



KARBİTOL ASETAT İLE KARBON DİOKSİTİN ABSORPSİYONU

İrem KOÇYİĞİT ÇAPOĞLU

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
KİMYA MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

TEMMUZ 2020

İrem KOÇYİĞİT ÇAPOĞLU tarafından hazırlanan “KARBİTOL ASETAT İLE KARBON DİOKSİTİN ABSORPSİYONU” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Gazi Üniversitesi Kimya Mühendisliği Ana Bilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Prof. Dr. Özkan Murat DOĞAN

Kimya Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

İkinci Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Duygu UYSAL ZIRAMAN

Kimya Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Başkan: Prof. Dr. Emine BAYRAKTAR

Kimya Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Ankara Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Üye: Prof. Dr. Ayla ALTINTEN

Kimya Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Üye: Doç. Dr. Hakan KAYI

Kimya Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Ankara Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Tez Savunma Tarihi: 02/07/2020

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

.....

Prof. Dr. Sena YAŞYERLİ

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

İrem KOÇYİĞİT ÇAPOĞLU

02/07/2020

KARBİTOL ASETAT İLE KARBON DİOKSİTİN ABSORPSİYONU

(Yüksek Lisans Tezi)

İrem KOÇYİĞİT ÇAPOĞLU

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Temmuz 2020

ÖZET

Günümüzün en önemli ve güncel problemlerinden biri atmosfere salınan sera gazları sonucu meydana gelen küresel ısınmadır. Küresel ısınmadaki en kritik etkiyi yapan sera gazı, karbon dioksit (CO_2) olarak kabul edilmektedir. Karbon dioksit en yüksek oranda, fosil yakıtların güç üretimi ve ısı için yakılması sonucu ortaya çıkmaktadır. Günümüzde, atmosfere salınan karbon dioksit emisyonlarını kontrol altına almak amacıyla birçok çalışma yapılmaktadır. Bunun için en etkili yöntemlerden biri, noktasal emisyon kaynaklarındaki baca gazı içerisindeki karbon dioksitin bir çözelti içerisinde absorplanmasıdır. Ticari uygulamalarda çoğunlukla absorbent olarak alkanolamin çözeltileri kullanılmaktadır. Bununla birlikte, alkanolaminlerin karbon dioksit yükleme kapasiteleri sınırlı ve kullanılan çözeltinin rejenerasyonu için harcanan enerjinin yüksek olması nedeniyle işletme maliyeti oldukça yüksektir. Bu sebeple, araştırmacıların odaklandığı konu, mevcut sistemlerdeki dezavantajları ortadan kaldıracak verimli, alternatif çözeltiler bulmaktır. Bu yüksek lisans tezi çalışmasında, karbon dioksitin, karbitol asetat ile absorpsiyonu incelenmiştir. Karbitol asetat, yüksek kaynama noktası ve düşük viskozite özelliğine sahip olması, korozif olmaması, suda kolayca çözünbilmesi, kararlı yapıda olması gibi özellikleri sebebiyle tercih edilmiştir. Ayrıca, kolay bir şekilde rejener edilebilen karbitol asetat, yapısal olarak karbon dioksitin fiziksel absorpsiyonuna uygundur. Bu özellikleri ile karbitol asetat, enerji tasarrufu sağlaması ve daha az maliyetli olması yönüyle dikkate değer alternatif bir çözümdür. Literatürde bu çözeltinin karbon dioksit absorpsiyonunda kullanılması ile ilgili çok az çalışma olduğundan bu çalışmada karbon dioksit-karbitol asetat sisteminin kütle transferinde etkin olan parametrelerin çalışması yapılmıştır. Çalışmada öncelikle, karbon dioksitin karbitol asetat içerisindeki difüzyon katsayıları diyafram hücre sisteminde deneysel olarak belirlenmiştir. Bu çalışmadan elde edilen deneysel verilerle teorik olarak yapılan hesaplamaların karşılaştırması yapılmıştır. Daha sonra Raschig halkalı laboratuvar ölçekli dolgu kolonda kütle transferi karakterizasyonu çalışmaları yapılmıştır. Kütle transferi karakterizasyonu çalışmalarında öncelikle sıvı ve gaz tarafı bireysel fiziksel kütle transferi katsayıları (k_L^0a ve k_G^0a) deneysel olarak elde edilmiştir. Daha sonra, iki direnç teorisi ile su-karbon dioksit sistemi için gaz tarafı toplu fiziksel kütle transfer katsayısı (K_G^0a) hesaplanmıştır. Çalışmalara, karbon dioksitin sodyum hidroksit çözeltisine absorpsiyonu ile devam edilmiştir. Bu sistemden, gaz tarafı toplu kimyasal kütle transfer katsayıları (K_Ga) elde edilmiştir. Son olarak, karbon dioksitin karbitol asetat çözeltisine absorpsiyonu incelenmiş olup, bu sistemden de gaz tarafı toplu fiziksel kütle transferi katsayıları elde edilmiştir. Ayrıca doğrusal olmayan regresyon yöntemi ile her iki sistem için korelasyonlar geliştirilmiştir.

Bilim Kodu : 91212
Anahtar Kelimeler : Karbon dioksit, Karbitol asetat, Fiziksel absorpsiyon
Sayfa Adedi : 123
Danışman : Prof. Dr. Özkan MURAT DOĞAN
İkinci Danışman : Dr. Öğr. Üyesi Duygu UYSAL ZIRAMAN

ABSORPTION OF CARBON DIOXIDE WITH CARBITOL ACETATE

(M. Sc. Thesis)

İrem KOÇYİĞİT ÇAPOĞLU

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

July 2020

ABSTRACT

Global warming is one of the most recent and important problem of the world, which is caused by greenhouse gases released to the atmosphere. Carbon dioxide (CO₂) is considered to have the highest critical impact that affects global warming amongst all greenhouse gases. Carbon dioxide occurs at the highest rate by burning fossil fuels for power generation and heat. Currently, many researches are carried out to control the carbon dioxide emissions released into the atmosphere. One of the most effective method is to capture carbon dioxide in flue gases at the source of emission into a solution. Alkanolamine solvents are mostly used as absorbent in commercial applications. However, these solvents have several drawbacks related to limited cyclic carbon dioxide loading capacity and the operating cost is fairly high due to the high energy requirement for regeneration of the solution. Therefore, researchers have been focused on finding efficient alternative solutions that may eliminate the disadvantages of the current systems. In this master's thesis, possibility of using carbitol acetate for carbon dioxide capture was investigated. Carbitol acetate has been preferred because of its thermally stable characteristic, high boiling point, low viscosity, non-corrosivity and its high solubility in water. In addition, carbitol acetate can be easily regenerated and it is structurally suitable for physical absorption of carbon dioxide. With these features, carbitol acetate is a remarkable alternative solution in terms of energy saving and lower cost. Since, there are hardly any studies about using carbitol acetate for absorption of carbon dioxide in literature, studies about parameters that are effective on mass transfer in carbon dioxide-carbitol acetate system were done. Firstly, diffusion coefficients of carbon dioxide in carbitol acetate were determined experimentally using a diaphragm cell system. Theoretical calculations were compared with experimental data which obtained from this part of the study. Then, mass transfer characterization studies were performed using a laboratory scale Raschig ring packed column. In the mass transfer characterization studies, primarily the liquid side and gas side physical individual mass transfer coefficients (k_L^0a ve k_c^0a) were obtained experimentally. Subsequently, the gas-side physical overall mass transfer coefficients (K_c^0a) were calculated regarding the two-resistance theory for the carbon dioxide-water system. Studies were continued by absorption of carbon dioxide into sodium hydroxide solution. In this means, gas side overall chemical mass transfer coefficients ($K_c a$) were obtained. Finally, absorption of carbon dioxide with carbitol acetate were investigated and gas side overall physical mass transfer coefficients were obtained. In addition, by nonlinear regression method correlations were developed for both systems.

Science Code : 91212

Key Words : Carbon dioxide, Carbitol acetate, Physical absorption

Page Number : 123

Supervisor : Prof. Dr. Özkan Murat DOĞAN

Co-Supervisor : Asst. Prof. Dr. Duygu UYSAL ZIRAMAN

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans çalışmalarım süresince bilgi ve katkılarıyla beni aydınlatıp yol gösteren ve yardımını esirgemeyen, değerli tecrübelerinden yararlandığım, manevi olarak da desteğini hep hissettirmiş olan sayın Hocam Prof. Dr. Özkan Murat DOĞAN'a bana vermiş olduğu emeklerinden dolayı teşekkürlerimi sunarım.

Tüm çalışmalarım boyunca bilgi ve tecrübeleriyle destek olan, herhangi bir konuda yardıma ihtiyaç duyduğumda her zaman yanımda olan, manevi desteğini içtenlikle hissettiğim kıymetli Hocam Dr. Öğr. Üyesi Duygu UYSAL ZIRAMAN'a çok teşekkür ederim.

Eğitim öğretim hayatımda bakış açımı değiştiren, araştırmanın, doğru bilgi kaynağına ulaşmanın ve etik olmanın önemini en güzel şekilde öğreten, öğrencisi olma ayrıcalığına erişmiş olmaktan onur duyduğum çok değerli Hocam Prof. Dr. Bekir Zühtü UYSAL'a bana vermiş olduğu emeklerinden dolayı çok teşekkür ederim.

Hayatım boyunca kızları olmaktan gurur duyduğum, sevgilerini ve emeklerini esirgememiş olan ve bu günlere gelmemi sağlayan kıymetli annem Serpil KOÇYİĞİT ve babam Latif KOÇYİĞİT'e, herhangi bir konuda yardıma ihtiyacım olduğunda hep yanımda olan sevgili kardeşim Elif KOÇYİĞİT'e, her koşulda desteğini hep yanımda hissettiğim, manevi olarak her zaman yanımda olan değerli eşim Emre ÇAPOĞLU'na teşekkür ederim.

Gazi Üniversitesi Temel İşlemler ekibinde yer alan, deneyimlerini hiçbir zaman esirgemeyen birlikte çalışmaktan keyif aldığım değerli arkadaşlarım Özgü YÖRÜK, Dr. Gizem GENÇ ÇELİKÇİ, Merve GÖRDESEL ve Hilal Seda DEMİREL'e kıymetli dostlukları ve destekleri için teşekkür ederim.

Çalışmalarım için gerekli olan çözümlerin temini konusunda bana yardımcı olan KANSAİ ALTAN Boya Sanayi Ticaret A.Ş. firmasından Teknik Destek Müdürü sayın Demet TOKUR'a ve laboratuvarında yaptığım çalışmalarda destek olan Deniz ÖNAL UYAR'a ve Lokman ÖZTÜRK'e teşekkür ederim.

Bölümde görev yapan, bir Kimya Mühendisi olarak yetişmemde katkı sağlayan birbirinden değerli tüm hocalarıma teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	xi
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xiii
RESİMLERİN LİSTESİ	xvi
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xvii
1. GİRİŞ	1
2. KÜRESEL ISINMA VE İKLİM DEĞİŞİKLİĞİ	5
2.1. Sera Gazları ve Etkileri	8
2.2. Küresel Sera Gazı Emisyon Değerleri	12
2.3. Sera Gazı Emisyon Değerlerini Azaltmak İçin Alınabilecek Tedbirler	16
2.4. İklim Değişikliği Protokolleri	16
3. KARBON DİOKSİT TUTMA İŞLEMLERİ	21
3.1. Endüstriden Kaynaklanan Tutma İşlemleri	21
3.1.1. Yanma öncesi sistemler	22
3.1.2. Yanma sonrası sistemler	23
3.1.3. Oksi yanma	23
3.1.4. Endüstriyel Prosesler	23
3.2. Karbon Dioksitin Depolanması.....	25
3.3. Karbon Dioksit Tutumu Metotları	26
3.3.1. Absorpsiyon.....	27
3.3.2. Adsorpsiyon.....	29
3.3.3. Kriyojenik ayırma.....	30

	Sayfa
3.3.4. Membranlar	30
4. DOLGULU KOLONLAR.....	31
4.1. Dolgulu Kolon Çalışma Prensibi	31
4.2. Dolgu Maddeleri	32
4.2.1. Geleneksel dolgular	33
4.2.2. Yapılı dolgular.....	35
5. KARBON DİOKSİT ABSORPSİYONUNDA KARBİTOL ASETATIN KULLANILABİLİRLİĞİ.....	37
5.1. Karbon Dioksit Absorpsiyonunda Kullanılan Çözeltiler Hakkında Araştırmalar.....	37
5.2. Karbitol Asetatın Özellikleri.....	41
6. MATERYAL METOT	43
6.1. Karbon Dioksitin Karbitol Asetat İçerisindeki Difüzyon Katsayısının Belirlenmesi	44
6.2. Dolgulu Kolonda Kütle Transferi Karakterizasyonu Çalışmaları.....	48
6.3. Dolgulu Kolonda Sıvı Tarafı Bireysel Fiziksel Kütle Transfer Katsayılarının Belirlenmesi	49
6.4. Dolgulu Kolonda Gaz Tarafı Bireysel Fiziksel Kütle Transfer Katsayılarının Belirlenmesi	53
6.5. Dolgulu Kolonda Gaz Tarafı Toplu Kütle Transfer Katsayısının Su İçin Elde Edilmesi.....	56
6.6. Dolgulu Kolonda Gaz Tarafı Toplu Kimyasal Kütle Transfer Katsayısının Belirlenmesi	59
6.7. Dolgulu Kolonda Gaz Tarafı Toplu Fiziksel Kütle Transfer Katsayısının Belirlenmesi	59
7. DENEYSEL YÖNTEM	61
7.1. Karbon Dioksitin Karbitol Asetat İçerisindeki Difüzyon Katsayısının Belirlenmesinde Kullanılan Deney Sistemi	61
7.2. Dolgulu Kolonda Sıvı Tarafı Bireysel Fiziksel Kütle Transfer Katsayılarının Belirlenmesinde Kullanılan Deney Sistemi	63

	Sayfa
7.3. Dolgulu Kolonda Gaz Tarafı Bireysel Fiziksel Kütle Transfer Katsayılarının Belirlenmesinde Kullanılan Deney Sistemi	65
7.4. Dolgulu Kolonda Gaz Tarafı Toplu Kimyasal Kütle Transfer Katsayısının Belirlenmesinde Kullanılan Deney Sistemi	67
7.5. Dolgulu Kolonda Gaz Tarafı Toplu Fiziksel Kütle Transfer Katsayısının Belirlenmesinde Kullanılan Deney Sistemi	69
7.6. Karbitol Asetatın Desorpsiyonunda Kullanılan Deney Sistemi.....	70
8. BULGULAR.....	73
8.1. Karbon Dioksitin Karbitol Asetat İçerisindeki Difüzyon Katsayısının Belirlenmesi	73
8.2. Dolgulu Kolonda Sıvı Tarafı Bireysel Fiziksel Kütle Transfer Katsayılarının Belirlenmesi	74
8.3. Dolgulu Kolonda Gaz Tarafı Bireysel Fiziksel Kütle Transfer Katsayılarının Belirlenmesi	80
8.4. Dolgulu Kolonda Gaz Tarafı Toplu Kütle Transfer Katsayısının Su İçin Elde Edilmesi.....	85
8.5. Dolgulu Kolonda Gaz Tarafı Toplu Kimyasal Kütle Transfer Katsayısının Belirlenmesi	88
8.6. Dolgulu Kolonda Gaz Tarafı Toplu Fiziksel Kütle Transfer Katsayısının Belirlenmesi	92
8.7. Karbitol Asetat Çözeltilisinin Sodyum Hidroksit Çözeltilisi ile Karşılaştırılması	94
9. SONUÇLAR	99
10. ÖNERİLER.....	103
KAYNAKLAR	105
EKLER.....	111
EK-1. Türkiye sera gazı emisyon değerleri	112
EK-2. Oksijen probunun kalibrasyonu	116
EK-3. Peristaltik pompa kalibrasyon eğrisi	119
EK-4. Gaz kromatografisi.....	120
EK-5. Raschig halkalı dolgulu kolon özellikleri.....	122

Sayfa

ÖZGEÇMİŞ	123
----------------	-----

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 3.1. Karbon dioksit yakalama teknolojilerinin mevcut durumu (Olajire, 2010)	24
Çizelge 3.2. Karbon dioksit yakalama teknolojilerinin potansiyeli (Olajire, 2010)	24
Çizelge 5.1. Fiziksel absorbentlerin karşılaştırılması (Li ve diğerleri, 2014).....	40
Çizelge 5.2. Farklı fiziksel absorbentin karşılaştırılması (Li ve diğerleri, 2018)	41
Çizelge 5.3. Karbitol asetatın fiziksel özellikleri (Wypych, A., Wypych, G., 2014: 354).....	42
Çizelge 7.1. Karbon dioksitin karbitol asetat içerisindeki difüzyon katsayısının hesaplanmasında kullanılan diyafram hücrenin özellikleri (Uysal, 2016) .	61
Çizelge 7.2. Sıvı tarafı bireysel fiziksel kütle transferi katsayısı belirlenmesinde kullanılan parametreler	64
Çizelge 7.3. Gaz tarafı bireysel fiziksel kütle transferi katsayısı belirlenmesinde kullanılan parametreler	66
Çizelge 7.4. Gaz tarafı toplu kimyasal kütle transferi katsayısı belirlenmesinde kullanılan parametreler	68
Çizelge 7.5. Gaz tarafı toplu fiziksel kütle transferi katsayısı belirlenmesinde kullanılan parametreler	69
Çizelge 8.1. Karbon dioksitin karbitol asetat içerisinde deneysel olarak hesaplanan difüzyon katsayısı	73
Çizelge 8.2. Karbon dioksitin karbitol asetat içerisinde teorik olarak hesaplanan difüzyon katsayısı	74
Çizelge 8.3. Sıvı tarafı bireysel fiziksel kütle transfer katsayısı deney sonuçları.....	75
Çizelge 8.4. Literatürdeki sıvı tarafı bireysel fiziksel kütle transfer katsayıları	79
Çizelge 8.5. Gaz tarafı bireysel fiziksel kütle transfer katsayıları deney sonuçları	80
Çizelge 8.6. Kükürt dioksit gazının sodyum hidroksit çözeltisine absorpsiyonu deneylerinde sistem girişi ve çıkışındaki sodyum hidroksit pH değişimleri	81
Çizelge 8.7. İki direnç teorisine göre farklı gaz ve sıvı akış hızlarında karbon dioksitin su içerisindeki gaz tarafı bazlı toplu kütle transfer katsayısı değerleri	86
Çizelge 8.8. Sıvı ve gaz dirençlerinin karşılaştırması	87

Çizelge	Sayfa
Çizelge 8.9. Farklı gaz ve sıvı akış hızlarında karbon dioksitin sodyum hidroksit çözeltisi içerisindeki gaz tarafı bazlı toplu kimyasal kütle transfer katsayısı ve karbon dioksit gaz konsantrasyonlarının değişimi.....	88
Çizelge 8.10. Karbon dioksitin sodyum hidroksit çözeltisine absorpsiyonu deneylerinde sistem girişi ve çıkışındaki sodyum hidroksit pH değişimleri	89
Çizelge 8.11. Farklı gaz ve sıvı akış hızlarında karbon dioksitin karbitol asetat çözeltisi içerisindeki gaz tarafı bazlı toplu fiziksel kütle transfer katsayısı ve karbon dioksit gaz konsantrasyonlarının değişimi	92
Çizelge 8.12. Sodyum hidroksit çözeltisi ile hesaplanan gaz tarafı toplu kimyasal kütle transfer katsayılarının su için hesaplanan gaz tarafı toplu kütle transfer katsayılarına oranı.....	95
Çizelge 8.13. Karbitol asetat çözeltisi ile hesaplanan gaz tarafı toplu fiziksel kütle transfer katsayılarının su için hesaplanan gaz tarafı toplu kütle transfer katsayılarına oranı.....	97

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Dünya üzerinde yıllara göre sıcaklık değişimi (UEA/CRU, 2020)	6
Şekil 2.2. Dünya üzerindeki 1884 ile 2019 yıllarına ait sıcaklık değişimi (NASA/GISS).....	7
Şekil 2.3. Küresel sera gazı emisyonları (IPCC, 2014)	8
Şekil 2.4. Sektörlere göre sera gazı emisyonu dağılımları (IPCC, 2014)	9
Şekil 2.5. Yıllara göre atmosferik karbon dioksit seviyeleri (NASA/GISS)	11
Şekil 2.6. 1990-2018 yılları arasında toplam sera gazı emisyonu dağılımları (PBL NEAA, 2018).....	12
Şekil 2.7. 1990-2018 yılları arasında fosil yakıt kullanımına göre küresel karbon dioksit emisyon değerleri (IEA, 2019)	13
Şekil 2.8. Ülkelere göre sera gazı emisyon değerleri (PBL NEAA, 2018)	14
Şekil 2.9. Türkiye'deki toplam ve kişi başı sera gazı emisyonu (1990-2018) (TÜİK, 2018).....	15
Şekil 3.1. Karbon dioksit tutulması için temel sistemler (IPCC, 2005; Uysal, 2016)	22
Şekil 4.1. Dolgulu kolon modeli	32
Şekil 4.2. Geleneksel dolgu malzemeleri (Seader, Henley ve Roper, 2011: 211)	34
Şekil 4.3. Yapılı dolgu (Structured Packing) malzemeleri (Seader, Henley ve Roper, 2011: 212).....	36
Şekil 6.1. Gazın ara yüzeyden sıvıya absorplanması esnasında zamanla meydana gelen basınç farkı (dış Basınç-iç Basınç)	45
Şekil 6.2. Oksijen desorpsiyonunda kullanılan dolgulu kolon şematik gösterimi	49
Şekil 6.3. Sodyum hidroksit çözeltisine kükürt dioksit absorpsiyonunda kullanılan dolgulu kolon şematik gösterimi	53
Şekil 6.4. İki direnç teorisine göre kolonda akan gazın gaz ve sıvı fazdaki konsantrasyon değişimleri ve denge eğrisi (Uysal, 2003: 137).....	57
Şekil 7.1. Diyafram hücre yöntemine ait şematik gösterim (Uysal, 2016).....	61
Şekil 7.2. Sıvı tarafı bireysel fiziksel kütle transfer katsayısı belirlenmesi için kullanılan deney sisteminin şematik gösterimi	63

Şekil	Sayfa
Şekil 7.3. Gaz tarafı bireysel fiziksel kütle transfer katsayısı belirlenmesi için kullanılan deney sistemine ait şematik gösterim	65
Şekil 7.4. Gaz tarafı toplu kimyasal kütle transfer katsayısı belirlenmesi için kullanılan deney sistemine ait şematik gösterim	67
Şekil 7.5. Karbitol asetatın desorpsiyonunda kullanılan deney düzeneğinin şematik gösterimi	71
Şekil 8.1. Beş farklı sıcaklık için hesaplanan deneysel ve teorik difüzyon katsayıları (standart hata barlı)	74
Şekil 8.2. Oksijen desorpsiyonu metodu ile elde edilen sıvı tarafı bireysel fiziksel kütle transfer katsayıları	75
Şekil 8.3. Su-oksijen sistemi için elde edilen sıvı tarafı bireysel fiziksel kütle transfer katsayılarının literatür ile karşılaştırılması	76
Şekil 8.4. Korelasyon ile elde edilen sıvı tarafı bireysel fiziksel kütle transfer katsayıları	77
Şekil 8.5. Sıvı tarafı bireysel fiziksel kütle transfer katsayısı için elde edilen korelasyon ve deneysel değerlerin karşılaştırılması	78
Şekil 8.6. Kükürt dioksitin sodyum hidroksit çözeltisine absorpsiyonu metodu ile elde edilen gaz tarafı bireysel fiziksel kütle transfer katsayıları	81
Şekil 8.7. Sodyum hidroksit çözeltisi içerisinde kükürt dioksit absorpsiyonu sistemi için elde edilen gaz tarafı bireysel fiziksel kütle transfer katsayılarının literatür ile karşılaştırılması (B=30 m/h)	83
Şekil 8.8. Korelasyon ile elde edilen gaz tarafı bireysel fiziksel kütle transfer katsayıları	84
Şekil 8.9. Gaz tarafı bireysel fiziksel kütle transfer katsayısı için elde edilen korelasyon ve deneysel değerlerin karşılaştırılması	85
Şekil 8.10. Farklı gaz ve sıvı akış hızlarında, karbon dioksitin su içerisindeki gaz tarafı bazlı toplu kütle transfer katsayısı değerleri	86
Şekil 8.11. Karbon dioksitin sodyum hidroksit çözeltisi içerisindeki gaz tarafı toplu kimyasal kütle transfer katsayıları	89
Şekil 8.12. Karbon dioksitin sodyum hidroksit çözeltisi içerisindeki korelasyon ile elde edilen gaz tarafı bazlı toplu kimyasal kütle transfer katsayıları	91
Şekil 8.13. Deneysel veriler ile korelasyondan elde edilen verilerin birbiri ile karşılaştırılması	91
Şekil 8.14. Karbon dioksitin karbitol asetat çözeltisi içerisindeki gaz tarafı bazlı toplu kimyasal kütle transfer katsayıları	93

Şekil	Sayfa
Şekil 8.15. Korelasyon ile elde edilen gaz tarafı bazlı toplu fiziksel kütle transfer katsayıları	93
Şekil 8.16. Korelasyon ile hesaplanan verilerle deneysel olarak elde edilen verilerin karşılaştırılması	94
Şekil 8.17. Sodyum hidroksit çözeltisi ile elde edilen gaz tarafı toplu kimyasal kütle transfer katsayılarının referans su ile elde edilen gaz tarafı toplu kütle transfer katsayılarına oranı	96
Şekil 8.18. Karbitol asetat çözeltisi ile elde edilen gaz tarafı toplu fiziksel kütle transfer katsayılarının referans su ile elde edilen gaz tarafı toplu kütle transfer katsayılarına oranı	98

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 5.1. Karbitol asetat moleküler gösterimi.....	41
Resim 7.1. Sıvı tarafı bireysel fiziksel kütle transfer katsayısı hesaplanmasında kullanılan oksijen analizörü.....	64
Resim 7.2. Gaz tarafı bireysel fiziksel kütle transferi hesaplanmasında kullanılan baca gazı analizörü	66
Resim 7.3. Gaz tarafı toplu kimyasal kütle transferi hesaplanmasında kullanılan gaz kromatografi cihazı.....	68
Resim 7.4. Karbitol asetatın desorpsiyonunda kullanılan deney düzeneği.....	70

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	Açıklamalar
a	Dolgu spesifik yüzey alanı, [m ² /m ³]
a_{etkin}	Dolgu etkin ara yüzey alanı, [m ² /m ³]
A_d	Diyafram yüzey alanı, [m ²]
B	Sıvı yükü, [m ³ /m ² ·h]
C_g	Gaz konsantrasyonu, [mol/m ³]
C_g^*	Sıvı fazı ile denge halinde olabilecek gaz konsantrasyonu, [mol/m ³]
C_i	Ara yüzey konsantrasyonu, [mol/m ³]
C_L	Sıvı konsantrasyonu, [mol/m ³]
C_L^*	Gaz fazı ile denge halinde olabilecek sıvı konsantrasyonu, [mol/m ³]
°C	Santigrat Derece
D_{AB}	A'nın B içerisindeki difüzyon katsayısı, [m ² ·s]
dz	Diferansiyel hacim elemanı, [m]
Gt	Gigaton
H_{AB}	A'nın B içerisindeki Henry sabiti, [m ³ ·Pa/mol]
j	Molar difüzyon akısı, [mol/s]
K_C	Gaz tarafı kimyasal toplu kütle transfer katsayısı, [m/s]
$k_c^0 a$	Gaz tarafı bireysel fiziksel kütle transfer katsayısı, [1/s]
$K_c^0 a$	Gaz tarafı fiziksel toplu kütle transfer katsayısı, [1/s]
$K_c a$	Gaz tarafı kimyasal toplu kütle transfer katsayısı, [1/s]
k_D	Diyafram kütle transfer katsayısı, [m/s]
K_H	Henry sabiti, [MPa]
k_L	Sıvı tarafı bireysel fiziksel kütle transfer katsayısı, [m/s]
$k_L^0 a$	Sıvı tarafı bireysel fiziksel kütle transfer katsayısı, [1/s]
L	Sıvı hacimsel akış hızı, [m ³ /s]
m	Boyutsuz çözünürlük

Simgeler**Açıklamalar**

M_B	Molekül ağırlığı, [kg/kmol]
M_t	Milyonton
N_A	Kütle transfer akısı, [kmol/m·s]
P_{atm}	Atmosferik basınç, [Pa]
P	Basınç, [Pa]
P_g	Gaz basıncı, [Pa]
ΔP	Basınç düşüşü farkı, [Pa]
ppm	Milyonda bir
ppb	Milyarda bir
R	Gaz sabiti, [m ³ ·Pa/mol·K]
S_c	Kolon kesit alanı, [m ²]
t	Zaman, [s]
T	Sıcaklık, [K]
U_G	Gaz akış hızı, [m/s]
U_L	Sıvı akış hızı, [m/s]
V_A	Çözünen maddenin normal kaynama sıcaklığındaki molar hacmi, [m ³ /kmol]
V	Molar gaz akış hızı, [kmol/s]
V_g	Gaz hacmi, [m ³]
V_L	Sıvı hacmi, [m ³]
w	Çözünme hızı, [mol/s]
W	Molar akış hızı, [kmol/s]
y	Gaz fazı mol kesri
x	Sıvı faz mol kesri
Z	Dolgu yüksekliği, [m]
%	Yüzde
σ_{AB}	Çarpışma çapı, [m]
δ_d	Diyafram hücrenin kalınlığı, [m]
ε	Boşluk kesri
μ	Viskozite, [cp]
ξ	Diyafram sabiti, [1/m]
τ	Bükümlülük faktörü

Simgeler ψ **Açıklamalar**

Wilke Chang denklemindeki birleşme parametresi

 $\Omega_{D_{AB}}$

Boyutsuz çarpışma integrali

Kısaltmalar**Açıklamalar****AB**

Avrupa Birliği

ABD

Amerika Birleşik Devletleri

CA

Karbitol Asetat

CCS

Carbon Capture and Storage (Karbon Yakalama ve Depolama)

CFC

Kloroflorokarbon

CMR

Cascade Mini Rings (Cascade Mini Halkalar)

COP

Conferance of the Parties (Taraflar Konferansı)

CRU

Climate Research Unit (İklim Araştırmaları Birimi)

DEA

Dietanolamin

DEPG

Polietilen glikol dimetil eter

DGA

Diglikolamin

DGDE

Dietilen glikol dietil eter

DIPA

Di-izopropanolamin

EGBEA

Etilen glikol bütıl eter asetat

EGMEA

Etilen glikol metil eter asetat

GISS

Goddard Institute for Space Studies (Goddard Uzay Araştırmaları Enstitüsü)

HFC

Hidrofloroklorokarbon

IEA

International Energy Agency (Uluslararası Enerji Ajansı)

IPCC

Intergovernmental Panel on Climate Change (Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli)

IUPAC

International Union of Pure and Applied Chemistry (Uluslararası Temel ve Uygulamalı Kimya Birliği)

MBA

3-metoksi bütıl asetat

MEA

Monoetanolamin

MDEA

Metiletanolamin

Kısaltmalar**Açıklamalar**

NASA	National Aeronautics and Space Administration (Ulusal Havacılık ve Uzay Dairesi)
NMP	N-metil-2-pirolidon
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration (Ulusal Okyanus ve Atmosfer İdaresi)
PBL NEAA	PBL Netherlands Environmental Assessment Agency (PBL Hollanda Çevre Değerlendirme Ajansı)
PC	Propilen karbonat
PFC	Perfloroklorokarbon
PGMEA	Propilen glikol metil eter asetat
PSA	Basınç salınımlı adsorpsiyon
RSR	Raschig Super Ring (Raschig Süper Halka)
TSA	Sıcaklık salınımlı adsorpsiyon
TÜİK	Türkiye İstatistik Kurumu
UEA	University of East Anglia (Doğu Anglia Üniversitesi)
UNFCCC	United Nations Framework Convention on Climate Change (Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi)
WG	Working group (Çalışma Grubu)

1. GİRİŞ

İçinde bulunduğumuz yüzyılda, küreselleşen ekonominin getirisi olarak artan enerji ihtiyacıyla birlikte, konvansiyonel sistemlerde fosil yakıtların yakılması sonucu ortaya çıkan karbon dioksit (CO₂), küresel ısınmaya yol açarak iklim değişikliğine sebebiyet vermesi nedeniyle en önemli çevresel problemlerden biri olarak karşımıza çıkmaktadır. Karbon dioksit en kritik sera gazlarından birisi olarak kabul edilmektedir ve atmosferdeki sera gazı artışı, dünya üzerindeki her canlı için ciddi sonuçlar doğurmaktadır.

Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli'nin (IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change) 2014 yılında yayımladığı rapora göre, karbon dioksit emisyonu artışı ile son yüzyıl içerisinde küresel sıcaklıkta 0,8°C derecelik bir artış meydana gelmiştir ve yapılan araştırmalar sonucu içinde bulunduğumuz yüzyıl sonunda küresel sıcaklıkta ortalama 3,7-4,8°C derece arasında bir artış olması beklenmektedir. Atmosferdeki sera gazı emisyonunu kontrol altında tutmak uluslararası alanda da önemli bir konu halinde gelmiştir ve bu konu ile ilgili çalışmalar da devam etmektedir. Paris'te yapılan 21. BM İklim Değişikliği Sözleşmesi Taraflar Konferansı (COP 21, Aralık 2015) kapsamında ülkeler arası yapılan görüşmeler sonucunda önemli adımlar atılmış ve küresel ortalama sıcaklık artış limitini 1,5°C derece ile sınırlandırmak ve 2°C derecenin altında tutmak konusunda anlaşma sağlanmıştır (IPCC, 2018).

Küresel ısınmanın dünya üzerindeki etkisini azaltmak için özellikle karbon dioksit yakalama ve depolama ile ilgili prosesler hakkında araştırmalar yapılmakta ve çeşitli sistemler geliştirilmektedir. Bunun yanı sıra, birçok araştırmacı alternatif enerji üretimi sistemlerinin geliştirilmesi ile ilgili çalışmalar yapmaktadır. Özellikle iklim değişikliği ile mücadelede, yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımının yaygınlaştırılması ile ilgili ülkeler önemli çevre politikalarını devreye almaktadır. Ancak günümüzde her ne kadar yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelim olsa da halen insanlığın ana enerji kaynağı fosil yakıtlardır. Ayrıca, yenilenebilir enerji konusunda uygulanan teknolojilerin halen gelişmekte olması nedeniyle başlangıçta yüksek yatırım maliyetleri gerektirmektedir. Bu sebeple, güncel şartlar içerisinde, mevcut karbon dioksit yakalama ve depolama işlemlerinin uygulanması ile atmosferdeki karbon dioksit emisyonunun kontrol altında tutulabilmesi için çalışmaları sürdürmek büyük önem taşımaktadır.

Karbon dioksit yakalama sistemlerinde, yanma sonrası, oksijen yanma ve yanma öncesi teknolojileri endüstride karbon dioksit giderimi için bilinen yöntemlerdendir. Ticari aşamalarda genellikle yanma sonrası sistemler kullanılmaktadır. Yanma sonrası sistemlerde, çoğunlukla kimyasal absorbent olan alkanolamin çözeltileri (MEA, DGA, DEA, DIPA, MDEA vb.) kullanılmaktadır. Bununla birlikte bu çözücüler, sınırlı karbon dioksit yükleme kapasiteleri, kullanılan çözeltinin rejenerasyonu için harcanan enerjinin yüksek olması nedeniyle yüksek işletme maliyeti gereksinimi, baca gazındaki kükürt dioksit (SO_2) ve oksijenin (O_2) varlığından ve rejenerasyon sırasında yüksek sıcaklıklara çıkılmasından dolayı çözeltinin zamanla bozulması ve ekipmanlarda korozyon sorununa neden olması gibi çeşitli dezavantajlara sahiptirler.

Bu yüksek lisans çalışmasında, güç santrallerindeki baca gazından salınan karbon dioksitin tutulması amacıyla, diğer çözeltilere alternatif olarak karbitol asetat (2-(2-etoksietoksi) etil asetat) çözeltisinde karbon dioksit absorpsiyonu incelenmiştir. Karbitol asetat, karbonil ve eter grupları içermesi nedeniyle yapısal olarak karbon dioksitin fiziksel absorpsiyonuna uygun olmakla birlikte enerji ihtiyacı tasarrufu sağlaması yönüyle dikkate değer alternatif bir çözüldür. Ayrıca, yüksek kaynama noktası, düşük viskozite özelliğine sahip olması, suda çözünebilmesi, kararlı yapıda olması, korozyif olmaması ve rejenerasyonunun kolay olması yönüyle diğer çözeltiler ile kıyaslandığında avantaj sağlayabileceği öngörülmüştür.

Literatürde karbon dioksit absorpsiyonunda karbitol asetat ile ilgili difüzyon katsayısı ve kütle transferi katsayısı hakkında bir çalışma yapılmamış olmasından dolayı, öncelikle diyafram hücre sisteminde karbon dioksitin karbitol asetat içerisindeki difüzyon katsayıları hesaplanmıştır. Sonrasında, absorpsiyon işleminin iyi bir şekilde anlaşılabilmesi için kütle transferi karakterizasyonu çalışması yapılmıştır. Kütle transferi hesaplamaları ile ilgili tüm çalışmalar laboratuvar ölçekli Raschig halkalı dolgu kolonda gerçekleştirilmiştir.

Kütle transferi karakterizasyonu çalışmalarında öncelikle, oksijen desorpsiyonu yöntemi ile sıvı tarafı bireysel fiziksel kütle transferi katsayıları hesaplanmış olup daha sonra sodyum hidroksit ($\text{pH}_{\text{NaOH}} > 10$) çözeltisine kükürt dioksit absorpsiyonu yöntemi ile de gaz tarafı bireysel fiziksel kütle transfer katsayısı hesaplanmıştır. İki direnç teorisine göre gaz tarafı toplu fiziksel kütle transfer katsayısının su için elde edilmesi ile çalışmalara devam edilmiştir.

Daha sonra gaz tarafı ve sıvı tarafı toplu kütle transferi katsayısı hesaplamalarına geçilmiş ve özellikle sıklıkla karbon dioksit absorplamada kullanılan sodyum hidroksit (NaOH) çözeltisi ile karbon dioksitin kimyasal absorpsiyonu ve karbitol asetat çözeltisi ile karbon dioksitin fiziksel absorpsiyonu incelenmiştir. Elde edilen veriler Raschig halkalı laboratuvar ölçekli dolgulu kolonda iki direnç teorisine göre su için elde edilen kütle transferi katsayıları ile karşılaştırılmıştır.

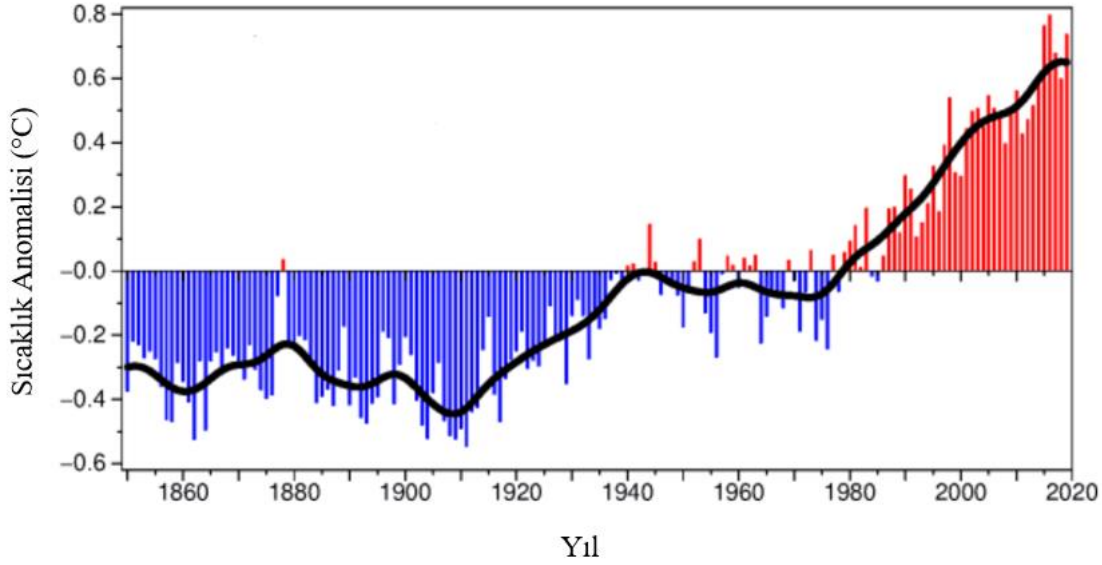
2. KÜRESEL ISINMA VE İKLİM DEĞİŞİKLİĞİ

Günümüzün en önemli ve güncel problemlerinden biri atmosfere salınan sera gazları sonucu meydana gelen küresel ısınmadır. Küresel ısınma, dünyanın iklim sisteminin ortalama sıcaklığındaki gözlenen yükseliş olarak tanımlanmaktadır. Güneşten gelen ve dünyanın yüzeyini ısıtan radyasyon enerjisi ile dünyadan atmosfere ve uzaya yayılan termal radyasyon enerjisinin birbirleri ile dengede olması gerekmektedir. Bu denge, zamanla atmosferdeki karbon dioksit miktarının artması ile bozulmuştur ve bu da dünya yüzeyindeki sıcaklık artışına yol açarak küresel ısınmaya neden olmuştur (Houghton, 2009: 18).

Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli (IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change), iklim değişikliğinin antropojenik (insan kaynaklı) veya doğal nedenlerden dolayı meydana geldiğinin vurgusunu yapmıştır. Özellikle, antropojenik sera gazı emisyonları, büyük ölçüde sanayileşme ve nüfus artışının etkisiyle endüstriyel gelişim dönemi öncesinden bu yana kadar hızla artmıştır (IPCC, 2014). Şu anki durum incelenecek olduğunda, atmosferdeki sera gazı emisyon değerlerinin günümüzde en yüksek seviyelere ulaştığı görülmektedir (IPCC, 2018).

Çevresel etkiler ile ilgili sorunlar, içinde bulunduğumuz yüzyılda önemli politik meselelerden biri haline gelmiştir. 1980 ve 1990 yılları arasında dünya yüzey sıcaklıklarında önemli sıcaklık artışları gözlenmiştir. 1998 yılında ölçülen ortalama küresel sıcaklık değerleri, 1860'tan beri ölçülen en yüksek atmosfer sıcaklıkları olarak kayıtlara geçmiştir (Houghton, 2009: 2).

Amerika Birleşik Devletleri'nde bulunan Ulusal Havacılık ve Uzay Dairesi (NASA: National Aeronautics and Space Administration) ve Ulusal Okyanus ve Atmosfer İdaresi (NOAA: National Oceanic and Atmospheric Administration) tarafından yapılan bağımsız analizlere göre, 2016 yılındaki küresel yüzey sıcaklıkları, 1880'den bu yana kaydedilen en yüksek ikinci sıcaklık değeri olmuştur. İngiltere'de East Anglia Üniversitesi İklim Araştırmaları Birimi ve Meteoroloji Ofisi tarafından hazırlanmış olan yıllara göre dünya üzerindeki sıcaklık değişimi grafiği Şekil 2.1'de gösterilmiştir (İnternet: <http://www.cru.uea.ac.uk/>; University of East Anglia/Climate Research Unit, Son Erişim Tarihi: 12.04.2020).

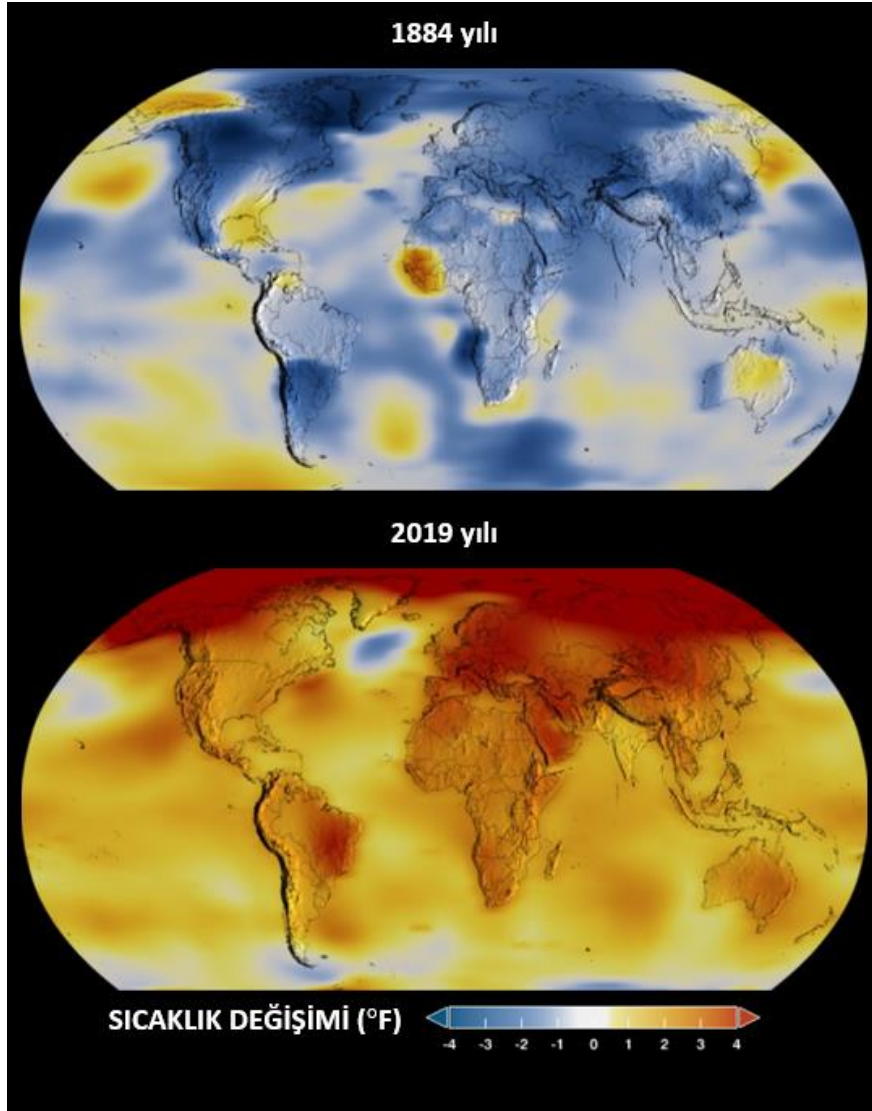


Şekil 2.1. Dünya üzerinde yıllara göre sıcaklık değişimi (UEA/CRU, 2020)

Küresel yüzey sıcaklıklarında, 20. yüzyıl içerisinde $0,8^{\circ}\text{C}$ derecelik bir artış meydana gelmiştir ve yapılan araştırmalar, eğer hiçbir önlem alınmazsa, 21. yüzyıl sonlarında küresel sıcaklıkta ortalama $3,7-4,8^{\circ}\text{C}$ derece arasında bir artış olacağını göstermektedir (IPCC, 2014). Araştırmacılar son yüzyılda meydana gelen bu artışın daha çok insan faaliyetleri tarafından üretilen karbon dioksit ve diğer sera gazlarının atmosferdeki artışından dolayı kaynaklandığı sonucuna varmışlardır.

Atmosferde ve okyanusta meydana gelen yüksek sıcaklıklar, Grönland ve Antarktika bölgelerinde buzul kayıplarına ve sıcak hava dalgaları, orman yangınları, yoğun yağışlar gibi bazı aşırı hava olaylarındaki artışa da katkıda bulunmaktadır. Hava dinamiklerinin genellikle bölgesel sıcaklıkları etkilemesi nedeniyle dünyadaki her bölge aynı miktarda ısınma yaşamamıştır. NASA'nın Goddard Uzay Araştırmaları Enstitüsü'nde (NASA Goddard Institute for Space Studies) yapılan araştırmalara göre Kuzey kutbu bölgesi 1970'ten bu yana dünyanın geri kalanından üç kat daha hızlı ısınmıştır (İnternet: <https://svs.gsfc.nasa.gov/4787>; Perkins, 2020, Son Erişim Tarihi: 12.04.2020).

Küresel ısınmanın dünya üzerindeki önemli etkisini gösterebilmek için NASA Goddard Uzay Araştırmaları Enstitüsü'nde (NASA Goddard Institute for Space Studies) oluşturulmuş olan 1884 ve 2019 yıllarına ait dünyadaki sıcaklık değişimini gösteren grafik Şekil 2.2.'de verilmiştir (İnternet: https://climate.nasa.gov/climate_resources/139/video-global-warming-from-1880-to-2019/; NASA/GISS, Son Erişim Tarihi: 09.05.2020).



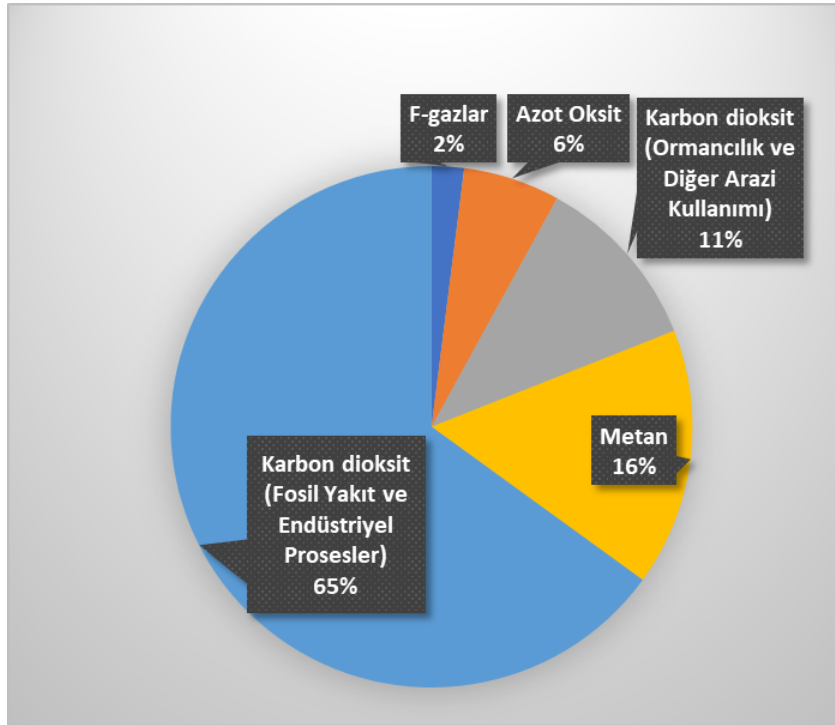
Şekil 2.2. Dünya üzerindeki 1884 ile 2019 yıllarına ait sıcaklık değişimi (NASA/GISS, 2020)

İklim değişikliği ile ilgili gelecekteki riskler, atmosferin ısınma hızına, süresine ve zirve yaptığı sıcaklık noktasına bağlıdır. Küresel yüzey sıcaklıklarında 2100 yılına kadar $1,5^{\circ}\text{C}$ üzerinde bir artış meydana gelecek olursa, bazı olası etkilerin uzun sürebileceği veya geri döndürülemez bir hale gelebileceği öngörülmektedir. Buna bağlı olarak bu artış, deniz seviyesinin yükselmesi ve bazı ekosistemlerin kaybı gibi sonuçlar ortaya çıkarabilir (IPCC, 2018).

Küresel sıcaklıktaki artışın dünya üzerindeki etkisinin ne kadar önemli olduğu, ortaya konulan çalışmalarla da açıkça görülmektedir. Küresel ısınmaya sebep olan sera gazı emisyonları kontrol altına alınmazsa, artan sıcaklığın dünya üzerindeki yaşamı olumsuz yönde etkilemesi kaçınılmazdır.

2.1. Sera Gazları ve Etkileri

Küresel ısınmaya sebep olan en büyük etkenin atmosferdeki sera gazları konsantrasyonundaki artış olduğu bilinmektedir. Örnek olarak başlıca sera gazları; karbon dioksit (CO_2), su buharı, metan (CH_4), azot oksit bileşenleri (NO_x) ve kloroflorokarbonlardır (CFC). Küresel ısınmadaki en kritik sera gazı karbon dioksit olarak kabul edilmektedir. Karbon dioksit gazı en yüksek oranda, fosil yakıtların elektrik ve ısı için yakılması sonucu ortaya çıkmaktadır. Fosil yakıtların yakılması, orman alanlarının azalması, arazi kullanımındaki değişiklikler ve sanayi süreçleri atmosferdeki sera gazları birikiminin artmasına ve doğal sera etkisinin kuvvetlenmesine neden olmaktadır. Şekil 2.3'te Hükümetler Arası İklim Değişikliği Paneli'nin (IPCC) oluşturduğu küresel sera gazı emisyon dağılımları gösterilmektedir (IPCC, 2014).

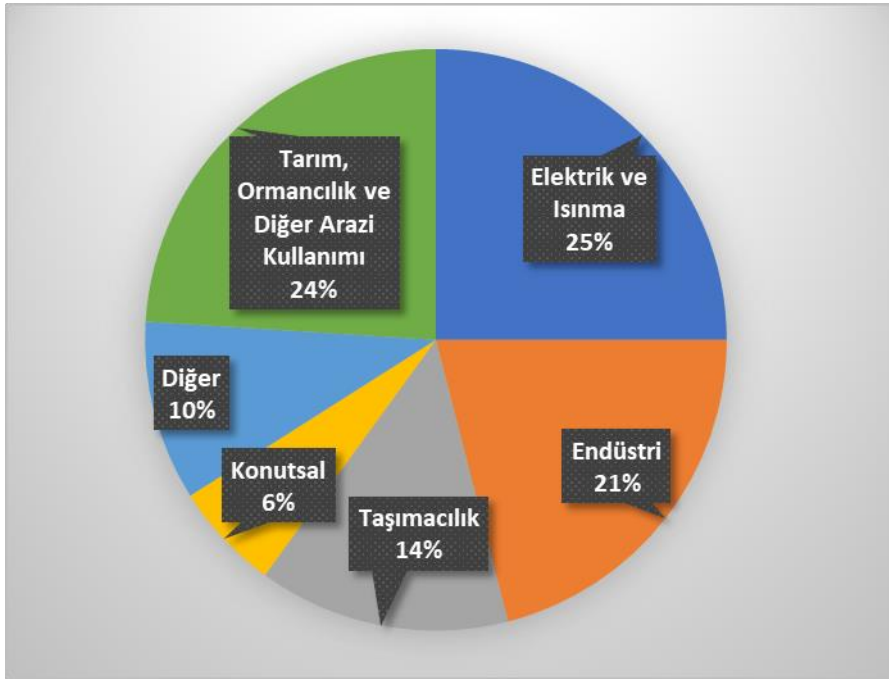


Şekil 2.3. Küresel sera gazı emisyonları (IPCC, 2014)

Hollanda Çevre Değerlendirme Ajansı'nın (PBL Netherlands Environmental Assessment Agency) 2018 yılı raporuna göre küresel sera gazı emisyonlarında %2'lik bir artış meydana gelmiştir ve bu değer 2012 yılından bu yana yıllık ortalama %1,2'lik artıştan daha yüksektir. Küresel sera gazı emisyon değerlerini %73'lük pay ile karbon dioksit (CO_2), %18'lik pay ile metan (CH_4), %6'lık pay ile azot oksitler (NO_x), %3'lük pay ile de florlu gazlar (hidroflorürkarbonlar-HFC, perflorokarbonlar-PFC) oluşturmaktadır (PBL NEAA, 2018).

Atmosfere yılda 36 milyar tonun üzerinde karbon dioksit salınımı olmaktadır. Bu salınımın bir kısmı volkanik patlamalar gibi doğal aktivitelere ait olsa da büyük çoğunluğu fosil yakıt yakılması sonucu meydana gelen salınımlardır.

Şekil 2.4'te Hükümetler Arası İklim Değişikliği Paneli'nin (IPCC) oluşturduğu sektörlere göre sera gazı emisyonu dağılımları gösterilmektedir. Elektrik ve ısı üretimi, küresel sera gazı emisyonlarının %25'ini oluşturmaktadır. Kömür, doğalgaz ve petrolün elektrik ve ısı için yakılması, küresel sera gazı emisyonlarının en büyük kaynağıdır. Özellikle güç santralleri, kömür, petrol, doğalgaz gibi yakıtları kullanmaktadır ve bu da karbon dioksit salınımına sebep olmaktadır.



Şekil 2.4. Sektörlere göre sera gazı emisyonu dağılımları (IPCC, 2014)

%24'lük payı içeren, tarım, ormancılık ve diğer arazi kullanımından kaynaklanan sera gazı emisyonları çoğunlukla tarımdan (ürün ve hayvan yetiştiriciliği) ve orman alanlarının azalmasından kaynaklanmaktadır. Toplam miktardaki paya bakılacak olduğunda, büyük bir yüzdenin bu alanda olması, insan tüketiminden kaynaklı etkinin ve şehirleşme ile birlikte yeşil alanların azalmasının ya da en küçük orman tahribatının dünya üzerindeki etkisinin ne denli büyük olduğunu göstermektedir.

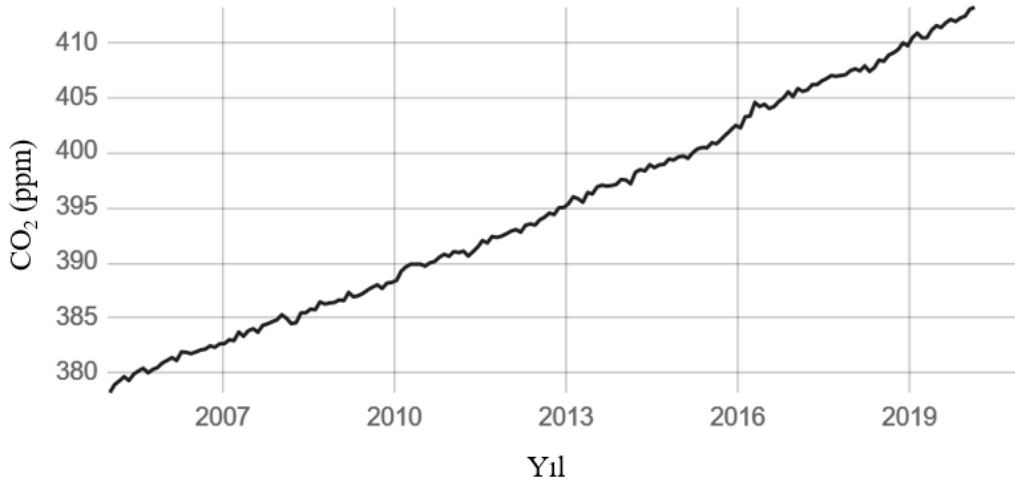
%21'lik pay endüstriden kaynaklanan sera gazı emisyonlarını oluşturmaktadır. Buradaki salınım kaynağı, öncelikli olarak güç üretim tesislerinde fosil yakıtların yakılması sonucunda oluşan emisyonları içermektedir.

%14'lük pay ise taşımacılık sonucu meydana gelen sera gazı emisyon değerlerini göstermektedir. Hava, deniz ve kara taşımacılığında, mazot, dizel ya da fosil yakıtların ulaşımda büyük yeri olmasından dolayı bu kullanımlardan doğan karbon dioksit salınımları da dünyayı etkilemektedir.

Kalan %6'lık pay konutsal yakıt tüketiminden kaynaklanmaktadır. %10'luk pay ise doğal sebeplerden meydana gelen karbon dioksit salınımlarıdır.

Atmosferdeki karbon dioksit miktarının insan aktiviteleri nedeniyle her geçen gün arttığı bilinmektedir. Sanayi devrimi başlamadan önce 1700'lü yılların ortalarında elde edilen verilere göre küresel ortalama karbon dioksit miktarı yaklaşık 280 ppm'i göstermektedir (IPCC, 1995). 1958 yılında Hawaii'de bulunan Mauna Loa Gözlemevi'nde gözlemlere başlandığında, küresel atmosferik karbon dioksit miktarı 315 ppm olarak ölçülmüştür. İlk kez 9 Mayıs 2013'te günlük ortalama karbon dioksit miktarı kayıtlara 400 ppm olarak geçmiştir. 2015 yılında ise bu miktar ilk kez 400 ppm'in üstüne çıkmıştır.

İklim değişikliği ile ilgili Paris Anlaşması'nın kilit küresel hedeflerinden biri, küresel ortalama sıcaklıktaki artışı 2°C'nin altında sınırlandırmaktır. Şekil 2.5, Mauna Loa Gözlemevi'nde ölçülen yıllara göre atmosferik karbon dioksit seviyelerini göstermektedir (İnternet: <https://climate.nasa.gov/vital-signs/global-temperature/>; NASA/GISS, Son Erişim Tarihi:09.05.2020). En son Şubat 2020'de alınan verilere göre atmosferdeki karbon dioksit seviyesi 413 ppm'e ulaşmıştır. IPCC raporuna göre, 21. yüzyıl sonunda bu miktarının yaklaşık 900 ppm'e ulaşması beklenmektedir (IPCC, 2007).



Şekil 2.5. Yıllara göre atmosferik karbon dioksit seviyeleri (NASA/GISS, 2020)

Atmosferik sera gazı konsantrasyonları son yıllarda göz ardı edilemeyecek ciddi seviyelere ulaşmıştır. Özellikle karbon dioksit (CO₂), metan (CH₄) ve azot oksit (N₂O) konsantrasyonları 1750 yılından bu yana sırasıyla %40, %150 ve %20 gibi büyük artışlar göstermiştir (IPCC, 2014).

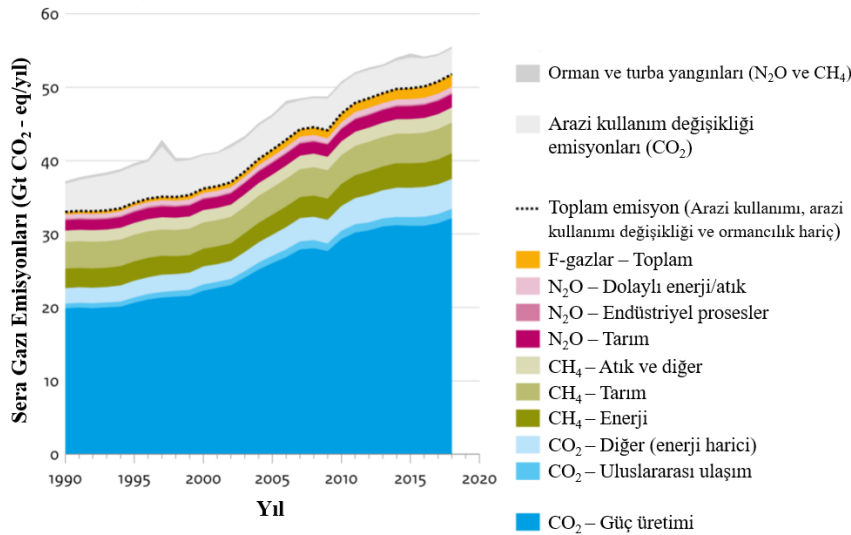
Diğer önemli sera gazları içerisinde karbon dioksitten sonra en büyük paya sahip olan metan, doğal gazın ana bileşenidir. Havadan daha hafif, kokusuz ve renksiz bir gazdır. 1800 yılından önce en az 2000 yıl boyunca atmosferdeki konsantrasyonunun 700 ppb olduğu bilinmektedir. O zamandan bu yana atmosferdeki konsantrasyonu neredeyse 2,5 kat artış göstermiştir. Atmosferdeki metan konsantrasyonu her ne kadar karbon dioksitten düşük olsa da sera etkisine tesiri ihmal edilmemelidir. Çünkü bir metan molekülünün neden olduğu sera etkisi, bir karbon dioksit molekülünün etkisinin yaklaşık 8 katıdır. Metan çoğunlukla doğrudan veya dolaylı olarak insan faaliyetlerinden, doğal gaz boru hattı ya da petrol kuyularında meydana gelen sızıntılardan, tarımsal üretimden, hayvan yetiştiriciliğinden ve çöplerin çürümesinden dolayı ortaya çıkmaktadır (Houghton, 2009: 50).

Diğer bir sera gazı olan azot oksitler (NO_x), atmosferde yaklaşık 0,5 ppm konsantrasyonunda bulunmaktadır ve her yıl yaklaşık %0,25 oranında artmaktadır. Antropojenik olarak tarım faaliyetlerinde gübre kullanılmasından, fosil yakıtlar ve biyokütle yakılmasından kaynaklanmaktadır. Ayrıca stabil bir gaz olmasından kaynaklı atmosferde 155 yıl gibi uzun bir süre kalabilmektedir. Bu sebeple emisyon kaynakları azaltılsa bile uzun süre atmosferde bulunabilecektir (Aksay, Ketenoglu ve Kurt, 2005).

Önemli diğer bir sera gazı olan kloroflorokarbonlar (CFC), klorin florin ve karbon karışımından meydana gelen insan yapımı kimyasallardır. Oda sıcaklığının hemen altında buharlaşabildikleri ve yanıcı olmadıkları için buzdolaplarında, spreylerde, klimalarda ve yalıtım malzemelerinde kullanılmaktadır. Kimyasal olarak çok reaktif bir yapıda olmamalarından dolayı, atmosfere salındıktan sonra yüzyıllar boyunca atmosferde kalabilmektedirler. 1980 yıllarında kullanımlarının artması sonucunda atmosferdeki konsantrasyonları da hızla artmıştır ve yaklaşık 1 ppb civarındadır. Bu gazlar ozon tabakasında ciddi problemlere yol açmaktadır. Kloroflorokarbon içeriğinde bulunan klorun, son derece reaktif olan ozon ile tepkimeye girerek ozonun yok olma oranına etkisi bulunmaktadır. Bir klor atomunun birçok ozon molekülünü yok ettiği bilinmektedir (Houghton, 2009: 45).

2.2. Küresel Sera Gazı Emisyon Değerleri

Küresel anlamda sera gazı emisyonları değerlendirildiğinde son yıllarda önemli artışlar meydana geldiği görülmektedir. Hollanda Çevre Değerlendirme Ajansı'nın (PBL Netherlands Environmental Assessment Agency) 2018 yılı raporuna göre, 2018 yılında küresel sera gazı emisyonlarında %2'lik bir artış meydana gelmiştir ve toplamda 51,8 Gt seviyesine ulaşmıştır. Şu anki emisyon değerleri 1990 yılındaki emisyon değerlerinden %57, 2000 yılındaki emisyon değerlerinden ise %43 daha fazladır (PBL NEAA, 2018). Şekil 2.6'da 1990 ve 2018 yılları arasındaki toplam sera gazı emisyon değerleri gösterilmektedir.

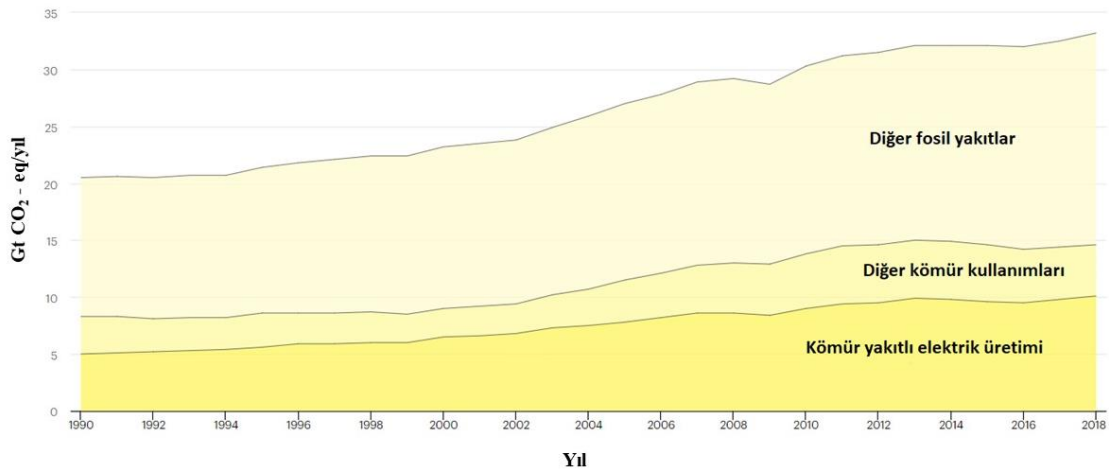


Şekil 2.6. 1990-2018 yılları arasında toplam sera gazı emisyonu dağılımları (PBL NEAA, 2018)

Sera gazı emisyonları son yıllarda istikrarlı bir şekilde artmaktadır. 20. yüzyılın son 30 yılında %1,3'lük olan ortalama küresel sera gazı emisyonu artışı, 1970'den bu yana ortalama %1,6'lık artış göstermiştir. 2017'de bu artış oranı %1,3 iken 2018 yılında artış oranı %3'e ulaşmıştır. 1970 yılında 24,6 Gt CO₂, 1990 yılında 33 Gt CO₂, 2002 yılında 37,1 Gt CO₂ olan küresel sera gazı emisyon değerleri 2018 yılında 51,8 Gt CO₂ değerine ulaşmıştır (PBL NEAA, 2018).

Enerji üretimi için fosil yakıtların yakılmasından ve endüstriyel proseslerdeki kullanımlardan ortaya çıkan karbon dioksit toplam sera gazı emisyonlarının %73'ünü oluşturmaktadır. 2018 yılında yüksek enerji talebinin de etkisiyle küresel karbon dioksit emisyon değeri 33,1 Gt değerine ulaşmıştır. Fosil yakıt tüketiminden kaynaklanan emisyonlar gittikçe artarken, enerji sektöründe fosil yakıt kullanımı bu artışın yaklaşık üçte ikisini oluşturmaktadır (IEA, 2019).

Şekil 2.7'de 1990-2018 yılları arasındaki fosil yakıt kullanımına göre küresel karbon dioksit emisyon değerleri gösterilmektedir.

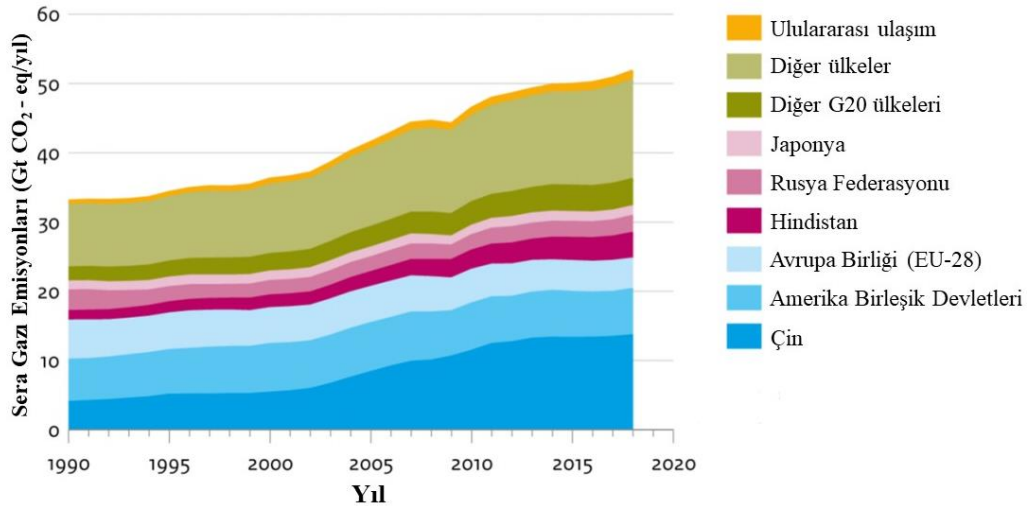


Şekil 2.7. 1990-2018 yılları arasında fosil yakıt kullanımına göre küresel karbon dioksit emisyon değerleri (IEA, 2019)

1996 yılında dünya genelinde elektriğin %25'ini üretmek için kömür kullanılmıştır. Kömür, yakılması sonucunda sera gazı emisyonlarının artmasına neden olsa da geniş rezervlere sahip olması bakımından enerji üretimi konusunda büyük rol oynamaya devam edecektir (Croiset, Thambimuthu ve Palmer, 2000).

Kömür kaynaklı elektrik üretiminin, küresel karbon dioksit emisyonlarının %30'unu oluşturduğu tespit edilmiştir. Emisyon değerlerindeki bu artış, küresel ekonominin büyümesinin yanı sıra artan enerji talebinden kaynaklı yüksek enerji tüketiminden kaynaklanmaktadır. Enerji verimliliğinde iyileştirmeler yapılması ve düşük karbonlu teknoloji kullanımının bir sonucu olarak 2014-2016 yılları arasında karbon dioksit emisyonlarında bir duruş yaşanmış olsa da 2017 ve 2018 için bu durumda değişiklik olmuştur. Düşük karbonlu teknolojilerin enerji verimliliği, enerji talebindeki artışı karşılayabilecek kadar hızlı ölçeklenememiştir. Sonuç olarak her ne kadar yenilenebilir enerji kaynakları bir etki yaratmış olsa da fosil yakıt kullanımı devam edecektir (IEA, 2019).

Küresel sera gazı emisyonu miktarlarına bakılacak olduğunda, fosil yakıt kullanımında Asya kıtası tek başına 10 Gt CO₂ emisyon değerine ulaşmıştır. Çin, Hindistan ve Amerika Birleşik Devletleri emisyonlardaki net artışın %85'ini oluşturmaktadır. Şekil 2.8'de, ülkelere göre ve uluslararası taşımacılığa yönelik sera gazı emisyon değerleri verilmiştir (PBL NEAA, 2018). Bu ülkeler en yüksek karbon dioksit emisyon seviyelerine sahiptir. Bu ülkelerin toplam sera gazı emisyonuna katkısı, sırasıyla Çin %26, Amerika Birleşik Devletleri %13, Avrupa Birliği %8(±0,2), Hindistan %7, Rusya Federasyonu %7 ve Japonya %3 civarındadır.



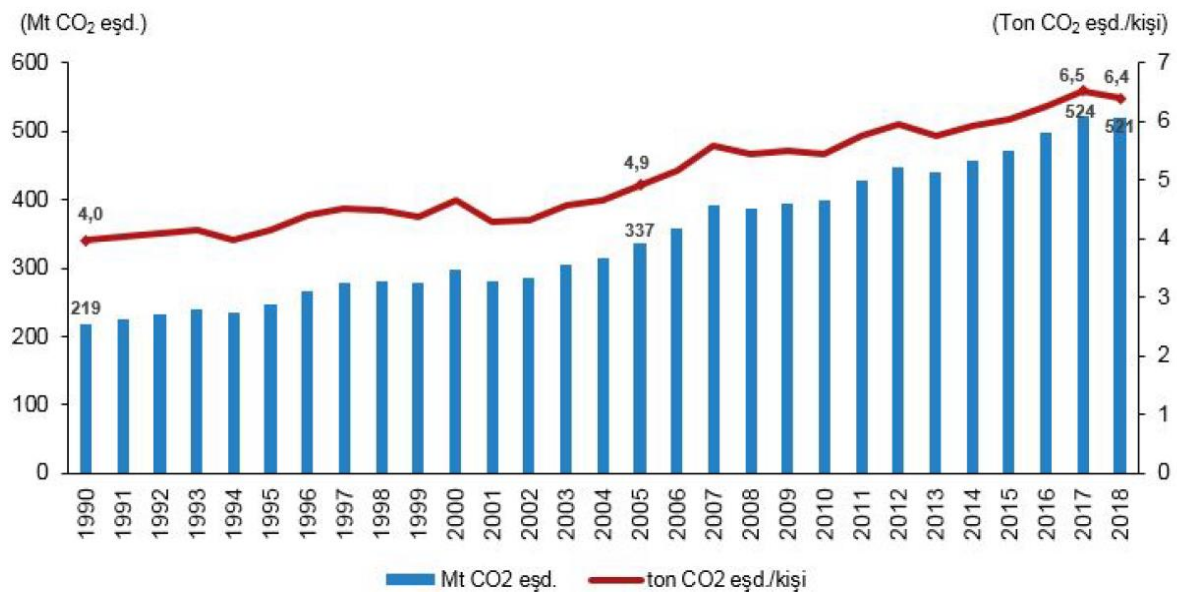
Şekil 2.8. Ülkelere göre sera gazı emisyon değerleri (PBL NEAA, 2018)

Ülkemizdeki toplam sera gazı emisyonu miktarı, Türkiye İstatistik Kurumu'nun (TÜİK) verilerine göre 2018 yılında 520,9 milyon ton (Mt) CO₂ olarak hesaplanmıştır. Elde edilen veriler, bir önceki yıla göre bu değerin %0,5 oranında azaldığını göstermektedir.

1990 yılında bu değer yaklaşık 219 Milyon ton (Mt) olarak hesaplanmıştır. Kişi başı toplam sera gazı emisyonu 2018 yılı için 6,5 ton CO₂ olarak hesaplanmıştır. Şekil 2.9'da 1990-2018 yılları arası toplam ve kişi başı sera gazı emisyon değerleri verilmiştir (İnternet: <http://www.tuik.gov.tr/PreHaberBultenleri.do?jsessionid=pC88p37C8nqxxyNVJp0Q2Cy82RSdjQ7wTJDcKqGYRhTJvfk4ST0q!-958873431?id=33624>; Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK), 2018, Son Erişim Tarihi: 09.05.2020).

Ülkemizde 2018 yılı toplam karbon dioksit emisyonlarının %35,5 i elektrik ve ısı üretiminden olmak üzere %85,8'i enerji sektöründen kaynaklanmaktadır. Bunu %13,9 ile endüstriyel işlemler ve ürün kullanımı, %0,3 ile tarımsal faaliyetler ve atık takip etmektedir.

2018 yılında enerji sektöründen kaynaklanan emisyon değerleri 1990 yılına göre %167,3'lük bir artış göstermiştir. Toplamda enerji sektöründen kaynaklanan emisyon değeri 373,1 Mt CO₂ olarak hesaplanmıştır. Türkiye ile ilgili sera gazı emisyon değerleri detaylı olarak Ek-1'de sunulmuştur.



Şekil 2.9. Türkiye'deki toplam ve kişi başı sera gazı emisyonu (1990-2018) (TÜİK, 2018)

Küresel olarak toplam karbon dioksit emisyonuna ülkelerin katkısı değerlendirildiğinde Türkiye'nin bu noktada nerede olduğunu bilmek önemlidir. 2016 küresel emisyon verilerine göre, %26'lık pay ile Çin, %13'lük pay ile ABD, %7'lik pay ile Hindistan gibi küresel sera gazına yüksek oranda katkıda bulunan ülkeler arasında Türkiye 17. sırada yer almaktadır. Türkiye'nin toplam küresel emisyondaki payı 2016 yılı için %1 olarak hesaplanmıştır.

2.3. Sera Gazı Emisyon Değerlerini Azaltmak İçin Alınabilecek Tedbirler

Atmosferdeki sera gazı emisyon değerlerinin artmasından dolayı yüzey sıcaklığı artmış ve bunun sonucunda da iklim değişiklikleri meydana gelmiştir. Küresel ısınma ile mücadelede alınabilecek en önemli önlem, atmosferdeki sera gazı emisyonlarındaki artışı durduracak hatta azaltacak yönde olmalıdır. Bununla ilgili, Paris'te yapılmış olan 21. BM İklim Değişikliği Sözleşmesi Taraflar Konferansı kapsamında, küresel ortalama sıcaklık artış limitinin 1,5-2°C derece arasında sınırlandırılması konusunda yapılan anlaşmaya bağlı kalmak önemlidir. Bu sıcaklık artışını sınırlandırma hedefini gerçekleştirebilmek için bazı tedbirlerin alınması gereklidir.

Bununla ilgili alınabilecek tedbirler;

- Fosil yakıtların kullanımlarını azaltmak,
- Daha az enerji tüketen teknolojilerle, tüketimde verimliliği artırmak ve enerji talebini azaltmak,
- Yenilenebilir enerjiye yönelmek,
- Karbon dioksit tutulmasını ve depolanmasını sağlamak ya da geri kazanılabilir hale getirilmesini sağlamak,

olarak sıralanabilir.

2.4. İklim Değişikliği Protokolleri

Küresel ısınmanın çevre üzerindeki etkilerine karşı uluslararası alanda atılan ilk önemli adım, 1992 yılında Rio de Janeiro'da gerçekleşen Birleşmiş Milletler (BM) Çevre Kalkınma Konferansı'nda imzaya açılan BM İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi olmuştur (BMİDÇS-United Nations Framework Convention on Climate Change: UNFCCC). Bu sözleşmeye, içinde Türkiye'nin de bulunduğu 195 ülke ile birlikte Avrupa Birliği de taraf olmuştur. Sözleşme 24 Mart 1994'te yürürlüğe girmiştir. Türkiye ise bu sözleşmeye 24 Mayıs 2004 tarihinde katılmıştır (REC, 2006).

Sözleşmeye taraf olan ülkeler, sera gazı salınımlarını azaltmaya, araştırma ve teknoloji üzerinde iş birliği yapmaya ve doğal çevreyi korumaya yönelik çalışmalar yapmaya teşvik edilmektedirler.

Sözleşme, sera gazı salınımlarını azaltmak adına, ülkelerin kalkınma önceliklerini ve özel koşullarını gözeterek ortak fakat farklılaştırılmış sorumluluklar yüklemektedir. Sözü edilen bu ortak fakat farklılaştırılmış sorumluluklar ilkesi bazı ülkelerin sanayi devriminden sonra diğer ülkelere göre daha fazla sera gazı salınımı yapması ve bu ülkelerin daha çok sorumluluk alması gerektiği düşüncesine dayanmaktadır. Bu bağlamda sözleşme farklı yükümlülükler açısından ülkeleri üç gruba ayırmıştır. Sözleşmede Ek-I olarak tabir edilen ülkeler, sera gazı salınımlarını sınırlandırmak, doğal çevreyi korumak ve geliştirmek, iklim değişikliğini önlemek için aldıkları önlemleri, izledikleri politikaları ve sera gazı salınımlarını bildirmekle yükümlüdür. Bu grupta toplam 42 ülke ve AB bulunmaktadır. Sözleşmede Ek-II olarak tabir edilen ülkeler de birinci gruptaki yükümlülüklerin yanı sıra, çevreye uyumlu teknolojilerin gelişmekte olan ülkelere aktarılması ve bu erişimin teşvik edilmesi, finanse edilmesi gibi konularda adım atmakla sorumlulardır. Bu grupta ise 23 ülke ve AB yer almaktadır. Son olarak ek dışı ülkeler ise sera gazı salınımını azaltmaya, araştırma ve teknoloji üzerinde iş birliği yapmaya ve doğal çevreyi korumaya teşvik edilmektedirler, ancak herhangi bir yükümlülük altına alınmamaktadırlar. Bu grupta 153 ülke bulunmaktadır. 2001 yılında Sözleşme'nin 7. Taraflar Konferansı'nda ülkemizin Ek-II ülkeleri arasından çıkarılması kararlaştırılmış ve diğer Ek-I ülkelerinden farklı bir konumda olduğunun tanınması yönünde çağrıda bulunulmuştur (REC, 2006).

2010 yılında ise Meksika'nın Cancun şehrinde 16. Taraflar Konferansı düzenlenmiştir. Burada alınan kararlar arasında yer alan ülkemize ilişkin bölümde, Türkiye'nin diğer Ek-I ülkelerinden farklı bir konumda bulunduğu BMİDÇS'ye taraf olan ülkelere tanınmıştır. 2011 yılında Güney Afrika'nın Durban kentinde düzenlenen 17. Taraflar Konferansı'nda, ülkemize sera gazı salınımının azaltılması, iklim değişikliğine uyum, teknoloji geliştirilmesi ve transferi, kapasite geliştirme ve finansman alanlarında sağlanacak desteğin gerekliliklerinin belirlenmesine ilişkin görüşmelerin sürdürülmesi karara bağlanmıştır.

BMİDÇS, iklim değişikliğiyle mücadelede ileriye dönük temel bir adım atılmasına öncülük etmiştir. Bununla birlikte, sera gazı salınımlarının dünyanın her yerinde artmaya devam etmesi ve iklim değişikliğinin olumsuz etkilerinin giderek daha fazla hissedilir olması üzerine, özellikle gelişmiş ülkelerin kararlı ve bağlayıcı yükümlülükler almaları için BMİDÇS'ye taraf olan ülkeler mevcut sözleşmenin niteliğini güçlendirmek amacıyla, Kyoto Protokolü'nü müzakere etmeye başlamışlardır (Houghton 2009: 300).

Kyoto Protokolü, 1997 yılında Kyoto’da yapılan 3. Taraflar Konferansı’nda kabul edilmiş, 2005 yılında Rusya Federasyonu’nun onaylaması ile yürürlüğe girmiştir. Gelişmiş ülkelerin sera gazı salınımlarını 1990 yılına göre %5,2 azaltmalarını öngörüp atmosferdeki sera gazı yoğunluğunun, küresel ısınmaya tehlikeli derecede etki yapmayacak seviyelerde dengede kalmasını sağlamaya yönelik BMİDÇS’de imzası bulunan ülkelere imzalanması planlanmış küresel ısınma ve iklim değişikliğiyle ilgili en somut çevre protokolüdür. 2010 Mayıs itibariyle toplam 191 ülke bu protokole taraf olmuştur. BMİDÇS üyesi olmasına rağmen protokolü onaylama niyeti olmadığını açık bir şekilde beyan eden tek ülke ABD’dir. Kyoto Protokolü sanayileşmiş ülkelerin önüne, sera gazı emisyonlarının 2012 yılına kadar azaltılması konusunda somut hedefler ortaya koymaktadır. Ancak ABD böyle bir hedef konmasına karşı çıkarak, çözümün sera gazı salınımlarında indirime gitmek değil, temiz enerji kaynaklarının geliştirilmesi olduğunu düşünmektedir. Karşıt görüşler ise, yenilenebilir enerji kaynaklarının geliştirilmesinin olumlu olduğunu fakat sera gazı emisyonunda bir azaltma yapılmadıkça bu çabanın küresel ısınmayı engelleyemeyeceğini düşünmektedirler.

Sözleşmede yer alan Ek-I ülkelerinin sera gazı salınımı azaltımı ya da kontrollü artış yükümlülüğü vardır. Bu ülkeler dışında bu protokole taraf olan diğer ülkeler, Ek-dışı ülkeler olarak adlandırılıp, sera gazı azaltımı konusunda herhangi bir yükümlülükleri bulunmamaktadır. Türkiye, 26 Ağustos 2009 yılında Kyoto protokolüne taraf olmuştur (REC, 2006).

Protokole göre ülkelerin temiz enerji kaynaklarına yönelmeleri gerekmektedir. Eğer bu ülkelerin emisyon fazlaları varsa, kotalarını doldurmayan ülkelere karbon kredisi satın alabilmekteler ya da kalkınmakta olan ülkelere temiz enerji teknolojisi transfer ederek bundan kredi sağlayabilmektelerdir (Houghton, 2009: 299).

İklim değişikliği ile ilgili önemli gelişmelerden biri, Aralık 2015’te Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi (United Nations Convention on Climate Change: UNFCCC) Taraflar Konferansı’nda 195 ülkenin onay vermesi ile Paris Anlaşması (COP 21) imzalanmıştır. Bu anlaşma, küresel ısınma ile ilgili mücadelede önemli bir gelişme olup küresel ortalama sıcaklık artışını endüstriyel devirden önceki seviyelere göre 2°C’nin altında tutma ve hatta 1,5°C ile sınırlamayı hedeflemektedir (IPCC, 2018). Paris Konferansı’nda Türkiye beyanında, 2030’daki sera gazı emisyon değerini 1 175 milyon ton CO₂ eşdeğeri yerine, %21 azaltarak 929 milyon ton CO₂ eşdeğerine indireceğini taahhüt etmektedir.

Küresel ısınma sonucu oluşabilecek olumsuz sonuçların önüne geçilmesi için gerekli tedbirler alınarak risklerin minimize edilmesi, iklim değişikliğinin gelecekte yaratacağı etkilerin ve doğuracağı sonuçların tahmin edilerek belirlenmesi gerekmektedir. Bu sebeple gerekli önlemlerin alınmasına yönelik çeşitli matematiksel tahmin modelleri geliştirilmiştir. Bu modellerin ışığında önümüzdeki yüzyıl içerisinde küresel ısınma ile mücadele etmek için çeşitli senaryolar ortaya konmuştur. Bu senaryolar sayesinde, atmosferik sera gazı yoğunlukları ve volkanik püskürtmeler gibi bilgilerden yararlanılarak bir takım alternatif sonuçlar öngörülebilmektedir. Bu amaç doğrultusunda önümüzdeki yüz yıllık süreci göz önünde bulundurularak geçmişten günümüze kadar tarihsel sıralama ile bazı emisyon tahmin modelleri ve öngörülleri oluşturulmuştur (Houghton, 2009: Bölüm 5; IPCC, 1995; IPCC, 2001; IPCC, 2007; IPCC, 2013; IPCC, 2018).

Senaryo modelleri, 2100 yılında küresel ortalama sıcaklıktaki artışı $1,5^{\circ}\text{C}$ ile sınırlandırmayı hedeflemektedir. Bu senaryo modelleri için geliştirilen önlemlerin ve bilimsel çalışmaların küresel olarak uygulanmaya başlanmaması durumunda daha kritik sonuçlar ortaya çıkacaktır. Bu sebeple küresel ısınmadaki büyük rolü ile en kritik sera gazı olan karbon dioksitin yakalanması ve depolanması ile ilgili çalışmalar halen güncelliğini koruyup devam etmektedir.

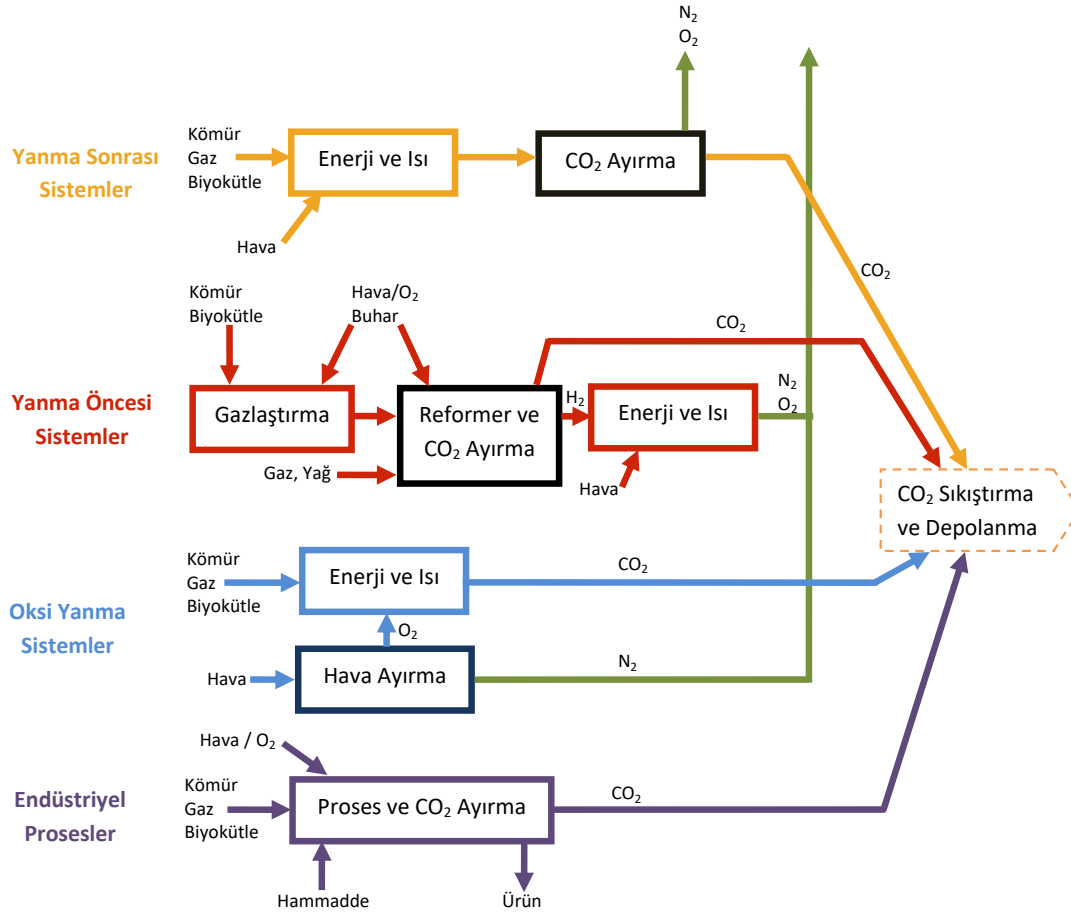
3. KARBON DİOKSİT TUTMA İŞLEMLERİ

Küresel ısınma ile mücadelede karbon dioksitin atmosferden uzaklaştırılmasını sağlamak önemli bir husustur. Özellikle noktasal emisyon kaynaklarından karbon dioksitin giderimi için mevcut metotların geliştirilmeye ihtiyacı vardır. Karbon yakalama ve depolama (Carbon Capture and Storage-CCS) teknolojileri kullanılarak karbon dioksitin atmosferden ve noktasal emisyon kaynaklarından giderimi sağlanmaktadır. Genel olarak karbon yakalama prosesi, karbon dioksiti yakalamak, sıkıştırmak ve güvenli bir şekilde yeraltına veya okyanusa depolamak şeklindeki basamaklardan oluşmaktadır.

3.1. Endüstriden Kaynaklanan Tutma İşlemleri

Karbon dioksit tutumunun ana uygulamaları büyük emisyon kaynaklarından gerçekleştirilmektedir. Bu büyük emisyon kaynaklarına; fosil yakıt kullanan elektrik santralleri ile özellikle demir, çelik ve çimento üreten büyük endüstriyel prosesler örnek olarak gösterilebilir.

Fosil yakıt, biyokütle gibi karbon kaynağı bakımından zengin yakıtların kullanımından dolayı oluşan karbon dioksitin tutumu için üç temel yaklaşım bulunmaktadır (Şekil 3.1). Bunlar; yanma sonrası, oksijen yanma ve yanma öncesi teknolojileri olarak sıralanabilir ve endüstride karbon dioksit giderimi için bilinen yöntemlerdendir (Ahmed ve diğerleri, 2020; Olajire, 2010). Ayrıca endüstriyel proseslerdeki üretim aşamalarında gaz akımlarından ortaya çıkan karbon dioksitin tutulması da Şekil 3.1 üzerinde gösterilmektedir. Karbon dioksitin baca gazı akımlarından uzaklaştırılması ve atmosferden izole edilmesi karbon yönetimi ve çevresel faktörlerin iyileştirilmesi için gerekli bir işlemdir.



Şekil 3.1. Karbon dioksit tutulması için temel sistemler (IPCC, 2005; Uysal, 2016)

3.1.1. Yanma öncesi sistemler

Yanma öncesi sistemlerde yakıt oksijen, hava veya bazı durumlarda da buhar ile tepkimeye sokulur ve karbon monoksit ile hidrojen elde edilir. Bu proses gazlaştırma, kısmi oksidasyon veya reformlama olarak bilinir. Karbon monoksit, buharla reaksiyona girerek ilave hidrojenle birlikte karbon dioksiti oluşturur. Hidrojen ve karbon dioksitten oluşan bu karışımdan, karbon dioksit ve hidrojen ayrıştırılır. Buradaki işlemler, yanma sonrası prosesine göre pahalı ve karmaşık olsa da daha yüksek basınç ve konsantrasyondaki (hacimce %15-60) karbon dioksit, daha verimli karbon dioksit yakalama tekniklerine olanak sağlamaktadır. Yanma öncesi yakalamanın önemli dezavantajı ise tesisin kurulumu için gerekli anapara miktarının çok yüksek olmasıdır (IPCC, 2005; Olajire, 2010).

3.1.2. Yanma sonrası sistemler

Fosil yakıt, biyokütle gibi karbon kaynağı yüksek olan yakıtların yakımı sonucu üretilen baca gazlarından karbon dioksitin tutulması, yanma sonrası tutulma olarak ele alınır. Baca gazları, direkt atmosfere salınmak yerine karbon dioksitin yoğunluğunu ayıracak bir tesisattan geçirilir. Karbon dioksit bir depo haznesine sevk edilir ve geriye kalan baca gazları da atmosfere salınır. Bu kategoride, kimyasal ve fiziksel absorpsiyon, membranlarla ayırma, kriyojenik teknikler ve adsorpsiyon gibi birçok ayırma tekniği uygulanabilmektedir. Genel olarak baca gazından sıvı bir çözelti ile karbon dioksit ayrıştırılır. Ticari aşamalarda genellikle yanma sonrası sistemler kullanılmaktadır (IPCC, 2005; Olajire, 2010).

3.1.3. Oksi yanma

Oksi yanma, yanma sonrası sistemlerin modifiye edilmiş halidir. Yakıt hava yerine neredeyse saf oksijenle yakılır ve baca gazında yüksek derişimde karbon dioksit üretilir. Bacadan çıkan gaz soğutularak ve sıkıştırılarak su buharı ayrıştırılır. Oksi yanmada havadaki oksijenin %95-99 oranında saflıkta ayrıştırılması gerekir. Yakıtın yüksek saflıktaki oksijenle yakılmasının bir avantajı baca gazının hacimsel olarak %80'in üzerinde karbon dioksit içermesidir. Oksi yanma sisteminin en önemli dezavantajı yüksek miktarlarda saf oksijene ihtiyaç duyması, dolayısıyla yüksek sabit yatırım maliyeti gerektirmesi ve fazla enerji harcamasıdır. Oksi yakıtın gaz türbinlerinde kullanılması konusu ise hala araştırma ve kavramsal tasarım safhasındadır (IPCC, 2005; Olajire, 2010).

3.1.4. Endüstriyel Prosesler

Karbon dioksit tutumu için yukarıda bahsedilen üç temel yaklaşımın dışında endüstriyel proseslerin işletme akımlarından CO₂ tutumu ile ilgili çalışmalar bulunmaktadır. Endüstriyel proseslerdeki atık CO₂ gazı, her sistem için basınç ve konsantrasyon açısından farklılık gösterebilmektedir. Bu da endüstriyel proseslerdeki CO₂ tutumu maliyetini değiştirmektedir. Bu proseslerden CO₂ tutumunun uygulandığı tesislere doğal gaz arıtım tesisleri ve amonyak üretim tesisleri örnek olarak verilebilir. Bu tesislerde kullanılan çoğu CO₂ tutumu teknolojisi yanma öncesi sistemlerde kullanılan teknoloji ile benzerdir. Çimento ve demir-çelik üretimi gibi diğer endüstriyel proseslerin işletme akımlarından CO₂ tutumu işlemleri güç santrallerinde kullanılan CO₂ tutum işlemlerine benzemektedir (IPCC, 2005).

Karbon dioksit yakalama sistemlerinin mevcut durumları ve bu teknolojilerin potansiyelleri Çizelge 3.1 ve Çizelge 3.2’de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Karbon dioksit yakalama teknolojilerinin mevcut durumu (Olajire, 2010)

Yanma Öncesi	Yanma Sonrası	Oksi Yanma
-Entegre kömür gazlaştırma çevrimleri ile amonyak üretimi için gelişmiştir. -Fiziksel çözeltilerle ayırma uygundur.	-Doğal gaz tesisleri için aminlerle ayırma teknolojisi gelişmiştir. -Bazı güç santrallerinde kullanılmaktadır. -Çözeltilerin bozunma problemi vardır.	-Oksijen üretimi için oldukça gelişmiştir. -Küçük çaplı yanma tesislerinde deneme aşamasındadır.

Çizelge 3.2. Karbon dioksit yakalama teknolojilerinin potansiyeli (Olajire, 2010)

Yanma Öncesi	Yanma Sonrası	Oksi Yanma
Genellikle yanma sonrası sistemlere göre daha yüksek karbon dioksit derişimi Karbon dioksit ayrılması için daha yüksek itici güç gereklidir. Yakıtın işlenmesi gereklidir. Gazlaştırma işlemlerinin ticarileşme konusundaki engelleri yaygındır. Kapsamlı destekleyici sistemlere ihtiyaç gereklidir.	Mevcut kömürle çalışan tesislerin çoğuna kolayca uygulanabilir. Düşük basınçlarda çalışılabilir. Yüksek yakalama seviyeleri için yüksek performans hacmi gereklidir. Geliştirilmiş çözeltiler enerji kayıplarını azaltabilir. Konvansiyonel monoetanolamin (MEA) sıyırma sistemleri (stripping) gelişmiştir. Önemli maliyet tasarrufu mümkündür.	Baca gazında çok yüksek karbon dioksit derişimi Yüksek kriyojenik oksijen üretim ihtiyacı ve maliyeti vardır. Sıcaklık kontrolü için yüksek oranda baca gazı geri dönüşümü Düşük enerji maliyeti için membranlarla ileri seviyede oksijen ayırma potansiyeli vardır. Düşük proses verimine sahiptir. Teknoloji geliştirme potansiyeli vardır.

Noktasal emisyon kaynaklarından karbon dioksitin tutulması hakkında birçok araştırma bulunmakta ve araştırmalar halen devam etmektedir. Genellikle araştırmalarda daha çok yanma sonrası sistemlerdeki baca gazından karbon dioksit tutulması üzerinde durulmaktadır.

3.2. Karbon Dioksitin Depolanması

Küresel sera gazı emisyon değerlerini kontrol altında tutabilmek için karbon dioksit depolama teknolojisi temel yöntemlerden biridir. Karbon yakalama ve depolama teknolojisi, kömür gibi konvansiyonel fosil yakıtların kullanımına izin verir ve güç santralleri ile endüstriyel sektörlerin karbon dioksitten arındırılması için uygun maliyetli teknolojilerden biri olarak görülmektedir (Zhang ve Huisin, 2017).

CCS teknolojisi, endüstriyel yakma tesislerinden (çoğunlukla kömür santrallerinden, çimento fabrikalarından veya çelik üretim tesislerinden) karbon dioksit yakalanmasını, sıkıştırılmasını, taşınmasını ve uygun jeolojik depolama alanlarına enjekte edilmesini içermektedir. Dünyanın çeşitli yerlerinde karbon dioksitin depolanmasıyla alakalı çalışmalar gerçekleştirilmektedir (IPCC, 2005).

Karbon dioksit depolamada potansiyel depolama alanları;

- Boş petrol rezervuarları,
- Boş doğal gaz alanları,
- Kullanılmayan kömür yatakları,
- Akiferler (yer altı suyu tabakaları)

olarak sıralanabilir (Hendriks, Graus ve van Bergen, 2004).

Karbon dioksit yeraltında binlerce yıl depolanabilmektedir. Uzun süreli depolama olabilmesi için, jeolojik depo bölgesi gözenekli ve geçirgen olmalı, örtü kayaçlar geçirimsiz olmalıdır. Jeolojik depolamada basınç kontrolünün iyi bir şekilde yapılması gerekmektedir. Belirli basınç seviyesinin üzerine çıkıldığında rezervi oluşturan yapı da sinterleşme olabilir ve bu yapı içerisine sürekli karbon dioksit pompalanması sonucu patlama riski ortaya çıkabilir.

Yeraltına jeolojik depolama, karbon dioksit yakalamada tercih edilen yöntemlerden biridir. Karbon dioksitin binlerce yıl boyunca önemli bir oranda atmosfere sızması için yapılan enjeksiyon işleminin en az 800 metre derinliğe yapılması gerekmektedir (Aminu, Rochelle, Nabavi ve Manovic, 2017).

Dünyadaki jeolojik rezervuarların potansiyel depolama kapasitesinin 236 Gt CO₂ olduğu bilinmektedir. Güvenli depolama sahaları oluşturmak için bazı gereksinimlere ihtiyaç vardır.

Bunlar aşağıdaki gibi sıralanabilir (Zhang ve Huisingh, 2017).

- Yeterli gözeneklilik ve kalınlık (depolama kapasitesi) ve geçirgenlik: Potansiyel depolama alanları, enjekte edilen karbon dioksiti depolamak için yeterli gözenek hacmine sahip olmalıdır.
- Karbon dioksitin depolanabilmesi için tatmin edici sızdırmazlık kapağı kullanılmalıdır.
- Depolama alanının bütünlüğünü korumak için uygun bir jeolojik ortam seçilmelidir.
- Depolama rezervuarlarının derinliğinin 800 metreden daha çok olması gerekmektedir. Karbon dioksit süper kritik olarak sıkıştırılıp depolandığı için depolama hacmi en azı iner ve gözenekler içerisinde kolayca ilerler.

Bir diğer karbon dioksit depolama alanı ise okyanuslardır. Okyanuslar, dünyanın %70'ini kaplaması ve mevcut derinlikleri sayesinde alternatif depolama sahalarıdır. Karbon dioksitin borular ya da gemiler aracılığıyla, okyanusun derinine enjekte edilmesi yöntemi ile depolama gerçekleştirilir. Okyanusa depolama yönteminde, su içerisinde dağılmış ve çözünmüş karbon dioksit, sonrasında karbon döngüsünün bir parçası haline gelebilir. Bu yöntem kullanıldığında karbon dioksitin deniz canlılarına ve buradaki ekosisteme verebileceği zarar ve bu durumun etkileri halen bilinmemektedir (IPCC, 2005). Ayrıca, bu yöntemin maliyetli olması sebebiyle okyanusa depolama hakkındaki araştırmalar devam etmektedir.

3.3. Karbon Dioksit Tutumu Metotları

Karbon dioksit tutumu, toplam karbon yakalama ve depolama teknolojisi maliyetinin %75'ini oluşturmaktadır. Her ne kadar bu oran yakalama ve depolama sistemlerine göre farklılık gösterse de CCS teknolojisinde maliyetin azaltılması önemli bir faktördür. Karbon dioksit bir gaz akımı ile birlikte tutuluyorsa, çeşitli yöntemlerle bu gaz akımından ayrılabilir. Bu yöntemler; absorpsiyon, adsorpsiyon, membran ile ayırma ve kriyojenik ayırma olarak sıralanabilir. Mevcut birçok karbon dioksit tutumu metodu halen geliştirilmektedir. Bu metotlar geniş sıcaklık aralığını kapsarken, kuru ve yaş prosesler ile çalışmalar gerçekleştirilmektedir.

3.3.1. Absorpsiyon

Absorpsiyon, bir gaz karışımında bulunan bileşenlerden bir ya da birkaçının uygun bir sıvı ile teması sağlanarak diğer gaz akımından uzaklaştırılması işlemi olarak tanımlanabilir. Diğer sistemlerle karşılaştırıldığında absorpsiyon, enerji santralleri ve endüstriyel prosesler gibi büyük emisyon kaynaklarından karbon dioksitin tutulmasında en sık tercih edilen metotlardan biridir. Burada, karbon dioksit içeren gaz akımı, içerisinde uygun bir çözeltinin bulunduğu absorpsiyon kolonunun içinden geçirilir. Çözelti genellikle bir rejenerasyon kolonuna beslenerek geri kazanılır. Burada karbon dioksit saf olarak ayrılabilir. Karbon dioksitten arındırılan çözelti tekrar absorpsiyon kolonuna geri beslenmektedir.

Absorpsiyon ile karbon dioksit tutulması fiziksel ve kimyasal absorpsiyon olarak iki gruba ayrılmaktadır. Fiziksel absorpsiyonda, gazın sıvı içerisinde çözünmesi ile absorpsiyon işlemi gerçekleşmektedir. Kimyasal absorpsiyonda ise sıvı içerisinde çözülmüş olan gaz, reaksiyona girmektedir (Danckwerts, 1970: 31-33).

Fiziksel absorpsiyon

Fiziksel absorpsiyon yöntemi, belirli bir sıcaklıkta ve basınçta çözelti içerisinde çözünebilen gazın çözünürlük teorisine yani Henry Yasası'na dayanmaktadır. Fiziksel absorpsiyon teknolojisi organik çözeltiler ile asidik gazların (karbon dioksit gibi), kimyasal reaksiyon gerçekleşmeden fiziksel olarak çözeltiliye absorplanmasıdır. Bu çözeltiler daha sonra ısıtılarak ve basınç düşürülerek geri kazanılır. Karbon dioksit ve absorbent arasında kimyasal sistemlere oranla zayıf bir bağ vardır ve bu durum geri kazanım sırasındaki enerji maliyetinin azalmasını sağlamaktadır (Olajire, 2010).

Yüksek kısmi basınç ve düşük sıcaklık karbon dioksitin çözünürlüğünü artırır. Çözeltinin karbon dioksiti absorplaması, gaz akımındaki karbon dioksitin kısmi basıncı ile orantılıdır (Kohl ve Nielsen, 1997: 1190).

Ticari aşamalarda fiziksel absorpsiyon yöntemi, asidik gazların ($\text{CO}_2/\text{H}_2\text{S}$) uzaklaştırılması ve hidrojen, metanol ve amonyak üretiminde sentez gazından karbon dioksitin uzaklaştırılması için kullanılmaktadır. En çok kullanılan ticari fiziksel absorpsiyon proseslerine; selexol, rektisol, fluor ve purisol örnek olarak verilebilir (Olajire, 2010).

Seleksol prosesinde çözelti olarak polietilen glikol dimetil eterler (DEPG) kullanılmaktadır. Seleksol 1969 yılından beri kullanılmakta olan bir yöntemdir ve hem karbon dioksit (CO_2) hem de hidrojen sülfür (H_2S) gazlarının giderilmesi için üniteler bulundurmaktadır. Düşük sıcaklıklarda ($0-5^\circ\text{C}$) absorpsiyon işlemi gerçekleşebilmektedir. Düşük sıcaklıklarda çalışılabilmesi bir avantaj olsa da sistemin yüksek işletme basıncında daha verimli olması ekonomik anlamda bir dezavantaj oluşturmaktadır.

Rektisol işleminde, çözelti olarak soğutulmuş metanol kullanılmaktadır. Yüksek metanol buhar basıncından dolayı yaklaşık -40 ila -60°C sıcaklık aralığında çalışılmaktadır. Rektisol prosesi doğal gaz endüstrisinde karbon dioksit giderimi için yaygın olarak kullanılmaktadır. Düşük sıcaklıklarda çalışılması, çözeltinin soğutulmasını gerektirdiğinden işletme maliyetini artırmaktadır.

Fluor sisteminde çözelti olarak propilen karbonatlar ($\text{C}_4\text{H}_6\text{O}_3$) kullanılmaktadır. Bu işlem, gaz beslemesindeki karbon dioksitin kısmi basıncı yüksek olduğunda ($>5,15$ bar) veya besleme gazı karbon dioksit bakımından zengin ise karbon dioksit giderimi için kullanılan en etkili yöntemlerden biridir. Kullanılan çözelti yüksek karbon dioksit çözünürlüğüne sahiptir ancak pahalıdır.

Purisol prosesinde ise çözelti olarak N-metil-2-pirollidon kullanılmaktadır. Bu işlem, oda sıcaklığından yaklaşık -15°C sıcaklığına yapılan soğutma ile gerçekleştirilmektedir. Diğer çözeltilere göre daha yüksek buhar basıncına sahiptir. Bu sebeple diğer proseslere göre daha fazla çözelti kayıpları meydana gelebilmektedir (Olajire, 2010).

Kimyasal absorpsiyon

Kimyasal absorpsiyonla karbon dioksitin tutulması, yanma sonrası sistemlerde diğer yöntemlere göre günümüzde daha çok tercih edilen yöntemdir. Kimyasal absorpsiyon düşük ve orta kısmi basınçlı karbon dioksiti ayırmak için uygun bir yöntemdir. CO_2 asidik bir gaz olduğundan, karbon dioksitin baca gazından kimyasal absorpsiyonu bazik çözücüler kullanarak gerçekleşen asit-baz nötralizasyon reaksiyonuna bağlıdır. Karbon dioksit kimyasal çözücülerle tepkimeye girerek ısıl işlemlerle tekrar eski formuna dönüşebilecek zayıf bağlı ara ürünler oluşturur. CO_2 ile reaksiyona giren çözücü ısıl işlem yardımıyla geri kazanılır ve saf karbon dioksit elde edilir (Kim ve diğerleri, 2013; Olajire, 2010).

Karbon dioksit absorplamada ticari olarak en çok kullanılan çözeltiler alkanolamin (MEA-monoetanolamin, DEA-dimetanolamin, MDEA-metiletanolamin vb.) çözeltileridir. Alkanolamin çözeltileri ile absorpsiyon teknolojisinin doğal gaz sektöründeki endüstriyel uygulamaları yaklaşık 70 yıl önce başlamış ve olgunlaşmış bir teknolojidir. alkanolamin çözeltileri temel olarak birincil (RNH_2), ikincil (R_2NH) ve tersiyer (R_3N) olmak üzere üç gruba ayrılırlar (Olajire, 2010; Öztürk, Özek ve Yüksel, 2010).

Alkanolamin çözeltileri ile karbon dioksit absorplamada güncel araştırmalar, çözelti rejenerasyonu sırasında enerjinin en aza indirilmesine dayanmaktadır. Ancak her ne kadar bu prosesin performansını artıracak çözümler geliştirilse de bu sistemlerin karmaşıklığı ve maliyetin artması gibi sebepler operasyonel olarak avantaj sağlamamaktadır (Luis, 2016).

3.3.2. Adsorpsiyon

Adsorpsiyon işlemi, katı bir adsorbent yüzeyine karbon dioksit gazının diğer gaz akımlarından ayrılarak tutulması ile gerçekleşmektedir. Adsorpsiyon işlemi, fiziksel veya kimyasal olarak gerçekleşebilir. Fiziksel adsorpsiyon, moleküller arasındaki düşük çekim gücünden veya van der Waals kuvvetlerinden meydana gelmektedir. Fiziksel adsorpsiyon genel olarak geri dönüşümlü bir işlemdir. Kimyasal adsorpsiyon ise daha kuvvetli güçlerin etkisi sonucu oluşur. Genellikle adsorpsiyon sırasında moleküller adsorbent yüzeyinde bir film tabakası oluşur. Adsorbent yüzeyi belli bir süre sonra tamamen bu tabaka ile kaplanmış olur ve adsorbentin adsorplama kapasitesi tükenir. Bu tür adsorpsiyon işlemlerinde geri dönüşümün sağlanması için yüksek sıcaklıklarda rejenerasyon işlemi gereklidir.

Adsorpsiyon işlemleri ile karbon dioksit giderimi için moleküler elekler ve aktif karbon kullanılmaktadır. Adsorpsiyon işleminin geri kazanımı genellikle basınç düşürme işlemi (basınç salınlı adsorpsiyon-PSA) veya ısısal işlemlerle (sıcaklık salınlı adsorpsiyon-TSA) gerçekleştirilir. Sıcaklık salınlı adsorpsiyon işlemi ısıtma işleminde uzun döngü zamanı gerektirdiğinden çoğu uygulamalarda basınç salınlı adsorpsiyon işlemi kullanılmaktadır. Baca gazlarından karbon dioksit giderimi için adsorpsiyon uygulaması ticari olarak gelişmemiş olsa da pilot uygulamaları mevcuttur. Karbon dioksiti etkin bir şekilde adsorbe edecek yeni nesil malzemelerin geliştirilmesi ile özellikle baca gazından ayırma işlemlerinde adsorbentlerin rekabet gücü artacaktır (IPCC, 2005).

3.3.3. Kriyojenik ayırma

Kriyojenik ayırma yöntemi, karbon dioksitin sıvılaştırılarak taşıma ve depolama kolaylığı sağlanmasını amaçlayan bir yöntemdir. Diğer yöntemlere göre kriyojenik ayırma, daha yüksek karbon dioksit konsantrasyonuna sahip kaynaklardan karbon dioksiti ayırmak için kullanılır. Bu metoda göre gazlar çok düşük sıcaklıklara soğutularak ($<-73,3^{\circ}\text{C}$) karbon dioksitin dondurulması, sıvılaştırılması sağlanır.

Kriyojenik ayırma prosesinin bir avantajı, karbon dioksitin saf olarak geri kazanılmasına imkân tanınmasıdır. Geri kazanılan saf karbon dioksit, kömür rezervuarlarından metanın çıkarılması için enjeksiyon bölgesine veya petrol geri kazanım bölgelerine gönderilir. Diğer bir avantaj ise, karbon dioksitin sıvı hale getirilmesi ile taşınma işleminin kolaylaşmasıdır. Kriyojenik ayırmanın önemli bir dezavantajı ise, seyreltik akımlardan karbon dioksitin ayrılması için yüksek enerji gereksinimi olmasıdır (Çeliktaş, 2016).

3.3.4. Membranlar

Membranlar, gaz akımının içinden belli bir bileşenin seçici olarak geçirimini sağlayan özel olarak üretilmiş malzemelerdir. Membranlar, çeşitli mekanizmalarla maddeleri ayıran gözenekli veya gözeneksiz yarı geçirgen bariyerlerdir. Membranın seçiciliği, kullanılan malzemenin yapısıyla alakalıdır ancak gaz akışı genellikle membrandaki basınç farkı ile gerçekleşir. Bu sebeple genel olarak membran ile ayırma işlemlerinde yüksek basınçlı akımlar tercih edilmektedir. Polimerik, metalik, seramik gibi birçok membran çeşidi vardır. Membran ile ayırma işlemleri, endüstride mevcut birçok uygulamada bulunsa da karbon dioksit yakalama sistemleri için hem güvenilirlik açısından hem de maliyetin yüksek olması sebebiyle büyük ölçekli tesislere uygulanmamıştır. Halen, karbon dioksit yakalamada büyük ölçekli tesisler için membran malzemelerin geliştirilmesiyle alakalı çalışmalar devam etmektedir (IPCC, 2005).

Membran ile ayırma işleminin absorpsiyon ve adsorpsiyon proseslerine göre birçok avantajı bulunsa da her zaman yüksek seviyede ayırma sağlayamamaktadırlar. Ayrıca kükürtlü bileşiklere ve diğer eser elementlere duyarlı davranış göstermektedirler. Membranlar sadece ayırma işlemleri için kullanılmaktadır ancak başka kimyasal proseslere de entegre edilebilmektedir (Olajire, 2010).

4. DOLGULU KOLONLAR

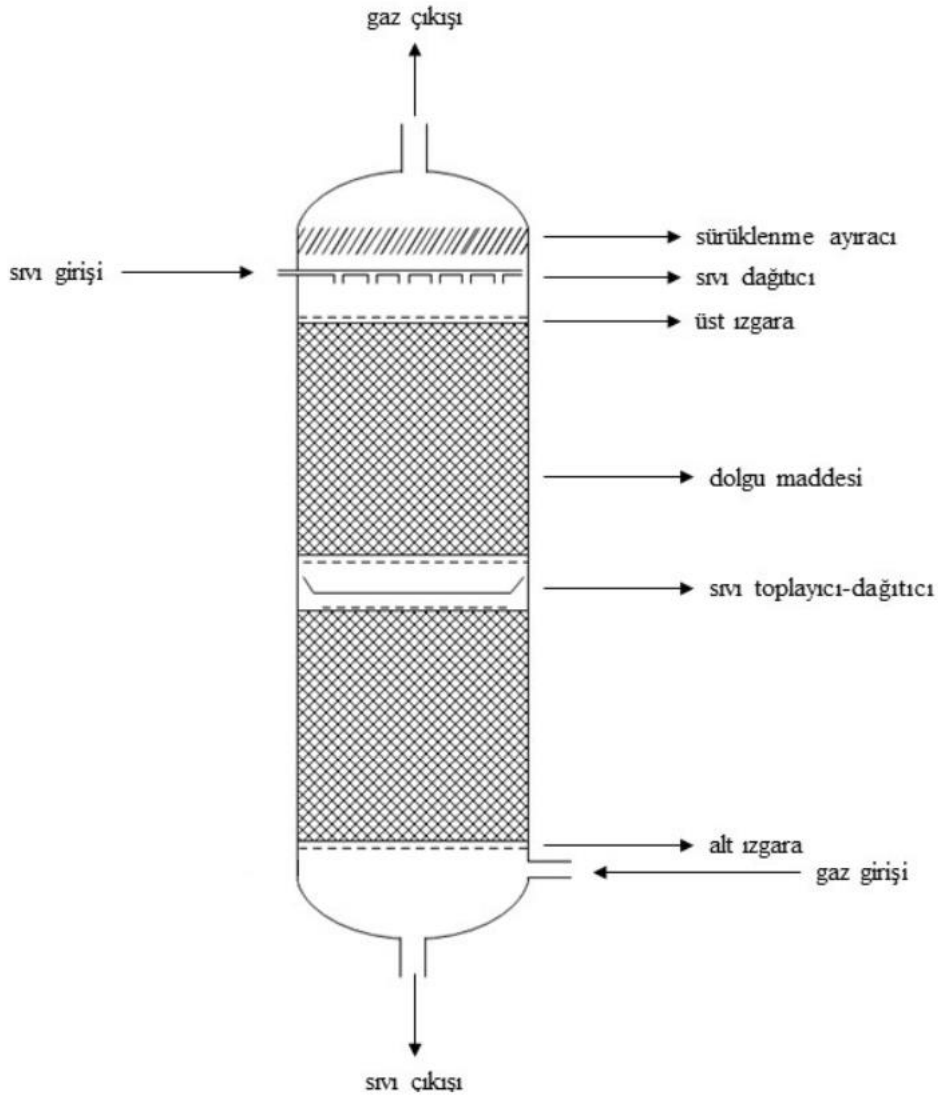
Absorpsiyon işlemlerinde gaz-sıvı temas yüzeyini artırmak için sıklıkla kullanılan ekipmanlardan biri dolgulu kolonlardır. Dolgulu kolonlarda, eş yönlü veya ters yönlü akım ile çalışılabilir. Genellikle distilasyon ve çoğu absorpsiyon proseslerinde ters yönlü akım ile çalışılmaktadır (Charpentier, 1976).

Son zamanlarda, karbon dioksit yakalamada dolgulu kolonların etkinliği hakkında daha fazla araştırma sunmak için çeşitli deneysel çalışmalar yapılmaktadır. Dolgulu kolonlar, gaz ve sıvı arasında etkili ara temas yüzeyi oluşturması, yüksek kütle aktarım verimi sunması ve düşük basınç düşüşü bakımından yaygın olarak kullanılmaktadır (Kohl ve Nielsen 1997: 15; Tan, Shariff, Lau ve Bustam, 2012).

4.1. Dolgulu Kolon Çalışma Prensibi

Dolgulu kolonun üst bölgesinden homojen olarak beslenen sıvı akımı, dolgu maddelerinin yüzeyi boyunca yer çekiminin etkisi ile aşağı doğru akarken, dolgulu kolonun alt bölgesinden gönderilen gaz akımı, dolgu maddelerinin boşluklarından yukarı doğru hareket eder ve böylece gaz ve sıvı akımları birbirleri ile temas eder. Bu sayede, etkin bir kütle transferi alanı sağlanmış olur (Uysal, 2003: 187).

Şekil 4.1’de absorpsiyon işlemlerinde kullanılabilecek bir dolgulu kolon modeli gösterilmektedir. Kolonun alt kısmında bulunan ızgara üzerine dolgu maddeleri yerleştirilir. Yüksek akış hızlarında, dolgu maddelerinin sürüklenmesini önlemek için kolonun üst tarafına da ızgara konulur. Dolgulu kolonda, gaz akımının sıvı damlacıklarını da beraberinde sürüklemesini önlemek için bir sürüklenme ayırıcı kullanılır. Sıvı akımının dolgu maddeleri boyunca homojen olarak dağılmasını sağlamak için sıvı dağıtıcı kullanılır. Dolgu maddeleri arasından aşağı doğru akan sıvı akımıyla, dolgu maddesinin boşluklarından yukarı doğru akan gaz akımı karşılaştığında iki akım arasında kütle transferi gerçekleşmiş olur.



Şekil 4.1. Dolgulu kolon modeli

4.2. Dolgu Maddeleri

Sıvı ve gaz akım arasındaki ara yüzey miktarını arttırmak için çeşitli dolgu maddeleri geliştirilmiştir. Dolgulu kolonlarda sıvı akımı, dolgu maddelerinin yüzeyini bir film şeklinde kaplayarak aşağı doğru akar. Dolgu maddelerini kaplayan sıvı filminin ince olduğu yani sıvı film kalınlığının ihmal edilebilir düzeyde olduğu ve sıvı fazın tüm dolgu maddelerinin yüzeyini yeterince ıslattığı varsayımı yapılırsa, dolgu maddesi yüzey alanının, sıvı- gaz ara yüzey alanı ile yaklaşık olarak eşit kabul edilebilmektedir. Bu durum göz önüne alındığında, birim dolgu hacminde en yüksek ara yüzey alanını verecek dolgu malzemesinin şeklini geliştirmek, dolgulu kolonlarda verimi artırmak amacıyla devam etmekte olan bir araştırma konusudur (Uysal, 2003:188).

Yukarıdaki sebeplerden dolayı dolgu maddelerinin tasarımında zamanla önemli değişiklikler meydana gelmiştir. Raschig halkaları, Pall halkaları, Intallox saddle, Berl saddle, Lessing halkaları geleneksel dolgulara örnek olarak verilebilir. Yapılı dolgular (Structured packings) ise yeni nesil dolgular olarak bilinmektedir (Kohl ve Nielsen, 1997: 8). Dolgu maddeleri; plastik, çelik, porselen, alüminyum, kil, alümina, grafit gibi çeşitli malzemelerden yapılabilir. Genelde, ticari dolgu maddeleri ile bazı dolgu maddeleri 3-75 mm boyutları arasında bulunabilmektedir. %65-95 oranında yüksek boşluk hacmi, dolgu maddeleri için iyi bir karakteristik özelliktir (Geankoplis, 2003: 656).

Kütle transferi ve absorpsiyon verimini yüksek seviyelere çıkarmak için dolgu maddesi seçiminde aşağıda belirtilen özelliklere dikkat edilebilir (Uysal, 2003: 189):

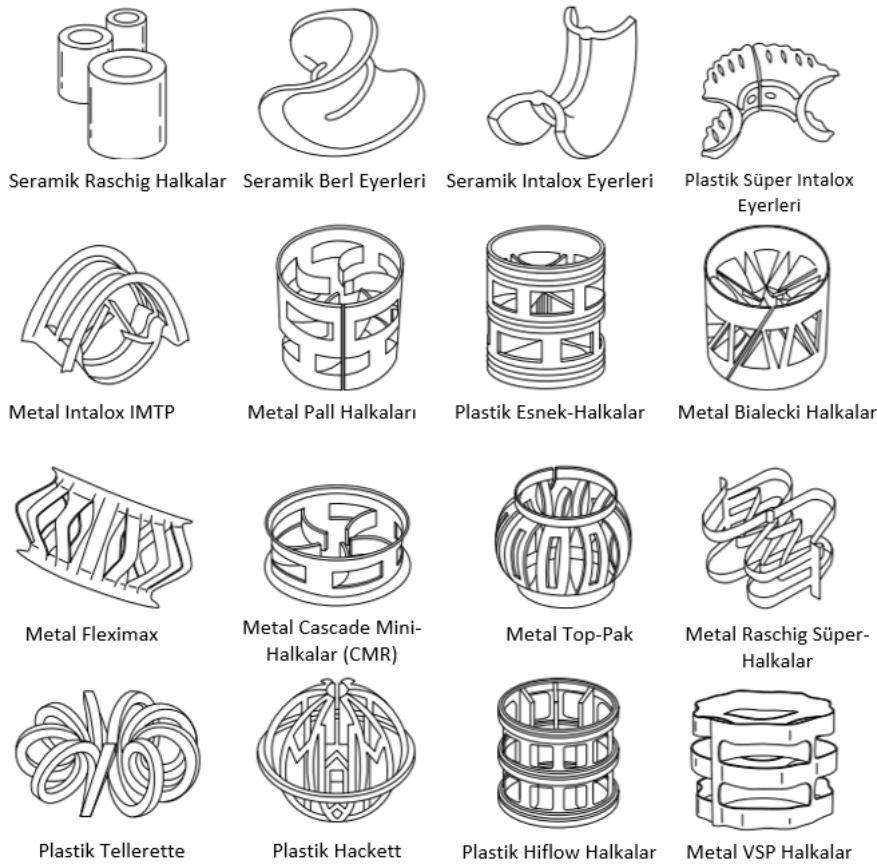
- Dolgu maddeleri sağlam ve mukavemetli olmalıdır,
- Ağır olmamalıdır,
- Yüksek basınç düşüşlerine neden olmamalıdır,
- Kullanılan sıvı ve gaz ile tepkimeye girmemelidir, inert olmalıdır,
- Sıvı ve gaz akımı arasında yeterli teması sağlamalıdır,
- Dolgu kolon boyunca eşit bir şekilde dağılmış olmalıdır,
- Ucuz olmalıdır.

Dolgulu kolonlarda kullanılan çeşitli dolgu malzemelerine örnekler Şekil 4.2 ve Şekil 4.3'te gösterilmektedir.

4.2.1. Geleneksel dolgular

Geleneksel dolgular, sıvı-gaz teması için gerekli yüzey alanına sahip, belirli geometrik şekli bulunan malzemelerdir (Şekil 2.4). Geleneksel dolgular incelenecek olduğunda, dolgu maddelerinin gelişimi dört ayrı nesile ayrılabilir (Seader, Henley ve Roper, 2011: 209-210)

1895-1950 yılları arasında kullanılan, seramik Raschig halkası ve Berl saddle dolguları birinci nesil dolgular olarak adlandırılırlar. Bu dolgular yerlerini, kütle transferi için daha yüksek yüzey alanı, yüksek akış kapasitesi ve daha düşük basınç düşüşü sağlayan, ikinci nesil dolgulara yani metal ve plastik Pall halkaları, metal Bialecki halkaları ve seramik Intallox saddle dolgularına bırakmışlardır (Seader, Henley ve Roper, 2011: 210).



Şekil 4.2. Geleneksel dolgu malzemeleri (Seader, Henley ve Roper, 2011: 211)

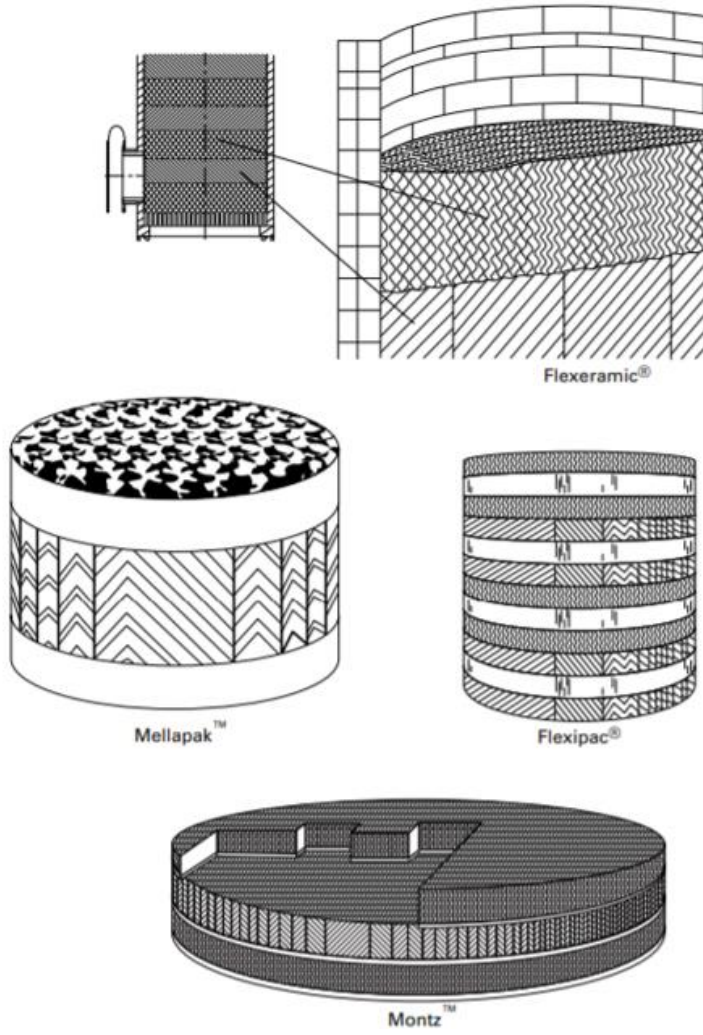
İkinci nesil dolgulardan sonra, daha yüksek kütle aktarım hızı sağlayan ve yüksek verimli üçüncü nesil dolgular geliştirilmiştir. Bunlar, metal Intalox, metal, plastik, seramik Cascade Mini Halkalar (Cascade Mini-ring-CMR), metal Levapak, metal, plastik, seramik Hiflow halkaları, metal Tri-packs ve plastik Nor-Pac halkaları olarak sıralanabilir. Bu dolgu maddeleri, “yüksek verimli” geleneksel dolgu maddeleri olarak adlandırılırlar. Yaklaşık 2-9 cm (1-3,5 inch) arasında değişen nominal çaplarda bulunmaktadır. Dolgu maddesinin boyutu arttıkça, kütle aktarım verimi ve basınç düşüşü azalmaktadır. Bunun için optimum dolgu maddesi boyutu bulunmaktadır (Seader, Henley ve Roper, 2011: 210).

Dördüncü nesil geleneksel dolguları, VSP halkaları, Fleximax ve Raschig Süper Halkaları (RSR) oluşturmaktadır. Bu dolgu malzemeleri dalgalı geometriye sahiplerdir. Dolgu malzemeleri üzerinde, düzgün ıslanmayı destekleyen türbülanslı sıvı filmleri oluşumu sağlanır. Burada, dolgu maddesinde yüksek kapasite sağlanırken, düşük basınç düşüşü ile yüksek kütle aktarım verimi elde edilir (Seader, Henley ve Roper, 2011: 210).

Metal dolgu maddeleri genelde yüksek mukavemet ve iyi ıslanabilme özellikleri ile tercih edilmektedir fakat yüksek maliyetlidir. Düşük mukavemetli fakat yüksek ıslanabilme özelliği ile seramik dolgular yüksek sıcaklıklarda ve korozif ortamlarda kullanılmaktadırlar. Genellikle propilen plastik ambalajlar hem ucuzdur hem de yeterli mukavemete sahiptir. Ancak düşük sıvı oranlarında zayıf ıslanabilirliğe sebep olabilirler (Seader, Henley ve Roper, 2011: 210).

4.2.2. Yapılı dolgular

Yapılı dolgular, delikli veya deliksiz, kıvrımlı, seramik, plastik veya metal tabakaların birbirlerine bitişik olarak sıralanması ile oluşturulmuş malzemelerdir (Şekil 4.2). Yapılı dolgularda, Sulzer, BX Montz, Gempak gibi dolgular oluklu metal levhalardan oluşmaktadır. Metal ve plastikten imal edilen, delikli, kabartmalı veya kabartmasız yeni ve daha ucuz yapılı dolgu malzemeleri ise Mellapak 250Y, metal Flexipak, metal ve plastik Gempak 4A, metal Montz B1 gibi yüksek performanslı yapılı dolgulardır. Yapılı dolgular, aralarında açıklık bulunacak şekilde, birbirlerine bitişik olarak sıralanarak bir kolonda istiflenirler. Geleneksel dolgulara göre daha pahalı olmalarına rağmen, yapılı dolgular daha az basınç düşüşüne sebep olur ve daha yüksek verimlilik ve kapasiteye sahiptir (Seader, Henley ve Roper, 2011: 210-211). Ancak ticari kullanımlarda geleneksel dolgular en yaygın dolgu tipi olarak görülmektedir.



Şekil 4.3. Yapılı dolgu (Structured Packing) malzemeleri (Seader, Henley ve Roper, 2011: 212)

5. KARBON DİOKSİT ABSORPSİYONUNDA KARBİTOL ASETATIN KULLANILABİLİRLİĞİ

5.1. Karbon Dioksit Absorpsiyonunda Kullanılan Çözeltiler Hakkında Araştırmalar

Büyük noktasal emisyon kaynaklarından karbon dioksitin tutulması ile ilgili birçok çalışma olsa da en sık tercih edilen yöntem absorpsiyon işlemidir. Kimyasal absorpsiyon işlemi, endüstride özellikle yanma sonrası sistemlerde sıklıkla kullanılmaktadır. Karbon dioksitin etkili bir şekilde uzaklaştırılabilmesi için çeşitli çözeltiler hala test edilmektedir.

Yanma sonrası sistemlerde çoğunlukla kimyasal absorbent olan monoetanolamin (MEA), dietanolamin (DEA), di-izorpropanolamin (DIPA) ve metildietanolamin (MDEA) gibi alkanolamin çözeltileri kullanılmaktadır. MEA, alkanolamin çözeltileri arasında en çok kullanılan çözeltilerdir. Fosil yakıt kullanan enerji üretim tesislerinden çıkan baca gazı, MEA çözeltisi bulunan absorpsiyon kolonuna gönderilir. Burada karbon dioksitçe zenginleşen MEA çözeltisi daha sonrasında karbon dioksitin ayrılması için rejenerasyon ünitesine gönderilir. Absorpsiyon işlemi yüksek basınç ve düşük sıcaklıkta gerçekleşirken ($\cong 2,3$ atm ve 50°C) rejenerasyon ünitesinde düşük basınç ve yüksek sıcaklıkta çalışılır (1 atm 120°C) (Puxty ve diğerleri 2009).

Alkanolamin çözeltilerine absorpsiyon hızını arttırıcı veya korozyon önleyici katkı maddeleri eklenmesi de uygulanan yöntemlerdendir. Çeşitli aktifleştirici katkıların kullanımının çözelti performansını arttırıcı etkisi olsa da proses maliyetini arttırmaktadır ve bu katkıların çevre üzerindeki etkileri hakkında endişeler bulunmaktadır. Ayrıca yavaş reaktiviteye sahip aminlerin çeşitli aktivatörler yardımıyla hızları arttırılmaktadır (Kohl ve Nielsen, 1997: 46, 362; Seo ve Hong, 2000).

Son zamanlarda, karbon dioksit absorpsiyonunda alkanolamin çözeltileri ile ilgili çalışmalar, çözelti rejenerasyonundaki enerji gereksinimini en aza indirerek maliyeti düşürmek üzerine yapılmaktadır. Alkanolamin çözeltileri ile karbon dioksit yakalama oldukça olgunlaşmış bir teknolojidir. Bu sebeple bazı çalışmalar bu teknolojinin modifikasyonu ile geliştirilmesine dayanmaktadır (Luis, 2016).

Karbon dioksit absorpsiyonunda alkanolamin çözeltisi kullanan sistemlerin dezavantajları aşağıda sıralanmıştır (Wang, Lawal, Stephenson, Sidders ve Ramshaw, 2011).

- Sınırlı karbon dioksit yükleme kapasitesi,
- Rejenerasyon için yüksek enerji maliyetleri,
- Yüksek ekipman korozyon hızı,
- Yüksek sıcaklıklarda çözelti bozunumu,
- Oksijen varlığında alkanolamin çözeltisinin oksitlenmesi,
- Yüksek enerji maliyeti gereksinimi,
- Uçuculuktan kaynaklanan çözelti kayıpları.

Yukarda sıralanan dezavantajlar sebebiyle alkanolamin çözeltilerine alternatif olabilecek çözelti arayışları devam etmektedir. Bu alternatif çözeltilerde aranan en önemli özellikler; düşük enerji maliyeti ile yüksek karbon dioksit seçiciliği, çevre dostu olması ve insan sağlığına zararlı olmaması, çözelti bozunmasının ve korozyonunun düşük seviyede olmasıdır (Wang ve diğerleri, 2011).

Karbon dioksit absorplamada son zamanlardaki araştırmalar iyonik sıvılar üzerine de yoğunlaşmıştır. İyonik sıvılar; geniş seçenek aralıkları, termal kararlılıkları ile hem polar hem apolar sistemlerdeki yüksek çözünürlükleri ve ihmal edilebilir buhar basınçları gibi özellikleriyle karbon dioksit absorpsiyonu için önerilen çözeltilerdir (Babamohammadi, Shamiri ve Aroua, 2015).

İyonik sıvılar, organik katyonların, organik veya inorganik anyonlar ile zayıf bir bağ ile birbirlerine bağlanmalarından meydana gelirler (Özkutlu, 2014). Genelde iyonik sıvı olarak imidazol tuzu, amonyum tuzu, sülfonik asit tuzu ve pirrol tuzu kullanılmaktadır. En yaygın kullanılan, düşük viskozite özelliğine sahip olması ile imidazolyum bazlı iyonik sıvılardır (Zhang, Ye ve Jiang, 2015).

Karbon dioksit absorpsiyonunda iyonik sıvıların performansını artırmak için, iyonik sıvı yapısının içine amin yapısı eklenerek iyileştirme çalışmaları yapılmaktadır (Şeker, 2013). Ancak bu karışımın oluşması için birçok sentez aşamasına ihtiyaç vardır ve MEA gibi geleneksel alkanolaminlere kıyasla maliyeti daha fazladır. Ayrıca yüksek viskozite gibi dezavantajları bulunmaktadır (Babamohammadi, Shamiri ve Aroua, 2015).

İyonik sıvılar, her ne kadar son zamanlarda karbon dioksit absorpsiyonunda üzerinde durulan çözeltiler olsa da iyonik sıvıların maliyeti yüksektir. Ayrıca, iyonik sıvıların özellikle düşük basınçlarda karbon dioksit absorplama kapasiteleri ve hızlarının düşük olduğu bilinmektedir (Özkutlu, 2014).

Alkanolamin ve iyonik sıvılar dışında karbon dioksit absorpsiyonunda farklı çözeltiler hakkında da araştırmalar halen devam etmektedir. Gliserol, polietilen glikol eterler, polietilen glikol esterler, propilen karbonat, potasyum karbonat, n-metil-2-pirolidon, 2-amino-2-metil-1-propanol gibi birçok çözelti de karbon dioksit absorpsiyonunda kullanılabilmektedir (Aschenbrenner ve Styring, 2010; Ghosh, Kentish ve Stevens, 2009; Svenson ve diğerleri, 2014).

Endüstride kullanılan çözeltilerin maliyetli olması, viskoz olması, korozif olması gibi sebeplerle karbon dioksit absorplamada bilinen çözeltilerin dışında alternatif çözelti arayışı halen güncelliğini korumaktadır. Karbon dioksit absorplamada asetat kullanımı da son zamanlarda üzerinde durulan çalışmalardan biridir. Li, Huang, Zheng, Mi ve Dong (2014) çalışmalarında, kaynama noktaları yüksek, karbonil ve eter grubu içeren 2-etoksietil eter, 2-butoksietil asetat ve 2-(2-etoksietoksi) etil asetat (karbitol asetat) çözeltilerinin karbon dioksit çözünürlüklerini incelemişlerdir (Li, Huang, Zheng, Mi ve Dong, 2014).

Fiziksel absorbentlerde farklı fonksiyonel gruplar farklı karbon dioksit çözünürlüklerine yol açmaktadır. Bu durum incelendiğinde, karbonil ve eter gruplarının karbon dioksit çözünürlüğünü arttırdığı ve karbonil grubunun eter grubundan daha etkili olduğu görülmektedir. Ayrıca çözelti kayıplarını azaltmasından dolayı yüksek kaynama noktası önemli bir avantajdır. Bu üç fiziksel absorbent arasında karbitol asetat en iyi karbon dioksit absorplama kapasitesine sahip çözelti olarak öne çıkmaktadır. Karbitol asetat içerisindeki karbon dioksit çözünürlüğü diğer çözeltilerle kıyaslandığında en yüksek sonucu vermiştir çünkü diğer çözeltiler içinde en güçlü Lewis asit-baz etkileşimi olan çözelti karbitol asetattır. Çizelge 5.1’de endüstride fiziksel absorbent olarak sıkça kullanılan çözeltiler ile 2-etoksietil eter, 2-butoksietil asetat ve 2-(2-etoksietoksi) etil asetat’ın spesifik bazı özellikleri bulunmaktadır (Li ve diğerleri, 2014).

Çizelge 5.1. Fiziksel absorbentlerin karşılaştırılması (Li ve diğerleri, 2014)

	Molekül Ağırlığı (g/mol)	Viskozite (mPa.s)	Kaynama Noktası (°C)	Henry Sabiti K_H (MPa) (25°C'de)
Metanol	32,04	0,59	65	15,4
DEPG (polietilen glikol dimetil eter)	250-270	5,80	>250	4,68
PC (propilen karbonat)	102,09	2,50	242	8,21
NMP (N-metilpirolidinon)	99,13	1,65	204	6,38
2-Etoksietil eter	162,23	1,40	189	4,56
2-Bütoksietil asetat	160,21	1,70	192	4,41
2-(2-etoksietoksi) etil asetat	176,21	2,80	219	4,25

Son zamanlarda araştırmacılar yüksek karbon dioksit absorplama kapasitesine sahip yeni fiziksel çözeltiler aramaya odaklanmış ve karbon dioksit ve çeşitli fiziksel çözeltiler için buhar-sıvı dengesi üzerinde çalışmışlardır. Bu çalışmalardan bazıları oda sıcaklığının altındaki sıcaklıklarda karbon dioksit çözünürlükleri üzerinedir (Li, Chen, Huang ve Yang, 2018).

Li ve arkadaşları (2018) ise çalışmalarında, eter ve ester gruplarına sahip altı fiziksel absorpsiyon çözeltilisinin düşük sıcaklıkta (0-10°C) ve 1,2 MPa basınçlarda karbon dioksit çözünürlüğünü incelemişlerdir. Sıcaklığın azaltılmasının absorpsiyon kapasitesinin iyileştirilmesi konusunda büyük etkisinin olduğunu ortaya koymuşlardır. Seçilen çözeltilerin Henry sabitleri ve hacimsel çözünürlükleri, absorpsiyon kapasitesini değerlendirmek amacıyla diğer çözeltiler ve iyonik sıvılarla karşılaştırılmıştır.

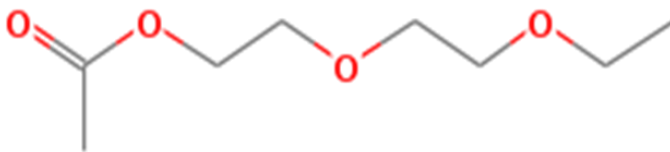
Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar, etilen glikol metil eter asetat (EGMEA) ve karbitol asetat (CA, 2-(2-etoksietoksi) etil asetat)'ın karbon dioksit yakalamada potansiyel değere sahip olduğunu göstermektedir. Absorpsiyon davranışını incelemek için, çözeltilerin entropisi, entalpisi ve seçilen sistemler için çözeltilerin Gibbs serbest enerjisi gibi termodinamik özellikler incelenmiştir. Çizelge 5.2'de bu altı fiziksel absorbente ait özellikler verilmiştir (Li ve diğerleri, 2018).

Çizelge 5.2. Farklı fiziksel absorbentin karşılaştırılması (Li ve diğerleri, 2018)

	Molekül Ağırlığı (g/mol)	Kaynama Noktası (°C)	Henry Sabiti K_H (MPa) (0°C'de)	$\Delta_{sol}H$ (kJ/kmol)
EGMEA (etilen glikol metil eter asetat)	76,09	125	2,97	-12,50
PGMEA (propilen glikol metil eter asetat)	132,16	146	2,86	-11,37
MBA (3-metoksi bütül asetat)	146,19	135	2,84	-11,78
DGDE (dietilen glikol dietil eter)	162,22	188	2,93	-11,84
EGBEA (etilen glikol bütül eter asetat)	160,21	192	2,90	-11,64
CA (2-(2-etoksietoksi) etil asetat)	176,21	219	2,81	-11,62

5.2. Karbitol Asetatın Özellikleri

Bu yüksek lisans tezi kapsamında, diğer çözeltilere alternatif olarak karbitol asetat (diğer bir adıyla 2-(2-etoksietoksi) etil asetat) çözeltilisinin karbon dioksit absorpsiyonunun incelenmesine karar verilmiştir. Karbitol asetat yüksek kaynama noktası, düşük viskozite özelliğine sahip olması, suda çözünebilmesi, kararlı yapıda olması, korozif olmaması ve rejenerasyonunun kolay olması yönüyle seçilmiştir. Ayrıca karbonil ve eter grupları içermesi nedeniyle yapısal olarak karbon dioksitin fiziksel absorpsiyonuna uygundur (Li ve diğerleri, 2014). Bu özellikleri ile karbitol asetat enerji ihtiyacı tasarrufu sağlaması yönüyle dikkate değer alternatif bir çözeltilidir. Ayrıca, karbon dioksit absorpsiyonunda karbitol asetat ile alakalı araştırmaların çok az olması sebebiyle bu yüksek lisans tez çalışması ile literatüre de katkı sağlanması amaçlanmaktadır. Resim 5.1'de karbitol asetata ait molekül yapısı verilmiştir.



Resim 5.1. Karbitol asetat moleküler gösterimi

Karbitol asetat, çoğu organik çözücüyle karışabilen renksiz bir sıvıdır. Karbitol asetat, ağırlıklı olarak kimya endüstrisinde, boya ve verniklerin formülasyonunda bir çözücü olarak kullanılır. Baskı mürekkepleri, kaplama vernikleri ve zambak reçineleri içerisinde kullanımının yanı sıra kozmetik ve parfümeri endüstrilerinde, elyaf ve kumaşların baskısında ve boyarmadde olarak da kullanılmaktadır (Li ve diğerleri, 2014). Karbitol asetata ait bazı fiziksel özellikler Çizelge 5.3'te gösterilmektedir (Wypych, A., Wypych, G., 2014; 354).

Çizelge 5.3. Karbitol asetatın fiziksel özellikleri (Wypych, A., Wypych, G., 2014: 354)

Karbitol Asetat (Dietilen glikol monoetil eter asetat)	
IUPAC adı	2-(2-etoksietoksi) etil asetat
Kimyasal Kategori	Ester
Molekül Formülü	C ₈ H ₁₆ O ₄
Molekül Ağırlığı	176,21 g/mol
Kaynama Noktası	219°C
Donma Noktası	-25°C
Buhar Basıncı	0,007 kPa
Viskozite	2,8 cP
Yoğunluk	1,011 g/mL
Alevlenme Noktası	91°C

6. MATERYAL METOT

Bu yüksek lisans çalışması kapsamında, karbitol asetat ile karbon dioksitin absorpsiyonu incelenmiştir. Literatür araştırmasında, karbon dioksit absorpsiyonunda karbitol asetatın difüzyon katsayısı değerleri ile kütle transferi katsayısı değerleri hakkında bir çalışmaya rastlanmamıştır.

Öncelikle, karbon dioksitin karbitol asetat içerisindeki difüzyon katsayısının belirlenmesi ile ilgili çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın teorik olarak irdelenmesi Kısım 6.1’de, deneysel çalışma Kısım 7.1’de ve çalışmaya ait bulgular Kısım 8.1’de sunulmuştur.

Daha sonrasında kütle transferi çalışmaları yapılmıştır. Bunun için öncelikli olarak kütle transferi karakterizasyonunun gerçekleştirilmesi için oksijen desorpsiyon yöntemi ile sıvı tarafı bireysel fiziksel kütle transfer katsayıları ve sodyum hidroksit çözeltisine kükürt dioksit absorpsiyonu yöntemi ile gaz tarafı bireysel fiziksel kütle transfer katsayıları belirlenmiştir. Bu çalışmaların teorik olarak irdelenmesi Kısım 6.2 ve Kısım 6.3’te, deneysel çalışmalar Kısım 7.2 ve Kısım 7.3’te ve çalışmaya ait bulgular Kısım 8.2 ve Kısım 8.3’te sunulmuştur.

Kütle transferi çalışmalarına, iki direnç teorisine göre gaz tarafı toplu fiziksel kütle transfer katsayısının su için elde edilmesi ile devam edilmiştir. Bu çalışmanın teorik olarak irdelenmesi Kısım 6.4’te ve çalışmaya ait bulgular Kısım 8.4’te sunulmuştur.

Son olarak, kütle transferi çalışmaları, sodyum hidroksit ($pH_{NaOH} > 10$) çözeltisine karbon dioksit absorpsiyonu ile gaz tarafı toplu kimyasal kütle transfer katsayıları ve karbitol asetat çözeltisine karbon dioksit absorpsiyonu ile gaz tarafı toplu fiziksel kütle transfer katsayılarının belirlenmesi ve gaz tarafı toplu kimyasal ve fiziksel kütle transfer katsayılarının iki direnç teorisine göre gaz tarafı toplu kütle transfer katsayıları ile karşılaştırılması yapılarak bitirilmiştir. Bu çalışmaların teorik olarak irdelenmesi Kısım 6.5 ve Kısım 6.6’da, deneysel çalışmalar Kısım 7.4 ve 7.5’te ve çalışmaya ait bulgular Kısım 8.5, Kısım 8.6 ve Kısım 8.7’de sunulmuştur.

6.1. Karbon Dioksitin Karbitol Asetat İçerisindeki Difüzyon Katsayısının Belirlenmesi

Sıvılarda difüzyon katsayısı hesaplamaları ile ilgili literatür incelendiğinde, teorik modellerin yeterli olmadığı görülmüştür. Bu sebeple, literatürde çeşitli ampirik korelasyonlar önerilmiştir. Seyreltik çözeltilerde difüzyon katsayısı hesaplanırken kullanılan en uygun modellerden biri Wilke-Chang denklemidir (Uysal, 2003: 21). Eşitlik 6.1’de Wilke-Chang denklemi gösterilmektedir.

$$D_{AB} = 1.17 \times 10^{-13} \frac{\sqrt{\psi_B M_B T}}{\mu V_A^{0.6}} \quad (6.1)$$

Eş. 6.1’de, D_{AB} [m^2/s] biriminden seyreltik çözeltilerdeki difüzyon katsayısını, M_B [kg/kmol] biriminden çözücünün molekül ağırlığını, T [K] biriminden mutlak sıcaklığı, V_A [m^3/kmol] biriminden çözünen maddenin normal kaynama sıcaklığındaki molar hacmini, μ [cp] biriminden çözeltinin viskozitesini ve ψ_B çözücü B için birleşme parametresini göstermektedir.

Wilke-Chang denklemi ile ilgili olarak literatürde birçok düzenleme mevcuttur. Özellikle karbon dioksit çözünürlüğü ile ilgili olarak denklemdeki viskozite (μ) üs değeri 1’den değişiklik gösterebilmektedir (Danckwerts, 1970: 16). Bu çalışmalar daha sonradan Othmer-Thakar ve Hayduk-Laudie tarafından yapılan çalışmalarla da desteklenmiştir (Hayduk ve Laudie, 1974; Othmer ve Thakar, 1953). Buna göre denklemdeki viskozite üs değerlerinin -0,5 ve +1,4 arasında değişiklik gösterdiği literatürde mevcuttur (Shramke, Murphy ve Doucette, 1999). Literatürdeki bu çalışmalar dikkate alınarak, karbon dioksitin karbitol asetate içerisindeki difüzyon katsayısı hesaplamalarında kullanılan düzenlenmiş Wilke-Chang denklemi Kısım 8.1 içerisinde Eşitlik 8.1’de gösterilmektedir.

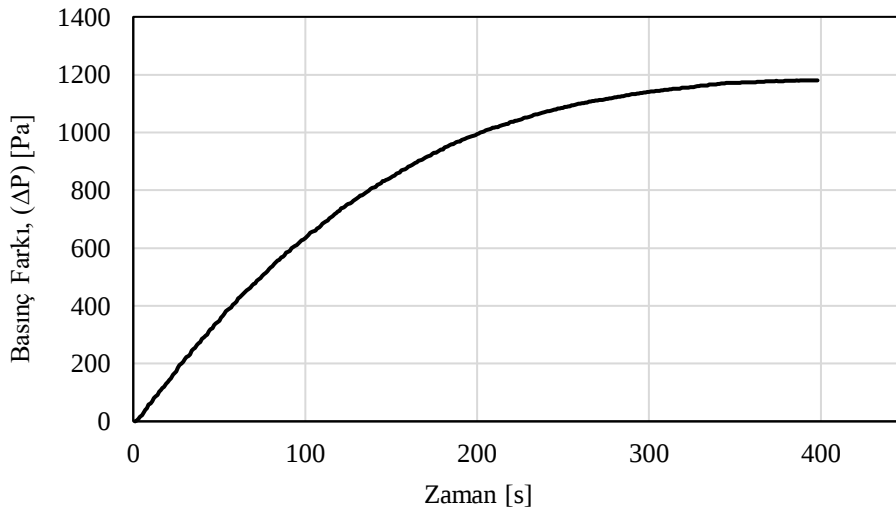
Deneyisel çalışmada, karbon dioksitin karbitol asetate içerisindeki difüzyon katsayıları hesaplanırken diyafram hücre sistemi kullanılmıştır. Diyafram hücre yöntemi, difüzyon katsayısının bulunması amacıyla literatürde kullanılmakta olan yöntemlerden biridir (Uysal, 2016; Wu, Liu, Li, 2001; Littel, Versteeg ve van Swaaij, 1992; Brillman, 1968; Dullien, 1958).

Diyafram hücre sisteminde, gaz haznesine hapsedilen gazın ara yüzeyden sıvıya absorplanmasından dolayı gaz basıncında azalma meydana gelmiştir. Diyafram hücre içerisinde difüzyon sonucu meydana gelen basınç düşüşü değerleri (gaz haznesindeki basınç ile atmosferik basınç arasındaki fark) anlık olarak basınç algılayıcı ile kaydedilmiş ve daha sonra bu değerler zamana karşı grafiğe geçirilmiştir.

Diyafram hücre sisteminde gaz haznesindeki basınç ölçümü, atmosferik basınç ile anlık basınç algılayıcıdan ölçülen basınç değerinin farkı olup Eş. 6.2’de gösterilmiştir.

$$P = P_{atm} - \Delta P \quad (6.2)$$

Gazın ara yüzeyden sıvıya absorplanması esnasında meydana gelen basınç farkı grafiği Şekil 6.1’de gösterilmektedir.



Şekil 6.1. Gazın ara yüzeyden sıvıya absorplanması esnasında zamanla meydana gelen basınç farkı (dış Basınç-iç Basınç)

Diyafram hücre sistemi, sıvı ve gaz hazne ile birlikte bu iki haznenin arasında bulunan gözenekli bir diyaframdan oluşmaktadır. Gaz hazneye saf karbon dioksit gazı hapsedilirken, sıvı hazneye de absorpsiyon çözeltisi konulmuştur. Gaz-sıvı ara yüzeyine gözenekli bir diyafram kullanılmıştır. Diyafram olarak poröz cam kullanılmıştır. Gözenekli diyaframın kullanılmasıyla sistemdeki gaz-sıvı temas yüzey alanı artırılmaktadır. Temas yüzeyi artırılmış bu sistemde kütle transferi gerçekleşmiştir. Bu sistemden yararlanılarak elde edilen difüzyon katsayısı hesaplamalarında, Uysal’ın (2016) doktora tez çalışmalarında yapmış olduğu çıkarım denklemlerinden yararlanılmıştır.

Diyafram hücre sisteminde meydana gelen absorpsiyon hızı Eş. 6.3'teki gibi ifade edilebilir (Uysal, 2016).

$$j = -\frac{D\varepsilon}{\delta_d\tau}(C_{L,i} - C_L)A_d = -\frac{D\varepsilon}{\delta_d\tau}(mC_g - C_L)A_d = -k_D(mC_g - C_L)A_d \quad (6.3)$$

Burada A_d , m ve k_D , sırasıyla diyafram yüzey alanı [m^2], boyutsuz çözünürlük ve diyafram kütle transfer katsayısıdır [m/s]. Boyutsuz çözünürlük ifadesi Eş. 6.4'teki gibi ifade edilebilir.

$$m = (C_L/C_g)_{denge} \quad (6.4)$$

Diyafram hücre için kütle transfer katsayısı, Eş. 6.3 ele alınacak olduğunda, Eş. 6.5 gibi ifade edilebilir.

$$k_D = \frac{D\varepsilon}{\delta_d\tau} \quad (6.5)$$

Burada δ_d , diyafram hücrenin kalınlığı [m]; τ , bükümlülük faktörü; ε ise boşluk kesridir. Bu parametreler kullanılan diyaframa bağlı özellikler olup, kullanılan malzemeye ve sisteme göre farklılık gösterebilirler.

Gazdan sıvıya transfer olan madde miktarı Eş 6.6'daki gibi hesaplanabilir.

$$V_g \frac{dC_g}{dt} = -k_D(mC_g - C_L)A_d \quad (6.6)$$

Eş. 6.6'ya benzer şekilde gazdan sıvıya geçen gaz miktarı Eş. 6.7'deki gibi hesaplanabilir.

$$V_L \frac{dC_L}{dt} = k_D(mC_g - C_L)A_d \quad (6.7)$$

Eş. 6.6 ve Eş. 6.7 kullanılarak Eş. 6.8 elde edilebilir.

$$-V_g \frac{dC_g}{dt} = V_L \frac{dC_L}{dt} \quad (6.8)$$

Eş. 6.8'in çözülmesi ile Eş. 6.9 ve Eş.6.10 elde edilir.

$$\int_0^{C_L} dC_L = \frac{-V_g}{V_L} \int_{C_{g,0}}^{C_g} dC_g \quad (6.9)$$

$$C_L = \frac{V_g}{V_L} (C_{g,0} - C_g) \quad (6.10)$$

Eş. 6.10, Eş. 6.6'da yerine yazılırsa Eş. 6.11 elde edilir.

$$\frac{dC_g}{dt} = -\frac{k_D A_d}{V_g} \left[\left(m + \frac{V_g}{V_L} \right) C_g - \frac{V_g}{V_L} C_{g,0} \right] \quad (6.11)$$

Eş. 6.11, integrali alınarak düzenlenirse Eş. 6.12'deki ifade elde edilir.

$$\frac{1}{\left(m + \frac{V_g}{V_L} \right)} \int_{C_{g,0}}^{C_g} \frac{d \left[\left(m + \frac{V_g}{V_L} \right) C_g \right]}{\left[\left(m + \frac{V_g}{V_L} \right) C_g - \frac{V_g}{V_L} C_{g,0} \right]} = - \int_0^t \frac{k_D A_d}{V_g} dt \quad (6.12)$$

Bu denklem, $t=0$ anında gaz konsantrasyonu $C_g = C_{g,0}$ olarak kabul edilerek çözüldüğünde Eş. 6.13 elde edilir.

$$C_g = \frac{C_{g,0}}{(mV_L + V_g)} \left(V_g + mV_L e^{-k_D A_d t \left(\frac{m}{V_g} + \frac{1}{V_L} \right)} \right) \quad (6.13)$$

Burada, $C_g = \frac{P_g}{RT}$ denklemini kullanarak sabit sıcaklıkta ölçülen basınçtan konsantrasyonu hesaplamak mümkündür. $C_{L,i}$ ifadesi ise, kullanılan gazın sıvı ara yüzey konsantrasyonudur.

$$C_{L,i} = mC_g = \frac{RT}{H_{CO_2}^{\text{çözeltili}}} C_g \quad (6.14)$$

Eş. 6.14'te yer alan $H_{CO_2}^{\text{çözeltili}}$, karbon dioksitin çözeltiler içerisindeki Henry yasası sabitlerini ifade eder. Eş. 6.13, gazdan sıvıya transfer olan gaz miktarı ele alınarak k_D için düzenlendiğinde Eş. 6.15'teki gibi elde edilir.

$$\frac{-\ln \left[\frac{1}{mV_L} \left(\frac{P_g(V_g + mV_L)}{P_{g,0}} - V_g \right) \right]}{A_d \left(\frac{m}{V_g} + \frac{1}{V_L} \right)} = k_D t \quad (6.15)$$

Burada yer alan V_L ve V_g , sırasıyla $[m^3]$ biriminden hücreye konulan sıvı ve gaz hacmi; $P_{g,0}$ ve P_g , $[Pa]$ biriminden sırasıyla başlangıç ve t anındaki gaz basıncıdır.

Bu denkleme göre eşitliğin sol tarafı zamana karşı grafiğe geçirildiğinde elde edilen doğrunun eğimi, diyafram kütle transfer katsayısını (k_D) verecektir.

$$Eğim = k_D = D_{CO_2}^{çözelti} \xi \quad (6.16)$$

Eş. 6.16'da yer alan $D_{CO_2}^{çözelti}$, $[m^2/s]$ biriminden karbon dioksit gazının çözelti içerisindeki difüzyon katsayısı, ξ $[1/m]$, diyafram sabiti olup, kullanılan diyaframın özelliklerinin bir arada toplandığı bir sayıdır (Uysal, 2016). Diyafram sabiti (ξ) değeri, bu çalışma için ayrıca hesaplanmamış olup, aynı sistemde önceden yapılan doktora çalışmasından elde edilen diyafram sabiti (ξ) değeri kullanılmıştır (Genç Çelikçi, 2020).

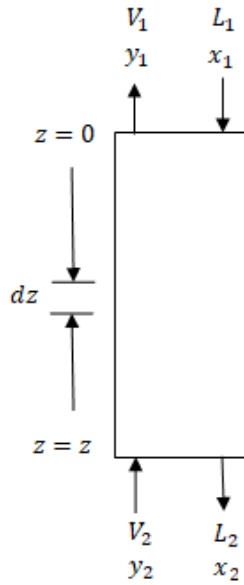
Karbon dioksitin karbitol asetat içerisindeki difüzyon katsayısının belirlenmesi için yapılan deneysel çalışma Kısım 7.1'de ve çalışmaya ait bulgular Kısım 8.1'de verilmiştir.

6.2. Dolgulu Kolonda Kütle Transferi Karakterizasyonu Çalışmaları

Raschig halkalı dolgulu kolonda, kütle transferi çalışmalarına geçmeden önce kolon içerisindeki kütle transferi mekanizmalarının iyice anlaşılması gerekmektedir. Bu sebeple öncelikli olarak kolonda kütle transferi karakterizasyonu yapılmıştır. İlk olarak oksijen desorpsiyonu yöntemi ile sıvı tarafı bireysel fiziksel kütle transfer katsayısı ($k_L^0 a$) ve sodyum hidroksit çözeltisi ($pH_{NaOH} > 10$) içerisine kükürt dioksit absorpsiyonu metodu ile gaz tarafı bireysel fiziksel kütle transfer katsayısı ($k_G^0 a$) değerleri deneysel olarak elde edilmiştir. Elde edilen bireysel fiziksel kütle transfer katsayısı değerleri ile, iki direnç teorisine göre karbon dioksit su sistemi için gaz tarafı bazlı toplu kütle transfer katsayısı ($K_G^0 a$) hesaplanmıştır. Daha sonra kimyasal sistemlerin işleyişinin incelenmesi için gaz tarafı bazlı toplu kimyasal kütle transfer katsayısı ($K_G a$) deneysel olarak elde edilmiştir. Yapılan bu çalışmaların ardından karbitol asetat çözeltisi kullanılarak gaz tarafı toplu fiziksel kütle transfer katsayıları elde edilmiştir.

6.3. Dolgulu Kolonda Sıvı Tarafı Bireysel Fiziksel Kütle Transfer Katsayılarının Belirlenmesi

Sıvı tarafı bireysel fiziksel kütle transfer katsayısının belirlenmesi ile ilgili literatürdeki çalışmalar incelendiğinde sıklıkla tercih edilen yöntemin desorpsiyon sistemi olduğu görülmüştür. Bu sistemlerde $k_L^0 a$ 'nın belirlenmesi için su içinde oksijen veya karbon dioksit gibi çözünebilir gazların kullanımı önerilmektedir (Hoffmann ve diğerleri 2007; Kunze ve diğerleri 2015). Dolgulu kolonda sıvı tarafı bireysel fiziksel kütle transfer katsayısının hesaplanabilmesi için oksijen desorpsiyon yönteminde yararlanılmıştır. Oksijen desorpsiyon yöntemi ile dolgulu kolon içerisinde oksijene doyurulmuş olan sudan havaya oksijen desorpsiyonu gerçekleşmiştir.



Şekil 6.2. Oksijen desorpsiyonunda kullanılan dolgulu kolon şematik gösterimi

Raschig halkalı dolgulu kolonda oksijen desorpsiyonu için madde denkliği basamakları aşağıdaki gibi yazılabilir.

Sıvı fazda çözünen oksijen akış hızı, F [kmol/s], Eş. 6.17'deki gibi hesaplanabilir.

$$F = L \cdot x \quad (6.17)$$

Eş. 6.17'de yer alan L [kmol/s], sıvı akış hızı; x [kmol/kmol] ise sıvı fazdaki oksijenin mol kesridir.

Dolgu yüksekliği boyunca çözünen oksijenin akış hızındaki değişimi veren madde denkliği W [kmol/s], Eş. 6.18'deki gibi ifade edilebilir.

$$W = d(L \cdot x) \quad (6.18)$$

Eğer, dz [m] yüksekliğinde diferansiyel hacim elemanı ve Sc [m²] kolon kesit alanı ele alınacak olursa, dolgu yüksekliği boyunca birim kesit alan için dolgu hacmi V [m³] Eş. 6.19'deki gibi elde edilir.

$$V = Sc \cdot dz \quad (6.19)$$

Diferansiyel bölümdeki ara yüzey temas alanı dA [m²], Eş. 6.20'deki gibi ifade edilebilir. Burada a [m²/m³] ile ifade edilen spesifik yüzey alanıdır.

$$dA = a \cdot Sc \cdot dz \quad (6.20)$$

Desorplanan maddenin kütle transfer hızı W [kmol/s], akı N_A [kmol/m².s] cinsinden Eş. 6.21'deki gibi ifade edilebilir.

$$W = N_A \cdot a \cdot Sc \cdot dz \quad (6.21)$$

Burada yer alan akı ifadesi, mol kesri ve konsantrasyon birimlerine bağlı kütle transfer katsayısı k_x ve k_L cinsinden Eş. 6.22'deki gibi ifade edilebilir.

$$N_A = k_x^0(x - x_i) = k_L^0(C_{A,L} - C_{A,i}) = k_L^0 C(x - x_i) \quad (6.22)$$

Eş. 6.22'deki ifadenin Eş. 6.21'de yerine konması ile dz [m] yüksekliğinde diferansiyel hacim elemanında sıvı tarafı kütle denkliği (Eş. 6.23) elde edilir.

$$W = k_L^0 C(x - x_i) a \cdot Sc \cdot dz = d(Lx) \quad (6.23)$$

Eş. 6.23'te gösterilen ifade ile Eş. 6.18'de gösterilen ifadenin birbirine eşitlenmesi ile Eş.6.24 elde edilir.

$$W = k_L^0 C(x - x_i) \cdot a \cdot Sc \cdot dz = -L \cdot dx \quad (6.24)$$

Eş. 6.24 düzenlenip integrali alındığında, Eş.6.25'daki ifade elde edilir.

$$\int_{z=0}^{z=L} \frac{k_L^0 a C_{Sc} dz}{-L} = \int_{x_{giris}}^{x_{çikis}} \frac{dx}{(x-x_i)} \quad (6.25)$$

Eş. 6.25'te yer alan kütle transfer katsayısı ve spesifik yüzey alanının çarpımı $k_L^0 a$, denklemin sol tarafına alınıp eşitlik tekrar düzenlendiğinde Eş. 6.26 elde edilir.

$$k_L^0 a = \frac{L}{Sc C Z} \ln \left(\frac{x_{giris}-x_i}{x_{çikis}-x_i} \right) = \frac{U_L}{Z} \ln \left(\frac{x_{giris}-x_i}{x_{çikis}-x_i} \right) \quad (6.26)$$

Burada oksijenin gaz tarafındaki konsantrasyonu sabit olduğundan, bununla dengede kalabilecek x_i değeri de sabit kalır. Bu değer, deneyin yapıldığı sıcaklık için sabit olduğundan toplam basınca göre düzeltilmesi gerekmektedir (Uysal Zıraman, Doğan ve Uysal, 2018). Eş. 6.25'teki x_i değerleri sıcaklıkla değişen bir değer olduğundan Ek-2'de sunulan tablodan okunmuştur. Bu durumda, sıvı tarafı bireysel fiziksel kütle transfer katsayısını veren ifade Eş. 6.27'deki gibi ifade edilebilir.

$$k_L^0 a = \frac{U_L}{Z} \ln \left(\frac{x_{giris}-x_i}{x_{çikis}-x_i} \right) \quad (6.27)$$

Burada $k_L^0 a$, oksijenin sıvı tarafı bireysel fiziksel kütle transfer katsayısı, U_L yüzeysel sıvı akış hızı, Z dolgu yüksekliği, x_1 ve x_2 sırasıyla kolonun girişinde ve çıkışında sıvı fazdaki oksijenin mol kesirleri, x_i gaz tarafı ile dengede olan sıvı tarafındaki oksijenin ara yüzey bileşimidir.

Oksijen desorpsiyonu yöntemi ile hesaplanan sıvı tarafı bireysel fiziksel kütle transferi katsayısı değerlerine karbon dioksit için bir düzeltme yapılması gerekmektedir.

Literatürde hem penetrasyon teorisi hem de yüzey yenileme teorisine göre kütle transfer katsayısı, difüzyon katsayısının kareköküyle orantılıdır (Uysal, 2003: 109).

$$k_L \propto \sqrt{D_{AB}} \quad (6.28)$$

Bu çalışmada, oksijen desorpsiyonu ile hesaplanan sıvı tarafı bireysel fiziksel kütle transfer katsayılarını, karbon dioksit ile yapılacak çalışmalarda kullanmak için Eş.6.29'dan yararlanılmıştır.

$$(k_L^0 a)_{CO_2} = (k_L^0 a)_{O_2} \sqrt{\frac{D_{CO_2-H_2O}}{D_{O_2-H_2O}}} \quad (6.29)$$

Karbon dioksitin su içerisindeki sıvı tarafı fiziksel kütle transfer katsayısının hesaplanabilmesi için öncelikle karbon dioksit ve oksijenin su içerisindeki difüzyon katsayılarının hesaplanması gerekmektedir.

Karbon Dioksitin Su İçerisindeki Difüzyon Katsayısı

Karbon dioksitin su içerisindeki difüzyon katsayısı hesaplamalarında Versteeg ve Van Swaaij'in (1998) geliştirmiş olduğu korelasyon kullanılmıştır.

$$D_{CO_2-H_2O} = 2.35 \times 10^{-6} e^{-2119/T} \quad (6.30)$$

Oksijenin Su İçerisindeki Difüzyon Katsayısı

Oksijenin su içerisindeki difüzyon katsayısı hesaplamalarında Wilke-Chang denklemi kullanılmıştır (Uysal 2003: 21).

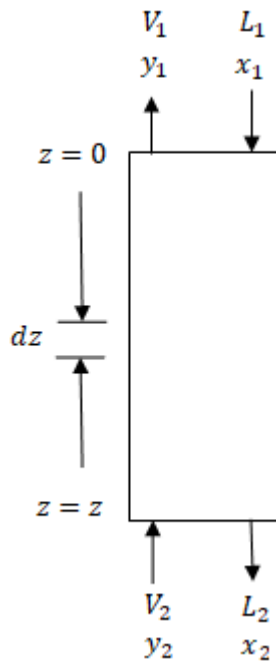
$$D_{O_2-H_2O} = 1.17 \times 10^{-13} \sqrt{\frac{\psi_B M_B T}{\mu V_A^{0.6}}} \quad (6.31)$$

Eş. 6.31'de, $D_{O_2-H_2O}$ [m²/s] biriminden oksijenin su içerisindeki difüzyon katsayısını, M_B [kg/kmol] biriminden çözücünün molekül ağırlığını, T [K] biriminden mutlak sıcaklığı, V_A [m³/kmol] biriminden çözünen maddenin normal kaynama sıcaklığındaki molar hacmini, μ [cp] biriminden çözeltinin viskozitesini ve ψ_B çözücü B için birleşme parametresini göstermektedir.

Sıvı tarafı bireysel fiziksel kütle transfer katsayılarının belirlenmesi ile ilgili yapılan deneysel çalışma Kısım 7.2'de ve bu çalışmaya ait deneysel bulgular Kısım 8.2'de verilmiştir.

6.4. Dolgulu Kolonda Gaz Tarafı Bireysel Fiziksel Kütle Transfer Katsayılarının Belirlenmesi

Gaz tarafı bireysel fiziksel kütle transferi katsayısının belirlenmesinde absorpsiyon sistemleri sıklıkla kullanılmaktadır. Bu sistemlerde $k_c^0 a$ 'nın belirlenebilmesi için sodyum hidroksit çözeltisine kükürt dioksit absorpsiyonu önerilmektedir (Haidl, Rejl, Valenz, Moucha ve Petrícek, 2017; Hoffmann ve diğerleri, 2007). Dolgulu kolonda gaz tarafı bireysel fiziksel kütle transfer katsayısının hesaplanabilmesi için sodyum hidroksit ($\text{pH}_{\text{NaOH}} > 10$) çözeltisine kükürt dioksit (SO_2) absorpsiyonu yönteminden yararlanılmıştır.



Şekil 6.3. Sodyum hidroksit çözeltisine kükürt dioksit absorpsiyonunda kullanılan dolgulu kolon şematik gösterimi

Raschig halkalı dolgulu kolonda kükürt dioksit absorpsiyonu için madde denkliği basamakları aşağıdaki gibi yazılabilir.

Gaz fazında SO_2 akış hızı, F [kmol/s], Eş. 6.32'deki gibi hesaplanabilir.

$$F = V \cdot y \quad (6.32)$$

Eş. 6.32'de yer alan V [kmol/s], gaz akış hızı, y [kmol/kmol] ise gaz fazdaki SO_2 'nin mol kesridir. Dolgu yüksekliği boyunca SO_2 'nin akış hızındaki değişimini veren madde denkliği W [kmol/s] Eş. 6.33'teki gibi ifade edilebilir.

$$W = d(V \cdot y) = -V \cdot dy \quad (6.33)$$

Eğer, akı N_A [kmol/m²·s], dz [m] yüksekliğinde diferansiyel bir hacim elemanı ve Sc [m²] kolon kesit alanı olarak ele alınacak olursa absorplanan SO₂'nin kütle transfer hızı W [kmol/s] Eş. 6.34'teki gibi ifade edilebilir.

$$W = N_A \cdot a \cdot Sc \cdot dz \quad (6.34)$$

Eş. 6.34'te yer alan akı ifadesi, mol kesri ve konsantrasyon birimlerine bağlı kütle transfer katsayıları k_y^0 ve k_c^0 cinsinden yazılacak olursa Eş. 6.35 elde edilir.

$$N_A = k_y^0(y - y_i) = k_c^0(c - c_i) = k_c^0 C(y - y_i) \quad (6.35)$$

Eş. 6.34, Eş. 6.35'te yerine konulacak olduğunda Eş. 6.36 elde edilir.

$$W = k_c^0 C(y - y_i) \cdot a \cdot Sc \cdot dz \quad (6.36)$$

Eş. 6.36 ve Eş. 6.32'de gösterilen ifadelerin birbirlerine eşitlenmesi ile dz [m] yüksekliğinde diferansiyel bir hacim elemanında gaz tarafı için kütle denkliği (Eş. 6.37) elde edilir.

$$W = k_c^0 C(y - y_i) \cdot a \cdot Sc \cdot dz = -V \cdot d_y \quad (6.37)$$

Eş. 6.37'nin düzenlenip, integrali alınırsa Eş.6.38 elde edilir.

$$\int_{z=0}^{z=z} \frac{k_c^0 a C Sc}{-V} dz = \int_{y_1}^{y_2} \frac{dy}{(y - y_i)} \quad (6.38)$$

Eş. 6.38'de yer alan kütle transfer katsayısı ve spesifik yüzey alanının çarpımı ($k_c^0 a$), denklemin sol tarafına alınıp yeniden düzenlendiğinde Eş. 6.39 elde edilir.

$$k_c^0 a = \frac{V}{Sc C z} \ln \left(\frac{y_1 - y_i}{y_2 - y_i} \right) = \frac{U_G}{z} \ln \left(\frac{y_1 - y_i}{y_2 - y_i} \right) \quad (6.39)$$

Sodyum hidroksit (NaOH) gibi alkali bir çözeltide kükürt dioksit (SO₂) absorpsiyonu ani bir kimyasal reaksiyonla sonuçlandığı için ara yüzeyde absorplanan SO₂ konsantrasyonu sıfıra

yakın ($y_i \approx 0$), yani ihmal edilebilir düzeyde olacaktır. Bu durumda, gaz tarafı bireysel fiziksel kütle transfer katsayısını veren ifade Eş. 6.40'daki gibi ifade edilebilir.

$$k_c^0 a = \frac{U_G}{Z} \ln \left(\frac{y_2}{y_1} \right) \quad (6.40)$$

Burada $k_c^0 a$, kükürt dioksitin sodyum hidroksit çözeltisi içerisindeki gaz tarafı bireysel fiziksel kütle transfer katsayısı, U_G gaz akış hızı, Z dolgu yüksekliği, y_2 ve y_1 sırasıyla kolonun girişinde ve çıkışında gaz fazdaki kükürt dioksitin mol kesirleridir.

Sıvı tarafı bireysel fiziksel kütle transfer katsayısı hesaplamalarında olduğu gibi, gaz tarafı bireysel fiziksel kütle transfer katsayısı hesaplamalarında da karbon dioksit ile yapılacak çalışmalarda kullanılması için düzeltme faktörü kullanılmıştır.

$$(k_c^0 a)_{CO_2} = (k_c^0 a)_{SO_2} \sqrt{\frac{D_{CO_2-Hava}}{D_{SO_2-Hava}}} \quad (6.41)$$

Kükürt dioksitin hava içerisindeki gaz tarafı fiziksel kütle transfer katsayısının hesaplanabilmesi için öncelikle kükürt dioksit ve karbon dioksitin hava içerisindeki difüzyon katsayılarının hesaplanması gerekmektedir.

Kükürt Dioksit ve Karbon Dioksitin Hava İçerisindeki Difüzyon Katsayısı

Kükürt dioksit ve karbon dioksitin hava içerisindeki difüzyon katsayısı Eş. 6.42'de verilen Chapman-Enskog denklemi kullanılarak hesaplanmıştır (Uysal 2003: 14).

$$D_{AB} = 1,8583 \times 10^{-27} \sqrt{\frac{T^3 \left(\frac{1}{M_A} + \frac{1}{M_B} \right)}{P_T \sigma_{AB}^2 \Omega_{D_{AB}}}} \quad (6.42)$$

Burada, D_{AB} [m^2/s] biriminden difüzyon katsayısı, T [K] biriminden sıcaklık, P [atm] biriminden basınç, σ_{AB} [m] biriminden çarpışma çapı olarak ifade edilebilir.

Eşitlik 6.42'de yer alan boyutsuz çarpışma integrali ($\Omega_{D_{AB}}$) sıcaklığın bir fonksiyonu olup, enerji parametrelerine (ε/K) dayanılarak hesaplanabilir.

Eş. 6.43'te maksimum çekme enerjisi (ε) ve Eş. 6.44'te çarpışma çapı (σ) ifadeleri verilmiştir.

$$\frac{\varepsilon_{AB}}{K} = \sqrt{\left(\frac{\varepsilon_A}{K}\right)\left(\frac{\varepsilon_B}{K}\right)} \quad (6.43)$$

$$\sigma_{AB} = \frac{1}{2}(\sigma_A + \sigma_B) \quad (6.44)$$

Kükürt dioksit, karbon dioksit ve hava için Lennard-Jones denklemindeki çarpışma çapı ve enerji parametreleri değerleri ve Lennard-Jones potansiyeline göre hesaplanan çarpışma integrali değerleri için “Kütle Transferi Esasları ve Uygulamaları” kitabından Tablo 2.3 ve Tablo 2.4'ten yararlanılmıştır (Uysal 2003: 16-18).

Gaz tarafı bireysel fiziksel kütle transfer katsayılarının belirlenmesi ile ilgili yapılan deneysel çalışma Kısım 7.3'te ve bu çalışmaya ait deneysel bulgular Kısım 8.3'te verilmiştir.

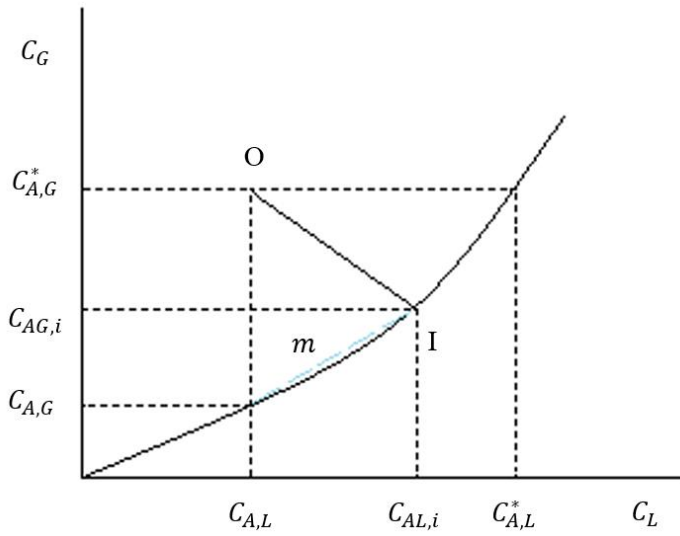
6.5. Dolgulu Kolonda Gaz Tarafı Toplu Kütle Transfer Katsayısının Su İçin Elde Edilmesi

Bireysel fiziksel sıvı ve gaz tarafı toplu kütle transfer katsayılarının belirlenmesinin ardından gaz tarafı toplu kütle transfer katsayısının hesaplamalarına geçilmiştir. Daha önce yapılan hesaplamalar, yüzey alanında durağan bir filmin varlığını kabul eden film teorisi ele alınarak incelenmiştir.

Absorpsiyon işlemi ele alınacak olduğunda, sıvı ve gaz tarafı için bireysel fiziksel kütle transfer akısı N_A [kmol/m²·s] konsantrasyon cinsinden Eş. 6.45'teki gibi yazılabilir.

$$N_A = k_L^0(C_{AL,i} - C_{A,L}) = k_c^0(C_{AG,i} - C_{A,G}^*) \quad (6.45)$$

Şekil 6.4'te kolonda akan gazın, sıvı ve gaz fazlarındaki konsantrasyonlarının değişimi yer almaktadır (Uysal, 2003: 137).



Şekil 6.4. İki direnç teorisine göre kolonda akan gazın gaz ve sıvı fazdaki konsantrasyon değişimleri ve denge eğrisi (Uysal, 2003: 137)

Şekil 6.4 incelenecek olduğunda, işletme noktası “O” ’dan çizilen yatay ve düşey doğruların denge eğrisi ile kesişmesi, sırasıyla $C_{A,G}$ kompozisyonundaki bir gaz fazı ile denge halinde olabilecek sıvının konsantrasyonunu ($C_{A,L}^*$) ve $C_{A,L}$ kompozisyonundaki bir sıvı fazı ile denge halinde olabilecek gazın konsantrasyonunu ($C_{A,G}^*$) verir (Uysal, 2003: 136). Şekil 6.4’te yer alan ordinat üzerinde gösterilen gaz konsantrasyonları dikkate alındığında Eş. 6.46 yazılabilir.

$$(C_{A,G} - C_{A,G}^*) = (C_{A,G} - C_{AG,i}) + (C_{AG,i} - C_{A,G}^*) \quad (6.46)$$

Ayrıca denge eğrisinin eğimi Eş.6.47’deki gibi yazılabilir (Uysal, 2003: 137).

$$m = \frac{\Delta C_{gaz}}{\Delta C_{sıvı}} = \frac{C_{AG,i} - C_{A,G}^*}{C_{AL,i} - C_{A,L}} \quad (6.47)$$

Eş. 6.44’den yararlanarak Eş. 6.46 yeniden düzenlendiğinde Eş. 6.48 elde edilir (Uysal, 2003: 137).

$$(C_{A,G} - C_{A,G}^*) = (C_{A,G} - C_{AG,i}) + m(C_{AL,i} - C_{A,L}) \quad (6.48)$$

Bireysel fiziksel gaz ve sıvı tarafı kütle transfer katsayıları k_L^0 ve k_c^0 ’ın tanımlarına benzer şekilde gaz tarafı bazlı toplu kütle transfer katsayısı da akı cinsinden Eş. 6.49’daki gibi yazılabilir (Uysal, 2003: 137).

$$N_A = K_c^0 (C_{A,G} - C_{A,G}^*) \quad (6.49)$$

Eş. 6.48 ve Eş. 6.49'dan yararlanılarak Eş. 6.50 elde edilir (Uysal, 2003: 138).

$$\frac{N_A}{K_c^0} = \frac{N_A}{k_c^0} + m \frac{N_A}{k_L^0} \quad (6.50)$$

Eş. 6.50'de yer alan ifadeler $(a \cdot N_A)$ 'ya bölünürse, Eş. 6.51 yazılabilir (Uysal, 2003: 138).

$$\frac{1}{(K_c^0)a} = \frac{1}{(k_c^0)a} + \frac{m}{(k_L^0)a} \quad (6.51)$$

Eş. 6.51, iki direnç teorisinin matematiksel ifadesi olarak kabul görmektedir. Bu eşitlik, ara yüzeyde denge şartlarının geçerli olduğu varsayımıyla, toplu kütle transfer direncinin, gaz fazındaki direnç ile sıvı fazındaki direncin toplamına eşit olduğunu göstermektedir (Uysal 2003: 138).

Eş. 6.51 kullanılarak gaz tarafı toplu kütle transfer katsayısının hesaplamaları yapılmıştır. Eş. 6.51'de yer alan k_L^0 ve k_c^0 'ın Kısım 7.2 ve 7.3'te anlatıldığı gibi deneysel olarak belirlenmesi ve boyutsuz çözünürlük m 'in Eş. 6.52 kullanılarak hesaplanması ile gaz tarafı toplu kütle transfer katsayısı su için elde edilmiştir (Uysal, 2016).

$$m = \frac{RT}{H_{CO_2}^{H_2O}} \quad (6.52)$$

Eş. 6.53'te yer alan karbon dioksitin su içerisindeki Henry sabiti değeri hesaplanmıştır (Versteeg ve van Swaaij, 1988).

$$H_{CO_2}^{H_2O} = 100 \exp \left(-\frac{2625}{T} + 12.2 \right) \quad (6.53)$$

Bu denklem için Henry sabiti [Pa·m³/mol], sıcaklık [K] birimindedir.

Gaz tarafı toplu kütle transfer katsayısının su için elde edilmesine ait bulgular Kısım 8.4'te verilmiştir.

6.6. Dolgulu Kolonda Gaz Tarafı Toplu Kimyasal Kütle Transfer Katsayısının Belirlenmesi

Raschig halkalı dolgulu kolonda, gaz tarafı toplu kimyasal kütle transfer katsayısının belirlenmesi için karbon dioksitin sodyum hidroksit çözeltisine ($\text{pH}_{\text{NaOH}} > 10$) absorpsiyonu yönteminden yararlanılmıştır.

Gaz tarafı toplu kimyasal kütle transfer katsayısının belirlenmesi için hesaplamalar Eş. 6.40'ta benzer şekilde yapılmış olup, kimyasal absorpsiyon sistemi için bu eşitlik tekrar düzenlenmiştir (Eş. 6.54).

$$K_c a = \frac{U_G}{Z} \ln \left(\frac{y_2}{y_1} \right) \quad (6.54)$$

Burada $K_c a$, karbon dioksitin sodyum hidroksit içerisindeki gaz tarafı toplu kimyasal kütle transfer katsayısı, U_G gaz akış hızı, Z dolgu yüksekliği, y_2 ve y_1 sırasıyla kolonun girişinde ve çıkışında gaz fazdaki karbon dioksitin mol kesirleridir.

Gaz tarafı toplu kimyasal kütle transfer katsayısı belirlenmesi ile ilgili yapılan deneysel çalışmalar Kısım 7.4'te bu çalışmaya ait deneysel bulgular ise Kısım 8.5'te verilmiştir.

6.7. Dolgulu Kolonda Gaz Tarafı Toplu Fiziksel Kütle Transfer Katsayısının Belirlenmesi

Raschig halkalı dolgulu kolonda, gaz tarafı toplu fiziksel kütle transfer katsayısının belirlenmesi için karbon dioksitin karbitol asetat çözeltisine absorpsiyonu yönteminden yararlanılmıştır.

Gaz tarafı toplu fiziksel kütle transfer katsayısının belirlenmesi için hesaplamalar Eş. 6.40'ta benzer şekilde yapılmış olup, fiziksel absorpsiyon sistemi için bu eşitlik tekrar düzenlenmiştir (Eş. 6.55).

$$K_c^0 a = \frac{U_G}{Z} \ln \left(\frac{y_2}{y_1} \right) \quad (6.55)$$

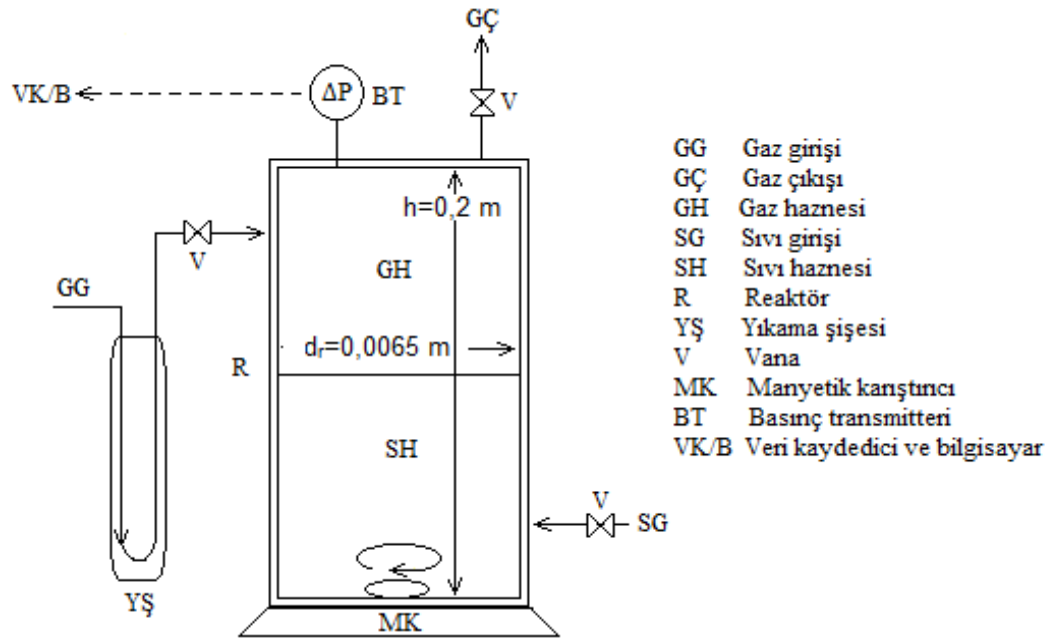
Burada $K_c^0 a$, karbon dioksitin karbitol asetat içerisindeki gaz tarafı toplu fiziksel kütle transfer katsayısı, U_G gaz akış hızı, Z dolgu yüksekliği, y_2 ve y_1 sırasıyla kolonun girişinde ve çıkışında gaz fazdaki karbon dioksitin mol kesirleridir.

Gaz tarafı toplu fiziksel kütle transfer katsayısı belirlenmesi ile ilgili yapılan deneysel çalışmalar Kısım 7.5'te bu çalışmaya ait deneysel bulgular ise Kısım 8.6'da verilmiştir.

7. DENEYSEL YÖNTEM

7.1. Karbon Dioksitin Karbitol Asetat İçerisindeki Difüzyon Katsayısının Belirlenmesinde Kullanılan Deney Sistemi

Karbon dioksitin karbitol asetat çözeltisi içerisindeki difüzyon katsayısının belirlenmesinde daha önce Kısım 6.1’de de belirtildiği gibi diyafram hücre yöntemi kullanılmıştır. Diyafram hücre sistemine ait şematik gösterim Şekil 7.1’de gösterilmiştir.



Şekil 7.1. Diyafram hücre yöntemine ait şematik gösterim (Uysal, 2016)

Diyafram hücrede, diyafram altında bulunan hazneye sıvı çözelti doldurulurken diyaframın üstünde bulunan hazneye de gaz hapsedilir. Diyafram hücreye ait olan veriler Çizelge 7.1’de verilmiştir.

Çizelge 7.1. Karbon dioksitin karbitol asetat içerisindeki difüzyon katsayısının hesaplanmasında kullanılan diyafram hücrenin özellikleri (Uysal, 2016)

Sıvı hazne, (V_L), L	0,4
Gaz hazne, (V_G), L	0,5
Diyafram çapı, m	0,065
Diyafram kesit alanı (A_d), m	0,003318

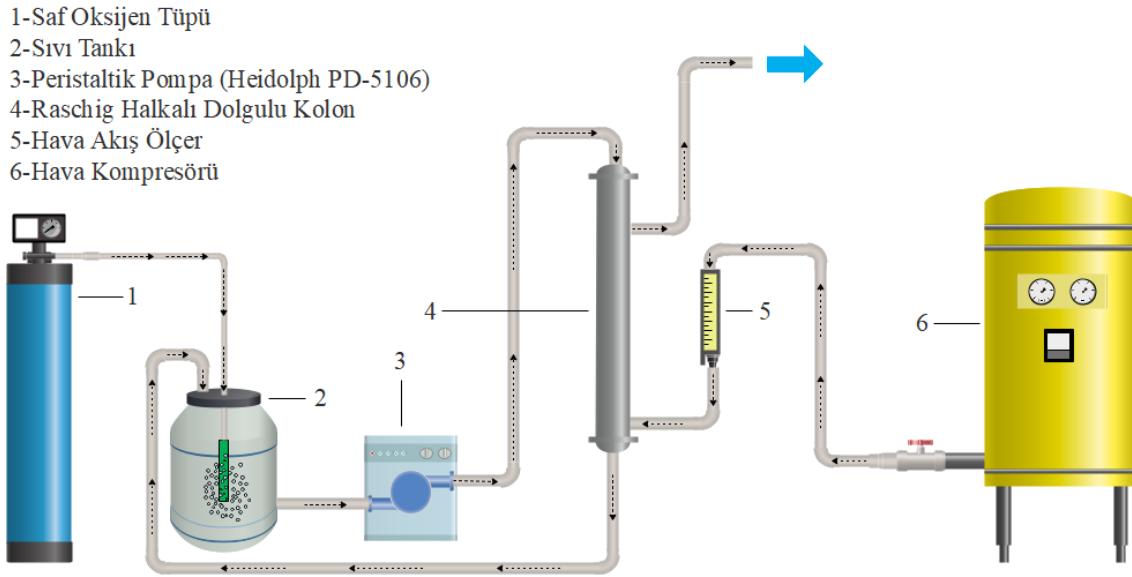
Deney düzeneğinde kullanılan diyaframın eşit bir şekilde ıslatılması önem arz etmektedir. Diyafram olarak kullanılan poröz cam, her deney öncesinde 1 gün boyunca çözelti içerisinde bırakılmış ve çözeltiye doyurulmuştur. Her deney sonrasında da diyafram, saf su ile yıkanmış ve yine 1 gün boyunca saf su içerisinde bırakılmıştır. Böylece, çözülden gelebilecek kirliliklerin gözenekleri tıkaması ve deneysel sonuçları etkilemesi engellenmiştir. Diyafram hücrede bulunan çözelti, deneyler esnasında sürekli olarak manyetik karıştırıcı ile vorteks oluşmayacak şekilde karıştırılmıştır. Bu sayede sabit ara yüzey oluşturularak homojen sıvı elde edilmesi sağlanmıştır.

Deney süresince hücre içerisindeki basınç değişimi, basınç algılayıcı ile anlık olarak kaydedilmiştir. Hücre içerisinde difüzyon sonucu meydana gelen basınç düşüşü değerleri yardımı ile karbon dioksitin karbitol asetat içerisindeki difüzyon katsayıları deneysel olarak hesaplanmıştır. Yapılan deneylerin öncesinde, çözeltiye eş zamanlı karıştırma ve 100°C sıcaklıkta ısıtma yapılarak, vakum pompası yardımıyla çözelti içerisindeki çözünmüş gazların giderimi sağlanmıştır.

Deneyler süresince sıcaklığın sabit kalması için deney sisteminin tamamı, ısıtma kalibrasyonu önceden yapılmış ve varyak sayesinde kontrolü sağlanan ısı bantları ile sarılmıştır. Bu şekilde deneyler boyunca hem sıvı haznesi hem de gaz haznesi ve borular aynı sıcaklıkta sabit tutulmuştur. Diyafram hücre yöntemi ile gerçekleştirilen deneyler 91 kPa çevre basıncında ve 20-60°C aralığında beş farklı sıcaklıkta gerçekleştirilmiştir. Tüm deneylerde sıvı olarak saf karbitol asetat, gaz olarak da saf karbon dioksit gazı kullanılmıştır. Bu deneysel yöntem ile elde edilen veriler Kısım 8.1’de verilmiştir.

7.2. Dolgulu Kolonda Sıvı Tarafı Bireysel Fiziksel Kütle Transfer Katsayılarının Belirlenmesinde Kullanılan Deney Sistemi

Raschig halkalı dolgulu kolonda, sıvı tarafı bireysel fiziksel kütle transfer katsayısını belirlemek için Kısım 6.2’de de belirtilmiş olan oksijen desorpsiyonu yöntemi kullanılmıştır. Raschig halkalı kolona ait özellikler Ek-4’te verilmiştir. Sıvı tarafı bireysel fiziksel kütle transfer katsayılarının belirlenmesi için kullanılan deney düzeneği Şekil 7.2’de gösterilmektedir.



Şekil 7.2. Sıvı tarafı bireysel fiziksel kütle transfer katsayısı belirlenmesi için kullanılan deney sisteminin şematik gösterimi

Deneyler sırasında, sıvı tankı (2) su ile doldurularak içerisinden oksijen tüpü (1) yardımı ile saf oksijen geçirilmiştir ve su oksijene doyurulmuştur. Hava kompresöründen (6) Raschig halkalı dolgulu kolona (4) hava akış ölçer (5) yardımıyla, farklı akış hızlarında hava gönderilmiştir. Ardından, oksijene doyurulmuş su, peristaltik pompa (3) yardımıyla önce azot (N_2) ile sıyrılan Raschig halkalı dolgulu kolona beslenmiştir. Burada, oksijenin desorpsiyonu gönderilen havaya gerçekleşmiştir. Kolona sıvı giriş ve çıkış bölgelerinden numuneler alınarak oksijen analizörü (YSI Model 50B Çözünmüş Oksijen Metre) ile kolonun giriş ve çıkışındaki su içerisindeki oksijen miktarları analiz edilmiştir (Resim 7.1). Ölçülen oksijen miktarlarının Eş. 6.27’de yerine yazılması ile farklı sıvı ve gaz hızlarında oksijenin sıvı tarafı bireysel fiziksel kütle transfer katsayıları elde edilmiştir.



Resim 7.1. Sıvı tarafı bireysel fiziksel kütle transfer katsayısı hesaplanmasında kullanılan oksijen analizörü

Deneyleer 11°C sıcaklığında 91 kPa çevre basıncında gerçekleştirilmiştir. Sıvı tankı içerisindeki su ve hava kolona sürekli olarak beslenmiştir. Sıvı akış hızı sabit tutularak, hava dört farklı akış hızında sisteme beslenmiştir. Bu şekilde dört farklı sıvı akış hızı için deneyler tekrarlanmış olup hem sıvı hem de gaz hızının sıvı tarafı bireysel fiziksel kütle transfer katsayısına etkisi incelenmiştir. Deneyler için belirlenen parametreler Çizelge 7.2’de verilmiştir.

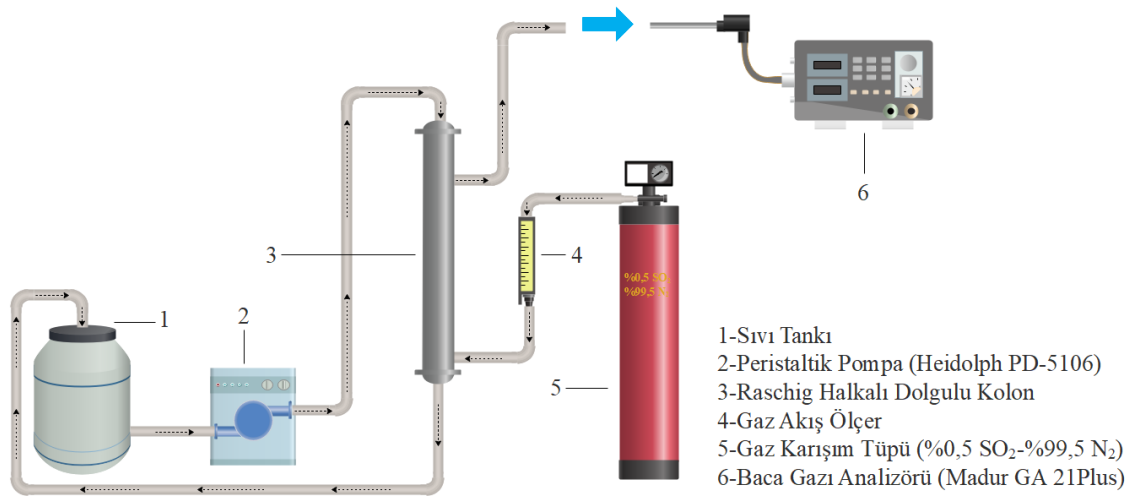
Çizelge 7.2. Sıvı tarafı bireysel fiziksel kütle transferi katsayısı belirlenmesinde kullanılan parametreler

Sıvı hızı (U_L), [m/s]	Gaz hızı (U_G), [m/s]	Sıvı hızı (U_L), [m/s]	Gaz hızı (U_G), [m/s]
0,0060	0,0070	0,0112	0,0070
	0,0105		0,0105
	0,0140		0,0140
	0,0175		0,0175
0,0084	0,0070	0,0140	0,0070
	0,0105		0,0105
	0,0140		0,0140
	0,0175		0,0175

Oksijen desorpsiyonu yöntemi ile elde edilen sıvı tarafı bireysel fiziksel kütle transferi katsayılarına ait deneysel veriler Kısım 8.2’de verilmiştir.

7.3. Dolgulu Kolonda Gaz Tarafı Bireysel Fiziksel Kütle Transfer Katsayılarının Belirlenmesinde Kullanılan Deney Sistemi

Raschig halkalı dolgulu kolonda, gaz tarafı bireysel fiziksel kütle transferi katsayısının belirlenmesi için Kısım 6.3'te belirtildiği gibi sodyum hidroksit çözeltisine ($\text{pH}_{\text{NaOH}} > 10$) kükürt dioksit (SO_2) absorpsiyonu gerçekleştirilmiştir. Gaz tarafı bireysel fiziksel kütle transferi katsayılarının belirlenmesi için kullanılan deney düzeneği Şekil 7.3'te gösterilmektedir.



Şekil 7.3. Gaz tarafı bireysel fiziksel kütle transfer katsayısı belirlenmesi için kullanılan deney sistemine ait şematik gösterim

Deneylerde, sıvı tankı (1) ara yüzeyin sıvı tarafındaki anlık reaksiyonun ve sıvı tarafındaki direncin ihmal edilebilmesi için pH'ı 10'dan yüksek yaklaşık $\text{pH} \cong 12$ olacak şekilde sodyum hidroksit çözeltisi ile doldurulmuştur (Danckwerts, 1970: 239, 243). Hacimce %0,5 SO_2 gazı içeren gaz tüpünden (5) Raschig halkalı dolgulu kolona (3) farklı akış hızlarında gaz akış ölçer (4) yardımıyla gaz beslemesi yapılmıştır. Ardından, peristaltik pompa (2) yardımıyla sıvı tankı içerisindeki sodyum hidroksit çözeltisi sisteme beslenmiş olup kükürt dioksitin sodyum hidroksit çözeltisine absorpsiyonu gerçekleşmiştir. Sistem çıkışında SO_2 miktarının tayini için Madur GA 21 Plus baca gazı analizörü kullanılmıştır (Resim 7.2). Böylece farklı gaz ve sıvı hızlarında sodyum hidroksit içerisine absorplanan kükürt dioksit konsantrasyonları belirlenmiştir. Ölçülen kükürt dioksit konsantrasyonlarının Eş. 6.40'ta yerine konulması ile kükürt dioksitin gaz tarafı bireysel fiziksel kütle transfer katsayıları hesaplanmıştır.



Resim 7.2. Gaz tarafı bireysel fiziksel kütle transferi hesaplanmasında kullanılan baca gazı analizörü

Deneyler, 14°C sıcaklığında 91 kPa çevre basıncında gerçekleştirilmiştir. Sıvı tankı içerisindeki NaOH çözeltisi ve hacimce %0,5'lik SO₂ gazı kolona sürekli olarak beslenmiştir. Burada, gaz akış hızı sabit tutularak, NaOH çözeltisi dört farklı akış hızında sisteme beslenmiştir. Sisteme giren ve sistemden çıkan gaz, baca gazı analizörü ile analiz edilerek absorplanan SO₂ belirlenmiştir. Aynı şekilde sistemin giriş ve çıkışlarından sıvı numuneler alınarak pH değişimleri pH metre ile analiz edilmiştir. Bu şekilde dört farklı gaz akış hızı için deneyler tekrarlanmış olup hem sıvı hem de gaz hızının gaz tarafı bireysel fiziksel kütle transfer katsayısına etkisi incelenmiştir. Deneyler için belirlenen parametreler Çizelge 7.3'te verilmiştir.

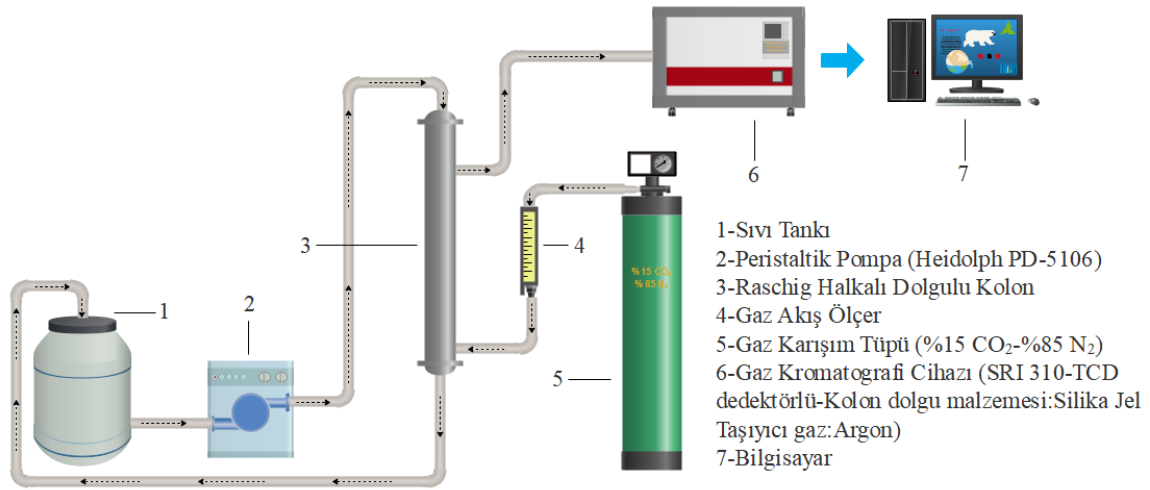
Çizelge 7.3. Gaz tarafı bireysel fiziksel kütle transferi katsayısı belirlenmesinde kullanılan parametreler

Gaz hızı (U_G), [m/s]	Sıvı hızı (U_L), [m/s]	Gaz hızı (U_G), [m/s]	Sıvı hızı (U_L), [m/s]
0,0070	0,0060	0,0140	0,0060
	0,0084		0,0084
	0,0112		0,0112
	0,0140		0,0140
0,0105	0,0060	0,0175	0,0060
	0,0084		0,0084
	0,0112		0,0112
	0,0140		0,0140

Sodyum hidroksit çözeltisine kükürt dioksit absorpsiyonu ile belirlenen gaz tarafı bireysel fiziksel kütle transferi katsayılarına ait veriler Kısım 8.3'te verilmiştir.

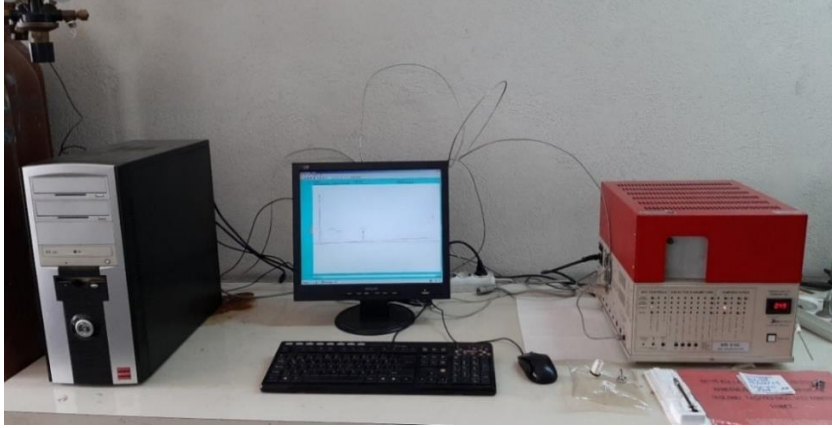
7.4. Dolgulu Kolonda Gaz Tarafı Toplu Kimyasal Kütle Transfer Katsayısının Belirlenmesinde Kullanılan Deney Sistemi

Raschig halkalı dolgulu kolonda, gaz tarafı toplu kimyasal kütle transferi katsayısının belirlenmesi için Kısım 6.5'te de belirtildiği gibi karbon dioksitin (CO_2) sodyum hidroksit çözeltisine ($\text{pH}_{\text{NaOH}} > 10$) absorpsiyonu deneyleri gerçekleştirilmiştir. Gaz tarafı toplu kimyasal kütle transfer katsayılarının belirlenmesi için kullanılan deney düzeneği Şekil 7.4'te gösterilmektedir.



Şekil 7.4. Gaz tarafı toplu kimyasal kütle transfer katsayısı belirlenmesi için kullanılan deney sistemine ait şematik gösterim

Gaz tarafı bireysel fiziksel kütle transferi belirlenmesindeki gibi, gaz tarafı toplu kimyasal kütle transfer katsayısının belirlenmesinde de NaOH çözeltisinin pH'ı 10'dan yüksek olacak şekilde ayarlanmış ve sistem giriş ve çıkışlarında kaydedilmiştir. Sıvı tankına (1) NaOH çözeltisi doldurulduktan sonra, hacimce %15 CO_2 gazı içeren gaz tüpünden (5) Raschig halkalı dolgulu kolona (3) gaz akış ölçer (4) yardımıyla farklı akış hızlarında gaz beslemesi yapılmıştır. Ardından, peristaltik pompa (2) yardımıyla sıvı tankı içerisindeki sodyum hidroksit çözeltisi sisteme beslenmiş olup karbon dioksitin sodyum hidroksit çözeltisine absorpsiyonu gerçekleşmiştir. Sistem çıkışında CO_2 miktarının tayini için SRI 310-TCD dedektörlü gaz kromatografi cihazı kullanılmıştır (Resim 7.3). Gaz kromatografi cihazının enjektör sıcaklığı 50°C ve dedektör (termal iletkenlik dedektörü) sıcaklığı 210°C 'dir. Deneyler boyunca kullanılan kolonun sıcaklık programı Ek-4'te yer almaktadır.



Resim 7.3. Gaz tarafı toplu kimyasal kütle transferi hesaplanmasında kullanılan gaz kromatografi cihazı

Deneyler, 20°C sıcaklığında 91 kPa çevre basıncında gerçekleştirilmiştir. Sıvı tankı içerisindeki NaOH çözeltisi ve %15'lik CO₂ gazı kolona sürekli olarak beslenmiştir. Burada, gaz akış hızı sabit tutularak, NaOH çözeltisi dört farklı akış hızında sisteme beslenmiştir. Sisteme giren ve sistemden çıkan gaz, gaz kromatografi cihazı ile analiz edilerek absorplanan CO₂ belirlenmiştir. Aynı şekilde sistemin giriş ve çıkışlarından sıvı numuneler alınarak pH değişimleri pH metre ile analiz edilmiştir. Bu şekilde dört farklı gaz akış hızı için deneyler tekrarlanmış olup hem sıvı hem de gaz hızının gaz tarafı toplu kimyasal kütle transfer katsayısına etkisi incelenmiştir. Deneyler için belirlenen parametreler Çizelge 7.4'te verilmiştir.

Çizelge 7.4. Gaz tarafı toplu kimyasal kütle transferi katsayısı belirlenmesinde kullanılan parametreler

Gaz hızı (U_G), [m/s]	Sıvı hızı (U_L), [m/s]	Gaz hızı (U_G), [m/s]	Sıvı hızı (U_L), [m/s]
0,0070	0,0060	0,0140	0,0060
	0,0084		0,0084
	0,0112		0,0112
	0,0140		0,0140
0,0105	0,0060	0,0175	0,0060
	0,0084		0,0084
	0,0112		0,0112
	0,0140		0,0140

Gaz tarafı toplu kimyasal kütle transferi katsayılarının belirlenmesi için yapılan deneylerden elde edilen veriler Kısım 8.5'te verilmiştir.

7.5. Dolgulu Kolonda Gaz Tarafı Toplu Fiziksel Kütle Transfer Katsayısının Belirlenmesinde Kullanılan Deney Sistemi

Raschig halkalı dolgulu kolonda, gaz tarafı toplu fiziksel kütle transferi katsayısının belirlenmesi için karbon dioksitin (CO_2) karbitol asetat çözeltisine ($\text{C}_8\text{H}_{16}\text{O}_4$) absorpsiyonu deneyleri gerçekleştirilmiştir. Gaz tarafı toplu fiziksel kütle transferi katsayısının belirlenmesi deneylerinde, gaz tarafı toplu kimyasal kütle transferi katsayısı belirlenmesinde kullanılan Şekil 7.4'te gösterilen deney sistemi kullanılmıştır.

Sıvı tankına karbitol asetat çözeltisi doldurulduktan sonra, hacimce %15 CO_2 gazı içeren CO_2 -azot gaz karışım tüpünden Raschig halkalı dolgulu kolona farklı akış hızlarında gaz beslemesi yapılmıştır. Ardından, peristaltik pompa yardımıyla sıvı tankı içerisindeki karbitol asetat çözeltisi sisteme beslenmiş olup karbon dioksitin karbitol asetat çözeltisine absorpsiyonu gerçekleşmiştir. Sistem çıkışında karbon dioksit gazı miktarının tayini için SRI 310-TCD detektörlü gaz kromatografi cihazı kullanılmıştır (Resim 7.3).

Deneyler, 20°C sıcaklığında 91 kPa çevre basıncında gerçekleştirilmiştir. Sıvı tankı içerisindeki karbitol asetat çözeltisi ve hacimce %15'lik CO_2 gazı kolona sürekli olarak beslenmiştir. Burada, gaz akış hızı sabit tutularak, karbitol asetat çözeltisi dört farklı akış hızında sisteme beslenmiştir. Sisteme giren ve sistemden çıkan gaz, gaz kromatografi cihazı ile analiz edilerek absorplanan CO_2 belirlenmiştir. Bu şekilde dört farklı gaz akış hızı için deneyler tekrarlanmış olup hem sıvı hem de gaz hızının gaz tarafı toplu fiziksel kütle transfer katsayısına etkisi incelenmiştir. Deneyler için belirlenen parametreler Çizelge 7.6'da verilmiştir.

Çizelge 7.5. Gaz tarafı toplu fiziksel kütle transferi katsayısı belirlenmesinde kullanılan parametreler

Gaz hızı (U_G), [m/s]	Sıvı hızı (U_L), [m/s]	Gaz hızı (U_G), [m/s]	Sıvı hızı (U_L), [m/s]
0,0070	0,0060	0,0140	0,0060
	0,0084		0,0084
	0,0112		0,0112
	0,0140		0,0140
0,0105	0,0060	0,0175	0,0060
	0,0084		0,0084
	0,0112		0,0112
	0,0140		0,0140

Gaz tarafı toplu fiziksel kütle transferi katsayılarının belirlenmesi için yapılan deneylerden elde edilen veriler Kısım 8.6'da verilmiştir.

7.6. Karbitol Asetatın Desorpsiyonunda Kullanılan Deney Sistemi

Karbitol asetat, rejenerasyonu kolay, kaynama noktası yüksek ve kararlı yapıda olan bir çözeltilidir. Karbitol asetatın bu özellikleri, çözeltilinin karbon dioksit absorpsiyonundan sonra tekrar kolayca kullanılabilceğini göstermektedir. Buradan yola çıkarak, Resim 7.5'teki gibi bir çözeltili desorpsiyon sistemi oluşturulmuştur.



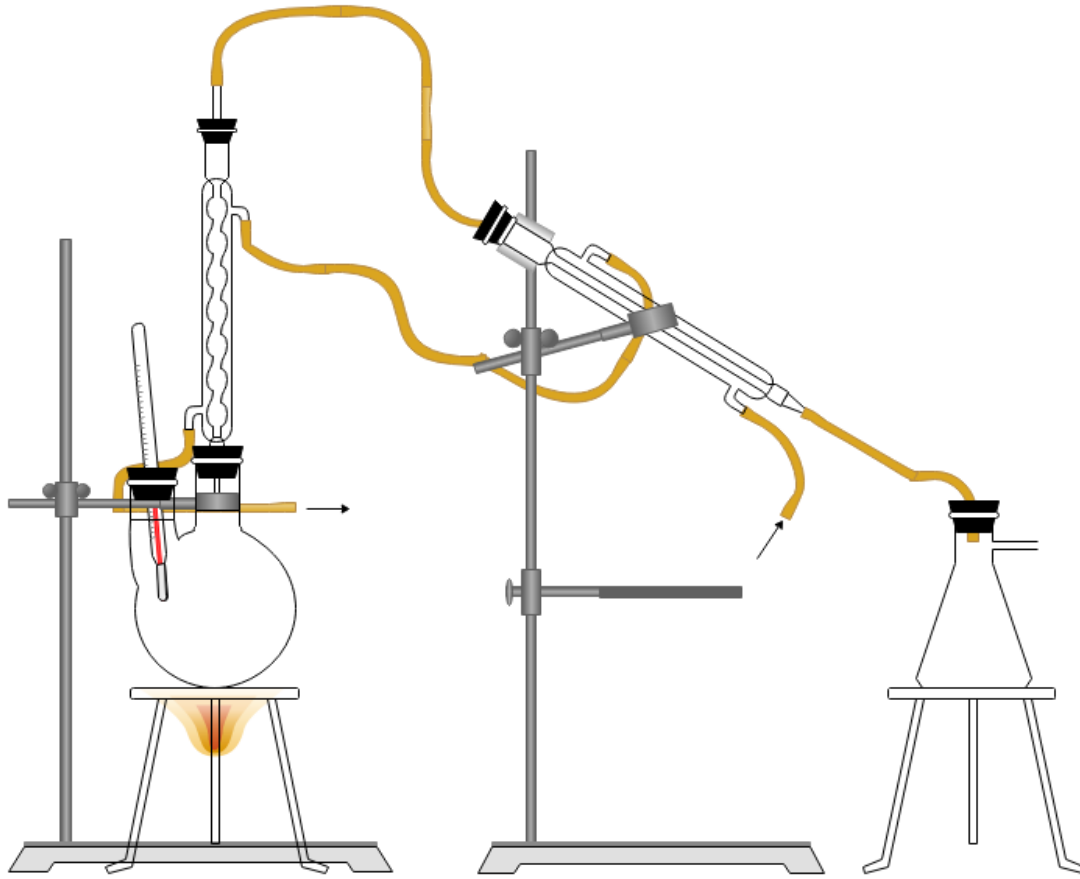
Resim 7.4. Karbitol asetatın desorpsiyonunda kullanılan deney düzeneği

Karbon dioksit absorpsiyonunun gerçekleştiği her deney sonrasında, karbitol asetat çözeltisi desorbe edilmiş ve içerisindeki karbon dioksit uzaklaştırılarak çözelti tekrar kullanılmıştır.

Desorpsiyon sisteminde çözelti, 500 mL hacminde iki girişli bir cam balon içerisine konulmuş ve bek alevi ile alttan ısıtılarak sıcaklığının artırılması sağlanmıştır. Cam balondaki iki girişin birisinden termometre yardımı ile sıcaklığın kontrollü bir şekilde artırılması sağlanmıştır. Diğer girişe ise geri soğutucu bağlanarak olası çözelti kayıplarının azaltılması sağlanmıştır. Sisteme iki geri soğutucu bağlanarak sistemde oluşabilecek herhangi bir çözelti kaybı engellenmiştir. Bu sistemden elde edilen veriler göstermektedir ki, karbon dioksit karbitol asetat çözeltisinden desorpsiyon ile kolayca uzaklaştırılabilmektedir.

Desorpsiyon işlemi sırasında, karbitol asetat çözeltisinin sıcaklığı 80-100°C aralığına kadar çıkarılmıştır. Her desorpsiyon işleminde bu sıcaklık aralığında çözelti yaklaşık yarım saat kadar bekletilmiştir ve çözelti içerisindeki karbon dioksit uzaklaştırılmıştır.

Karbitol asetatın desorpsiyonunda kullanılan deney düzeneğinin şematik gösterimi Şekil 7.5'te gösterilmektedir.



Şekil 7.5. Karbitol asetatın desorpsiyonunda kullanılan deney düzeneğinin şematik gösterimi

8. BULGULAR

8.1. Karbon Dioksitin Karbitol Asetat İçerisindeki Difüzyon Katsayısının Belirlenmesi

Karbon dioksitin karbitol asetat içerisindeki difüzyon katsayısını belirlemek için diyafram hücre sisteminden yararlanılmıştır. Bu çalışmada, karbon dioksitin karbitol asetat içerisindeki difüzyon katsayısı değerleri 20-60°C sıcaklık aralığında hesaplanmıştır. Bu yöntem ile elde edilen veriler Çizelge 8.1’de verilmiştir.

Çizelge 8.1. Karbon dioksitin karbitol asetat içerisinde deneysel olarak hesaplanan difüzyon katsayısı

Sıcaklık [°C]	Difüzyon Katsayısı-Deneysel D_{AB} [m ² /s]
20	$0,94 \times 10^{-9}$
30	$1,19 \times 10^{-9}$
40	$1,05 \times 10^{-9}$
50	$2,35 \times 10^{-9}$
60	$2,14 \times 10^{-9}$

Elde edilen deneysel verilerden hesaplanan sonuçların teorik olarak uygunluğunu incelemek için Wilke-Chang denklemi düzenlenmiş ve bu şekilde kullanılmıştır. Kısım 6.1’de de bahsedildiği gibi, literatürde yapılan araştırmalar incelendiğinde, gaz-sıvı sistemlerinde, sisteme özgün olarak Wilke-Chang denklemindeki viskozite üs değeri 1’den değişiklik gösterebilmektedir. Bu çalışmada da, literatürden elde edilen bilgiler ve deneysel sonuçlar göz önüne alınarak viskozite üs değeri 1,5 olarak belirlenmiştir. Buna göre, karbon dioksitin karbitol asetat içindeki difüzyon katsayısı için düzenlenen Wilke-Chang denklemi aşağıda verilmiştir.

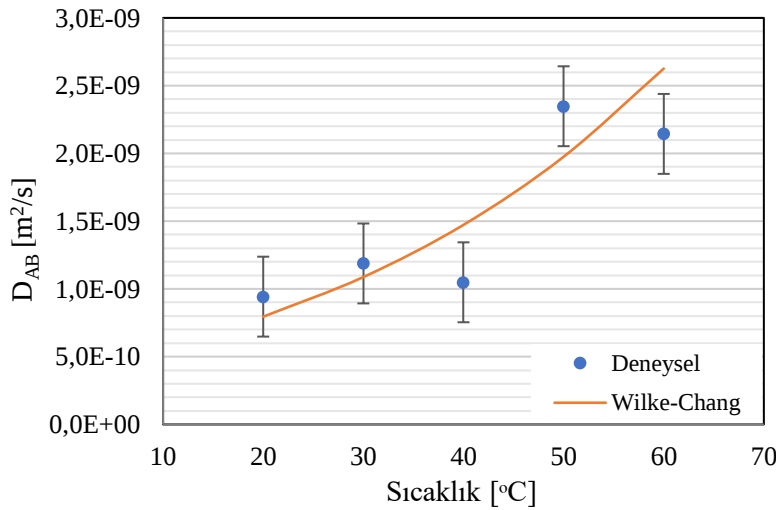
$$D_{AB} = 1.17 \times 10^{-13} \frac{\sqrt{\psi_B M_B T}}{\mu^{1.5} V_A^{0.6}} \quad (8.1)$$

Bu denklem kullanılarak beş farklı sıcaklık için difüzyon katsayıları hesaplanmıştır. Teorik olarak elde edilen veriler Çizelge 8.2’de verilmiştir.

Çizelge 8.2. Karbon dioksitin karbitol asetat içerisinde teorik olarak hesaplanan difüzyon katsayısı

Sıcaklık [°C]	Difüzyon katsayısı-Modifiye Wilke-Chang D_{AB} [m ² /s]
20	$0,79 \times 10^{-9}$
30	$1,09 \times 10^{-9}$
40	$1,47 \times 10^{-9}$
50	$1,97 \times 10^{-9}$
60	$2,62 \times 10^{-9}$

Deneyssel olarak elde edilen verilerle, modifiye Wilke-Chang denklemi ile yapılan hesaplamalar sonucunda elde edilen değerler birbirleri ile karşılaştırılmıştır (Şekil 8.1).



Şekil 8.1. Beş farklı sıcaklık için hesaplanan deneysel ve teorik difüzyon katsayıları (standart hata barlı)

Şekil 8.1 incelenecek olduğunda, modifiye Wilke-Chang denklemi ile deneysel sonuçların uyum içerisinde olduğu görülmektedir. Sıcaklığın etkisi bakımından da teorik hesaplamalarla deneysel sonuçların aynı davranışı göstermesi, diyafram hücrenin difüzyon katsayısını bulabilmek için güvenilir bir deneysel sistem olduğunu göstermektedir.

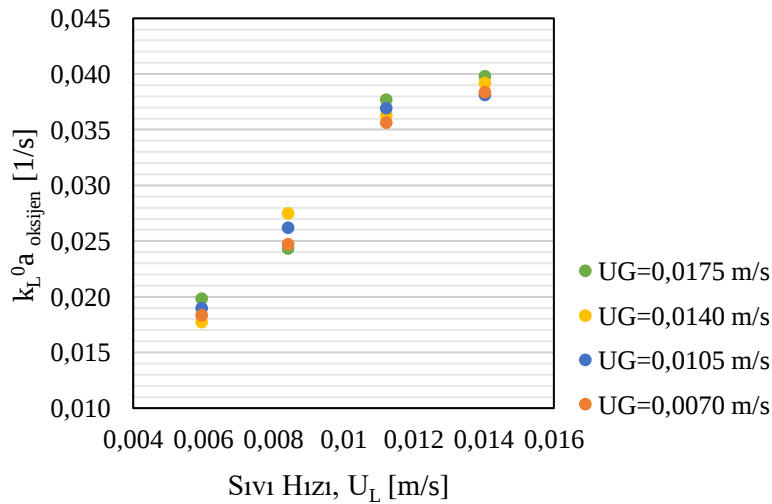
8.2. Dolgulu Kolonda Sıvı Tarafı Bireysel Fiziksel Kütle Transfer Katsayılarının Belirlenmesi

Raschig halkalı dolgulu kolonda sıvı tarafı bireysel fiziksel kütle transfer katsayısının belirlenmesi için oksijen desorpsiyonu yöntemi kullanılmıştır. Oksijen desorpsiyonu yöntemi kullanılarak, farklı sıvı ve gaz akış hızlarında deneyler gerçekleştirilmiş olup, sıvı tarafı fiziksel kütle transfer katsayıları hesaplanmıştır (Çizelge 8.3).

Hesaplanan sıvı tarafı bireysel fiziksel kütle transfer katsayıları sıvı hızına karşı grafiğe geçirilmiştir. Elde edilen grafik Şekil 8.2’de gösterilmektedir.

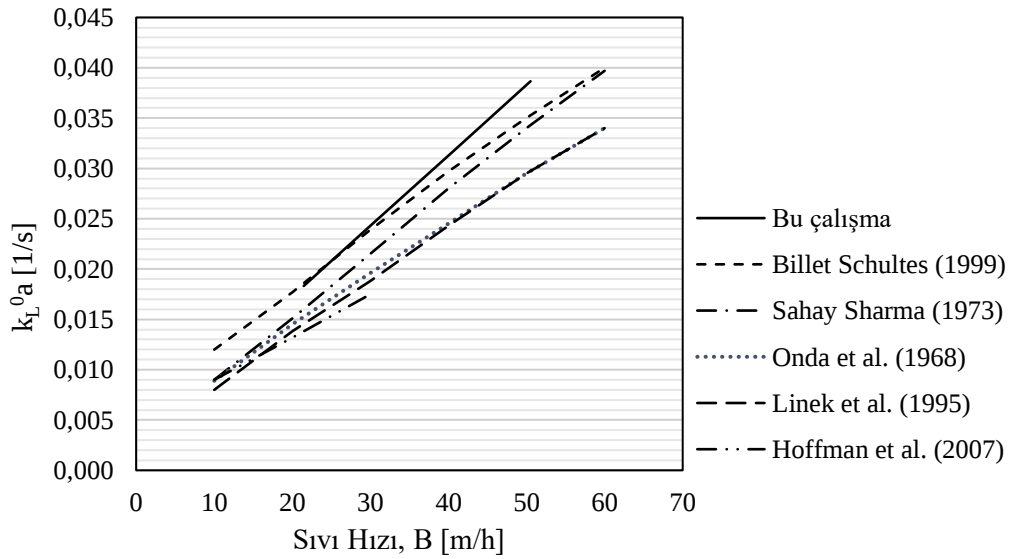
Çizelge 8.3. Sıvı tarafı bireysel fiziksel kütle transfer katsayısı deney sonuçları

Gaz hızı (U_G), [m/s]	Sıvı hızı (U_L), [m/s]	Oksijen giriş konsantrasyonu, [mg/L]	Oksijen çıkış konsantrasyonu, [mg/L]	Oksijen desorpsiyonu yöntemi ile elde edilen sıvı tarafı fiziksel kütle transfer katsayısı, $k_L^0 a$ [1/s]
0,0070	0,0060	16,41	11,91	0,0184
	0,0084	15,53	12,15	0,0247
	0,0112	16,42	12,15	0,0357
	0,0140	15,47	12,13	0,0384
0,0105	0,0060	17,34	12,14	0,0190
	0,0084	16,78	12,47	0,0262
	0,0112	16,61	12,13	0,0369
	0,0140	15,99	12,35	0,0382
0,0140	0,0060	17,65	12,45	0,0177
	0,0084	17,81	12,69	0,0275
	0,0112	17,12	12,34	0,0363
	0,0140	16,33	12,42	0,0392
0,0175	0,0060	18,33	12,33	0,0199
	0,0084	18,04	13,12	0,0244
	0,0112	17,33	12,31	0,0377
	0,0140	18,31	13,14	0,0398



Şekil 8.2. Oksijen desorpsiyonu metodu ile elde edilen sıvı tarafı bireysel fiziksel kütle transfer katsayıları

Yapılan deneysel çalışmalar sonucu elde edilen verilerin daha sonrasında literatüre uygunluğu incelenmiştir. Rejl ve arkadaşlarının 2009 yılında yaptıkları çalışma incelenerek, sıvı tarafı fiziksel kütle transfer katsayısı ($k_L^0 a$) belirlenmesinde oksijen desorpsiyonu ile çalışan farklı yazarların çalışmalarının kıyaslandığı bir grafik ile bu grafikten yola çıkılarak bu çalışmadan elde edilen verilerle literatür kıyaslaması yapılmıştır (Şekil 8.3). Şekil 8.3'te bu çalışma olarak gösterilen veriler, oksijen desorpsiyonu yöntemi ile elde edilen deneysel verilerin ortalamasının eğilim çizgisi yardımı ile hesaplanmıştır.



Şekil 8.3. Su-oksijen sistemi için elde edilen sıvı tarafı bireysel fiziksel kütle transfer katsayılarının literatür ile karşılaştırılması

Literatür ile yapılan kıyaslama değerlendirildiğinde bu çalışmadan elde edilen verilerin Billet ve Schultes (1999)'un elde etmiş olduğu verilere yakın olduğu görülmektedir.

Oksijen desorpsiyonu yöntemi ile elde edilen kütle transfer katsayılarının, karbon dioksit için sıvı tarafı bireysel fiziksel kütle transfer katsayısı hesaplanmasında kullanılması üzere, Kısım 6.2'de anlatıldığı gibi karbon dioksit ve oksijenin su içerisindeki difüzyon katsayısı değerleri hesaplanmıştır (Eş. 8.2 ve Eş. 8.3).

$$D_{CO_2-H_2O} = 1,356 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s} \quad (8.2)$$

$$D_{O_2-H_2O} = 2,310 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s} \quad (8.3)$$

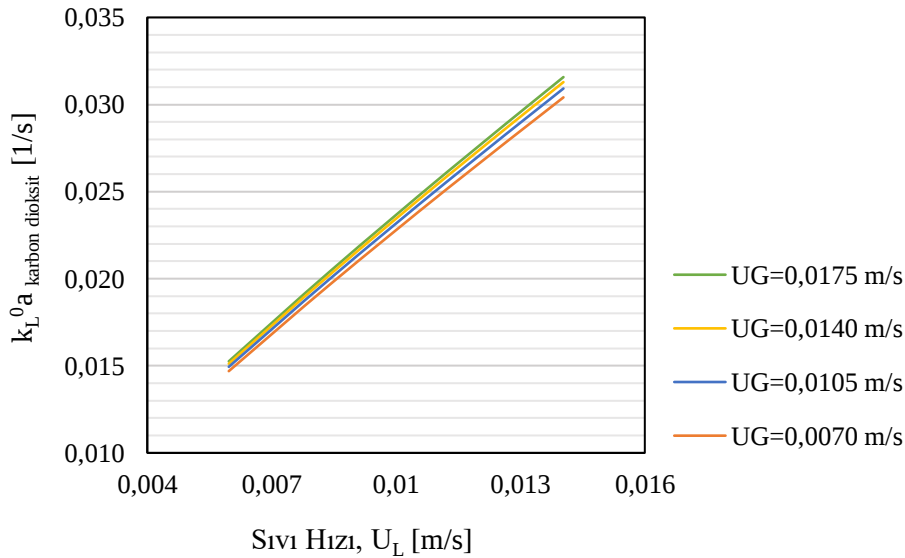
Daha sonra hesaplanan difüzyon katsayıları birbirlerine oranlanıp karekökleri alınarak düzeltme faktörü elde edilmiştir (Eş. 8.4).

$$\text{Düzeltilme Faktörü} = \sqrt{\frac{D_{CO_2-H_2O}}{D_{O_2-H_2O}}} = 0,767 \quad (8.4)$$

Elde edilen düzeltme faktörü deneysel verilere uygulanmış olup daha sonra, Raschig halkalı dolgu kolon deney düzeneği için, IBM SPSS Statistics programından yararlanılarak doğrusal olmayan regresyon yöntemi ile karbon dioksitin su içerisindeki sıvı tarafı bireysel fiziksel kütle transfer katsayısını veren korelasyon gaz ve sıvı akış hızına bağlı olarak elde edilmiştir (Eş. 8.5). Korelasyona göre regresyon katsayısının karesi 0,942 olarak hesaplanmıştır.

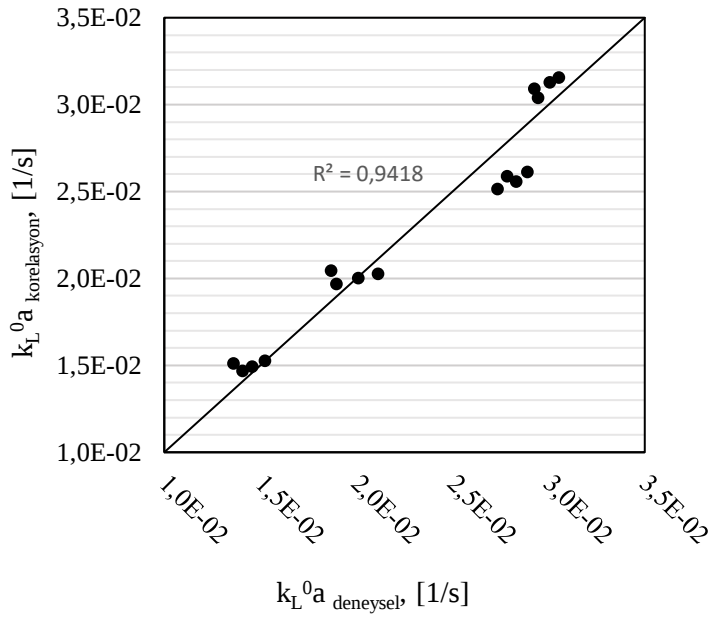
$$(k_L^0 a)_{CO_2} = 1,40 U_G^{0,041} U_L^{0,850} \quad (8.5)$$

Korelasyon ile hesaplanan bireysel fiziksel sıvı tarafı kütle transfer katsayısı, sıvı hızına karşı grafiğe geçirilmiştir (Şekil 8.4).



Şekil 8.4. Korelasyon ile elde edilen sıvı tarafı bireysel fiziksel kütle transfer katsayıları

Korelasyon ile elde edilen sıvı tarafı bireysel fiziksel kütle transfer katsayısı değerleri ile, deneysel olarak hesaplanan değerlerin birbirleri ile uygunluğu incelemek için bir karşılaştırma grafiği çizilmiştir (Şekil 8.5).



Şekil 8.5. Sıvı tarafı bireysel fiziksel kütle transfer katsayısı için elde edilen korelasyon ve deneysel değerlerin karşılaştırılması

Şekil 8.5’de verilen karşılaştırma grafiği incelendiğinde, bu sistem için elde edilen korelasyonun, hesaplanmış olan deneysel veriler ile uyumlu olduğu görülmektedir.

Oksijen desorpsiyonu metodu ile sıvı tarafı bireysel fiziksel kütle transfer katsayısı hesaplamaları literatürde mevcuttur (Charpentier, 1976; Hegely, Roesler, Alix, Rouzineau ve Meyer, 2017; Reiss, 1967; Rejl ve diğerleri, 2009). Daha önceki çalışmalarda, sıvı tarafı bireysel fiziksel kütle transferi hesaplamalarında gaz tarafı direncinin ihmal edilebileceği, özellikle endüstriyel uygulamalar için k_L ’nin U_G ’den bağımsız olduğu söylenmektedir (Charpentier, 1976; Wang, Yuan ve Yu 2005). Yöntemlerin çoğunda, kütle transferi direncinin ağırlıklı olarak sıvı direnci içinde kalması ve gaz tarafı direncinin ihmal edilebilir düzeyde olması için çok düşük çözünürlüğe sahip gaz bileşeni kullanılmaktadır. Ancak gaz tarafı direnci asla tamamen ortadan kalkmamakta, sadece çok düşük gaz çözünürlüğü bu direnci ihmal edilebilir kılmaktadır (Hegely ve diğerleri, 2017).

Bu yüksek lisans tezi çalışmasında, sıvı tarafı bireysel fiziksel kütle transferi için geliştirilen korelasyonda $k_L^0 a$ değerlerinin hem gaz hem de sıvı akış hızına bağlı olduğu görülmüştür. Literatürde, her ne kadar gaz hızının ihmal edilmiş olduğu korelasyonlar geliştirilmiş olsa da hem gaz hem de sıvı hızının sıvı tarafı bireysel fiziksel kütle transfer katsayısına etki ettiği korelasyonlar da mevcuttur (Charpentier, 1976; Hegely ve diğerleri, 2017; Reiss, 1967).

Gaz akış hızının kütle transfer katsayısına etkisi beklenen bir durumdur. Oksijen desorpsiyonu sisteminde, aynı sıvı hızında gaz hızı arttıkça, çözünen bileşenin sıvı tarafındaki ara yüzey konsantrasyonu azalır itici kuvvet artar ve kütle transfer hızı da buna bağlı olarak artar (Çelikçi, Uysal Zıraman ve Uysal, 2020).

Daha yüksek sıvı hızlarında, sıvı hızının baskın hale gelmesinden dolayı gaz hızının etkisi geri planda kalmaktadır. Bu tez çalışmasından elde edilen korelasyon incelenecek olduğunda (Eş. 8.5), sıvı ve gaz hızları arasında bir baskınlık olmadığı açıkça görülmektedir. Çizelge 8.4'te literatürdeki sıvı tarafı bireysel fiziksel kütle transfer katsayılarına ait korelasyonlar verilmiştir (Charpentier, 1976; Painmanakul, Wachirasak, Jamnongwong ve Hebrard, 2009; Rejl ve diğerleri, 2009; Wang, 2005).

Çizelge 8.4. Literatürdeki sıvı tarafı bireysel fiziksel kütle transfer katsayıları

Yazar	Korelasyon
Sherwood ve Holloway (1940)	$k_L = m \left(\frac{D_L}{a_e} \right) \left(\frac{\rho_L U_L}{\mu_L} \right)^{1-n} Sc_L^{0,5}$
Shulman ve diğerleri (1955)	$k_L = 25,1 \frac{D_L}{d_p} \left(\frac{d_p \rho_L U_L}{\mu_L} \right)^{0,45} Sc_L^{0,5}$
Reiss (1967)	$k_L a = 0,03 E_L^{0,5}; E_L = \left[\frac{\Delta P}{\Delta L} \right]_{LG} V_L$
Akita ve Yoshida (1973)	$k_L a = d_c^{0,17} U_G^{0,7}$
Ufford ve Perona (1973)	$k_L a = 13,5 U_L U_G^{0,75}$
Sahay ve Sharma (1973)	$\frac{k_L a}{D} = 120 \left(\frac{L}{\mu_L} \right)^{0,75} \left(\frac{\mu_L}{\rho_L D} \right)^{0,5}$
Deckwer, Burckart ve Zoll (1974)	$k_L a = 0,0269 U_G^{0,82}$
Cho ve Wakao (1988)	$k_L a = 6,5 * 10^{-5} D_L^{0,5} U_G^{0,81}$
Rejl ve diğerleri (2009)	$k_L a = 5 * 10^{-5} B^{0,628} (a_t)^{-0,253}$

Çizelge 8.4 değerlendirildiğinde ve literatürde elde edilmiş olan korelasyonlar incelendiğinde, sıvı tarafı bireysel fiziksel kütle transfer katsayılarının hem sıvı hızına hem de gaz hızına bağlı olduğu korelasyonlar olduğu gibi sadece sıvı hızına ya da sadece gaz hızına bağlı korelasyonların da olduğu görülmektedir. Bu sonucun oluşmasının sebebi her sistemin kendine özgü özelliklerinin olmasından kaynaklanmaktadır.

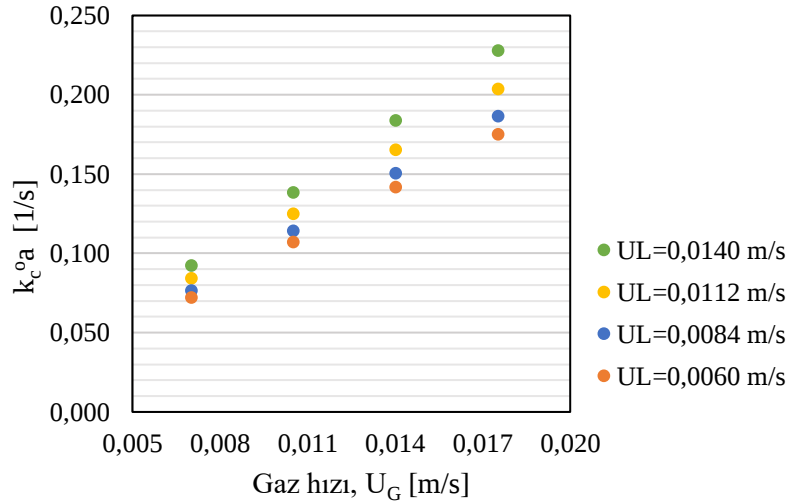
8.3. Dolgulu Kolonda Gaz Tarafı Bireysel Fiziksel Kütle Transfer Katsayılarının Belirlenmesi

Raschig halkalı dolgulu kolonda gaz tarafı fiziksel kütle transfer katsayısı belirlenmesi için sodyum hidroksit çözeltisinde ($\text{pH} > 10$) kükürt dioksit absorpsiyonu yöntemi kullanılmıştır. Sodyum hidroksit çözeltisine kükürt dioksit absorpsiyonu yöntemi kullanılarak farklı sıvı ve gaz akış hızlarında deneyler gerçekleştirilmiş olup gaz tarafı fiziksel kütle transfer katsayıları hesaplanmıştır (Çizelge 8.5).

Çizelge 8.5. Gaz tarafı bireysel fiziksel kütle transfer katsayıları deney sonuçları

Gaz hızı (U_G), [m/s]	Sıvı hızı (U_L), [m/s]	SO ₂ , ppm	Kükürt dioksitin sodyum hidroksit çözeltisine absorpsiyonu ile elde edilen gaz tarafı fiziksel kütle transfer katsayısı, $k_c \cdot a$ [1/s]
0,0070	0,0060	152	0,0721
	0,0084	122	0,0766
	0,0112	84	0,0843
	0,0140	57	0,0923
0,0105	0,0060	156	0,1073
	0,0084	125	0,1142
	0,0112	88	0,1250
	0,0140	57	0,1385
0,0140	0,0060	161	0,1418
	0,0084	130	0,1506
	0,0112	91	0,1653
	0,0140	58	0,1839
0,0175	0,0060	168	0,1750
	0,0084	134	0,1867
	0,0112	96	0,2039
	0,0140	60	0,2281
*SO ₂ başlangıç konsantrasyonu = 5000 ppm			

Deney sonucunda elde edilen gaz tarafı bireysel fiziksel kütle transfer katsayıları gaz hızına karşı grafiğe geçirilmiştir (Şekil 8.6).



Şekil 8.6. Kükürt dioksitin sodyum hidroksit çözeltisine absorpsiyonu metodu ile elde edilen gaz tarafı bireysel fiziksel kütle transfer katsayıları

Deneyler boyunca sodyum hidroksit çözeltisinin pH değerleri 10'dan yüksek olacak şekilde yaklaşık 12 civarında tutulmuştur. Danckwerts, alkali çözeltiler ile gerçekleştirdiği önceki çalışmalarında gaz ve sıvı ara yüzeyindeki sıvı tarafı direncinin ihmal edilebilmesi için çözeltinin pH değerlerinin 10'un üzerinde tutulmasını önermiştir (Danckwerts, 1970: 239, 243). Sodyum hidroksit çözeltisinin pH değişimi deney boyunca kaydedilmiştir (Çizelge 8.6).

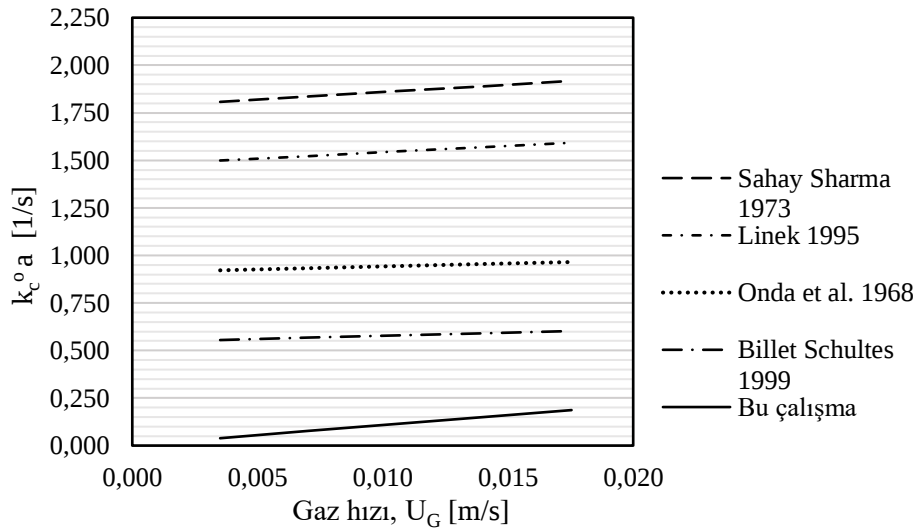
Çizelge 8.6. Kükürt dioksit gazının sodyum hidroksit çözeltisine absorpsiyonu deneylerinde sistem girişi ve çıkışındaki sodyum hidroksit pH değişimleri

Sıvı hızı, [m/s]	Gaz hızı 0,0035 [m/s]	
	Sistem girişindeki pH	Sistem çıkışındaki pH
0,0060	12,15 ^a	11,93
0,0084	11,98	11,82
0,0112	11,79	11,67
0,0140	11,58	11,45
	11,38 ^b	
Sıvı hızı, [m/s]	Gaz hızı 0,0070 [m/s]	
	Sistem girişindeki pH	Sistem çıkışındaki pH
0,0060	12,71 ^a	12,65
0,0084	12,62	12,55
0,0112	12,52	12,44
0,0140	12,37	12,18
	12,04 ^b	
a: Tank içerisindeki başlangıç pH değerleri		
b: Deney sonunda tank içerisindeki pH değeri		

Çizelge 8.6 (devam). Kükürt dioksit gazının sodyum hidroksit çözeltisine absorpsiyonu deneylerinde sistem girişi ve çıkışındaki sodyum hidroksit pH değişimleri

Sıvı hızı, [m/s]	Gaz akış hızı 0,0105 [m/s]	
	Sistem girişindeki pH	Sistem çıkışındaki pH
0,0060	11,65 ^a	11,52
0,0084	1,47	11,33
0,0112	11,31	11,19
0,0140	11,29	11,15
	10,96 ^b	
Sıvı hızı, [m/s]	Gaz akış hızı 0,0140 [m/s]	
	Sistem girişindeki pH	Sistem çıkışındaki pH
0,0060	12,23 ^a	12,19
0,0084	12,21	12,14
0,0112	12,09	11,96
0,0140	11,84	11,73
	11,69 ^b	
Sıvı hızı, [m/s]	Gaz akış hızı 0,0175 [m/s]	
	Sistem girişindeki pH	Sistem çıkışındaki pH
0,0060	12,84 ^a	12,82
0,0084	12,80	12,77
0,0112	12,76	12,63
0,0140	12,52	12,33
	12,25 ^b	
a: Tank içerisindeki başlangıç pH değerleri		
b: Deney sonunda tank içerisindeki pH değeri		

DeneySEL çalışmalar sonucunda elde edilen veriler daha sonrasında literatür ile karşılaştırılmıştır. Rejl ve arkadaşlarının 2009 yılında yaptıkları çalışmada, gaz tarafı bireysel fiziksel kütle transfer katsayısı ($k_c^0 a$) belirlenmesinde sodyum hidroksit çözeltisi içerisinde kükürt dioksit absorpsiyonu yöntemi ile çalışan farklı yazarların çalışmalarının kıyaslandığı hazırlanmış bir grafik ile bu grafikten yola çıkılarak bu çalışmadan elde edilen verilerle literatür kıyaslaması yapılmıştır (Şekil 8.7). Şekil 8.7’de bu çalışma olarak gösterilen veriler, sodyum hidroksit çözeltisine kükürt dioksit absorpsiyonu yöntemi ile hesaplanan deneySEL verilerin, B=30 m/h olan sıvı hızına ait verilerden oluşturulmuştur.



Şekil 8.7. Sodyum hidroksit çözeltisi içerisinde kükürt dioksit absorpsiyonu sistemi için elde edilen gaz tarafı bireysel fiziksel kütle transfer katsayılarının literatür ile karşılaştırılması (B=30 m/h)

Şekil 8.7 incelenecek olduğunda, bu çalışmadan elde edilen gaz tarafı bireysel fiziksel kütle transfer katsayısı değerleri Billet ve Schultes (1999)'un değerlerine en yakındır. Şekil 8.7'de gösterilen grafik değerlendirildiğinde literatürdeki çalışmalar arasında da önemli farklar olduğu görülmektedir. Bunun sebebi sıvı tarafı bireysel fiziksel kütle transferi katsayılarında olduğu gibi her sistemin kendine özgü özelliklerinin olmasından kaynaklanmaktadır.

Sodyum hidroksit çözeltisinde (pH>10) kükürt dioksit absorpsiyonu yöntemi ile elde edilen kütle transfer katsayılarının, karbon dioksit için gaz tarafı bireysel fiziksel kütle transfer katsayısı hesaplanmasında kullanılması üzere, Kısım 6.3'te anlatıldığı gibi karbon dioksit ve kükürt dioksitin hava içerisindeki difüzyon katsayısı değerleri hesaplanmıştır (Eşitlik 8.6 ve Eşitlik 8.7).

$$D_{CO_2-Hava} = 1,44 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s} \quad (8.6)$$

$$D_{SO_2-Hava} = 1,178 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s} \quad (8.7)$$

Daha sonra hesaplanan difüzyon katsayıları birbirlerine oranlanıp karekökleri alınarak düzeltme faktörü elde edilmiştir (Eşitlik 8.8).

$$\text{Düzeltilme Faktörü} = \sqrt{\frac{D_{CO_2-Hava}}{D_{SO_2-Hava}}} = 1,107 \quad (8.8)$$

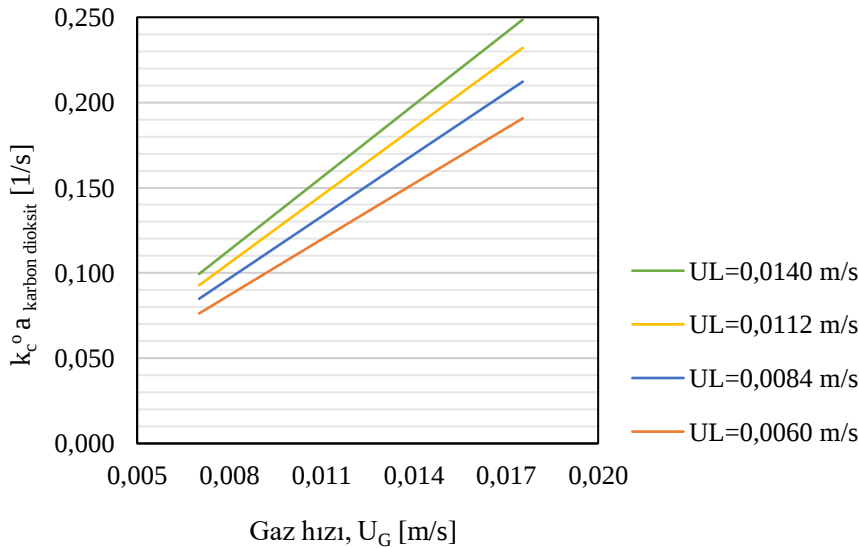
Elde edilen düzeltme faktörü deneysel verilere uygulanmış olup daha sonra, Raschig halkalı dolgu kolon deney düzeneği için, karbon dioksitin sodyum hidroksit çözeltisi içerisindeki gaz tarafı bireysel fiziksel kütle transfer katsayısını veren korelasyon IBM SPSS Statistics programından yararlanılarak doğrusal olmayan regresyon yöntemi ile elde edilmiştir (Eş. 8.9). Korelasyona göre regresyon katsayısının karesi 0,996'dır.

$$(k_c^0 a)_{CO_2} = 46,979 U_G^{0,971} U_L^{0,309} \quad (8.9)$$

Elde edilen korelasyonda U_G üssünün 1'e yakın olmasından dolayı U_G üssü kullanılan IBM SPSS Statistics programında 1'e yakınsanarak korelasyon tekrar oluşturulmuştur (Eş. 8.10). Korelasyona göre regresyon katsayısının karesi 0,995'dir. Her iki korelasyon için regresyon katsayılarının karesi birbirleri ile kıyaslandığında aradaki farkın çok küçük olduğu görülmektedir.

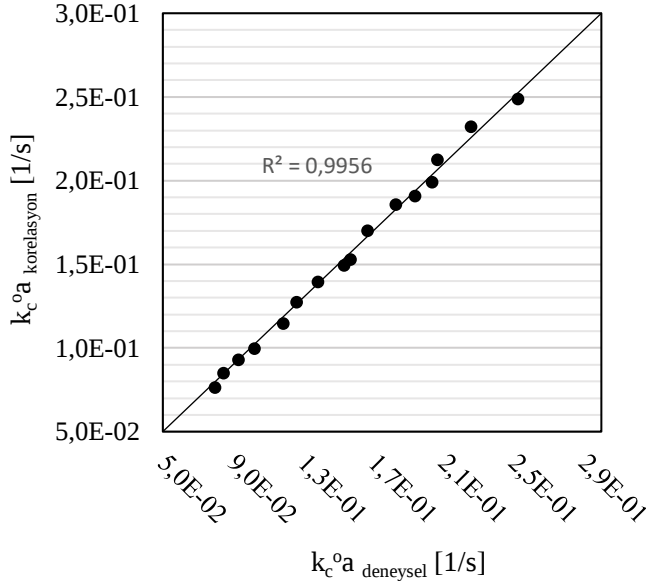
$$(k_c^0 a)_{CO_2} = 53,176 U_G U_L^{0,310} \quad (8.10)$$

Elde edilen korelasyon kullanılarak gaz tarafı bireysel fiziksel kütle transfer katsayısı karbon dioksit için hesaplanmış olup gaz hızına karşı grafiğe geçirilmiştir (Şekil 8.8).



Şekil 8.8. Korelasyon ile elde edilen gaz tarafı bireysel fiziksel kütle transfer katsayıları

Gaz tarafı bireysel fiziksel kütle transfer katsayısını belirlemek için korelasyon kullanılarak hesaplanan değerlerle, deneysel olarak elde edilen değerlerin birbirleri ile uygunluğu incelenmiştir (Şekil 8.9).



Şekil 8.9. Gaz tarafı bireysel fiziksel kütle transfer katsayısı için elde edilen korelasyon ve deneysel değerlerin karşılaştırılması

Şekil 8.9’da verilen karşılaştırma grafiği incelendiğinde, korelasyondan elde edilen veriler ile deneysel olarak hesaplanmış olan verilerin uyum içinde olduğu görülmektedir.

8.4. Dolgulu Kolonda Gaz Tarafı Toplu Kütle Transfer Katsayısının Su İçin Elde Edilmesi

Raschig halkalı dolgulu kolonda, bireysel fiziksel sıvı ve gaz tarafı kütle transfer katsayılarının belirlenmesinin ardından gaz tarafı bazlı toplu kütle transfer katsayısı hesaplamaları yapılmıştır.

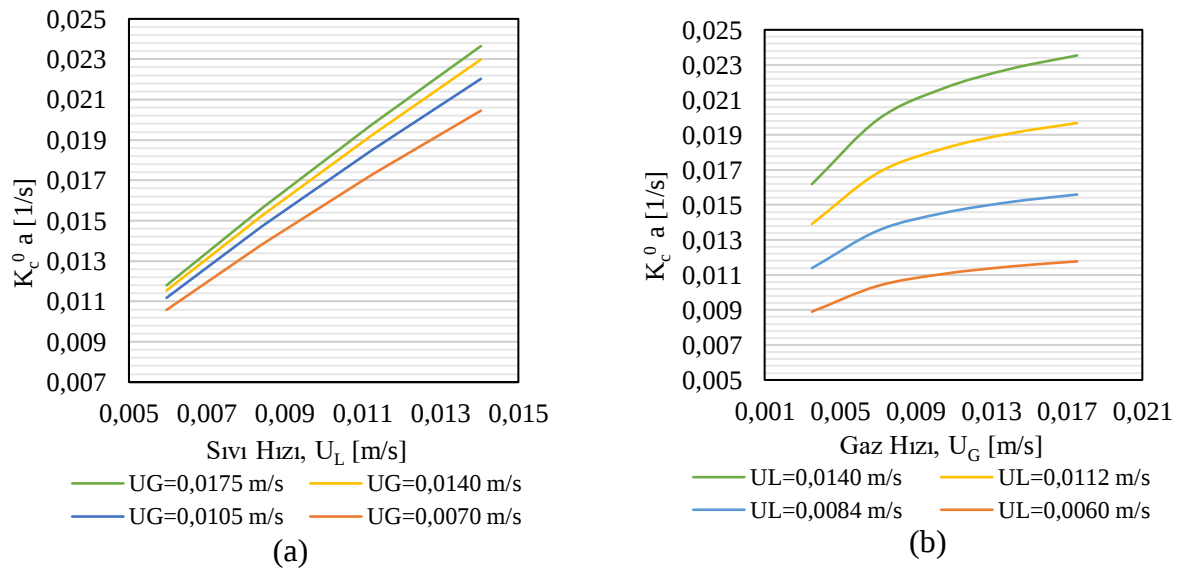
İki direnç teorisine göre, gaz tarafı bazlı toplu kütle transfer katsayısının hesaplanması için deneylerin yapıldığı 11°C sıcaklık şartlarında karbon dioksitin su içerisindeki Henry sabiti değeri, 1933,5 [Pa·m³/mol], boyutsuz çözünürlük değeri ise 1,222 olarak hesaplanmıştır.

Gaz ve sıvı tarafı bireysel fiziksel kütle transfer katsayıları için geliştirilen korelasyonlar ve su için hesaplanan boyutsuz çözünürlüğün farklı gaz ve sıvı akış hızlarında iki direnç teorisine göre gaz tarafı bazlı toplu kütle transfer katsayısı su için elde edilmiştir (Çizelge 8.7).

Çizelge 8.7. İki direnç teorisine göre farklı gaz ve sıvı akış hızlarında karbon dioksitin su içerisindeki gaz tarafı bazlı toplu kütle transfer katsayısı değerleri

Gaz ve sıvı akış hızları		Bireysel fiziksel kütle transfer katsayıları		İki direnç teorisine göre CO ₂ 'nin su içerisindeki gaz tarafı bazlı toplu kütle transfer katsayısı
Gaz hızı (U _G), [m/s]	Sıvı hızı (U _L), [m/s]	k _c ⁰ a, CO ₂ [1/s]	k _L ⁰ a, CO ₂ [1/s]	K _c ⁰ a, CO ₂ [1/s]
0,0070	0,0060	0,0881	0,0147	0,0106
	0,0084	0,0980	0,0197	0,0138
	0,0112	0,1072	0,0252	0,0173
	0,0140	0,1148	0,0304	0,0205
0,0105	0,0060	0,1306	0,0149	0,0112
	0,0084	0,1453	0,0200	0,0147
	0,0112	0,1589	0,0256	0,0185
	0,0140	0,1702	0,0309	0,0220
0,0140	0,0060	0,1727	0,0151	0,0115
	0,0084	0,1921	0,0203	0,0153
	0,0112	0,2101	0,0259	0,0192
	0,0140	0,2251	0,0313	0,0230
0,0175	0,0060	0,2144	0,0153	0,0118
	0,0084	0,2386	0,0205	0,0156
	0,0112	0,2609	0,0261	0,0198
	0,0140	0,2796	0,0316	0,0237

Hesaplanmış olan karbon dioksitin su içerisindeki gaz tarafı bazlı toplu kütle transfer katsayısı değerleri sıvı ve gaz hızlarına karşı grafiğe geçirilmiştir (Şekil 8.10).



Şekil 8.10. Farklı gaz ve sıvı akış hızlarında, karbon dioksitin su içerisindeki gaz tarafı bazlı toplu kütle transfer katsayısı değerleri

Şekil 8.10'daki grafik (a) incelendiğinde, gaz hızı arttıkça her bir gaz hızı için elde edilen eğriler arasındaki aralığın azaldığı görülmektedir. Buna göre, daha yüksek gaz hızlarına ulaşıldığında (endüstriyel işletmelerdeki ekipmanlarda ulaşılan hızlar gibi), aradaki farkın gittikçe küçülerek neredeyse sıfıra yaklaşacağı söylenebilir.

Gaz ve sıvı tarafı dirençlerinin karşılaştırmasının yapılması ile kütle transferi mekanizmasının hangi taraf kontrollü olduğu belirlenebilmektedir. Eş. 6.51 ile belirtilen “ $\frac{1}{k_c^0 a}$ ” terimi, gaz tarafı direncini ifade ederken “ $\frac{m}{k_L^0 a}$ ” terimi ise sıvı tarafı direncini ifade etmektedir. Buna göre, bu sistem için gaz ve sıvı tarafı dirençlerinin karşılaştırması yapılmıştır (Çizelge 8.8).

Çizelge 8.8. Sıvı ve gaz dirençlerinin karşılaştırması

Gaz hızı (U_G), [m/s]	Sıvı hızı (U_L), [m/s]	$1/k_c^0 a$	$m/k_L^0 a$
0,0070	0,0060	11,35	83,16
	0,0084	10,20	62,03
	0,0112	9,33	48,58
	0,0140	8,71	40,18
0,0105	0,0060	7,66	81,79
	0,0084	6,88	61,01
	0,0112	6,29	47,78
	0,0140	5,87	39,52
0,0140	0,0060	5,79	80,83
	0,0084	5,20	60,30
	0,0112	4,76	47,22
	0,0140	4,44	39,06
0,0175	0,0060	4,66	80,10
	0,0084	4,19	59,75
	0,0112	3,83	46,79
	0,0140	3,58	38,70

Genellikle sıvı tarafı ve gaz tarafı direnci karşılaştırıldığında, gaz tarafı direncinin ihmal edilebilecek kadar küçük olduğu bu nedenle de $\frac{1}{(K_c^0 a)} \cong \frac{m}{(k_L^0 a)}$ varsayımı yapılır (Hegely ve diğerleri, 2017; Uysal, 2003: 139). Burada gaz ve sıvı tarafı dirençlerine bakıldığında, sıvı tarafı direncinin gaz tarafı direncine göre daha yüksek olduğu görülebilir.

Düşük gaz hızlarında sıvı tarafı direncinin gaz tarafı direncinden yaklaşık olarak 7 kat daha büyük olmasının yanında, gaz hızı yükseldikçe bu oranın yaklaşık 10 kata kadar arttığı görülmektedir. Buna göre, sıvı tarafı direncinin gaz tarafı direncine göre daha baskın olduğu söylenebilir.

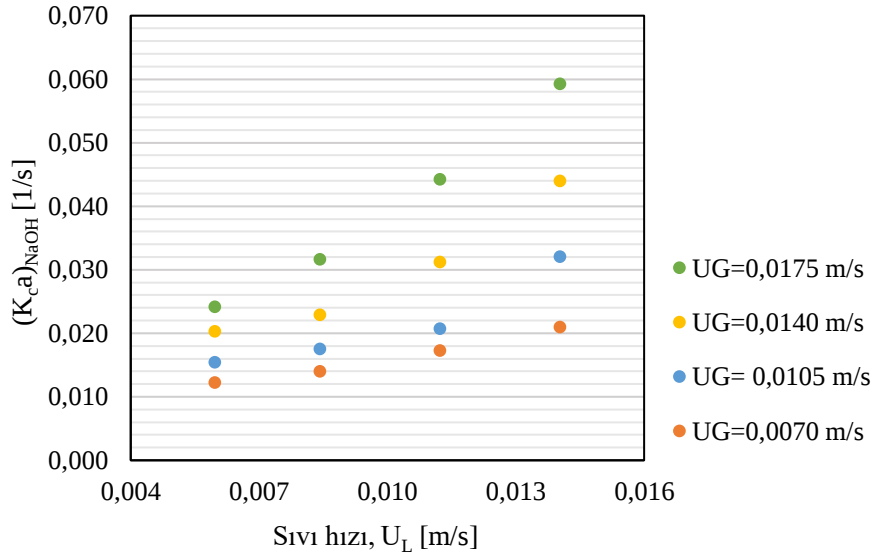
8.5. Dolgulu Kolonda Gaz Tarafı Toplu Kimyasal Kütle Transfer Katsayısının Belirlenmesi

Raschig halkalı dolgulu kolonda, gaz tarafı toplu kimyasal kütle transfer katsayısının belirlenmesi için karbon dioksitin sodyum hidroksit çözeltisine absorpsiyonu deneyleri yapılmıştır. Farklı gaz ve sıvı hızlarında gaz tarafı toplu kimyasal kütle transfer katsayısı değerleri sodyum hidroksit çözeltisi için elde edilmiştir (Çizelge 8.9).

Çizelge 8.9. Farklı gaz ve sıvı akış hızlarında karbon dioksitin sodyum hidroksit çözeltisi içerisindeki gaz tarafı bazlı toplu kimyasal kütle transfer katsayısı ve karbon dioksit gaz konsantrasyonlarının değişimi

Gaz hızı (U_G), [m/s]	Sıvı hızı (U_L), [m/s]	CO ₂ , %	Karbon dioksitin sodyum hidroksit çözeltisine absorpsiyonu ile elde edilen gaz tarafı bazlı toplu kimyasal kütle transfer katsayısı, K _{ca} deneysel, [1/s]
0,0070	0,0060	8,39	0,0123
	0,0084	7,71	0,0140
	0,0112	6,88	0,0173
	0,0140	5,49	0,0210
0,0105	0,0060	9,23	0,0154
	0,0084	8,63	0,0175
	0,0112	7,77	0,0208
	0,0140	5,40	0,0321
0,0140	0,0060	9,28	0,0204
	0,0084	8,73	0,0229
	0,0112	7,13	0,0312
	0,0140	5,23	0,0440
0,0175	0,0060	9,50	0,0242
	0,0084	8,23	0,0317
	0,0112	6,44	0,0443
	0,0140	4,82	0,0593
*CO ₂ başlangıç konsantrasyonu =%15,2			

Karbon dioksitin sodyum hidroksit çözeltisine absorpsiyonu ile hesaplanmış olan gaz tarafı toplu kimyasal kütle transferi katsayıları, sıvı hızına karşı grafiğe geçirilmiştir (Şekil 8.11).



Şekil 8.11. Karbon dioksitin sodyum hidroksit çözeltisi içerisindeki gaz tarafı toplu kimyasal kütle transfer katsayıları

Deneyler boyunca sodyum hidroksitin pH değişimi yine 10'dan büyük olacak şekilde ayarlanmış ve sistem giriş ve çıkışlarında kaydedilmiştir (Çizelge 8.10).

Çizelge 8.10. Karbon dioksitin sodyum hidroksit çözeltisine absorpsiyonu deneylerinde sistem girişi ve çıkışındaki sodyum hidroksit pH değerleri

Sıvı hızı, [m/s]	Gaz hızı 0,0035 [m/s]	
	Sistem girişindeki pH	Sistem çıkışındaki pH
0,0060	11,19 ^a	10,28
0,0084	11,08	10,26
0,0112	10,78	10,10
0,0140	10,47	10,04
	10,23 ^b	
Sıvı hızı, [m/s]	Gaz hızı 0,0070 [m/s]	
	Sistem girişindeki pH	Sistem çıkışındaki pH
0,0060	11,28 ^a	10,17
0,0084	11,05	10,14
0,0112	10,72	10,09
0,0140	10,46	10,02
	10,25 ^b	
a: Tank içerisindeki başlangıç pH değerleri		
b: Deney sonunda tank içerisindeki pH değeri		

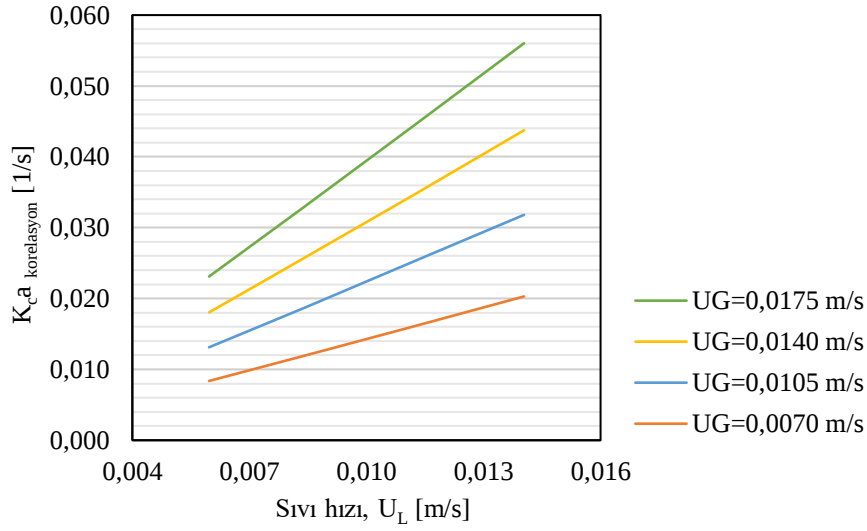
Çizelge 8.10 (devam). Karbon dioksitin sodyum hidroksit çözeltisine absorpsiyonu deneylerinde sistem girişi ve çıkışındaki sodyum hidroksit pH değişimleri

Sıvı hızı, [m/s]	Gaz akış hızı 0,0105 [m/s]	
	Sistem girişindeki pH	Sistem çıkışındaki pH
0,0060	11,81 ^a	10,76
0,0084	11,26	10,63
0,0112	11,19	10,58
0,0140	11,07	10,24
	10,76 ^b	
Sıvı hızı, [m/s]	Gaz akış hızı 0,0140 [m/s]	
	Sistem girişindeki pH	Sistem çıkışındaki pH
0,0060	11,35 ^a	11,00
0,0084	11,31	10,96
0,0112	11,26	10,61
0,0140	11,19	10,29
	10,68 ^b	
Sıvı hızı, [m/s]	Gaz akış hızı 0,0175 [m/s]	
	Sistem girişindeki pH	Sistem çıkışındaki pH
0,0060	11,31 ^a	10,26
0,0084	10,82	10,18
0,0112	10,67	10,07
0,0140	10,48	10,02
	10,31 ^b	
a: Tank içerisindeki başlangıç pH değerleri		
b: Deney sonunda tank içerisindeki pH değeri		

Gaz tarafı toplu kimyasal kütle transfer katsayısını veren korelasyon, deneysel veriler kullanılarak ve IBM SPSS Statistics programından yararlanılarak doğrusal olmayan regresyon yöntemi ile elde edilmiştir (Eş. 8.11). Denklemin regresyon katsayısının karesi 0,965 olarak hesaplanmıştır.

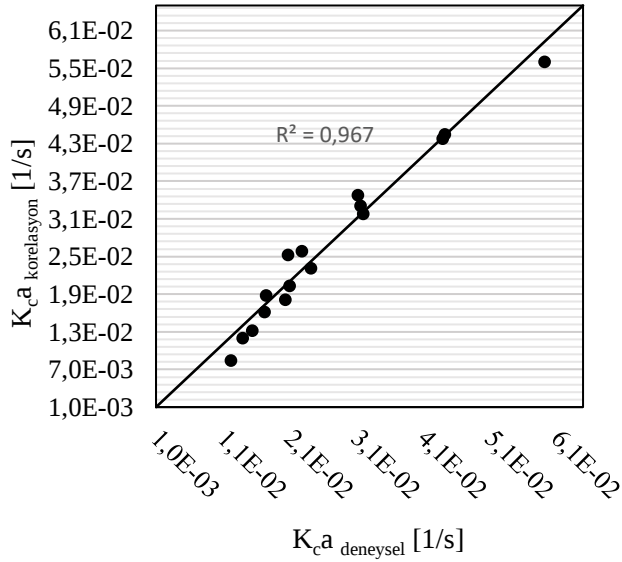
$$K_c a = 408,622 U_G^{1,108} U_L^{1,035} \quad (8.11)$$

Elde edilen korelasyon kullanılarak gaz tarafı bazlı toplu kimyasal kütle transfer katsayıları hesaplanmış olup, sıvı hızına karşı grafiğe geçirilmiştir (Şekil 8.12).



Şekil 8.12. Karbon dioksitin sodyum hidroksit çözeltisi içerisindeki korelasyon ile elde edilen gaz tarafı bazlı toplu kimyasal kütle transfer katsayıları

Gaz tarafı toplu kimyasal kütle transfer katsayısını belirlemek için deneysel verilerle korelasyon ile elde edilen verilerin birbirleri ile uyumu incelenmiştir (Şekil 8.13).



Şekil 8.13. Deneysel veriler ile korelasyondan elde edilen verilerin birbiri ile karşılaştırılması

Şekil 8.13'teki karşılaştırma grafiği incelendiğinde, korelasyon ile elde edilen verilerin deneysel olarak hesaplanmış olan değerlerle uyum içinde olduğu görülmektedir.

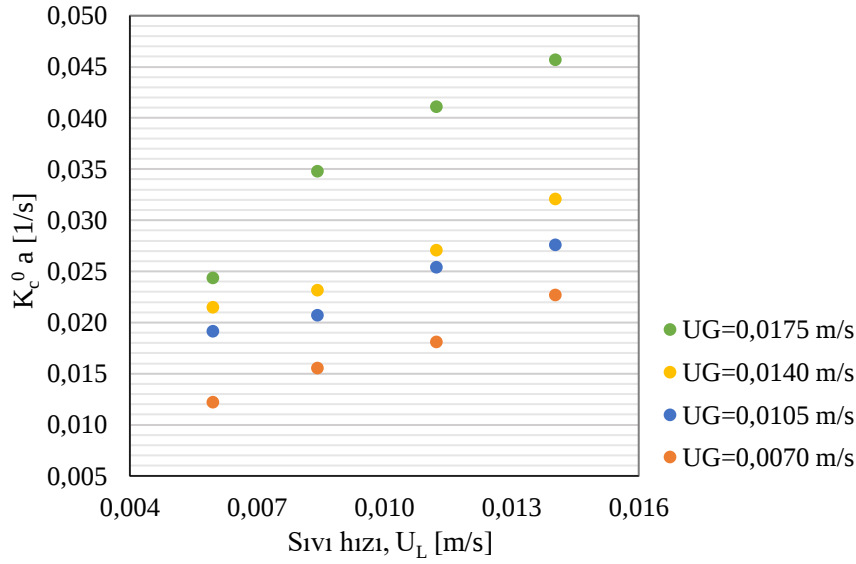
8.6. Dolgulu Kolonda Gaz Tarafı Toplu Fiziksel Kütle Transfer Katsayısının Belirlenmesi

Raschig halkalı dolgulu kolonda, karbon dioksitin karbitol asetat çözeltisine absorpsiyonu deneyleri yapılmış olup, gaz tarafı bazlı toplu kimyasal kütle transfer katsayısı değerleri karbitol asetat çözeltisi için elde edilmiştir (Çizelge 8.11).

Çizelge 8.11. Farklı gaz ve sıvı akış hızlarında karbon dioksitin karbitol asetat çözeltisi içerisindeki gaz tarafı bazlı toplu fiziksel kütle transfer katsayısı ve karbon dioksit gaz konsantrasyonlarının değişimi

Gaz hızı (U_G), [m/s]	Sıvı hızı (U_L), [m/s]	CO ₂ , %	Karbon dioksitin karbitol asetat çözeltisine absorpsiyonu ile elde edilen gaz tarafı bazlı toplu fiziksel kütle transfer katsayısı, (Kc^0)a deneysel, [1/s]
0,0070	0,0060	8,42	0,0122
	0,0084	7,16	0,0155
	0,0112	6,32	0,0181
	0,0140	5,06	0,0227
0,0105	0,0060	8,18	0,0192
	0,0084	7,77	0,0207
	0,0112	6,68	0,0254
	0,0140	6,23	0,0276
0,0140	0,0060	9,03	0,0215
	0,0084	8,67	0,0232
	0,0112	7,89	0,0271
	0,0140	6,98	0,0321
0,0175	0,0060	9,48	0,0244
	0,0084	7,74	0,0348
	0,0112	6,85	0,0411
	0,0140	6,27	0,0457
*CO ₂ başlangıç konsantrasyonu =%15,2			

Hesaplanmış olan karbon dioksitin karbitol asetat çözeltisi içerisindeki gaz tarafı bazlı toplu fiziksel kütle transfer katsayısı değerleri sıvı akış hızlarına karşı farklı gaz akış hızı değerleri için grafiğe geçirilmiştir (Şekil 8.14).

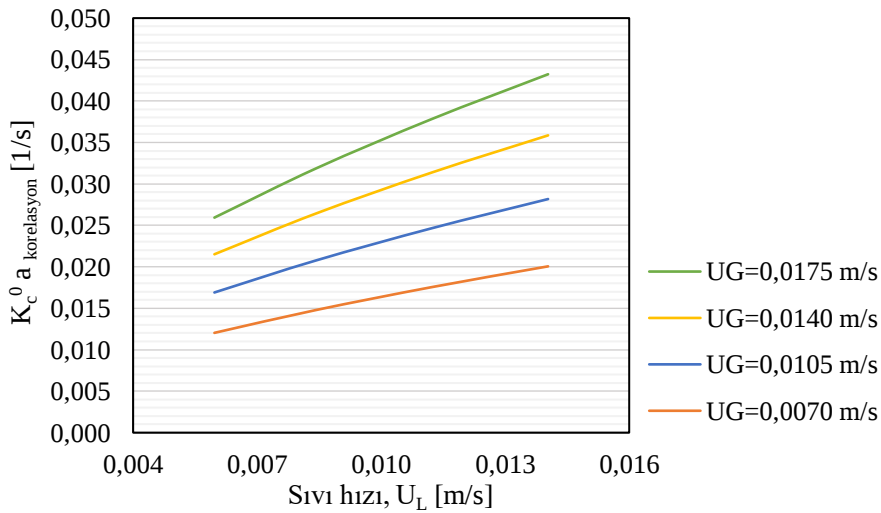


Şekil 8.14. Karbon dioksitin karbitol asetat çözeltisi içerisindeki gaz tarafı bazlı toplu kimyasal kütle transfer katsayıları

Gaz tarafı bazlı toplu fiziksel kütle transfer katsayısını veren korelasyon deneysel veriler kullanılarak ve IBM SPSS Statistics programı yardımıyla doğrusal olmayan regresyon yöntemi ile elde edilmiştir (Eş. 8.12). Denklemin regresyon katsayısının karesi 0,930 olarak hesaplanmıştır.

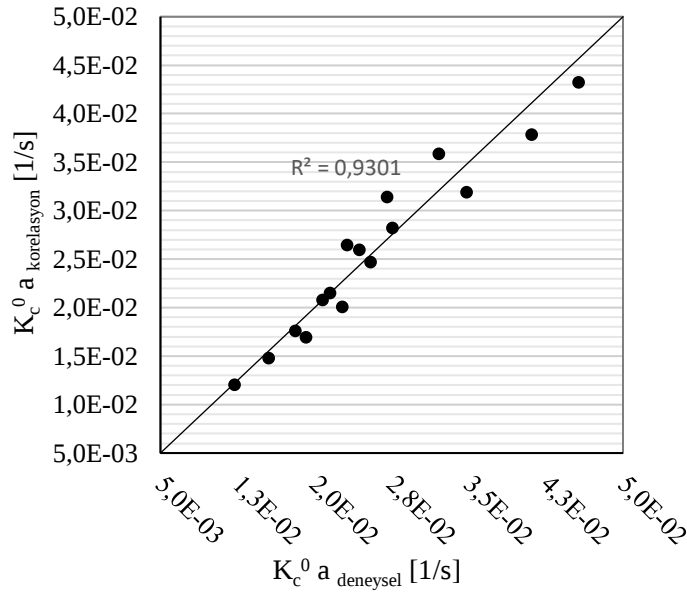
$$K_c^0 a = 16,372 U_G^{0,838} U_L^{0,597} \quad (8.12)$$

Elde edilen korelasyon kullanılarak gaz tarafı bazlı toplu kimyasal kütle transfer katsayıları sıvı hızına karşı grafiğe geçirilmiştir (8.15).



Şekil 8.15. Korelasyon ile elde edilen gaz tarafı bazlı toplu fiziksel kütle transfer katsayıları

Gaz tarafı fiziksel kütle transfer katsayısını belirlemek için deneysel olarak elde edilen verilerle korelasyon kullanılarak hesaplanan verilerin birbirleri ile uyumu incelenmiştir (Şekil 8.16).



Şekil 8.16. Korelasyon ile hesaplanan verilerle deneysel olarak elde edilen verilerin karşılaştırılması

Şekil 8.16’da gösterilmiş olan kıyaslama grafiği incelendiğinde, korelasyondan elde edilen verilerin deneysel olarak hesaplanmış olan verilerle uyum içerisinde olduğu görülmektedir.

8.7. Karbitol Asetat Çözeltisinin Sodyum Hidroksit Çözeltisi ile Karşılaştırılması

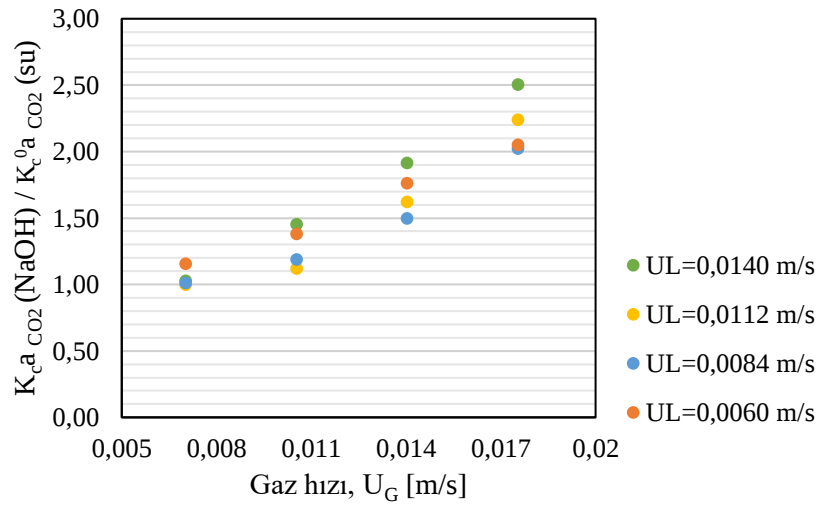
Gaz tarafı toplu kimyasal kütle transferi katsayılarının hesaplanmasında kullanılan sodyum hidroksit çözeltisi ile gaz tarafı toplu fiziksel kütle transferi hesaplanmasında kullanılan karbitol asetat çözeltisinin birbirleri ile karşılaştırılması yapılmıştır. Buna göre, her iki çözelti için hesaplanan gaz tarafı toplu kütle transfer katsayıları, referans olarak alınan su için hesaplanmış olan gaz tarafı toplu kütle transfer katsayılarına oranlanmıştır.

Sodyum hidroksit çözeltisi kullanılarak elde edilen gaz tarafı toplu kimyasal kütle transfer katsayılarının referans su için hesaplanan gaz tarafı toplu kütle transfer katsayılarına oranı hesaplanmış olup Çizelge 8.12’de gösterilmektedir.

Çizelge 8.12. Sodyum hidroksit çözeltisi ile hesaplanan gaz tarafı toplu kimyasal kütle transfer katsayılarının su için hesaplanan gaz tarafı toplu kütle transfer katsayılarına oranı

Sıvı hızı (U_L), [m/s]	Gaz hızı (U_G), [m/s]	$K_c^0 a \text{ CO}_2$ [1/s] (su için elde edilen)	CO_2 'nin NaOH çözeltisine absorpsiyonu ile elde edilen gaz tarafı toplu kimyasal kütle transfer katsayısı, K_{ca} , [1/s]	$K_{ca} \text{ CO}_2 (\text{NaOH}) / K_c^0 a \text{ CO}_2 (\text{su})$
0,0060	0,0070	0,0106	0,0123	1,16
	0,0105	0,0112	0,0154	1,38
	0,0140	0,0115	0,0204	1,76
	0,0175	0,0118	0,0242	2,05
0,0084	0,0070	0,0138	0,0140	1,01
	0,0105	0,0147	0,0175	1,19
	0,0140	0,0153	0,0229	1,50
	0,0175	0,0156	0,0317	2,02
0,0112	0,0070	0,0173	0,0173	1,00
	0,0105	0,0185	0,0208	1,12
	0,0140	0,0192	0,0312	1,62
	0,0175	0,0198	0,0443	2,24
0,0140	0,0070	0,0205	0,0210	1,03
	0,0105	0,0220	0,0321	1,46
	0,0140	0,0230	0,0440	1,91
	0,0175	0,0237	0,0593	2,51

Sodyum hidroksit çözeltisi kullanılarak elde edilen gaz tarafı toplu kimyasal kütle transfer katsayılarının referans su için hesaplanan gaz tarafı toplu kütle transfer katsayılarına oranı hesaplanarak elde edilen sonuçlar gaz hızlarına karşı grafiğe geçirilmiştir (Şekil 8.17).



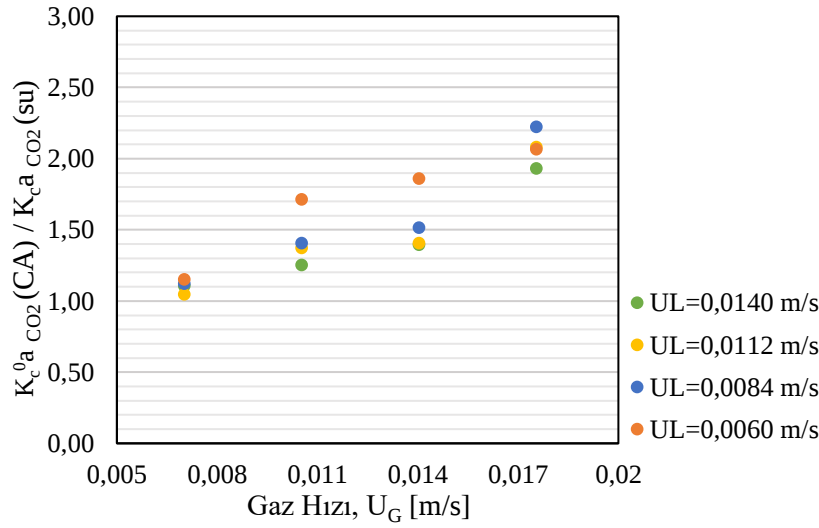
Şekil 8.17. Sodyum hidroksit çözeltisi ile elde edilen gaz tarafı toplu kimyasal kütle transfer katsayılarının referans su ile elde edilen gaz tarafı toplu kütle transfer katsayılarına oranı

Karbitol asetat çözeltisi ile hesaplanan gaz tarafı toplu fiziksel kütle transfer katsayılarının su için hesaplanan gaz tarafı toplu kütle transfer katsayılarına oranı Çizelge 8.13'te gösterilmektedir.

Çizelge 8.13. Karbitol asetat çözeltisi ile hesaplanan gaz tarafı toplu fiziksel kütle transfer katsayılarının su için hesaplanan gaz tarafı toplu kütle transfer katsayılarına oranı

Sıvı hızı (U_L), [m/s]	Gaz hızı (U_G), [m/s]	$K_c^0 a \text{ CO}_2$ [1/s] (su için elde edilen)	Karbon dioksitin karbitol asetat (CA) çözeltisine absorpsiyonu ile elde edilen gaz tarafı bazlı toplu fiziksel kütle transfer katsayısı, $K_c^0 a$, [1/s]	$K_c^0 a \text{ CO}_2 \text{ (CA)} / K_c^0 a \text{ CO}_2 \text{ (su)}$
0,0060	0,0070	0,0106	0,0122	1,15
	0,0105	0,0112	0,0192	1,72
	0,0140	0,0115	0,0215	1,86
	0,0175	0,0118	0,0244	2,07
0,0084	0,0070	0,0138	0,0155	1,12
	0,0105	0,0147	0,0207	1,41
	0,0140	0,0153	0,0232	1,52
	0,0175	0,0156	0,0348	2,22
0,0112	0,0070	0,0173	0,0181	1,05
	0,0105	0,0185	0,0254	1,38
	0,0140	0,0192	0,0271	1,41
	0,0175	0,0198	0,0411	2,08
0,0140	0,0070	0,0205	0,0227	1,11
	0,0105	0,0220	0,0276	1,25
	0,0140	0,0230	0,0321	1,40
	0,0175	0,0237	0,0457	1,93

Karbitol asetat çözeltisi kullanılarak elde edilen gaz tarafı toplu fiziksel kütle transfer katsayılarının referans su için hesaplanan gaz tarafı toplu kütle transfer katsayılarına oranı hesaplamalarından elde edilen veriler gaz hızına karşı grafiğe geçirilmiştir (Şekil 8.18).



Şekil 8.18. Karbitol asetat çözeltisi ile elde edilen gaz tarafı toplu fiziksel kütle transfer katsayılarının referans su ile elde edilen gaz tarafı toplu kütle transfer katsayılarına oranı

Gaz tarafı toplu kimyasal ve fiziksel kütle transfer katsayılarının, su için elde edilen gaz tarafı toplu kütle transfer katsayıları ile oranlarına bakılacak olursa, oranların birbirlerine çok yakın olduğu görülmektedir. Çalışılan gaz hızı aralığında, gaz tarafı toplu kimyasal kütle transfer katsayılarının referans su için hesaplanan gaz tarafı toplu kütle transfer katsayılarından 1 ila 2,5 kat daha fazla olduğu görülmektedir. Aynı şekilde, çalışılan gaz hızı aralığında, gaz tarafı bazlı toplu fiziksel kütle transfer katsayılarının referans su için hesaplanan gaz tarafı bazlı toplu kütle transfer katsayılarından 1 ila 2,3 kat daha fazla olduğu görülmektedir. Bu karşılaştırma, karbon dioksit absorpsiyonunda, fiziksel bir absorbent olan karbitol asetat çözeltisinin neredeyse kimyasal bir absorbent olan sodyum hidroksit çözeltisi kadar etkili bir çözelti olduğunu göstermektedir.

9. SONUÇLAR

- Bu yüksek lisans tezinde karbitol asetat içerisinde karbon dioksit absorpsiyonu çalışılmıştır.
- Karbon dioksitin, karbitol asetat çözeltisi içerisinde fiziksel absorpsiyon ile tutulabildiği yapılan çalışmalar ile gösterilmiştir.
- Karbon dioksitin karbitol asetat içerisindeki difüzyon katsayısı değerleri hem teorik hem de deneysel olarak 5 farklı sıcaklık için elde edilmiştir. Yapılan çalışma değerlendirildiğinde teorik ve deneysel sonuçların birbiri ile uyum içinde olduğu gösterilmiştir.
- Sıcaklığın etkisi göz önünde bulundurularak, teorik ve deneysel sonuçların birbirleri ile uyum içinde olması, deney sırasında kullanılan diyafram hücre sisteminin difüzyon katsayısı hesaplamalarında güvenilir bir deneysel sistem olduğu gösterilmiştir.
- Kütle transferi çalışmalarına geçilirken ilk olarak kullanılan Raschig halkalı dolgulu kolonun karakterizasyonunun yapılabilmesi için gaz ve sıvı tarafı bireysel fiziksel kütle transfer katsayıları elde edilmiştir.
- Sıvı tarafı bireysel fiziksel kütle transfer katsayısı, oksijen desorpsiyon yöntemi ile hesaplanmıştır. Literatür çalışmalarıyla yapılan karşılaştırma sonucunda elde edilen deneysel verilerin uygun çalışma aralığında olduğu gösterilmiştir. Literatürde genel olarak oksijen desorpsiyonu ile yapılan deneyler sonucunda gaz hızının sıvı tarafı bireysel fiziksel kütle transfer katsayısına etkisinin çok az olduğu dolayısıyla ihmal edilebileceği gösterilmektedir. Fakat bu çalışmayla elde edilen sonuçlar göstermektedir ki, bireysel fiziksel kütle transferi katsayısına sıvı hızının olduğu kadar gaz hızının da etkisi vardır. Bu sonuçlar göz önünde bulundurularak, bireysel fiziksel kütle transferi katsayısı için çalışma aralığına uygun olarak bir korelasyon geliştirilmiştir.
- Gaz tarafı bireysel fiziksel kütle transfer katsayısı, sodyum hidroksit çözeltisine ($\text{pH}_{\text{NaOH}} > 10$) kükürt dioksit absorpsiyonuyla hesaplanmıştır. Burada Danckwerts'in önerisine bağlı kalınarak, deneyler boyunca sodyum hidroksit çözeltisinin pH'ı hep

10'un üzerinde kalacak şekilde deneyler gerçekleştirilmiştir. Bunun kontrolünün sağlanması için deneyler boyunca sıvı tankı giriş ve çıkışlarından numune alınarak pH metre ile ölçüm yapılmıştır. Sıvı tarafı bireysel fiziksel kütle transferi katsayısı hesaplamalarında olduğu gibi gaz tarafı bireysel fiziksel kütle transfer katsayısı için de korelasyon geliştirilmiştir.

- Kütle transfer katsayılarında kimyasal ve fiziksel absorpsiyon yöntemlerinin bir karşılaştırılmasının yapılabilmesi için gaz tarafı toplu kütle transfer katsayısı için yapılan deneyler, hem kimyasal absorpsiyona uygun olan sodyum hidroksit çözeltisi ile hem de fiziksel absorpsiyona uygun olan karbitol asetat çözeltisi ile gerçekleştirilmiştir.
- Gaz tarafı toplu kimyasal kütle transfer katsayısı, sodyum hidroksit çözeltisine ($\text{pH}_{\text{NaOH}} > 10$) karbon dioksit absorpsiyonuyla hesaplanmıştır. Yine gaz tarafı bireysel fiziksel kütle transfer katsayısı hesaplamalarında olduğu gibi sodyum hidroksit çözeltisinin pH'ı 10'dan yüksek olacak şekilde ayarlanmıştır ve deneyler boyunca da pH metre ile kontrolü sağlanmıştır. Elde edilen deneysel sonuçlar kullanılarak gaz tarafı toplu kimyasal kütle transfer katsayısı için bir korelasyon geliştirilmiştir.
- Gaz tarafı toplu fiziksel kütle transfer katsayısı, karbitol asetat çözeltisine karbon dioksit absorpsiyonuyla hesaplanmıştır. Elde edilen deneysel sonuçlar yardımıyla gaz tarafı toplu fiziksel kütle transfer katsayısı için bir korelasyon geliştirilmiştir.
- Gaz tarafı toplu kimyasal ve fiziksel kütle transfer katsayıları, su için elde edilen gaz tarafı toplu kütle transfer katsayıları ile oranlanarak birbirleri ile karşılaştırılmıştır. Çalışılan gaz hızı aralığında, gaz tarafı toplu kimyasal kütle transfer katsayılarının referans su için hesaplanan gaz tarafı toplu kütle transfer katsayılarından 1 ila 2,5 kat daha fazla olduğu görülmüştür. Aynı şekilde, çalışılan gaz hızı aralığında, gaz tarafı bazlı toplu fiziksel kütle transfer katsayılarının referans su için hesaplanan gaz tarafı bazlı toplu kütle transfer katsayılarından 1 ila 2,3 kat daha fazla olduğu görülmüştür. Yapılan bu karşılaştırmanın sonucu göstermektedir ki, fiziksel bir absorbent olan karbitol asetat çözeltisi, kimyasal bir absorbent olan sodyum hidroksit çözeltisi kadar karbon dioksit absorplayabilmektedir. Bu da fiziksel absorbentler arasında karbitol asetatın önemli bir çözelti olduğunu göstermektedir.

- Karbitol asetat çözeltisinin basit bir desorpsiyon sistemi ile desorbe edilerek çok fazla enerji harcanmadan tekrar deneylerde rahatlıkla kullanılabilirdiği deneysel olarak gösterilmiştir.
- Bu çalışmada karbitol asetat karbon dioksit absorpsiyonunda kullanılmıştır. Literatürdeki çalışmalar göz önünde bulundurulduğunda, karbon dioksitin karbitol asetat içerisindeki difüzyon katsayısı hesaplamaları ve karbon dioksitin karbitol asetat içerisindeki kütle transferi katsayısı hesaplamaları ilk defa yapılmış olup bu konu daha önce hakkında araştırma yapılmamış, orijinal bir çalışmadır.

10. ÖNERİLER

- Çalışmanın devamında, absorpsiyon sistemlerinde sıklıkla kullanılan ekipmanlarla (kabarcıklı kolon, yapılı dolgulu kolon, ıslak duvarlı kolon gibi) kütle transfer çalışmalarına devam edilebilir.
- Karbon dioksitin karbitol asetat çözeltisine absorpsiyonunda dolgulu kolon dışındaki sistemlerde kullanılabilmesi için etkin ara yüzey alanı hesaplanabilir.
- Karbitol asetat çözeltisinin karbon dioksit absorplamada uygun bir fiziksel absorbent olduğu teorisini güçlendirmek için endüstride çokça kullanılan fiziksel absorbentlerle (seleksol, rektisol vb.) bir karşılaştırması yapılabilir.
- Karbitol asetat çözeltisinin yine karbon dioksit absorplamada son zamanlarda literatürde hakkında oldukça fazla çalışmalar bulunan çeşitli iyonik sıvılarla bir karşılaştırması yapılabilir.
- Karbon dioksit absorpsiyonunda, endüstriyel uygulamalara yönelik yol gösterici bir çalışma olarak pilot ölçekli bir sistemde çalışmalar gerçekleştirilebilir.

KAYNAKLAR

- Ahmed, R., Liu, G., Yousaf, B., Abbas, Q., Ullah, H., Ali, M. U. (2020). Recent advances in carbon-based renewable adsorbent for selective carbon dioxide capture and separation A-review. *Journal of Cleaner Production*, 242(5), 118409.
- Akita, K., Yoshida, F. (1973). Gas Holdup and Volumetric Mass Transfer Coefficient in Bubble Columns. *Industrial & Engineering Chemistry Process Design and Development*, 12(1), 76-80.
- Aksay, C.S., Ketenoglu, O., Kurt, L. (2005). Küresel ısınma ve İklim Değişikliği. *Selçuk Üniversitesi Fen Fakültesi Fen Dergisi*, 25, 29-41.
- Aminu, M. D., Nabavi, S. A., Rochelle, C. A., Manovic, V. (2017). A review of developments in carbon dioxide storage. *Applied Energy*, 208, 1389-1419.
- Aschenbrenner, O., Styring, P. (2010). Comparative study of solvent properties for carbon dioxide absorption. *Energy & Environmental Science*, 3, 1106-1113.
- Babamohammadi, S., Shamiri, A., Aroua, M. K. (2015). A review of CO₂ capture by absorption in ionic liquid-based solvents. *Reviews in Chemical Engineering*, 31(4), 383-412.
- Brilman, D.W.F. (1968). *Mass transfer and chemical reaction in gas-liquid-liquid systems*, Doctorate of Philosophy Thesis, Universiteit Twente, The Netherlands.
- Charpentier, J.C. (1976). Recent Progress in Two Phase Gas-Liquid Mass Transfer in Packed Bed. *The Chemical Engineering Journal*, 11,161-181.
- Cho, J. S., Wakao, N. (1988). Determination of Liquid-side and Gas-side Volumetric Mass Transfer Coefficients in a Bubble Column. *Journal of Chemical Engineering of Japan*, 21(6), 576-581.
- Croiset, E., Thambimuthu, K., Palmer, A. (2000). Coal Combustion in O₂ / CO₂ Mixtures Compared with Air. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 78, 402-407.
- Çeliktaş, B. (2016). *Oksi yanma şartlarında oluşan karbon dioksitin soğutma/sıkıştırma yöntemiyle tutulması üzerine deneysel çalışmalar*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul.
- Danckwerts, F. R. S. (1970). *Gas-Liquid Reactions*. New York: McGraw-Hill Book Company, 16, 31-33, 239, 243.
- Deckwer, W. D., Burchart, R., Zoll, G. (1974). Mixing and mass transfer in tall bubble columns, *Chemical Engineering Science*, 29, 2177-2188.
- Dullien, F.A.L. (1958). *Reconsideration of the diaphragm cell method of measuring diffusion coefficients*. The University of British Columbia, Chemical Engineering Department, Master of Science Thesis.

- Geankoplis, C. J. (2003). *Transport Processes and Separation Process Principles* (Fourth edition). New Jersey: Pearson Education, Inc, 656.
- Genç Çelikçi. (2020). *Karbon Dioksitin Yapılı Dolgulu Kolonda N-Bütanol ve Etil Asetat ile Tutulması*. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kimya Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Ankara.
- Genç Çelikçi, G., Uysal Zıraman, D., Uysal, B. Z. (2020). Yapılı dolgulu kolonda sıvı ve gaz fazı kütle transfer katsayıları ve ara yüzey alanı. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 35(3), 1333-1352.
- Ghosh, U. K., Kentish, S. E., Stevens, G. W. (2009). Absorption of carbon dioxide into aqueous potassium carbonate promoted by boric acid. *Energy Procedia*, 1, 1075-1081.
- Haidl, J., Rejl, F.J., Valenz, L., Moucha, T. and Petřícek, R. (2017). General mass-transfer model for gas phase in structured packings. *Chemical Engineering Research and Design*, 126, 45–53.
- Hayduk, W., Laudie, H. (1974). Prediction of Diffusion Coefficients for Nonelectrolytes in Dilute Aqueous Solutions. *AIChE Journal*, 20(3), 611-615.
- Hegely, L., Roesler, J., Alix, P., Rouzineau, D., Meyer, M. (2017). Absorption methods for the determination of mass transfer parameters of packing internals: A literature review. *AIChE Journal*, 63(8), 3246-3275.
- Hendricks, C., Graus, W., van Bergen, F. (2004). *Global carbon dioxide storage potential and costs*. Report EEP-02001, Ecofoys, Utrecht.
- Hoffmann, A., Mackowiak, J.F., Gorak, A., Haase, M., Loning, J.M., Runiowski, T. and Hallenberger, K., (2007). Standardization of mass transfer measurements a basis for the description of absorption processes. *Chemical Engineering Research and Design*, 85, 40.
- Houghton, J. (2009). *Global Warming: The Complete Briefing* (Fourth Edition). New York: Cambridge University Press, 2, 18, 45, 50, 299, 300.
- International Energy Agency (IEA). (2019). *The latest trends in energy and emissions in 2018*. Global Energy & CO₂ Status Report.
- IPCC. (1995). *Climate Change 1995: The science of climate change*. Contribution of Working Group I to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 14-15, 79-87.
- IPCC. (2001). *Climate Change 2001: Synthesis Report*. Contribution of Working Group to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Houghton, J. T., Meira Filho, L. G., Callander, B. A., Harris, N., Kattenberg, A., Maskell, K.]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 8-11, 20-28, 60-72.

- IPCC. (2005). *Carbon Dioxide Capture and Storage*. Prepared by Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change, [Metz, B., O. Davidson, H. C. de Coninck, M. Loos, and L. A. Meyer (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 44,67, 108-110, 113-116, 119-122.
- IPCC. (2007). *Global Climate Projections*. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 44, 67.
- IPCC. (2013). *Climate Change 2013: The Physical Science Basis Summary for Policymakers*. Technical Summary and Frequently Asked Questions, A report of Working Group I of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 19-29.
- IPCC. (2014). *Climate Change 2014: Synthesis Report*. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 28, 40, 88.
- IPCC. (2018). *Global warming of 1.5°C: IPCC Special Report*. Working Group I of the Intergovernmental Panel on Climate Change [V. Masson-Delmotte, P. Zhai, H. O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J. B. R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M. I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor and T. Waterfield (eds.)], 12, 16-39.
- İnternet: Global Air Temperature. *Climate Research Unit (CRU), University of East Anglia (UEA)*. URL: <http://www.cru.uea.ac.uk/>, Son Erişim Tarihi: 12.04.2020.
- İnternet: Global warming from 1880 to 2019. *National Aeronautics and Space Administration (NASA), Goddard Institute for Space Studies (GISS)*. URL: https://climate.nasa.gov/climate_resources/139/video-global-warming-from-1880-to-2019/, Son Erişim Tarihi: 09.05.2020.
- İnternet: Global Temperature Latest Annual Average Anomaly. *National Aeronautics and Space Administration (NASA), Goddard Institute for Space Studies (GISS)*. URL: <https://climate.nasa.gov/vital-signs/global-temperature/>, Son Erişim Tarihi: 09.05.2020.
- İnternet: Perkins, L. (Ocak, 2020). Global Temperatures Anomalies from 1880 to 2019. *National Aeronautics and Space Administration (NASA), Goddard Institute for Space Studies (GISS)*. URL: <https://svs.gsfc.nasa.gov/4787>, Son Erişim Tarihi: 14.04.2020.
- İnternet: Türkiye İstatistik Kurumu (Nisan, 2018). Haber Bülteni: Sera Gazı Emisyon İstatistikleri. *TÜİK*. URL: <http://www.tuik.gov.tr/PreHaberBultenleri.do?id=27675>, Son Erişim Tarihi: 14.04.2020.
- Kim, Y. E., Lim, A. J., Jeong, K. S., Yoon, Y., Bae, T. S., Nam, S. C. (2013). Comparison of Carbon dioxide Absorption in Aqueous MEA, DEA, TEA and AMP Solutions. *Bulletin of the Korean Chemical Society*, 34(3), 783-787.

- Kohl A.L., Nielsen, R.B. (1997). *Gas Purification* (5th edition). Texas, Houston: Gulf Publishing Company, 8, 15, 46, 362, 1190.
- Kunze, A. K., Lutze, P., Kopatschek, M., Mackowiak, J. F., Mackowiak, J., Grünwald, M. and Górak, A. (2015). Mass transfer measurements in absorption and desorption: determination of mass transfer parameters. *Chemical Engineering Research and Design*, 104, 440–452.
- Li, Y., Huang, W., Zheng, D., Mi, Y., Dong, L. (2014). Solubilities of CO₂ Capture Absorbents 2-Ethoxyethyl Ether, 2-Butoxyethyl Acetate and 2-(2-Ethoxyethoxy) Ethyl Acetate. *Fluid Phase Equilibria*, 370, 1-7.
- Li, Y., Chen, X., Huang, W., Yang, J. (2018). Below the room temperatures of CO₂ solubilities in six physical absorbents. *The Journal of Chemical Thermodynamics*, 122, 133-141.
- Littel, L. J., Versteeg, G. F., van Swaaij, W. P. M. (1992). Diffusivity measurement in some organic solvents by a gas liquid diaphragm cell. *Journal of Chemical & Engineering Data*, 37, 42-45.
- Luis, P. (2016). Use of monoethanolamine (MEA) for CO₂ capture in a global scenario: Consequences and alternatives. *Desalination*, 38, 93-99.
- Olajire, A.A. (2010). CO₂ capture and separation technologies for end-of-pipe applications—A review. *Energy*, 35, 2610-2628.
- Onda, K., Takeuchi, H. and Okumoto, Y. (1968). Mass transfer coefficients between gas and liquid phases in packed columns. *Journal of Chemical Engineering of Japan*, 1, 56-62.
- Othmer, D. F., Thakar, M. S. (1953). Correlating Diffusion Coefficients in Liquids. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 45(3), 589-593.
- Özkutlu M. (2014). *İyonik Sıvı -Amin İkili Sisteminin CO₂ Absorpsiyonu Kinetiği*. Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı, Ankara.
- Öztürk M., Özek N., Yüksel Y.E. (2010). Doğalgazdan Hidrojen Üretilmesi ve Salınan Karbondioksitin Tutulması, *Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi*, 2, 1-13.
- Painmanakul, P., Wachirasak, J., Jamnongwong, M., Hebrard, G. (2009). Theoretical Prediction of Volumetric Mass Transfer Coefficient (k_{La}) for Designing an Aeration Tank. *Engineering Journal*, 13(3), 13-28.
- PBL Netherlands Environmental Assessment Agency, (2018). *Trends in global CO₂ and total greenhouse gas emissions 2018 Report*. PBL publication number: 3125, 9.
- Puxty, G., Rowland, R., Allport, A., Yang, Q., Bown, M., Burns, R., Attala, M. (2009). Carbon Dioxide Postcombustion Capture: A Novel Screening Study of The Carbon Dioxide Absorption Performance of 76 Amines, *Environmental Science & Technology*, 43, 6427-6433.

- REC Türkiye: Bölgesel Çevre Merkezi Raporu. (Nisan, 2006). *Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi ve Kyoto Protokolü* [Arıkan, Y.], İris İletişim Çözümleri, Ankara, Türkiye.
- Reiss, L.P. (1967). Cocurrent Gas-Liquid Cantacting in Packed Columns. *Industrial & Engineering Chemistry Process Design and Development*, 6(4), 486-499.
- Rejl J.F., Linek V., Moucha T., Valenz L. (2009). Methods standardization in the measurement of mass-transfer characteristics in packed absorption columns. *Chemical Engineering Research and Design*, 87, 695-704.
- Sahay, B. N., Sharma, M. M. (1972). Effective area and liquid and gas side mass transfer coefficients in a packed column. *Chemical Engineering Science*, 28, 41-47.
- Seader, J. D., Henley, E. J., Roper, D. K. (2011). *Seperation Process Principles: Chemical and Biochemical Operations* (Third Edition). United States: John Wiley & Sons, Inv, 209-212.
- Seo, D. J. ve Hong W. H. (2000). Effect of piperazine on the kinetics of carbon dioxide with aqueous solutions of 2-amino-2-methyl-1-propanol. *Industrial Engineering Chemistry Reseacrh*, 39 (6), 2062–2067.
- Schramke, J. A., Murphy, S. F., Doucette, W. J. (1999). Prediction of Aqueous Diffussion Coefficients for Organic Compounds at 25 °C. *Chemosphere*, 38, 2381-2406.
- Svensson, H., Edfeldt, J., Zejnullahu Velasco, V., Hulteberg, C., Karlsson, H. T. (2014). Solubility of carbon dioxide in mixtures of 2-amino-2-metyl-1-propanol and organic solvents. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 27, 247-254.
- Şeker, A. (2013). *Karbon Dioksit Tutan Organik Sıvılarda (CO2TOS) Farklı Alkollerin Kullanımının Karbon Dioksit Tutma Performansına Etkisi*, Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı, Ankara.
- Tan, L. S., Shariff, A. M., Lau, K. K., Bustam, M.A. (2012). Factors affecting CO2 absorption efficiency in packed column: A review. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 18(2002), 1874-1883.
- Ufford, R. C., Perona, J. J. (1973). Liquid Phase Mass Transfer with Contercurrent Flow Through Packed Towers. *AIChE Journal*, 19(6), 1223-1226.
- Uysal, B. Z. (2003). *Kütle Transferi Esasları ve Uygulamaları* (2.Baskı). Ankara: Alp Yayınevi, 14, 16-18, 21, 109, 136-139, 187-189.
- Uysal, D. (2011). *Kabarcıklı Kolonda Sodyum Metaborat Çözeltisine Karbon Dioksitin Absorpsiyonu*. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Kimya Mühendisliği Bölümü, Ankara.
- Uysal, D. (2016). *Kalsiyum Asetat Çözeltisi ile Karbon Dioksitin Absorpsiyonu*, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kimya Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Ankara.

- Uysal Zıraman, D., Doğan, Ö.M. and Uysal, B.Z. (2018). Mass transfer enhancement factor for chemical absorption of carbon dioxide into sodium metaborate solution. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 35 (9), 1800-1806.
- Versteeg, G.F. and van Swaaij, W.P.M. (1988). Solubility and diffusivity of acid gases (CO₂, N₂O) in aqueous alkanolamine solutions. *Journal of Chemical & Engineering Data*, 33, 29-34.
- Wang, G. Q., Yuan, X. G., Yu, K. T. (2005). Review of Mass-Transfer Correlations for Packed Columns. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 44, 8715-8729.
- Wang, M., Lawal, A., Stephenson, P., Sidders, J., Ramshaw, C. (2011). “Post-Combustion CO₂ Capture with Chemical Absorption: A State-of-Art Review”, *Chemical Engineering Research and Design*, 89, 1609-1624.
- Wu, Y., Liu, Y. and Li, S. (2001). Diffusion coefficients of l-proline, l-threonine and l-arginine in aqueous solutions at 25°C. *Fluid Phase Equilibria*, 186, 27–38.
- Wypych, A., Wypych, G. (2014). *Databook of Solvents* (First Edition), Ontario, Canada: ChemTec Publishing, 354.
- Zhang, W., Ye L., Jiang, J. (2015). CO₂ capture with complex absorbent of ionic liquid, surfactant and water, *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 3(1),227-232.
- Zhang, Z., Huisinigh, D. (2017). Carbon dioxide storage schemes: Technology, assesment and deployment. *Journal of Cleaner Production*, 142(2), 1055-1064.

EKLER

EK-1. Türkiye sera gazı emisyon değerleri

Çizelge 1.1. 1990-2018 yılları arasında Türkiye karbon dioksit emisyon değerleri

CO ₂ emisyonları, 1990 – 2012 (Bin ton)							
Sera gazı kaynakları	1990	1995	2000	2005	2010	2011	2012
Toplam	151 508,5	180 903,0	229 790,6	264 200,8	314 380,0	339 482,3	353 666,2
Enerji	129 882,3	156 827,1	204 511,0	232 408,6	270 819,8	291 845,2	304 431,7
Yakıt yanması	129 662,0	156 617,8	204 343,0	232 266,9	270 663,5	291 694,5	304 287,9
Çevrim ve enerji sektörü	37 130,3	50 297,9	77 502,7	89 665,8	112 091,5	123 668,6	124 752,8
İmalat sanayi ve inşaat	37 004,0	39 842,8	57 657,3	62 731,1	52 119,6	52 379,7	60 821,1
Ulaştırma	26 250,8	33 180,0	35 490,2	41 043,8	44 382,6	46 366,8	61 248,5
Diğer sektörler	29 276,9	33 297,2	33 692,7	38 826,2	62 069,8	69 279,4	57 465,5
Kaçak emisyonlar	220,2	209,1	167,8	141,6	156,2	150,5	143,7
Karbon dioksit taşıma ve depolama	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Endüstriyel işlemler ve ürün kullanımı	21 139,6	23 624,1	24 641,2	31 167,1	42 904,1	47 065,4	48 580,3
Mineral ürünleri	13 423,7	17 549,4	18 417,6	23 246,4	33 393,8	35 297,6	36 384,4
Kimya sanayi	565,2	472,1	214,3	591,3	249,6	1 012,0	1 192,0
Metal üretimi	6 967,3	5 399,7	5 732,2	6 883,7	8 829,2	9 902,1	10 398,4
Enerji dışı yakıt ve solvent kullanımı	183,4	202,8	277,1	445,7	431,6	853,7	605,5
Tarım	459,9	425,9	617,5	613,2	645,0	557,5	639,8
Üre uygulaması	459,9	425,9	617,5	613,2	645,0	557,5	639,8
Atık	26,6	26,0	21,0	11,9	11,2	14,1	14,4
Atıkların açıkta yakılması	26,6	26,0	21,0	11,9	11,2	14,1	14,4

EK-1 (devam). Türkiye sera gazı emisyon değerleri

Çizelge 1.1 (devam). 1990-2018 yılları arasında Türkiye karbon dioksit emisyon değerleri

CO ₂ emisyonları, 2013 – 2018 (Bin ton)						
Sera gazı kaynakları	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Toplam	345 220,6	361 675,5	381 331,9	401 239,7	425 329,2	419 194,7
Enerji	292 913,6	309 259,0	329 781,9	345 297,9	366 897,6	359 818,8
Yakıt yanması	292 767,9	309 113,4	329 627,2	345 139,8	366 740,4	359 644,2
Çevrim ve enerji sektörü	119 519,1	130 128,0	133 503,4	142 679,4	153 557,1	157 443,3
İmalat sanayi ve inşaat	52 772,0	54 232,9	59 358,6	59 839,6	59 958,3	59 311,2
Ulaştırma	67 478,1	72 084,3	74 271,6	80 207,8	82 953,4	82 787,8
Diğer sektörler	52 998,7	52 668,2	62 493,7	62 413,0	70 271,6	60 101,9
Kaçak emisyonlar	145,5	145,5	154,6	157,9	157,0	174,5
Karbon dioksit taşıma ve depolama	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Endüstriyel işlemler ve ürün kullanımı	51 492,3	51 628,3	50 738,4	54 644,7	56 980,5	58 117,2
Mineral ürünleri	39 618,1	39 854,6	38 479,2	42 004,4	44 274,1	43 818,7
Kimya sanayi	792,8	976,2	1 337,2	940,0	741,7	1 270,2
Metal üretimi	10 547,9	10 398,3	10 655,4	11 554,0	11 813,1	12 821,9
Enerji dışı yakıt ve solvent kullanımı	533,6	399,2	266,5	146,2	151,5	206,4
Tarım	807,3	787,7	810,6	1 295,3	1 449,6	1 257,5
Üre uygulaması	807,3	787,7	810,6	1 295,3	1 449,6	1 257,5
Atık	7,4	0,5	1,1	1,8	1,5	1,2
Atıkların açıkta yakılması	7,4	0,5	1,1	1,8	1,5	1,2

EK-1 (devam). Türkiye sera gazı emisyon değerleri

Çizelge 1.2. 1990-2018 yılları arasında Türkiye’de sektörlere göre sera gazı emisyon değerleri

Sektörlere göre toplam sera gazı emisyonları (CO ₂ eşdeğeri), 1990-2018 (Milyon ton-Mt)						
Yıl	Toplam	1990 yılına göre değişim (%)	Enerji	Endüstriyel işlemler ve ürün kullanımı	Tarım	Atık
1990	219,4	.	139,6	22,8	45,8	11,1
1991	226,8	3,4	144,0	24,7	46,7	11,3
1992	233,0	6,2	150,3	24,3	46,8	11,5
1993	240,3	9,5	156,8	24,5	47,2	11,8
1994	234,3	6,8	153,3	24,2	44,7	12,0
1995	247,8	12,9	166,3	25,2	43,8	12,3
1996	267,4	21,9	184,0	26,2	44,5	12,7
1997	278,6	27,0	196,2	27,0	42,3	13,2
1998	280,2	27,7	195,9	27,4	43,5	13,5
1999	277,7	26,6	193,8	25,8	44,1	13,9
2000	298,8	36,2	216,1	26,2	42,1	14,3
2001	280,3	27,8	199,2	25,9	39,7	15,5
2002	286,0	30,4	205,8	26,9	37,4	15,9
2003	305,3	39,2	220,3	28,2	40,5	16,2
2004	314,7	43,4	226,1	30,8	41,1	16,6
2005	337,1	53,7	244,0	33,6	42,2	17,3
2006	358,3	63,3	260,0	36,7	43,6	18,0
2007	391,4	78,4	290,8	39,2	43,2	18,3
2008	387,6	76,7	287,3	40,9	41,0	18,4
2009	395,6	80,3	292,5	42,5	41,8	18,8
2010	398,9	81,8	287,0	48,1	44,1	19,5
2011	427,8	95,0	308,7	52,8	46,6	19,8
2012	447,3	103,9	320,5	55,1	52,3	19,4
2013	439,3	100,3	307,5	58,1	55,5	18,2
2014	458,4	108,9	325,8	58,6	55,9	18,2
2015	472,6	115,4	340,9	57,1	55,8	18,8
2016	497,7	126,9	359,7	61,1	58,5	18,4
2017	523,8	138,8	379,9	63,6	62,8	17,4
2018	520,9	137,5	373,1	65,2	64,9	17,8

EK-1 (devam). Türkiye sera gazı emisyon değerleri

Çizelge 1.3. 1990-2018 yılları arasında Türkiye’de sera gazı emisyon dağılımı

Sera gazı emisyonları (CO ₂ eşdeğeri), 1990-2018 (Milyon ton-Mt)					
Yıl	Toplam	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	F-gazları
1990	219,4	151,5	42,4	24,8	0,6
1991	226,8	158,0	43,3	24,6	0,9
1992	233,0	163,9	43,2	25,1	0,7
1993	240,3	171,0	43,0	25,9	0,4
1994	234,3	167,4	42,7	23,5	0,7
1995	247,8	180,9	42,5	23,7	0,6
1996	267,4	199,5	42,9	24,4	0,6
1997	278,6	212,0	42,1	23,9	0,6
1998	280,2	212,0	42,3	25,3	0,6
1999	277,7	207,8	43,7	25,6	0,6
2000	298,8	229,8	43,6	24,7	0,7
2001	280,3	213,5	42,8	23,2	0,8
2002	286,0	221,0	40,9	23,1	1,0
2003	305,3	236,5	42,9	24,7	1,2
2004	314,7	244,5	43,5	25,2	1,5
2005	337,1	264,2	45,2	26,1	1,7
2006	358,3	281,6	46,6	28,1	1,9
2007	391,4	312,7	49,0	27,4	2,3
2008	387,6	309,3	49,9	25,9	2,4
2009	395,6	315,4	49,6	28,3	2,4
2010	398,9	314,4	51,3	29,6	3,6
2011	427,8	339,5	53,7	30,7	4,0
2012	447,3	353,7	57,1	31,8	4,7
2013	439,3	345,2	55,5	33,8	4,8
2014	458,4	361,7	57,3	34,3	5,1
2015	472,6	381,3	51,4	35,0	4,9
2016	497,7	401,2	53,9	37,4	5,2
2017	523,8	425,3	54,2	38,8	5,4
2018	520,9	419,2	57,6	38,9	5,2

EK-2. Oksijen probunun kalibrasyonu

■ %100 Hava Doygunluğu İçin Kalibrasyon Yöntemi

- I. İçinde su bulunan bir beherin içerisine YSI 5700 Series oksijen probu 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 önemli bir husustur).
- II. Cihazın üzerindeki düğme %CAL'a getirilir.
- III. Bir kere CAL butonuna basıldıktan sonra düğme %'ye getirilir. Bu sırada ekranda 100,0 ($\pm 0,2$) yazmalıdır. Doğruluğun sağlanması için en az bir dakika boyunca sabit bir değer görülmelidir.

■ Ölçümler

➤ Sıcaklık

- I. Oksijen probu sıvının içerisine konulur.
- II. Cihazın üzerinde bulunan düğme TEMP °C'ye çevrilir. Ekranda okunan değer sabit kalana kadar beklenir.

➤ Oksijen

- I. Kalibrasyonu yapılmış olan prob analiz edilecek olan sıvının içerisine konulur ve karıştırılır.
- II. 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 (Uysal, 2011)

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

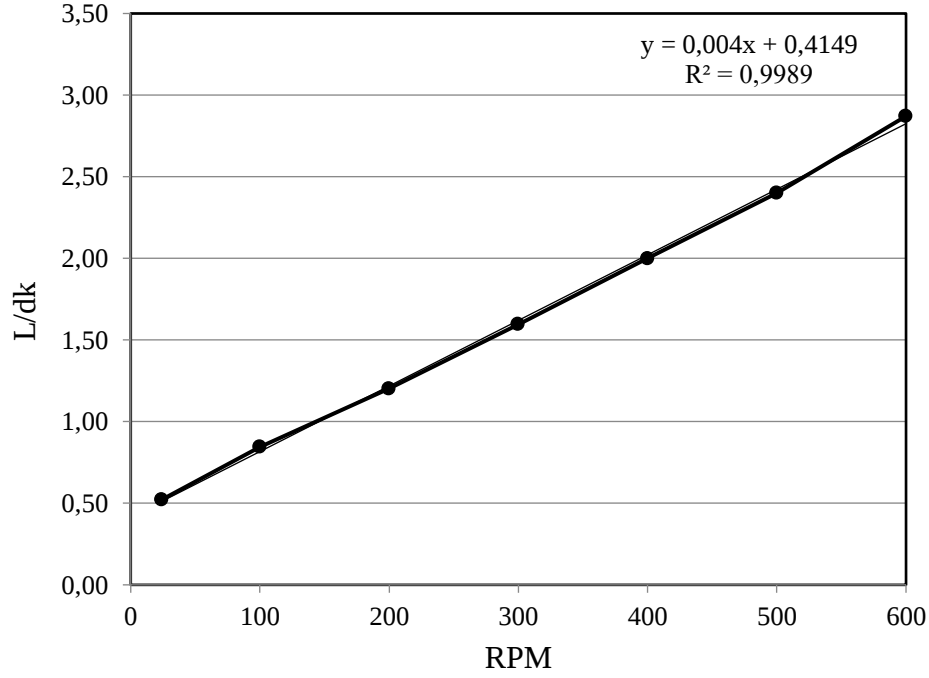
EK-2 (devam). Oksijen probunun kalibrasyonu

Çizelge 2.2. Farklı basınçlar için kalibrasyon değerleri (Uysal, 2011)

Basınç (mmHg)	Kalibrasyon Değeri (%)	Basınç (mmHg)	Kalibrasyon Değeri (%)
768	101	631	83
760	100	623	82
752	99	616	81
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. Peristaltik pompa kalibrasyon eğrisi

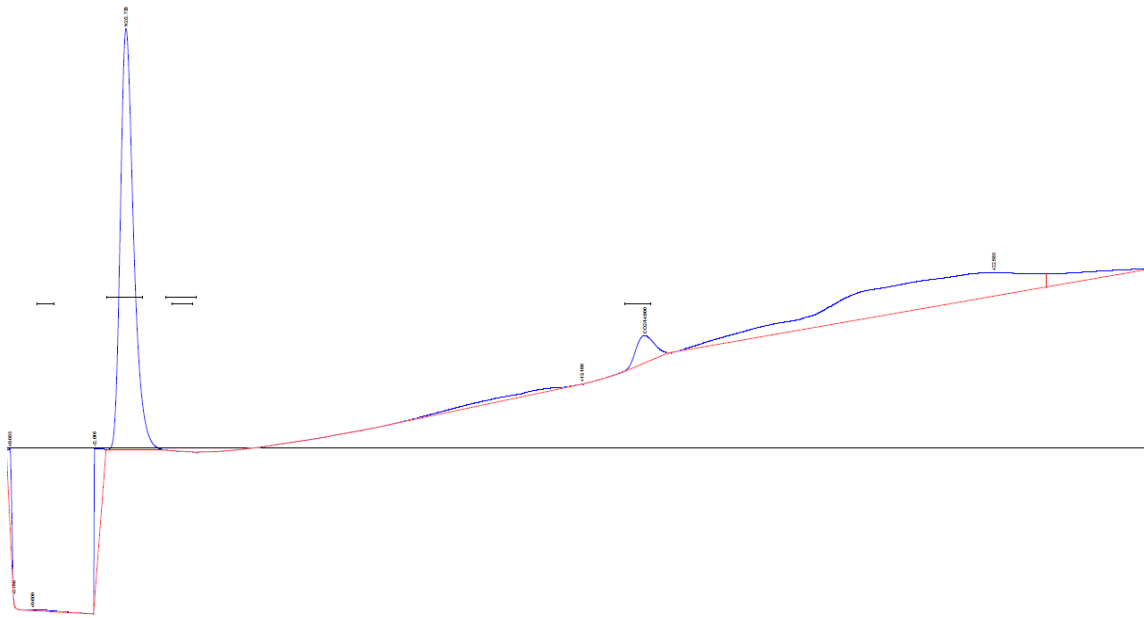
Raschig halkalı dolgulu kolon ile yapılan deneylerde sıvı beslemesi için kullanılan peristaltik pompanın L/dk ve RPM birimlerinde kalibrasyon eğrisi Şekil 3.1 'de verilmiştir.



Şekil 3.1. Peristaltik pompa kalibrasyon eğrisi

EK-4. Gaz kromatografisi

Analizlerde SRI Instruments firmasına ait SRI 310 modeli termal iletkenlik detektörü olan gaz kromatografi cihazı kullanılmıştır. Gaz kromatografi içerisinde 3’*1/8” boy ve çapındaki silika jel kolon kullanılmış olup taşıyıcı gaz olarak ise saf argon gazı kullanılmıştır. Deneylerden elde edilen gaz numuneler Hamilton marka 1µL’lik şırınga ile kolona beslenmiş olup sonuçlar Peaksimple adlı programdan okunmuştur. Şekil 4.1 ve Şekil 4.2’de deneyler sırasında elde edilen gaz kromatografî görüntülerine ait örnekler verilmiştir.

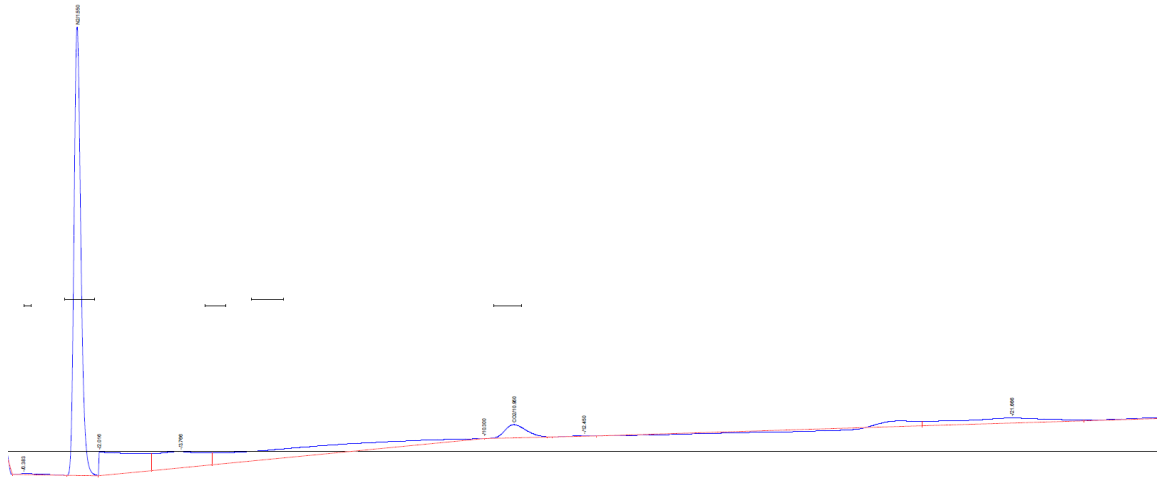


Şekil 4.1. Karbon dioksitin sodyum hidroksit çözeltisine absorpsiyonu deneyi gaz kromatografî görüntüsü ($U_G = 0,0175$ m/s, $U_L = 0,0084$ m/s)

Çizelge 4.1. Karbon dioksitin sodyum hidroksit çözeltisine absorpsiyonu deneyi gaz kromatografî sonuçları ($U_G = 0,0175$ m/s, $U_L = 0,0084$ m/s)

Component	Retention	Area	Height	External	Norm Area %
H ₂	0.000	0.0000	0.000	0.0000	0.0000
N ₂	2.733	2726.3050	129.185	0.8795	92.6752
CH ₄	0.000	0.0000	0.000	0.0000	0.0000
CO	0.000	0.0000	0.000	0.0000	0.0000
CO ₂	14.600	244.3960	8.430	0.0695	7.3248
		2970.7010		0.9490	100.000

EK-4 (devam). Gaz kromatografisi



Şekil 4.2. Karbon dioksitin karbitol asetat çözeltisine absorpsiyonu deneyi gaz kromatografi görüntüsü ($U_G = 0,0070$ m/s, $U_L = 0,0060$ m/s)

Çizelge 4.2. Karbon dioksitin karbitol asetat çözeltisine absorpsiyonu deneyi gaz kromatografi sonuçları ($U_G = 0,0070$ m/s, $U_L = 0,0060$ m/s)

Component	Retention	Area	Height	External	Norm Area %
H ₂	0.000	0.0000	0.000	0.0000	0.0000
N ₂	1.550	1397.3320	136.121	0.4508	92.5058
CH ₄	0.000	0.0000	0.000	0.0000	0.0000
CO	0.000	0.0000	0.000	0.0000	0.0000
CO ₂	10.950	128.3935	3.990	0.0365	7.4942
		1525.7255		0.4873	100.000

Gaz kromatografisine ait sıcaklık programı Çizelge 4.3’de verilmiştir.

Çizelge 4.3. Gaz kromatografi sıcaklık programı

Başlangıç sıcaklığı (°C)	Sabit kalma süresi (dk)	Isıtma hızı (°C/dk)	Son sıcaklık (°C)
50,00	3,200	60,00	80,00
80,00	8,000	60,00	120,00
120,00	4,500	60,00	200,00
200,00	8,000	0,00	0,00

EK-5. Raschig halkalı dolgulu kolon özellikleri

Tüm deneyler boyunca aynı Raschig halkalı dolgulu kolon deney düzeneği kullanılmıştır. Deneyler esnasında kullanılan Raschig halkalı dolgulu kolon Resim 5.1’de gösterilmektedir. Dolgulu kolona ait veriler Çizelge 5.1’de gösterilmektedir.



Resim 5.1. Raschig halkalı dolgulu kolon deney düzeneği

Çizelge 5.1. Raschig halkalı dolgulu kolonun özellikleri

Dolgu Yüksekliği (H), m	0,34
Kolon iç çapı (D), m	0,055
Birim dolgulu kolon hacmindeki dolgu maddesinin sağladığı yüzey alanı (a), m ² /m ³	984

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : KOÇYİĞİT ÇAPOĞLU, İrem
 Uyruğu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 05/04/1993, Altındağ
 Medeni Hali : Evli
 Telefon : 0 (554) 410 77 65
 e-posta : iremkocyigit@gazi.edu.tr



Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Yüksek Lisans	Gazi Üniversitesi / Kimya Müh. Bölümü	Devam Ediyor
Lisans	Gazi Üniversitesi / Kimya Müh. Bölümü	2016
Lise	Yıldırım Beyazıt Anadolu Lisesi	2011

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
02/2020-Halen	Gazi Üniversitesi	Araştırma Görevlisi
10/2017-06/2018	Gazi Üniversitesi	Öğrenci Asistan
11/2016-03/2017	Tolsa Turkey Madencilik A.Ş.	Kalite Mühendisi
09/2016-11/2016	Kavaklıdere Şarapları A.Ş.	Stajyer Mühendis

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

- Koçyigit, İ., Uysal, D., Doğan, Ö. M., Uysal, B. Z. (2016). *Capturing Carbon Dioxide from Air by Carbitol Acetate*, 9th International Conference on Sustainable Energy and Environmental Protection, SEEP2016 Kayseri, Turkey.
- Koçyigit, İ., Genç Çelikçi, G., Yörük, Ö., Uysal Zıraman, D., Doğan, Ö. M., Uysal, B. Z. (2018). *Karbon Dioksitin Karbitol Asetat İçerisindeki Difüzyon Katsayısı*, 13. Ulusal Kimya Mühendisliği Kongresi, Van, Türkiye.

Hobiler

Tiyatro, Müzik, Yüzme



GAZİ GELECEKTİR..