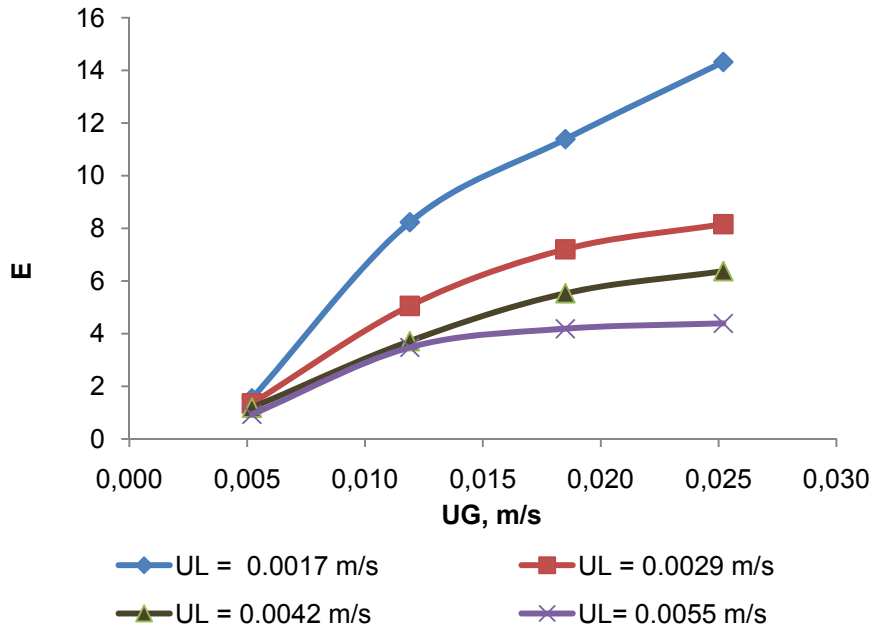
Deneysel yolla elde edilen kütle transfer katsayılarıyla, geliştirilen korelasyonla (Eş. 7.8) elde edilen katsayıların karşılaştırılması Şekil 7.16'da verilmiştir.



Şekil 7.16. Deneysel ve korelasyon sonucu elde edilen katsayılar

7.6. Sodyum Metaborata Karbon Dioksit Absorpsiyonu İçin Artış Faktörünün Belirlenmesi

Sodyum metaborata karbon dioksitin absorpsiyonu kimyasal bir olaydır. Dolayısıyla, bu kimyasal reaksiyonun sisteme nasıl bir katkı sağladığını göstermek için artış faktörü, E, belirlenmiştir. Kimyasal kütle transfer katsayılarının fiziksel kütle transfer katsayılarına oranı artış faktörünü, kimyasal reaksiyonun sisteme ne kadar katkı sağladığını verir.



Şekil 7.17. Çalışılan sistem için belirlenen artış faktörü değerleri

Artış faktörü için de regresyon yoluyla korelasyon elde edilmiştir. Geliştirilen korelasyon aşağıda verilmiştir.

$$E = 1,26 \left(\frac{u_G}{u_L} \right)^{0,91} \quad (7.9)$$

8. SONUÇLAR

- Bu çalışmada, sodyum metaborat çözeltisi içerisinde karbon dioksitin absorpsiyonu çalışılmıştır.
- CO₂'in, sodyum metaborat çözeltisi içerisinde kimyasal reaksiyonlu absorpsiyon ile tutulabildiği yapılan çalışmalarla kanıtlanmıştır.
- Sodyum borhidrürden H₂ eldesinde ürün olarak çıkan sodyum metaborat bu şekilde değerlendirilmiştir.
- Küresel ısınmaya neden olan CO₂'in bertarafı teknolojisinde metaborat çözeltisinin kullanılmasının sonucunda endüstriyel değeri olan ve sanayiide direkt olarak kullanılacak (özellikle cam sanayiinde) sodyum karbonat, sodyum bikarbonat ve boraks karışımının elde edilebileceği XRD analizi ile ve deneysel olarak gösterilmiştir.
- Amin çözeltileri ile yapılan absorpsiyon işleminin fazla enerji harcamasından dolayı aranan alternatif yollardan bir tanesinin de sodyum metaborat çözeltisinin kullanıldığı absorpsiyon işlemi olabileceği kanıtlanmıştır.
- CO₂'in sodyum metaborat çözeltisi ile atmosferik basınç ve çevre sıcaklığında verimli bir şekilde tutulabilmesi önemli bir avantaj olarak değerlendirilebilir.
- Sodyum metaborata CO₂'in absorpsiyonu kimyasal bir absorpsiyon olduğundan ve literatürde bu reaksiyonlara ait bilgi bulunmadığından dolayı reaksiyonların kinetik araştırması yapılmıştır. Aktivasyon enerjisi 18062 J/mol ve frekans faktörü $1,96 \times 10^{-3}$ m³/mol-s

belirlenmiştir. Reaksiyon sabitinin hesaplanabilmesi için denklik elde edilmiştir.

- Reaksiyon, sodyum metaborat konsantrasyonunun büyük olmasından dolayı birinci dereceden kabul edilmiştir. Buna göre, deneylerden elde edilen ortalama sodyum metaborat konsantrasyonu kullanılarak psödo birinci dereceden reaksiyon olarak kabul edilmiştir ve buna bağlı olarak da yeni frekans faktörü 0,11 olarak hesaplanmıştır.
- Absorpsiyon olayının incelenmesindeki ilk basamak olarak kolondaki gaz tutulması incelenmiştir. Literatürdeki korelasyonlarla karşılaştırıldıktan sonra sisteme ve çalışma aralığına uygun bir korelasyon geliştirilmiştir.
- Kolonda, oksijen desorpsiyonu yöntemiyle bireysel fiziksel kütle transferi katsayısı hesaplanmıştır. Yüzey yenileme teorisine uygun olarak difüzyon katsayılarından gidilerek karbon dioksit için olan bireysel fiziksel kütle transferi hesaplanmıştır. Deneysel hata payı içinde gaz hızının fiziksel kütle transferi katsayısına bir etkisi olmadığı gözlenmiştir ve yine sisteme, çalışma aralığına uygun olan sıvı hızına bağlı bir korelasyon geliştirilmiştir.
- Fiziksel kütle transferinin bulunmasının ardından kimyasal kütle transferi belirlenmiştir. Bunu belirleyebilmek için de absorbe olan karbon dioksit miktarları kullanılmıştır. Deneylerdeki her bir sıvı akış hızında bütün gaz akış hızları için kütle transfer katsayısı değerleri hesaplanmıştır. Bireysel kimyasal hacimsel kütle transfer katsayısı için de gaz hızına bağlı bir korelasyon geliştirilmiştir.
- Literatürde kütle transferinin bulunmasında yapılan çalışmaların çoğunda sıvı fazı durgun olarak yapılmıştır. Aksine, bu çalışmada sıvı

ve gaz fazı ters yönlü ve sürekli akış rejiminde kullanılmıştır. Dolayısıyla, literatürden alınan sonuçların doğrudan karşılaştırılması mümkün değildir. Fakat, bu çalışmaya benzer çalışmalar literatürde bulunmuştur. Literatürdeki çalışmalarla bu çalışma uyum göstermektedir.

- Absorpsiyonda reaksiyonun katkısının görülebilmesi için artış faktörü hesaplanmıştır. Çalışılan sıvı ve gaz akışlarındaki artış faktörü hesaplandıktan sonra, her ikisine de bağlı bir korelasyon geliştirilmiştir. Hesaplanan E değeri ile metaborat kullanılarak gerçekleştirilen diğer absorpsiyon sistemlerindeki kimyasal kütle transfer katsayısı hesaplanabilir ve tasarımları yapılabilir.

9. ÖNERİLER

Çalışmanın devamında, karbon dioksitin sodyum metaborata absorpsiyonunun kabarcıklı kolonlar dışındaki sistemlere de uyarlanabilmesi için ara yüzey alanı bulunabilir.

KAYNAKLAR

Abu-Zahra, M.R.M., Scheniders, L.H.J., Niederer, J.P.M., Feron, P.H.M., Versteeg, G.F., "CO₂ capture from power plants, Part I : A parametric study of the technical performance based on monoethanolamine", ***International Journal of Greenhouse Gas Control***, 1:37-46 (2007).

Argo, W.B., Cova, D.R., ***Ind. Eng. Chem. Process Design Develop.***, 4, 352 (1965).

Bach H.F., Pilhofer T., "Variation of gas hold-up in bubble columns with physical properties of liquids and operating parameters of columns", ***Ger. Chem. Eng.***, 5:270–5 (1978).

Bukur, D.B., Daly, J.G., "Gas holdup in bubble columns for Fischer–Tropsch synthesis", ***Chem. Eng. Sci.***, 42:2967–9 (1987).

Cerri, M.O., Baldacin, J.C., Cruz, A.J.G., Carlos, O.H., Badino, A.C., "Prediction of mean bubble size in pneumatic reactors", ***Biochemical Engineering Journal***, doi:10.1016/j.bej.2009.03.009 (2009).

Dhanasekaran, S., Karunanithi, T., "Mass transfer studies in a novel perforated plate bubble column", ***International Journal of Chemical Reactor Engineering***, 8:A116 (2010).

Dhaouadi, H., Poncin, S., Hornut, J.M., Midoux, N., "Gas-liquid mass transfer in bubble column reactor : Analytical solution and experimental confirmation", ***Chemical Engineering and Processing***, 47:548-556 (2008).

Dinçer, İ., Midilli, A., Hepbaşlı, A., Karakoç, T.H., "Global Warming : Engineering Solutions", First Edition, ***Springer***, New York, 1-3, (2010).

Deckwer, W.D., Burckhart, R., Zoll, G., "Mixing and mass transfer in tall bubble columns", ***Chem. Engng. Sci.***, 29:2100–2177 (1974).

Deckwer, W.D., Louisi, Y., Zaidi, A., Ralek, M., "Hydrodynamic properties of the Fisher–Tropsch slurry process", ***Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev.***, 19:699–708 (1980).

Deckwer, W.D., Nyugen-Tien, K., Kelkar, B.G., Shah, Y.T., "Applicability of axial dispersion model to analyse mass transfer measurements in bubble columns", ***AIChE Journal***, 29(6):915-922 (1983).

Degaleesan, S., Dudukovic, M., Pan, Y. "Experimental Study Of Gas Induced Liquid-flow Structures in Bubble Columns", ***AIChE Journal***, 47:1913-1931 (2001).

Dudley, J, "Mass Transfer in Bubble Columns : A Comparison of Correlations", **Wat. Res.**, 29(4):1129-1138 (1995).

Fan, L.S., "Gas-Liquid-Solid Fluidization Engineering", **Butterworths**, Boston (1989).

Fan, L.S., Matsuura, A., Chern, S.S., "Hydrodynamic characteristics of a gas-liquid-solid fluidized bed containing a binary mixture of particles", **AIChE Journal**, 31:1801-10 (1985).

Harriot, P., "Chemical Reactor Design", First Edition, **Marcel Dekker Inc.**, Ithaca, New York (2002).

Hibiki, T., Ishii M., "Two-group interfacial area transport equations at bubbly-to-slug flow transition", **Nucl. Eng. Des.**, 202:39-76 (2000).

Hikita, H., Kikukawa, H., "Liquid phase mixing in bubble columns : Effect of liquid properties", **Chem. Eng. Journal**, 8:191 (1974).

Hills, J.H., "Radial non-uniformity of velocity and voidage in a bubble column", **Ind. Eng. Chem. Process. Des. Dev.**, 20:540-5 (1974).

Hills, J.H., "The operation of a bubble column at high throughputs and gas holdup measurement", **Chem. Eng. J.**, 12:89-99 (1976).

Hughmark, G.A., "Holdup and mass transfer in bubble columns", **Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev.**, 6:218-20 (1967).

Hyndman, C.L., Larachi, F., Guy C., "Understanding gas-phase hydrodynamics in bubble columns: a convective model based on kinetic theory", **Chem. Eng. Sci.**, 52:63-77 (1997).

Internet : Energy Information Administration (EIA), "Annual Energy Outlook", <http://www.eia.doe.gov/oiaf/aeo/> (2010).

Joshi, J.B., Deshpande, N.S., Dinkar, M., Phanikumar, D.V., "Hydrodynamic stability of multiphase reactors", **Adv. Chem. Eng.**, 26:3-127 (2001).

Joshi, J.B., Shah, Y.T., "Hydrodynamic and mixing models for bubble column reactors", **Chem. Engng. Commun.**, 11:165-199 (1981).

Joshi, J.B., Sharma, M.M., "A circulation model for bubble columns", **Trans. Inst., Chem. Engrs.**, 57:244-251 (1979).

Ityokumbul, M.T., Kosaric, N., Bulani, W., "Gaz hold-up and liquid mixing at low and intermediate gas velocities : Air-water system", **The Chemical Engineering Journal**, 53:167-172 (1994).

Kantarci, N., Borak, F., Ulgen, K.O., "Review : Bubble column reactors", ***Process Biochemistry***, 40:2263-2283 (2005).

Kawagoe, K., Inoue, T., Nakao, K., Otake, T., "Flow-pattern and gas holdup conditions in gas-sparged contactors", ***Int. J. Chem. Eng.***, 16:176–83 (1976).

Kawase, Y., Moo-Young, M., "Heat taransfer in bubble column reactors with Newtonian and non-Newtonian fluids", ***Chem. Eng. Res. Des.***, 65:121-6 (1987).

Kawase Y., Umeno S., Kumagai T., "The prediction of gas hold-up in bubble column reactors: Newtonian and non-Newtonian fluids", ***Chem. Eng. Journal***, 50(1):1–7 (1992).

Krishna R., De Stewart J.W.A., Hennephof D.D., Ellenberger J., Hoefsloot H.C.J., "Influence of increased gas density on hydrodynamics of bubble column reactors", ***AIChE Journal***, 40:112–9 (1994).

Krishna R., Wilkinson P.M., Van Dierendonck L.L., "A model for gas holdup in bubble columns incorporating the influence of gas density on flow regime transitions", ***Chem. Eng. Sci.***, 46:2491–6 (1991).

Kulkarni, A., Shah, Y.T., Kelkar, B.G., "Gas hold-up in bubble columns with surface-active agents : A theoretical model", ***AIChE Journal***, 33, 690-693 (1987).

Lockett, M.J., Kirkpatrick, R.D, "Ideal bubbly flow and actual flow on bubble columns", ***Trans. Inst. Chem. Engrs***, 53:267-273 (1975).

Luo, X., Lee, D.J., Lau, R., Yang, G., Fan, L., "Maximum stable bubble size and gas holdup in high-pressure slurry bubble columns", ***AIChE Journal***, 45:665–85 (1999).

Matsuura, A., Fan, L.S., "Distribution of bubble properties in a gas–liquid–solid fluidized bed", ***AIChE Journal***, 30:894–903 (1984).

Metz, B., Davidson, O., Coninck, H., Loos, M., Meyer, L., "Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) - Carbon Dioxide Capture and Storage", 1st Edition, ***Cambridge Univerity Press***, New York, 19-37 (2005).

Miller, D.N., "Gas holdup and pressure drop in bubble column reactors", ***Ind. Eng. Chem. Process. Des. Dev.***, 19:371–7 (1980).

Millies, M., Mewes, D., "Interfacial area density in bubbly flow", ***Chem. Eng. Process***, 38:307–19 (1999).

Oels, U., Lucke, J., Buchholz, R., Schugerl, K., "Influence of gas distributor type and composition of liquid on the behavior of a bubble column bioreactor", **Ger. Chem. Eng.**, 1:115–129 (1978).

Olmos, E., Gentric, C., Vial, Ch., Wild, G., Midoux, N., "Numerical simulation of multiphase flow in bubble column reactors: Influence of bubble coalescence and break-up", **Chem. Eng. Sci.**, 56:6359–65 (2001).

Perry, R.H., Green, D.W., "Perry's Chemical Engineers' Handbook", 8th Edition, **McGraw Hill Publications**, New York (2008).

Pino, L.Z., Solari, R.B., Siuier, S., Estevez, L.A., Yopez, M.M., Saez, A.E., "Effect of operating conditions on gas holdup in slurry bubble columns with a foaming liquid", **Chem. Eng. Commun.**, 117:367–82 (1992).

Prakash, A., Margaritis, A., Li, H., "Hydrodynamics and Local Heat Transfer Measurements in a Bubble Column With Suspension Of Yeast", **Biochem. Eng. Journal**, 9:155-163 (2001).

Reilley, I.G., Scott, D.S., De Bruijin, T., Jain, A., Piskorz, J., "A correlation for gas holdup in turbulent coalescing bubble columns", **Can. J. Chem. Eng.**, 64:705–17 (1986).

Sada, E., Katoh, S., Yoshil, H., "Performance of the gas–liquid bubble column in molten salt systems", **Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev.**, 23:151–4 (1984).

Schulman, H.L., Molstad, M.C., **Ind. Eng. Chem.**, 42:1058 (1950).

Schumpe, A., Grund, G., "The gas disengagement technique for studying gas hold up structure in bubble columns", **Can. J. Chem. Eng.**, 64:891–6 (1986).

Shah, Y.T., Godbole, S.P., Deckwer, W.D., "Design parameters estimations for bubble column reactors", **AIChE Journal**, 28:353–79 (1982).

Shao, R., Stangeland, Aage, "Amines used in CO₂ Capture – Health and Environmental Impacts", Bellona Report, **The Bellona Foundation**, Norway (2009).

Takavoli, T., Syaiful, S., Bascoul, A., Delmas, H., "Evolution axiale du coefficient de transfert de matière en colonne à bulle et en lit fluidisé triphasique", **Canadian Journal Chem. Eng.**, 73:55-65 (1995).

Thorat, B.N., Joshi, J.B., "Regime transition in bubble columns: experimental and predictions", **Exp. Therm. Fluid. Sci.**, 28:423–30 (2004).

Uysal, B.Z., “Kütle Transferi Esasları ve Uygulamaları”, 2. Baskı, **Gazi Üniversitesi Yayınları**, Ankara, 109-111 (2003).

Winkler, M., “Biological treatment of waste water”, 1st Edition, **Ellis Horwood**, Chichester (1981).

Wu, Y., Ong, B.J., Al-Dahhan, M.H., “Predictions of gas hold-up profiles in bubble column reactors”, **Chem. Eng. Sci.**, 56:1207–10 (2001).

Yamashita F., Inoue H., “Gas holdup in bubble columns”, **J. Chem. Eng. Jpn.**, 8:444–9 (1975).

EKLER

EK – 1. Oksijen probunun kullanımı

Oksijen probunun kullanımı, oksijenin tüketilme hızını ölçülmesi için bir metottur. Oksijen probu, polarografik elektrottur ve özel olarak oksijenin tüketimini ölçmek için tasarlanmıştır. Polarografik ölçümlerde, uygun koşullar altında gerçekleşen olan reaksiyon, reaksiyona girecek olan maddenin elektrot yüzeyine olacak difüzyon hızı tarafından sınırlandırılır. Difüzyon hızı, reaksiyona girecek olan maddenin ortamdaki konsantrasyonuyla doğru orantılıdır; dolayısıyla, elektrottaki reaksiyon da maddenin ortamdaki konsantrasyonuyla orantılı olacaktır. Ölçülen değişken ise elektrot reaksiyonundan kaynaklanan akımdır. Oluşan akımın büyüklüğü, madde konsantrasyonunu ifade eder.

Oksijen elektrotu için bir çok tasarım mevcuttur. Bu çalışmada kullanılan cihaz ise Clark tipi (ya da membran kaplanmış) probdur. Bu tip elektrot, anot ve katot içeren bir elektrolitik hücreden oluşur; dolayısıyla elektrot yerine hücre ya da prob demek daha doğru olacaktır.

Probun yapısı Şekil 1.1’de verilmiştir. Prob, yalıtılmış plastik bir gövdeden oluşmuştur ve bu gövdeye iki dikdörtgen gümüş ve bir dairesel platin elektrot gömülmüştür. Gümüş elektrotlar anot olarak görev yaparken, platin elektrot katot olarak görevi görmektedir. Elektrotlar, nötr elektrolit olan sodyum klorür ve sodyum hidroksit çözeltisinden oluşan ince bir tabakayla kaplanmıştır. Elektrolitin üzeri ise ince teflon film tarafından kaplanmıştır.

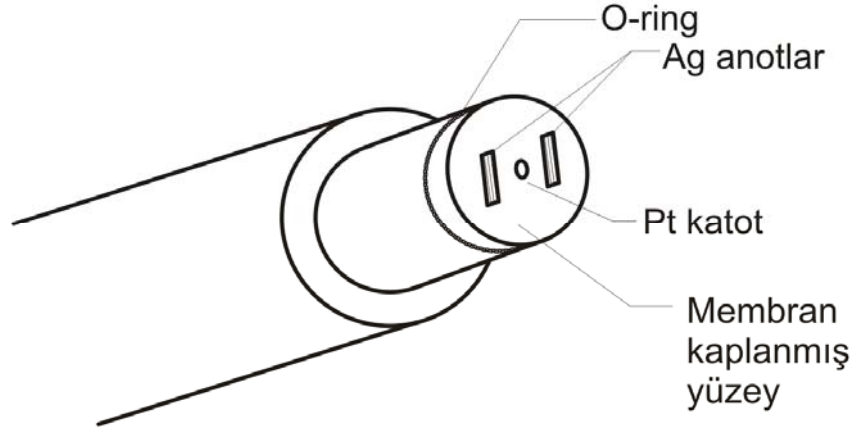
Oksijen, teflon membranından difüzyonla geçerek platinyum katota ulaşır ve burada indirgenir.



Gümüş elektrotta gerçekleşen reaksiyon ise aşağıdaki gibidir.



EK – 1. (Devam) Oksijen probunun kullanımı



Şekil 1.1. Oksijen probu

Bütün reaksiyonlar teflon membranin arkasında gerçekleşmektedir. Bu sayede, bu tip bir elektrotla probun yapıldığı maddeler zarar görmeksizin her akışkanın oksijen içeriği akışkan elektriği iletme bile ölçülebilir.

Elektrotlardaki reaksiyon, elektrotlara uygulanan voltaj tarafından yürütülür.

EK – 2. Oksijen probunun kalibrasyonu

- %100 Hava Doygunluğu İçin Kalibrasyon

- 1- İçinde su bulunan bir kabın içine YSI 5700 Series Probe yerleştirilir (5739 probu nemli sünger ile birlikte konulur veya sabit nemi sağlamak için nemli bir beze sarılır). Sıcaklık sabit kalana kadar beklenir; sıcaklığın sabit kalması kalibrasyon için önemlidir.
- 2- Cihazın üzerindeki düğme %CAL'a getirilir.
- 3- Bir kere CAL butonuna basıldıktan sonra ve düğme %'ye getirilir. Ekranda 100,0(±0,2) yazmalıdır. Doğruluğun sağlanması için en az bir dakika sabit bir değer görülmelidir.

- Ölçümler

Sıcaklık

- 1- Prob sıvının içerisine konulur.
- 2- Cihazın üzerindeki düğme TEMP °C'ye çevrilir. Okunan değer sabit kalana kadar beklenir.

Oksijen

- 1- Kalibre edilmiş prob sıvının içerisine konur ve karıştırılır.
- 2- Cihazın üzerindeki düğme %'ye çevrilir. Ekranda bir dakika boyunca aynı değer okunana kadar sabitliği sağlamak için probun dengeye gelmesi beklenir. Bu değer mg/L değerinde okunması için de düğme mg/L'ye getirilir ve aynı şekilde beklenir.

EK – 2. (Devam) Oksijen probunun kalibrasyonu

Çizelge 2.1. 760 mmHg basınçta suya doymun havada su içerisindeki oksijenin çözünürlüğü

Sıcaklık °C	Çözünürlük mg/L	Sıcaklık °C	Çözünürlük mg/L	Sıcaklık °C	Çözünürlük mg/L
0	14,62	16	9,87	32	7,31
1	14,22	17	9,67	33	7,18
2	13,83	18	9,47	34	7,07
3	13,46	19	9,28	35	6,95
4	13,11	20	9,09	36	6,84
5	12,77	21	8,92	37	6,73
6	12,45	22	8,74	38	6,62
7	12,14	23	8,58	39	6,52
8	11,84	24	8,42	40	6,41
9	11,56	25	8,26	41	6,31
10	11,29	26	8,11	42	6,21
11	11,03	27	7,97	43	6,12
12	10,78	28	7,83	44	6,02
13	10,54	29	7,69	45	5,93
14	10,31	30	7,56	46	5,84
15	10,08	31	7,43	47	5,74

EK – 2. (Devam) Oksijen probunun kalibrasyonu

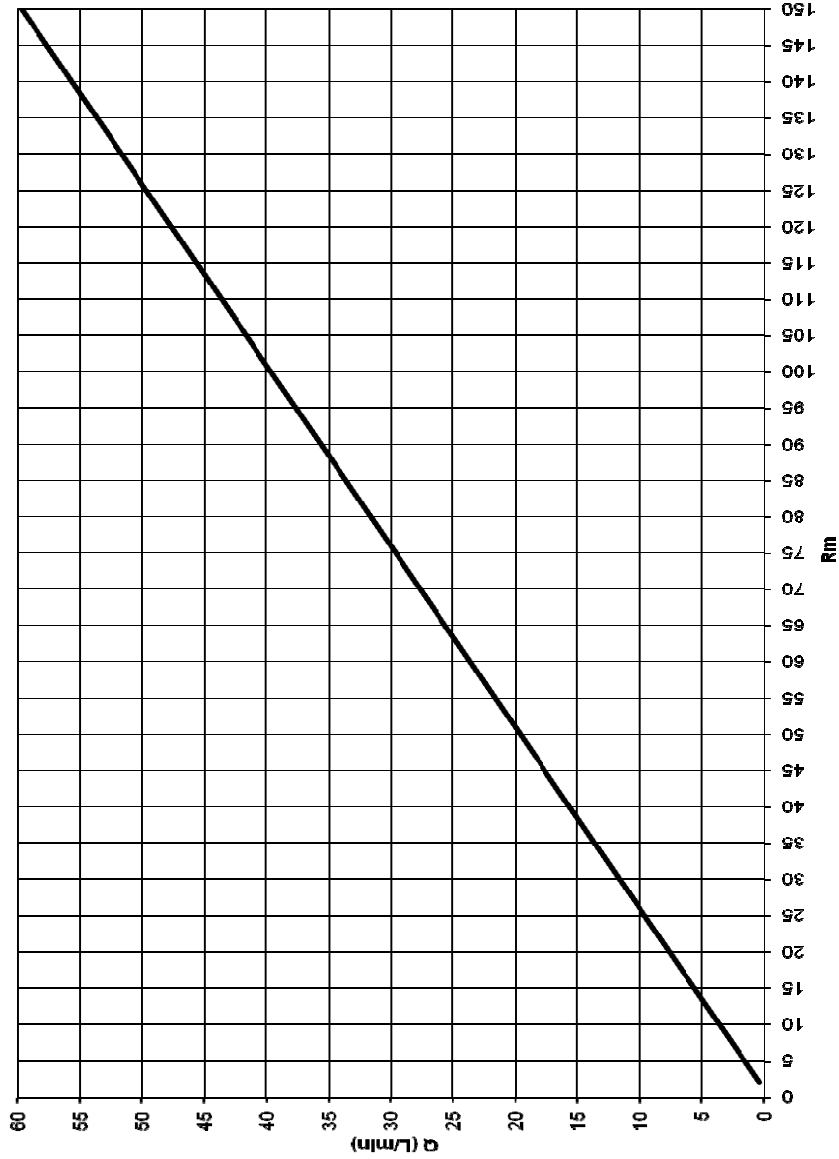
Çizelge 2.2. Farklı basınçlar için kalibrasyon değerleri

Basınç mmHg	Kalibrasyon Değeri (%)	Basınç mmHg	Kalibrasyon Değeri (%)
768	101	623	82
760	100	616	81
752	99	631	83
745	98	608	80
737	97	600	79
730	96	593	78
722	95	585	77
714	94	578	76
707	93	570	75
699	92	562	74
692	91	555	73
684	90	547	72
676	89	540	71
669	88	532	70
661	87	524	69
654	86	517	68
646	85	509	67
638	84	502	66

EK – 3. Rotametre kalibrasyonu

Deneyler sırasında gaz hızını ölçmek için kullanılan rotametrenin kalibrasyonu yapılmıştır. Kalibrasyon eşitliği ve grafiği aşağıda verilmiştir.

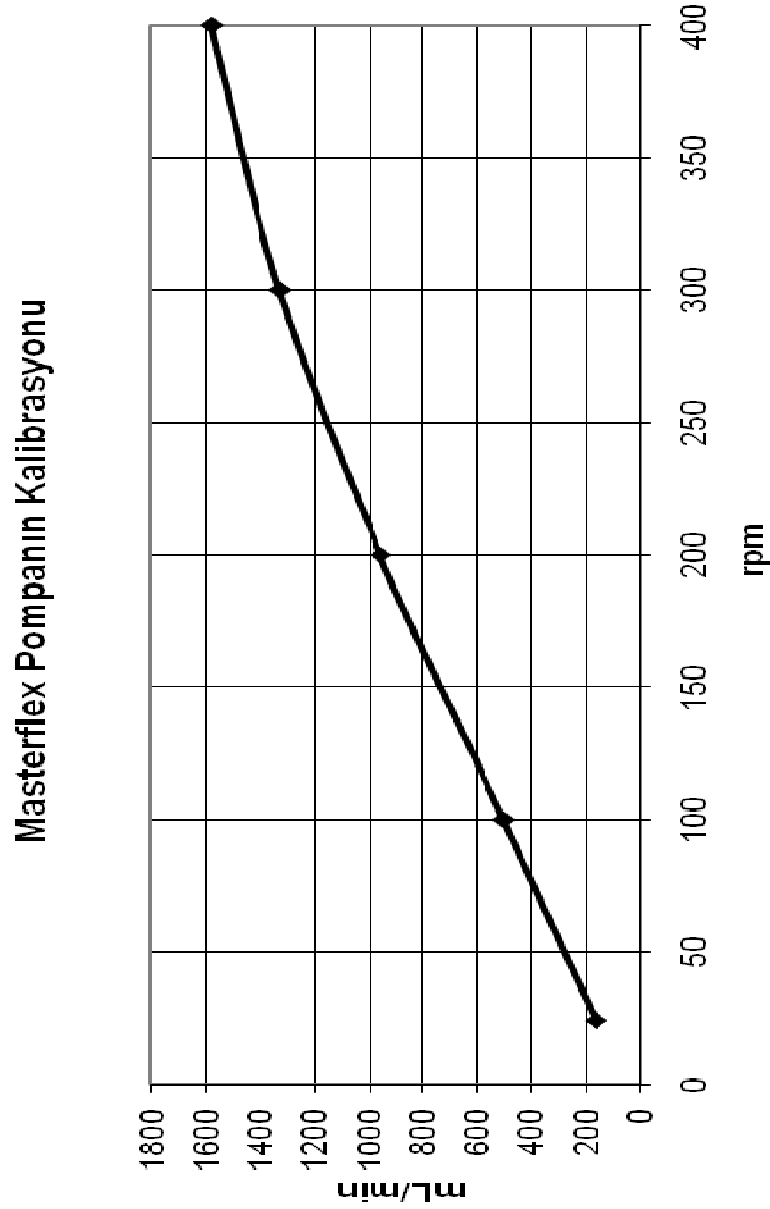
$$Q[cm^3 / s] = 6.68186R_m - 7.08111$$



Şekil 3.1. Gaz hızını ölçmek için kullanılan rotametrenin kalibrasyon grafiği

EK – 4. Pompa kalibrasyonu

Deneyler sırasında kullanılan Masterflex pompanın kalibrasyonu yapılmıştır. Kalibrasyon grafiği aşağıda verilmiştir.



Şekil 4.1. Masterflex pompanın kalibrasyon grafiği

EK – 5. Hidroklorik asit ile B₂O₃ analiz yöntemi

Kullanılan bu analiz yönteminin bir diğer adı da “yaş analiz yöntemi”dir. Bu yöntemde aşağıda verilen yol izlenmiştir.

- Analizi yapılacak numuneden 5 mL alınarak saf su ile 20 kat seyreltilir. Hazırlanan seyreltik çözeltiden 10 mL alınarak temiz bir erlene konulur ve üzerine titrasyonu rahat gözlemleyebilmek için bir miktar saf su ilave edilir. Saf su içerisinde bor bulunmadığı için eklenen su deney sonucunu değiştirmemektedir.
- Erkelen alınan çözelti üzerine 3-4 damla metil kırmızısı ilave edilir ve bir kaç damla 0,5 N HCl eklenerek asidik hale getirilir.
- Daha sonra bir damla 0,5 N NaOH ile renk dönümü sağlanarak dönüm noktası temin edilir. Eğer bu işle sırasında renk dönümü 3 damladan fazla NaOH kullanılarak sağlanırsa, çözelti tekrar HCl çözeltisi ile asidik hale getirilir.
- Çözeltiye 2-3 damla fenolftalein ve 1-2 spatül mannit (borla kompleks yapı oluşturarak borun NaOH ile titrasyonunu kolaylaştırır) ilave edilir ve 0,5 N NaOH çözeltisi ile açık pembe renk görünene kadar titre edilir.
- Titre edilen çözeltiye 1 spatül daha mannit eklenir ve çözeltinin rengi değişmiyor ise, titrasyonu tamamlanmıştır. Renk değişiyorsa, titrasyona açık pembe renk sabit kalana kadar devam edilir. Harcanan NaOH miktarı kaydedilir.
- B₂O₃ miktarının hesaplanması aşağıdaki formül yardımıyla yapılır.

$$B_2O_3 \left(\frac{g}{L} \right) = \frac{0,017405 \cdot F \cdot S}{V_{\text{ç}}} \cdot n \cdot 1000$$

EK – 5. (Devam) Hidroklorik asit ile B_2O_3 analiz yöntemi

Burada; F : 0,5 N NaOH faktörü

S : 0,5 N NaOH sarfiyatı (mL)

0,017405; sabit sayı (1 mL 0,5 N NaOH'a karşılık gelen B_2O_3 miktarıdır)

$V_{\text{Ç}}$: analizi yapılan numuneden çekilen miktar (mL)

N; sıvılar için seyreltme faktörü

EK – 6. Numune içindeki karbon dioksit miktarının belirlenmesi – yaş analiz metodu

1. Reaktörden alınan 250 mL'lik örnekten pipetle alınan 5'er mL'lik erlene konulur.
2. Erlen 1'deki çözeltiye bir damla fenolftalein indikatörü damlatılır ve pembe renk kaybolana kadar 0,2 M HCl ile titre edilir. Kullanılan asit miktarı T1 not edilir. Bu değer tüm hidroksiti nötralize edecek ve karbonatı bikarbonata dönüştürecek asit miktarını verir. Sonra aynı erlene 1 damla metiloranj indikatörü damlatılır ve son noktaya ulaşana dek aynı asit ile titre edilir. Son noktaya ulaşıldığında kullanılan asit miktarı T2 not edilir. Bu değer (T2-T1) biçiminde tüm bikarbonatın nötralize edilmesi için gerekli asit miktarını verir.
3. Sonuçların hassas bulunabilmesi için yukarıdaki yöntemin bir kez daha tekrarlanır.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, Adı : UYSAL, Duygu
 Uyruğu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 27.06.1988 Ankara
 Medeni Hali : Bekar
 Telefon : 0 (312) 582 35 52
 e-mail : duysal@gazi.edu.tr

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Lisans	Gazi Üniversitesi Kimya Mühendisliği Bölümü	2009
Lise	TED Ankara Koleji	2005

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
Şubat 2011 -	Gazi Üniversitesi	Araştırma Görevlisi
Temmuz 2010- Ocak 2011	TEKNOPROM	AR-GE Mühendisi
Şubat 2010- Haziran 2010	Gazi Üniversitesi	Öğrenci Asistanlık

Yabancı Dil

İngilizce (Çok iyi), Fransızca (Başlangıç)

Yayınlar

1. Uysal, B. Z., F. F. Ar, M. Tanrıverdi ve **D. Uysal**, “ İç Yüzeyi Boyunca Partiküller İnen Boru Duvarından Isı Transferi”, ULIBTK’07 16. Ulusal Isı Bilimi ve Tekniği Kongresi Bildiri Kitabı, 1095-1100, Kayseri, 30 Mayıs-2 Haziran 2007.
2. Uysal, B. Z., Ö. M. Doğan, **D. Uysal** ve S. Demir, “Kabarcıklı Kolonlarda Isı Transferi”, ULIBTK’09 17. Ulusal Isı Bilimi ve Tekniği Kongresi Bildiri Kitabı , Sivas, 24-27 Haziran 2009.
3. Sönmez, Y.M., **D. Uysal**, D. Öztan, I. Ölmez, Ö.M. Doğan, U.G. Zafer, B.Z. Uysal, “Production of humic acid from Turkish leonardites and absorption of copper from waste water”, CHISA-2010, 19th International Congress of Chemical and Process Engineering, Prague, Czech Republic, 28 August-1 September 2010.
4. Öztan, D., Y.M. Sönmez, **D. Uysal**, Ö.M. Doğan, U. Gündüz, M. Özdingiş, S. Anaç, B.Z. Uysal, “Çanakkale-Çan Linyitinin Kuruma Davranışı”, 9. Ulusal Kimya Mühendisliği, Gazi Üniversitesi, Ankara, 22-25 Haziran 2010.
5. Sönmez, Y.M., B.Z. Uysal, U.G. Zafer, S. Anaç, **D. Uysal**, D. Öztan, “Leonarditlerden Fülvik Asit Üretimi”, 9. Ulusal Kimya Mühendisliği Kongresi, Gazi Üniversitesi, Ankara, 22-25 Haziran 2010.
6. Uysal B.Z., Y.M. Sönmez, **D. Uysal**, S. Anaç, D. Öztan, U.G. Zafer, Ö.M. Doğan, M. Özdingiş, Z. Olgun, “Fulvic Acid Production from Turkish Leonardites”, 15th Meeting of the International Humic Substances Society, Canary Islands, Spain, 27 June-2 July 2010.

7. **Uysal, D.**, Ö.M. Doğan, B.Z. Uysal, “Kabarcıklı Kolonda Sodyum Metaborat Çözeltisine Karbon Dioksitin Absorpsiyonu” 9. Ulusal Kimya Mühendisliği Kongresi, Gazi Üniversitesi, Ankara, 22-25 Haziran 2010.
8. Uysal, B.Z., Doğan, Ö.M., **Uysal D.**, Demir, S., “Heat transfer in bubble columns”, Strojarstvo, 5, 543-548, 2010

Hobiler

Yüzme, Tenis, Bisiklet, Hiking