

T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DİMETİLASETAMİD (DMAC)
EMİSYONLARININ ADSORPSİYON
YÖNTEMİ İLE GİDERİMİ

GİZEM ÇELİK
YÜKSEK LİSANS TEZİ
ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

GEBZE
2019

T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DİMETİLASETAMİD (DMAC)
EMİSYONLARININ ADSORPSİYON
YÖNTEMİ İLE GİDERİMİ

GİZEM ÇELİK
YÜKSEK LİSANS TEZİ
ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DANIŞMANI
PROF. DR. AHMET KARAGÜNDÜZ

GEBZE
2019

T.R.
GEBZE TECHNICAL UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

**REMOVAL OF DIMETYLACETAMIDE
(DMAC) EMISSIONS BY ADSORPTION
METHOD**

GİZEM ÇELİK

**A THESIS SUBMITTED FOR THE DEGREE OF
MASTER OF SCIENCE
DEPARTMENT OF ENVIROMENTAL ENGINEERING**

**THESIS SUPERVISOR
PROF. DR. AHMET KARAGÜNDÜZ**

GEBZE

2019

GTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 12/06/2019 tarih ve 2019/26 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 21/06/2019 tarihinde tez savunma sınavı yapılan Gizem Çelik'in tez çalışması Çevre Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.

JÜRİ

ÜYE

(TEZ DANIŞMANI) : Prof. Dr. Ahmet KARAGÜNDÜZ

ÜYE

: Prof. Dr. Bülent KESKİNLER

ÜYE

: Doç. Dr. Derya Yüksel İMER

ONAY

Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun
...../...../..... tarih ve/..... sayılı kararı.

ÖZET

Uçucu organik bileşikler normal oda ısısında kolayca buharlaşabilen, farklı birçok kaynaktan atmosfere yayılarak çevreye, insanlara, bitkilere ve atmosferdeki bileşenlerin yapısına olumsuz etkileri olan maddelerdir. Bu olumsuz özelliklerinden dolayı hem ticari hem de endüstri kaynaklı olan uçucu organik bileşiklerin kullanımı azaltılarak, yerine başka alternatifler kullanılmakta ya da geri kazanım yapılarak atmosfere salınan miktarı azaltılmaktadır. Günümüzde çevre sağlığı açısından bu kirleticilerin kontrolüne çok daha fazla önem verilmekte ve kontroller sıklaştırılmaktadır. Uçucu organik bileşiklerin giderim yöntemleri; adsorpsiyon, absorpsiyon, yoğuşma, oksidasyon, biyofiltrasyon ve membran ile ayırmadır.

Bu çalışmada son zamanlarda sıklıkla karşımıza çıkan, özellikle tekstil sektöründe çözücü olarak kullanılan dimetilasetamid (DMAC) denilen uçucu organik bileşiğin adsorpsiyon ile giderimi, sıcak hava ile desorpsiyonu ve yeniden kullanım için geri kazanımı çalışılmıştır. Çalışma üç farklı sıcaklıkta (10, 20, 30°C), üç farklı akış hızında (0,8, 1,0, 1,2 L/dk) ve üç farklı konsantrasyonda (%25'lik DMAC, %50'lik DMAC, %75'lik DMAC) yürütülmüştür. DMAC adsorpsiyonu ile doygunluğa ulaşmış olan iki farklı adsorbentten (aktif karbon ve silika jel) uçucu organik bileşiğin sıcaklık etkisiyle desorpsiyonu da çalışılmıştır. Desorpsiyon için DMAC ile doygun olan kolon 180-200°C'lik sıcaklıklarda ısıtılmıştır.

DMAC adsorpsiyonu amacıyla kullanılan iki farklı adsorbentten aynı çalışma koşulları altında silika jelin kapasitesinin daha yüksek olduğu, optimum çalışma sıcaklığının 20°C ve 1,0 L/dk hızla gerçekleştirildiği saptanmıştır. Desorpsiyon işleminde de aktif karbon yerine silika jel kullanımı sıcaklıktan etkilenme derecelerine göre kıyaslandığında tercih sebebi olmuştur.

Anahtar Kelimeler: Uçucu Organik Bileşik (UOB), Dimetilasetamid (DMAC), Adsorpsiyon, Desorpsiyon, Geri Kazanım.

SUMMARY

Volatile organic compounds are substances that can easily evaporate at normal room temperature, spread from many different sources to the atmosphere and have negative effects on the environment, people, plants and the structure of the components in the atmosphere. Due to these negative properties, the use of volatile organic compounds, both commercial and industry-related, is reduced, and other alternatives are used or the amount of release to the atmosphere is reduced. Today, much more attention is given to the control of these pollutants in terms of environmental health and controls are tightened. Methods of removal of volatile organic compounds; adsorption, absorption, condensation, oxidation, bio-filtration and membrane separation.

In this study, the removal of the volatile organic compound called dimethylacetamide (DMAC), which is frequently used in the textile sector, as a solvent, has been studied, desorption with hot air and recovery for reuse has been studied. The study was carried out at three different temperatures (10, 20, 30°C), three different flow rates (0,8, 1,0, 1,2 L / min) and three different concentrations (25% DMAC, 50% DMAC, 75% DMAC). Desorption of the volatile organic compound by the effect of temperature has been studied from two different adsorbents (activated carbon and silica gel) which have reached saturation by DMAC adsorption. For desorption, the column saturated with DMAC was heated at temperatures of 180-200°C.

Two different adsorbents used for DMAC adsorption were found to have higher capacity of silica gel under the same operating conditions, and optimum operating temperature at 20°C and 1,0 L / min. In the desorption process, the use of silica gel instead of activated carbon was the preferred choice when compared to the degree of temperature effect.

Key Words: Volatile Organic Compounds (VOC), Dimethylacetamide (DMAC), Adsorption, Desorption, Recover.

TEŞEKKÜR

BaŐta, y¼ksek lisans eğitimimde ve akademik hayatımda desteğini ve yardımlarını hiğbir zaman esirgemeyip bilgisi ile bu ęalıŐmanın oluŐmasının yolunu açan danıŐmanım değerli hocam Prof. Dr. Ahmet KARAG¼ND¼Z'e,

ĘalıŐmalarım boyunca deneyim ve tecr¼besini benimle paylaŐan Prof. Dr. B¼lent KESKİNLER'e, Doç. Dr. Banu ęETİN'e, ęiędem BALęIK CANBOLAT'a, Cevdet DOğAN'a ve yanımda olup bilgilerini bana aktarıp beni rahatlatan IŐıl ęELİK SAğLAM'a, ęisel İSKURT'a ve Bahar Özbey ÜNAL'a,

217M132 No'lu proje kapsamında bu tezi destekleyen TÜBİTAK'a,

GöstermiŐ olduğu desteklerinden dolayı sevgili eŐim Mustafa Rifat ęELİK'e, her anımda yanımda olan kıymetli Abime, bana emek verip bug¼nlere getiren sevgili Anne ve Babama en içten teŐekk¼rlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	v
SUMMARY	vi
TEŞEKKÜR	vii
İÇİNDEKİLER	viii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	x
ŞEKİLLER DİZİNİ	xii
TABLolar DİZİNİ	xiv
1. GİRİŞ	1
1.1. Tezin Amacı ve Kapsamı	2
2. LİTERATÜR ÖZETİ	4
2.1. Uçucu Organik Bileşikler (UOB)	4
2.2. Uçucu Organik Bileşik Kaynakları	5
2.3. Uçucu Organik Bileşik Emisyon Mevzuatı	6
2.3.1. Türkiye'deki Yönetmelik	6
2.3.2. Çevre Koruma Ajansı (U.S. EPA)	7
2.4. Uçucu Organik Bileşiklerin Giderim Yöntemleri	7
2.4.1. Oksidasyon	10
2.4.2. Biyofiltrasyon	11
2.4.3. Absorpsiyon	12
2.4.4. Adsorpsiyon	13
2.4.5. Yoğuşma	17
2.4.6. Membran	19
2.5. Dimetilasetamid (DMAC)	20
2.6. Dimetilasetamid'in Giderim Yöntemleri	21
3. GEREÇ ve YÖNTEM	23
3.1. Kütle Akış ölçer (MFM)	23
3.2. Gaz Yıkama Şişesi	24
3.3. Su Banyosu	24
3.4. Adsorpsiyon Kolonu	25

3.5. Gaz Kromatografi (GC)	26
3.6. Deneysel Düzenek	28
4. BULGULAR	31
4.1. DMAC'in Aktif Karbon ile Adsorpsiyonu	31
4.1.1. Sıcaklık Etkisi	32
4.1.2. Gaz Hızı Etkisi	33
4.1.3. Konsantrasyon Etkisi	34
4.2. DMAC'in Aktif Karbondan Desorpsiyonu	35
4.3. DMAC'in Silika Jel ile Adsorpsiyonu	36
4.3.1. Sıcaklık Etkisi	37
4.3.2. Akış Hızı Etkisi	38
4.3.3. Nem Etkisi	38
4.4. DMAC'in Silika Jelden Desorpsiyonu	39
5. SONUÇLAR	42
KAYNAKLAR	45
ÖZGEÇMİŞ	47

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler ve</u>	<u>Açıklamalar</u>
<u>Kısaltmalar</u>	
a_L	: Adsorpsiyon enerjisine bağlı olan sabit
q_e	: Birim Adsorban Üzerinde Adsorplanan Madde Miktarı
q_m	: Maksimum Adsorpsiyon Kapasitesi
C_e	: Adsorpsiyon Sonrası Çözeltide Kalan Maddenin Konsantrasyonu
K_L	: Adsorbatın Adsorplama Kapasitesine Bağlı Olan Sabit
Q_{max}	: Adsorbanın Maksimum Adsorplama Kapasitesi
P_0	: Adsorpsiyon Sıcaklığındaki Adsorbanın Basıncı
N_2	: Azot
CO	: Karbonmonoksit
NO _x	: Azotoksit
C ₆ H ₆	: Benzen
C ₄ H ₉ NO	: Dimetilasetamid
BTEX	: Benzen, Toluen, Etil-benzen, Q-ksilen
NaHCO ₃	: Sodyum bikarbonat
GC	: Gaz Kromatografi
AK	: Aktif Karbon
SJ	: Silika Jel
SS	: Askıda Katı Madde
VSS	: Uçucu Askıda Katı Madde
FID	: Alev İyonlaşma Dedektörü
MS	: Kütle Dedektörü
TID	: Termo İyonik Dedektör
ECD	: Elektron Yakalama Dedektörü
TCD	: Termal İletkenlik Dedektörü
MFM	: Mass Flow Meter
UOB	: Uçucu Organik Bileşikler
DMAC	: Dimetilasetamid
HCFC	: Hidrofloroklorokarbon

CFC	:	Kloroflorokarbon
HKKY	:	Hava Kalitesinin Koruması Yönetmeliği
HKDYY	:	Hava Kalitesi Değerlendirme ve Yönetimi Yönetmeliği
NFM	:	N-Formil Morfolinin
TBAB	:	Damlatma Yataklı Biyofiltre
EPA	:	Enviroment Protect Agenyc



ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil No:</u>	<u>Sayfa</u>
2.1: UOB giderim yöntemleri.	7
2.2: Termal yakma prosesinin şematik görünümü.	10
2.3: Katalirik UOB yakma prosesinin şematik görünümü.	11
2.4: Biyofiltrasyon sistemine ait basit bir şema.	12
2.5: Gaz absorpsiyonunda kullanılan bir paket kulenin şematik görünümü.	13
2.6: Uçucu organik bileşiklerin yoğunlaştırılması.	18
2.7: Membran proses ile atık gazdan UOB giderimi.	19
2.8: DMAC atık gazının kontrolü için damlama yatağı hava biyofiltresinin şematik diyagramı.	21
3.1: Kütle akış ölçerin görünümü.	23
3.2: Kütle akış ölçerin çalışma prensibinin görünümü.	23
3.3: Gaz yıkama şişesinin görünümü.	24
3.4: Su banyosunun görünümü.	25
3.5: Çelik kolon görüntüsü.	25
3.6: Gaz kromatografi cihazının şematik görünümü.	26
3.7: Gaz kromatografi cihazının fotoğrafı.	28
Deney düzeneğine ait bir fotoğraf. 1: Kütle Akış Ölçer (MFM), 2:	29
3.8: Gaz Yıkama Şişesi, 3: Su Banyosu, 4: Karıştırıcı, 5: Adsorpsiyon Kolonu, 6: Gaz Kromatografi Cihazı (GC).	
4.1: Sıcaklığın DMAC adsorpsiyonuna olan etkisi (10°C'de $C_0=3.83$ mg/L, 20°C'de $C_0=6.37$ mg/L, 30°C'de $C_0=13.60$ mg/L).	32
4.2: Gaz hızının DMAC adsorpsiyonuna olan etkisi	33
4.3: Farklı DMAC konsantrasyonları ile gerçekleştirilen adsorpsiyon çalışmaları.	34
4.4: DMAC'in desorpsiyon öncesi ve sonrası adsorpsiyon eğrileri.	35

4.5:	DMAC'in silika jel adsorpsiyonuna sıcaklığın etkisi (10°C'de C ₀ =3.83 mg/L, 20°C'de C ₀ =6.37 mg/L, 30°C'de C ₀ =13.60 mg/L).	37
4.6:	Farklı akış hızlarında silika jele DMAC adsorpsiyonun kırılma eğrileri.	38
4.7:	Nemin kırılma eğrisine olan etkisinin belirlenmesi (DMAC su karışımındaki C ₀ =1.44 mg/L).	39
4.8:	10°C'de gerçekleştirilen ardışık adsorpsiyon ve desorpsiyon kırılma eğrileri.	40
4.9:	Sıcak hava ile desorpsiyonda kütle azalması	41
5.1:	Tasarlanan deney düzeneğine ait bir çizim. 1: Hava Fanı, 2: Kütle Akış Ölçer (MFM), 3: DMAC Çözeltisi, 4: Gaz Yıkama Şişesi, 5: Çekvalf, 6: Desorpsiyon Fırını, 7: Silika Jel Kolonu, 8: İzolasyon Malzemesi, 9: Termokulp, 10: Gaz Kromatografi Cihazı (GC), 11: Kayıt.	44

TABLULAR DİZİNİ

Tablo No:

Sayfa

2.1: Bazı uçucu organik bileşikler.	4
2.2: 1995 yılında Ameraki’de sabit, hareketli ve biyolojik kaynaklardan bir yılda atmosfere yayılan kirleticilerin miktarı (milyon ton).	6
2.3: Uçucu organik bileşik (UOB) kontrol teknikleri için analizleri.	9
2.4: Fiziksel ve kimyasal adsorpsiyon arasındaki ayırt edici özellikleri.	14
2.5: DMAC fiziksel ve kimyasal özellikleri.	20
3.1: GC kullanım parametreleri.	28
3.2: Deneysel matris.	30
4.1: Aktif karbonun özellikleri.	31
4.2: Silika jelin özellikleri.	36

1. GİRİŞ

Çevre kirliliği endüstrileşme ile birlikte gün geçtikçe artmaktadır. Bunun sonucu olarak çevre sorunlarının en başında gelen hava kirliliği için emisyonlar kontrol altında tutulmalıdır. Temiz hava içerisinde yaklaşık %78 azot, %21 oksijen ve %1 oranında diğer gazları barındırmaktadır [Saraç, 2011]. Havanın doğal bileşenlerinin çeşitli nedenlerle değişime uğraması hava kirliliğine neden olmaktadır. Bu hava kirliliğine ve kokuya neden olan birçok bileşik vardır. Oda sıcaklığında hava ile direkt temas etmesi halinde hızlıca buharlaşan, yapısında en az bir karbon ve hidrojen içeren kimyasal bileşikler olarak tanımlanan uçucu organik bileşikler [UOB] en önemlilerindedir. Çünkü tehlikeli sayılan hava kirleticilerin birçoğu bu grubun içerisinde yer almaktadır. Kaynama sıcaklığı 50-260°C arasında değişen bu hidrokarbonlarla günlük hayatımızda çok sık karşılaşırız [Alyüz vd. 2006]. UOB'lerin kaynakları; boyalar, ticari ürünler, yapıştırıcı malzemeler, çözücüler, döşeme ve yapı malzemeleridir. Bu bileşikler ya proses gereği açığa çıkar ve bacadan atılır ya da ekipman ve depolama tankı sızıntıları şeklinde çevreye yayılırlar [Kalafatoğlu vd., 2000].

Uçucu organik bileşiklerin insan sağlığı üzerinde oldukça ciddi yan etkileri vardır. Düşük konsantrasyonlar baş ağrısı, yorgunluk ve uyuşukluk gibi özellikle sinir sistemi ile ilgili şikayetlere neden olurken hayvanlar üzerinde yapılan deneyler sonucu yüksek konsantrasyonlara maruz kalınması durumunda kanser olma riskini arttırdığı söylenebilir.

Günümüzde çözücü ve çözücü bazlı kimyasalların kullanıldığı tüm endüstrilerde çalışan insanlar hatta sanayi tesislerinden uzakta yaşayan insanlar bile uçucu organik bileşiklerin tehlikeli etkilerine maruz kalmaktadırlar. En fazla dikkat çeken uçucu organik bileşikler benzen, toluen, etilbenzen, ksilen ve stiren'dir.

Uçucu organik bileşiklerin geri kazanımı ve arıtımıyla ilgili çok çeşitli yöntemler vardır. Bunlar; ısıtıl oksidasyon, katalitik oksidasyon, adsorbsiyon, absorpsiyon, biyofiltrasyon, membranlı ayırma, plazma teknolojisi vb.dir. Bu yöntemlerden ısıtıl oksidasyonu her türlü kirletici derişiminde uygulanabilir olsa da düşük derişimlerde çok yüksek debili bir atık gaz arıtımı 650-800°C'ye ısıtılacağından enerji gereksinimi fazladır. Atık sulardaki biyolojik arıtıma benzer olan biyofiltrasyon yönteminde ise mikroorganizmalar yardımıyla kirlilik bozundurulmaktadır. Ancak sisteme eklenmesi

gereken besin maddesi devamlı bir maliyet yaratacağından ekonomik açıdan uygun değildir. Membranlı ayırma prosesinde atık gazdaki kirleticiler yarı geçirgen bir membran yardımıyla ana akımdan daha derişik bir şekilde ayrılır ve hemen hemen her türlü kirleticiye uygulanabilir. Kloroflorokarbon (CFC), hidrofloroklorokarbon (HCFC), vinil klorür gibi değerli kimyasalların geri kazanılmasında endüstriyel uygulamaları olan membran prosesi, özellikle kirlilik yükü yüksek (>1000 ppm, tercihen >5000 ppm) atık gaz akımlarına uygulanır.

En ekonomik ve etkili yöntem ise uçucu organik bileşiklerin katı bir yüzeyde tutunarak birikmesiyle oluşturulan adsorpsiyon yöntemidir. Bu yöntemde adsorbent olarak en çok aktif karbon kullanılmaktadır [Kalafatoğlu vd., 2000].

Son günlerde renksiz, yüksek kaynama noktalı bir çözücü olan dimetilasetamit (DMAC) dikkat çekmektedir. Bu çözücü plastik sentetik fiber ve elektrolit üretim uygulamalarında, akrilik, elyaf, kauçuk, reçine ve kâğıt imalatında kullanılmaktadır [Turkchem Dergisi, 2013]. Hem gaz hem de sıvı formunda olabilen bu çözücü proseslerde reaksiyon katalizörü olarak görev yapar. Her yıl büyük miktarda DMAC atık gaz olarak gerek üretimi ve taşınımı, gerekse kullanımını ve bertarafı sırasında atmosfere salınır. Toksik olan bu madde hava kalitesini olumsuz etkilediği gibi insan sağlığını da tehlikeye atmaktadır. Ayrıca fabrikaların bacalarından atılan bu atık gaz etrafa da rahatsız edici bir koku vermektedir. Sıvı faz için geliştirilmiş birçok arıtma yöntemi olmasına karşın gaz fazı için geliştirilmiş arıtma sistemi sayısı oldukça kısıtlıdır. Gaz formunda bu atığın çevreye salınmasıyla ayrıca ciddi bir koku problemi ortaya çıkmaktadır. Bu kokunun giderilmesi için literatürde yapılmış olan çok fazla çalışma yoktur.

1.1. Tezin Amacı ve Kapsamı

Literatürde yapılan tüm çalışmaların ışığı altında bu tez çalışmasında DMAC'ın adsorpsiyon prosesiyle giderimine karşılık davranışının incelenmesi planlanmıştır. Bu kapsamda benzer çalışmalar da göz önüne alınarak aktif karbon ve silika jel olmak üzere iki farklı adsorbentin sonuçları araştırılırken günümüzde önemli sorunlardan biri olan uçucu organik bileşik emisyonunun kontrol altında tutulması, azaltılması ve geri kazanımı gibi konulara çözüm önerisi sunacaktır. Özellikle kâğıt ve tekstil endüstrilerinde dikkat çekici olan DMAC solventinin giderimi hakkında literatür de

kısıtlı sayıda araştırma yapılmış olması nedeniyle TÜBİTAK projesi kapsamında oluşturulan bu tez çalışması uygulanabilirliğinin de yüksek olmasıyla bilimsel olarak ileride gerçekleştirilecek olan çalışmalara kaynak olacaktır.

DMAC adsorpsiyonun için öncelikle aktif karbon adsorbenti kullanılmış daha sonra silika jel adsorbenti kullanılarak deney sonuçları karşılaştırılmıştır. Her iki adsorbent için de giderimi optimize edecek şartlar (akış hızı, sıcaklık, konsantasyon) ve geri kazanım potansiyeli belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar bu tez çalışmasında sunulmuştur.



2. LİTERATÜR ÖZETİ

2.1. Uçucu Organik Bileşikler (UOB)

Endüstriyel proseslerde kullanılan çoğu gaz kimyasallar atık veya yan ürün olarak açığa çıkar ve zehirlilikleri dolayısıyla hem insan sağlığı üzerinde hem de çevre kirlenmesi açısından olumsuz etkilere sahiptir. Bunların arasında yer alan ve büyük bir kısmını oluşturan uçucu organik bileşikler (UOB) genellikle inceltici, yağ giderici, temizleyici ve sıvı yakıtlarda çözücü olarak kullanılmaktadır [Kim vd., 2005]. Kaynakları ise kimyasal endüstriler, kâğıt üretim fabrikaları, gıda işleme, boya kurutma, metallerin yağdan arındırılması, tekstil fabrikaları ve elektronik aksam fabrikalarıdır. Yaygın olarak kullanılan bazı UOB'ler Tablo 2.1'de verilmiştir.

Tablo 2.1: Bazı Uçucu Organik Bileşikler.

Uçucu Organik Bileşik	Moleküler Formül	Moleküler Ağırlık (g/mol)
Asetaldehit	C ₂ H ₄ O	44,05
Aseton	C ₃ H ₆ O	58,08
Benzen	C ₆ H ₆	78,11
Etil Asetat	C ₄ H ₈ O ₂	88,11
Formaldehit	CH ₂ O	30,031
Hekzan	C ₆ H ₁₄	86,18
Heptan	C ₇ H ₁₆	100,21
İzopropil Alkol	C ₃ H ₈ O	60,1
Toluen	C ₆ H ₅ CH ₃	92,141
Vinil Klorür	C ₂ H ₃ Cl	62,498
Ksilen	C ₈ H ₁₀	106,16

İnsan ömrü boyunca ortalama 400–500 milyon litre hava solmaktadır. Dünyada her yıl hava kirliliğinden yaklaşık 3 milyon insan ölmektedir. Bu değer dünyadaki toplam ölüm vakalarının %5’ni oluşturmaktadır. Dolayısıyla temiz ve kirli hava insan sağlığı açısından oldukça önemlidir [Yurtseven, 2008]. UOB’lerin emisyonu ekipman ve boru sızıntılarından, depolama tanklarına yükleme kayıplarından ve proses tankı ventilasyon hattından kaynaklanabilmektedir. Çevresel açıdan ve insan sağlığı açısından baktığımız zaman gazların atmosfere salınımını kontrol altında tutmak gerekmektedir. Bu kapsamda oluşturulmuş bazı yasal düzenlemeler vardır. Türkiye’de uçucu organik bileşikler hakkında ilk düzenleme 1986 yılında yürürlüğe giren Hava Kalitesinin Korunması Yönetmeliği (HKKY) olup, bu yönetmelik ile havaya salınan organik gaz ve buhar emisyonlarına sınırlama getirilmiş ve bu yönetmelikte yer alan faaliyetleri gösteren tesisler emisyon iznine tabi tutulmuştur.

2.2. Uçucu Organik Bileşik Kaynakları

Uçucu organik bileşikler antropojenik kaynaklar ve doğal kaynaklar olmak üzere iki farklı sınıf halinde çeşitli kaynaklardan atmosfere salınırlar. Sıklıkla karşımıza çıkan antropojenik emisyon kaynaklarına örnek olarak trafik, yakma prosesleri, organik çözücüler ve kimya endüstrisi verilebilir. Kentleşmenin günümüzde giderek artması ve trafikteki araç sayısındaki artış sonucu uçucu organik bileşiğe neden olan karbonmonoksit (CO) ve azotoksit (NO_x) gibi kirleticilerin miktarın da artış meydana gelmektedir. Ayrıca taşıtlarda hava/yakıt oranının düşmesiyle ters orantılı olarak egzozdan çıkan hidrokarbon emisyonu artmaktadır. Fosil yakıtların yakılması ile de UOB emisyonunda ciddi bir artış gerçekleşmektedir. Yanma işlemi, içten yanmalı motorlardan çıkan egzoz gazı emisyonları ve yanmadan önce baca gazı emisyonları olmak üzere iki ana kategoriye ayrılabilir [Bek, 2015]. Bir başka kaynak olarak çok yaygın bir şekilde kullanılan çözücüler örnek verilebilir. Kuru temizleme, endüstriyel prosesler, kaplama işlemleri, baskı-boyama, reçine fabrikaları ve kauçuk prosesler bu çözücülerin kullanıldığı endüstrilerdir.

Atmosferik UOB emisyonlarının çoğu yeşil bitkilerden kaynaklanmaktadır [Heinsohn, 1999]. Özellikle ağaçlar, çeşitli bitkiler ve doğal orman yangınları bu emisyonlara neden olmaktadır. Bataklıklar, çürüyen gübre yığınları ve kanalizasyon gibi biyolojik aktiviteler de UOB’lerin doğal kaynakları arasında yer almaktadır. Tablo

2.3’de Amerika Birleşik Devletleri’nde sabit, hareketli ve biyolojik kaynaklardan bir yıl boyunca atmosfere yayılan UOB ve NO_x miktarı görülmektedir[Yılmaz, 2008].

Tablo 2.2: 1995 yılında Amerika’da sabit, hareketli ve biyolojik kaynaklardan bir yılda atmosfere yayılan kirleticilerin miktarı (milyon ton).

	Sabit Kaynaklar	Hareketli Kaynaklar	Biyolojik Kaynaklar
NO _x	11,2	10,6	2,6
UOB	14,5	8,4	32,7

2.3. Uçucu Organik Bileşiklerin Emisyon Mevzuatı

Diğer bölümlerde de bahsedildiği gibi uçucu organik bileşiklerin birçok farklı kaynağı bulunmakta ve hem insan sağlığı hem de çevreye olan etkisinden dolayı emisyonunu kontrol altında tutmak oldukça önemli bir konudur. Bu sebeple bazı yasal düzenlemeler oluşturulmuştur.

2.3.1. Türkiye’deki Yönetmelik

Türkiye’de uçucu organik bileşiklerin kontrolü hakkında üç farklı düzenleme bulunmaktadır. Bunlardan birincisi 2008 yılında yürürlüğe giren Hava Kalitesi Değerlendirme ve Yönetimi Yönetmeliği (HKDYY)’dir. Bu yönetmeliğin amacı, hava kirliliğinin çevre ve insan sağlığı üzerindeki zararlı etkilerini önlemek veya azaltmak için hava kalitesi hedeflerini tanımlamak ve oluşturmak aynı zamanda belirlenen bu tanımları esas alarak hava kalitesini değerlendirmek, hava kalitesinin iyi olduğu yerlerde mevcut durumu korumak, hava kalitesi ile ilgili yeterli bilgi toplamak ve uyarı eşikleri aracılığıyla halkın bilgilendirilmesini sağlamaktır. HKDYY’de, ozon öncül ölçümleri altında izlenecek önerilen UOB’lerin bir listesi vardır. Bu listede benzen, tolüen gibi otuza yakın uçucu organik bileşik yer almaktadır. Listedeki tüm bileşikler arasında, sadece benzenin, yıllık ortalama miktar için 5 µg / m³ olan bir konsantrasyon sınırı vardır. İkinci düzenleme olarak 2009 yılında zorunlu tutulan Sanayiden Kaynaklanan Hava Kirliliğinin Kontrolü Yönetmeliği’dir. Bu yönetmeliğin amacı, sanayi ve enerji üretim tesislerinin faaliyetleri sonucu atmosfere yayılan is, duman, toz, buhar ve aerosol halindeki emisyonları kontrol altına almaktır. Bu düzenlemede,

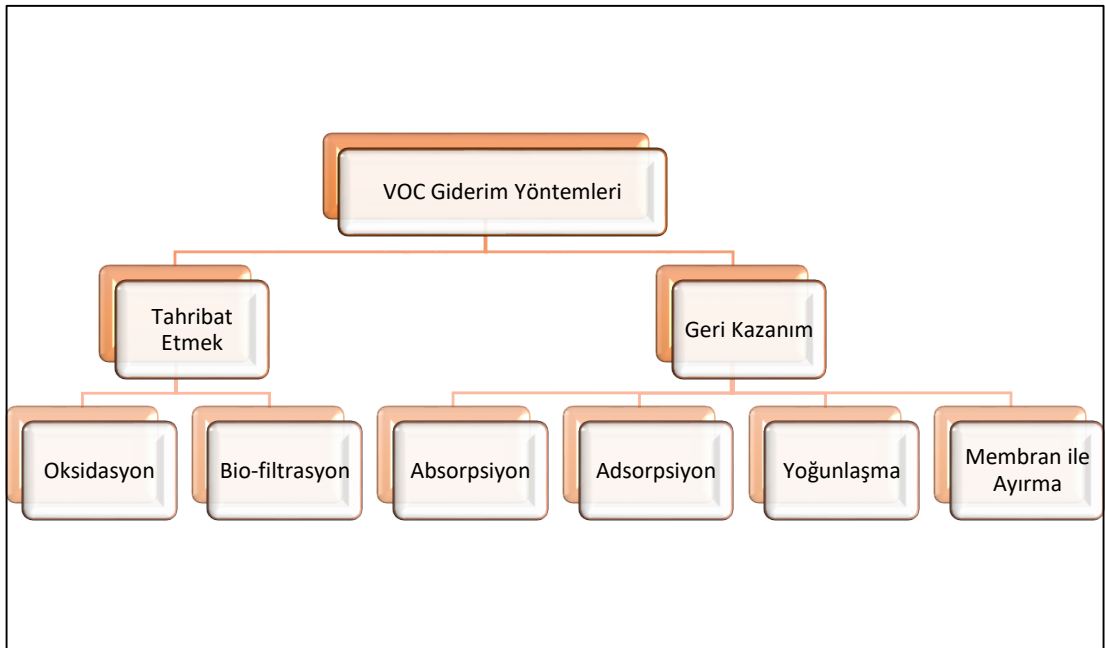
benzen, tolüen, ksilen ve etil benzen gibi bazı UOB'ler için sınır değerler belirlenmiştir. Üçüncü ve son düzenleme Egzoz Emisyonları Yönetmeliği'dir.

2.3.2. Çevre Koruma Ajansı (U.S. EPA)

Amerika Birleşik Devletleri'nde Temiz Hava Yasası, EPA'ya belirli hava kirlenici emisyonlarının sınırlandırılması konusunda yetki vermektedir. Devletler EPA'nın belirlemiş olduğu değerlerden daha katı yasalar koyabilirler ancak ortak olarak EPA'nın belirlediği limitlerden daha düşük olamaz. Uçucu organik bileşikler ozonun öncüleri olduklarından ozona ilişkin hava kalitesi standartları kapsamında düzenlenirler.

2.4. Uçucu Organik Bileşiklerin Giderim Yöntemleri

Uçucu organik bileşiklerin giderimi konusundaki çalışmalar gün geçtikçe önem kazanmakta ve iyileştirilmektedir. Atık gazların bileşenleri ve miktarları çok çeşitli olduğundan giderim yöntemleri de çok çeşitlidir. Şekil 2.2'de bu giderim yöntemleri listelenmiştir.



Şekil 2.1: UOB giderim yöntemleri.

Giderim yöntemlerinin seçiminde göz önünde bulundurulması gereken birçok parametre vardır. Gaz kirleticinin cinsi, miktarı, sıcaklığı ve debisi bu parametrelerden bazılarıdır. Arıtım sisteminin seçiminde önemli olan bir diğer konu da verimlilik, oluşabilecek atıklar ve yıllık işletme maliyetidir. Tablo 2.2’de uçucu organik bileşiklerin kontrolü için uygulanan teknikler ve bu tekniklere ait bazı olumlu-olumsuz durumlar verilmiştir [Khan ve Ghoshal, 2000].

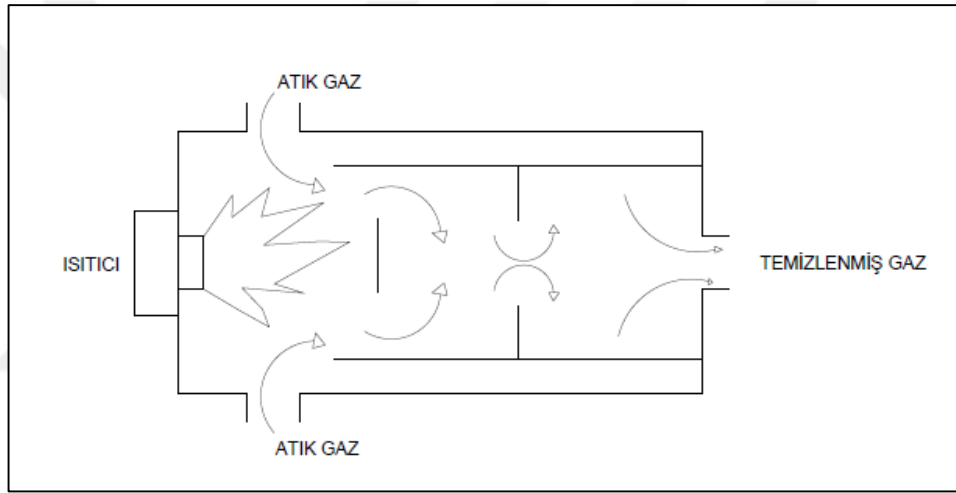


Tablo 2.3: Uçucu Organik Bileşik (UOB) kontrol teknikleri için analizler.

<i>Teknik</i>	<i>Uzaklaştırma Verimi, %</i>	<i>Üretilen İkincil Atık</i>	<i>Avantaj</i>	<i>Dezavantaj</i>
Termal Oksidasyon	95-99	<i>Yanma ürünleri</i>	<i>Max.%85'lik bir enerji geri kazanımı</i>	<i>Daha sonraki ilave kontrol teknikleri için halojenli bileşenlerin uzaklaştırılması gerekebilir.</i>
Katalitik Oksidasyon	90-98	<i>Yanma ürünleri</i>	<i>Max.%75'lik bir enerji geri kazanımı</i>	<i>İşletme şartları sistemin verimini etkiler. Belirli bileşikler katalizörü zehirleyebilir.</i>
BiyoFiltrasyon	60-95	<i>Biokütle</i>	<i>Başlangıç yatırımı daha düşük, zararlı ikincil kirletici azdır.</i>	<i>Kullanılan mikroorganizmalar organik bileşikler için seçicidir. Bu nedenle mikroorganizma kültür karışımına ihtiyaç vardır.</i>
Kondenzasyon	70-85	<i>Kondensat</i>	<i>Ürün geri kazanımı yıllık işletme maliyetini dengelenebilir.</i>	<i>33°C'nin üstünde kaynama noktasına sahip bileşikler için kullanılamaz. Bakım maliyeti yüksektir.</i>
Absorpsiyon	90-98	<i>Atık su</i>	<i>Ürün geri kazanımı yıllık işletme maliyetini dengeleyebilir.</i>	<i>UOB'lerin ön arıtımına ihtiyaç duyulabilir. Bakım maliyeti yüksektir.</i>
Adsorpsiyon (Aktif Karbon)	80-90	<i>Kullanılmış karbon ve bu karbondaki kalan organikler</i>	<i>Ürün geri kazanımı yıllık işletme maliyetini dengeleyebilir.</i>	<i>Neme karşı duyarlıdır. Keton aldehit gibi bazı bileşikler gözenekleri tıkayabilir.</i>
Adsorpsiyon (Zeolit)	80-90	<i>Birkaç döngüden sonra kullanılan zeolit ve bundaki kalan organikler</i>	<i>%90'lara varan relatif nemlerde yüksek etkinliğe sahiptir. Ürün geri kazanımı yıllık işletme maliyetini dengeleyebilir.</i>	<i>Zeolit maliyeti yüksektir.</i>
Membran Ayırma	90-99	<i>Kullanılmış membran</i>	<i>İleri arıtıma ihtiyaç duyulmaz. Ürün geri kazanımı yıllık işletme maliyetini dengeleyebilir.</i>	<i>Membranlar zor bulunur ve pahalıdır.</i>

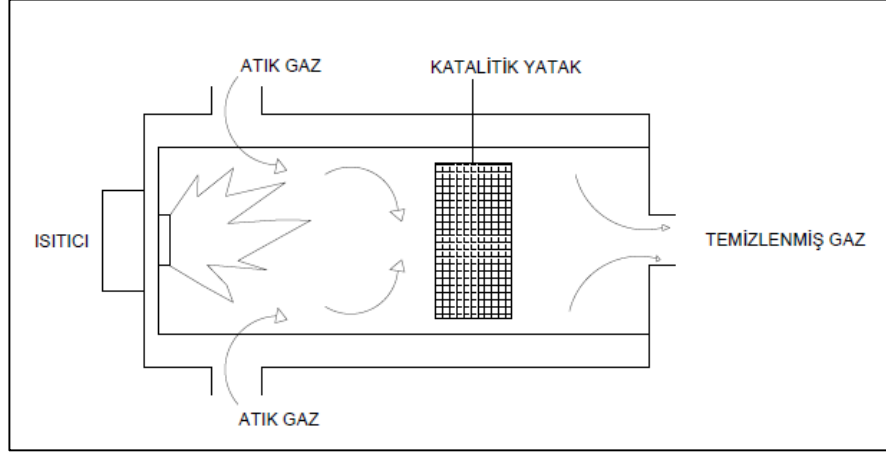
2.4.1. Oksidasyon

Uçucu organik bileşiklerin giderim yöntemlerinden biri olan oksidasyonda amaç çoğu yanıcı olan bu bileşikleri yakarak karbondioksite ve suya dönüştürmektir. Termal, katalitik ve biyolojik olarak farklı yöntemler izlenebilir. Termal yakma genellikle 750-1150°C civarı gerçekleşir. İyi bir termal UOB yakma işlemi için gerekli reaksiyon zamanının ve UOB-hava karışımının iyi ayarlanması gerekmektedir. Atık gaz içindeki UOB ne kadar yanıcı olursa olsun uçucu organik bileşiğin kendi konsantrasyonu yakma odasının ısısını 750-1150°C civarına yükseltmeye yetmez. Dolayısıyla sisteme dışarıdan yakıt beslemek gerekir.



Şekil 2.2: Termal yakma prosesinin şematik görünümü.

Termal olarak uçucu organik bileşiklerin yakılıp etkisiz hale getirilmesi işleminde özellikle fazla yakıt harcanması ve önemli bir hava kirleticisi olan NO_x oluşumunu engellemek için katalitik yakma prosesleri geliştirilmiştir. Katalitik yakma prosesleri 200-500°C arasında %90-98 verimle UOB'leri parçalayabilen proseslerdir [Yılmaz, 2008].

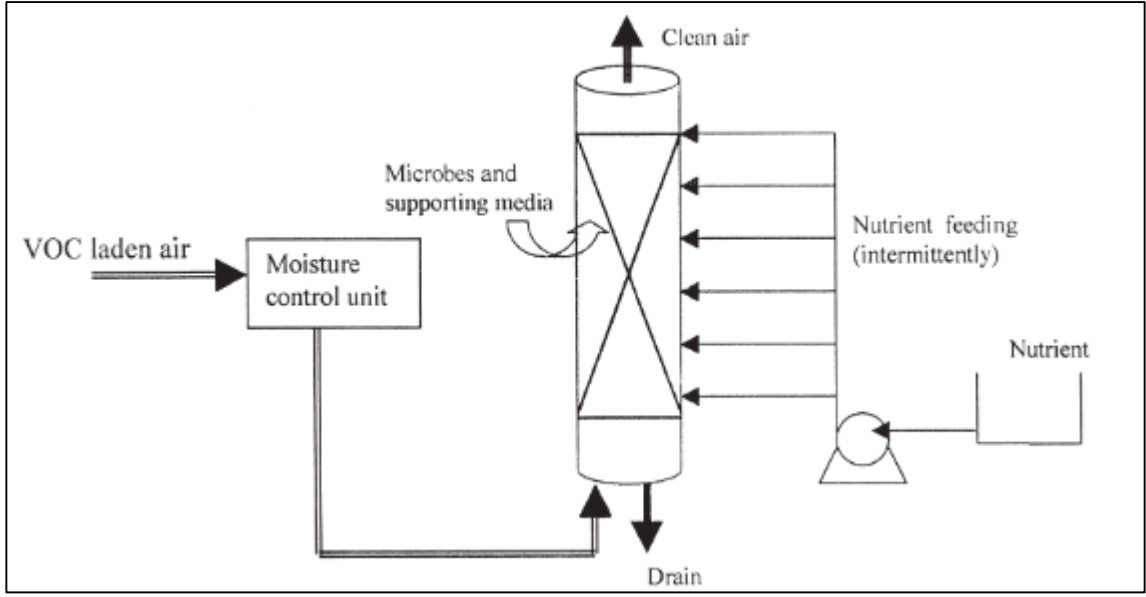


Şekil 2.3: Katalitik UOB yakma prosesinin şematik görünümü.

Barbara Maria Borges Ribeiro ve diğer arkadaşlarının yaptıkları bir çalışmada, pilot ölçekli bir katalitik reaktör geliştirmiş ve işletme parametrelerinin toluen yıkımı üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Katalizör olarak bal peteği şeklinde olan ticari otomotiv katalizörü [Umicore, model AFT] kullanılmış, giriş gazı elektrik dirençleri ile ısıtılmış ve çeşitli koşullar için %99'dan fazla toluen degradasyonu sağlanmıştır. Yapılan deneysel çalışmalar sonucu sıcaklık parametresinin en önemli süreç değişkeni olduğu kanısına varılmıştır. Tüm konsantrasyonlarda sıcaklık değerinin artırılması alıkonma süresinin azalmasına neden olmuştur. 800 ppmv'de, sıcaklık 543 K ila 633 K arasında değişirken alıkonma süresi sırasıyla 0,121 saniyeden 0,08 saniyeye düşmüştür. Geliştirilen katalitik reaktör, endüstriyel emisyon kaynaklarında yüksek bir uygulama potansiyeli gösteren UOB arıtımı için etkili olduğu kanıtlanmıştır.

2.4.2. Biyofiltrason

Biyofiltrasyon prosesi atık gazlardaki koku giderimi için tasarlanmış, etkili ve pahalı olmayan bir arıtım yöntemidir. Bu teknolojinin temelinde aerobik şartlar altında mikroorganizmaların organik kirleticileri suya, karbondioksite ve biyokütleyle dönüştürmesidir. Şekil 2.4'de bu sisteme ait temel bir şema verilmiştir [Khan, 2000].



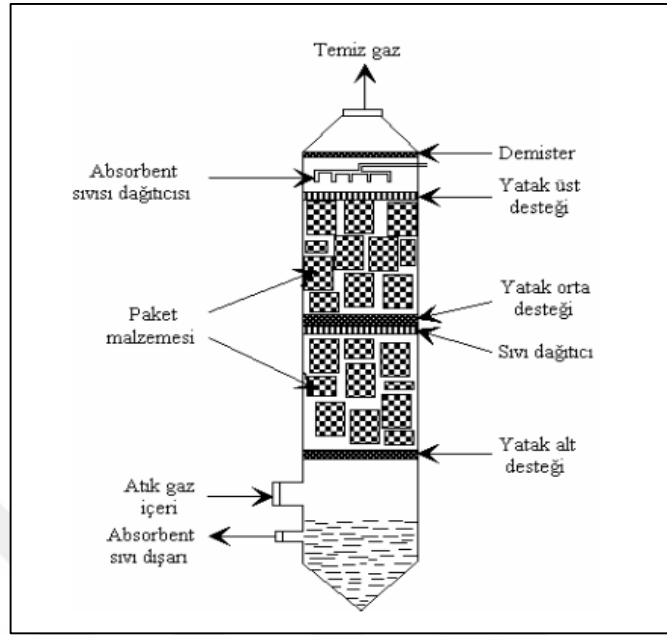
Şekil 2.4: Biyofiltrasyon sistemine ait basit bir şema.

Biyofiltre dolgulu bir yataktan oluşur ve bu yatak mikro-flora ile yoğun bir şekilde kaplanmış durumdadır. Atık gaz bu biyolojik tabakanın içerisinde geçirilip bakterilerce parçalanarak dolgu malzemesi üzerine adsorbe edilir. Bu süreçte çeşitli dolgu malzemeleri kullanılabilir. Genellikle turba, kompost, yaprak, ağaç kabuğu veya toprak gibi doğal organik maddeler tercih edilir [Lu, vd,2000]. Bruneel vd. (2008) yaptıkları derleme makalelerinde hidrofobik bileşiklerin arıtılmasının güç olduğundan bahsetmiştir. Çünkü dolgu malzemesinin üzerinde bulunan biyofilmden suya kütle transferi düşüktür. Bu transfer sınırlaması sorununun üzerinden gelmek için geleneksel olarak kompost ve ahşap takoz (kavela) içeren biyofiltreye hidrofobik olan silikon köpüğü ilave edilerek kullanılmıştır. Bruneel ve diğ. aseton, hekzan ve dimetilsülfidi arıtmak için boş yatak alıkonma süresi 57 dakika, giriş yükleme değeri $4,5 \text{ gm}^3/\text{sa}$ ve işletme süresi 180 gün olacak şekilde prosesi işletmişlerdir. Aseton, dimetilsülfid ve hekzanın en yüksek arıtma verimliliği sırasıyla %99, %80 ve %50'dir.

2.4.3. Absorpsiyon

Absorpsiyon belli bir sıvı içinde yüksek çözünürlüğe sahip bir gazın söz konusu sıvı içine gönderilerek sıvı tarafından tutulmasıdır. Bu süreçteki itici güç sıvı ile gaz arasındaki konsantrasyon farkıdır. Absorplanmak istenen gaz, içinde iyi çözündüğü düşük uçuculuğa sahip organik bir sıvı absorplayıcı olarak kullanılır. Ancak

absorplanmak istenen gaz suda iyi çözünen bir gaz ise direk olarak suyun içine absorplanabilir.



Şekil 2.5: Gaz absorpsiyonunda kullanılan bir paket kulenin şematik görünümü.

Biard vd. yaptıkları bir çalışmada asidik veya bazik fonksiyon grubu olmayan, kokulu atıkların içerisinde düşük konsantrasyonlarda karşılaşılan üç uçucu organik bileşiği (bütanol, bütiraldehit, metiletilketon) ıslak gaz yıkayıcı ile absorbe etmişlerdir. Bu gaz-sıvı kontaktörü gaz fazının yüksek hızlarda (>12 m/dk) geçtiği tel ızgara paket sisteminden oluşmaktadır. Bütanol gibi su için iyi bir afinite gösteren bileşikler için, 20 ms'lik bir gaz alıkonma süresine yol açan, 32 cm'lik bir kısa kontaktör uzunluğu için %90'a varan arıtım verimliliği ölçülmüştür. Bununla birlikte, suda zayıf bir şekilde çözünen bütiraldehitin giderim etkinliği ise %10 ile %30 arasında değişmektedir. Kütle transfer modellemesi gerçekleştirilmiş ve yüksüz bir çözelti ile beslenen birkaç küçük yıkayıcı ile çalışmanın, arıtma verimliliğini arttırmak için etkili olduğu vurgulanmıştır.

2.4.4. Adsorpsiyon

Adsorpsiyon, bir ara kesit veya yüzey üzerinde tutulmasını istediğimiz bir maddenin birikmesi ve buradaki derişiminin zamanla artması olarak tanımlanabilmektedir. Burada bahsedilen yüzey bir sıvı ile bir gaz, katı veya bir başka

sıvı arasındaki yüzey olabilir. Adsorpsiyonda adsorbe eden katı maddeye adsorplanan, adsorbent veya adsorban denilirken; katı yüzeyinde tutunan maddeye adsorplanan madde veya adsorbat denilmektedir. Adsorpsiyon olayı üç farklı şekilde gerçekleşebilir; fiziksel adsorpsiyon, kimyasal adsorpsiyon ve değişim adsorpsiyonu. Fiziksel ve kimyasal adsorpsiyonun başlıca ayırt edici özellikler Tablo 2.3’de yer almaktadır [Orbak, 2009].

Tablo 2.4: Fiziksel ve kimyasal adsorpsiyon arasındaki ayırt edici özellikleri.

Özellikler	Fiziksel Adsorpsiyon	Kimyasal Adsorpsiyon
Adsorpsiyon Isısı, kJ/mol	20-40	>80
Adsorpsiyon Hızı	273 K’ de Hızlı	273 K’de Yavaş
Desorpsiyon	Kolay	Zor
Spesifik Olma	Spesifik Değil	Çok Spesifik
Kaplama	Çoklu Tabaka	Tel Tabaka

Katı yüzey ile adsorplanan madde molekülleri arasındaki çekim kuvvetleri sonucu oluşan adsorpsiyon olayına fiziksel adsorpsiyon denir. Burada zayıf Van der Waals kuvvetleri etkindir ve işlem tersinirdir. Adsorplanan madde ile katı yüzey arasındaki fonksiyonel grupların kimyasal etkileşimi ile oluşan adsorpsiyona da kimyasal adsorpsiyon denir. Bu reaksiyon tersinmez ve tek tabakalıdır. Üçüncü adsorpsiyon çeşidi ise elektrostatik çekim kuvvetlerinin etkisi ile iyonların yüzeydeki yüklü bölgelere tutunmasıdır. Burada adsorplanan ile adsorplananın iyonik güçleri önemlidir.

Adsorpsiyon prosesinin dört basamakta gerçekleştiği kabul edilmektedir. İlk basamakta sıvı veya gaz fazdaki adsorbat molekülleri, adsorbentin dış tabakasına yani yüzeyine yönelirler ve bu basamak çok hızlı gerçekleşir. İkinci basamakta adsorbat molekülleri, adsorbentin gözeneklerine doğru difüzyonla başlarlar. Üçüncü basamakta adsorbat molekülleri, adsorbent gözenekleri arasındaki boşuklardan adsorpsiyonun gerçekleştiği yüzeye doğru difüzyonla başlarlar. Son basamakta, adsorbat molekülleri gözeneklerin yüzeyinde adsorplanırlar ve adsorpsiyon tamamlanır. Adsorpsiyon hızını genellikle ikinci veya üçüncü basamaklar belirlemektedir [Koçkaya, 2016].

Aktif karbon ilk ve en fazla kullanılan adsorbenttir. Fakat aktif karbon üzerine UOB adsorpsiyonunun bazı dezavantajları olduğunu görülmüştür. Bu dezavantajlar aktif karbonun yanma riski, bazı uçucu organik bileşiklerin adsorbent yüzeyinde polimerize olması ve adsorbentin porlarını tıkaması, aktif karbonun nem tutuculuğu ve aktif karbonun rejenerasyonu esnasında karşılaşılan bazı güçlüklerdir [Demet,2008].

İdeal bir adsorbentin bazı özelliklere sahip olması istenir. Bunlar;

- Adsorbentin hidrofobik olması,
- Yüksek tersinir adsorpsiyon kapasitesine sahip olması,
- Katalitik aktivitenin olmaması,
- Yüksek termal ve hidrotermal kararlılığa sahip olması ve
- Kolay rejenere edilebilir olmasıdır.

Adsorpsiyon izotermi, izotermal ve izobarik şartlar altında dengedeki adsorbe edilmiş maddenin X_{eq} [mg/mg] spesifik kütle miktarının, maddenin gaz fazındaki C_{in} [ppm] konsantrasyonunun bir fonksiyonu olarak tanımlanır. Farklı fiziksel varsayımlara dayanan yarı deneysel ya da tamamen deneysel nitelikte olan çeşitli izoterm modelleri vardır. Bunlar;

- Langmuir İzotermi ve
- Freundlich İzotermi'dir [Ligotski vd., 2018].

Langmuir izoterminde adsorpsiyon, adsorbat başlangıç konsantrasyonu ile birlikte lineer olarak artar. Maksimum doyma noktasında, yüzey tek tabaka ile kaplanmakta ve yüzeye adsorbe olmuş adsorbat miktarı sabit kalmaktadır. Langmuir izoterminde adsorpsiyon enerjisi üniformdur. Adsorpsiyon hızı adsorbat konsantrasyonu ve yüzey üzerinde bulunan boş adsorpsiyon alanları ile doğru orantılıdır. Desorpsiyon hızı ise yüzeydeki adsorplanmış molekül sayısı ile doğru orantılıdır [Şahan, 2007].

Langmuir eşitliği şu şekilde gösterilmektedir:

$$q_e = \frac{Q_{max} a_L C_e}{1 + a_L C_e} \quad (2.1)$$

$$q_e = \frac{K_L C_e}{1 + a_L C_e} \quad (2.2)$$

- C_e : Adsorpsiyon sonrası çözeltilde kalan maddenin konsantrasyonu (mg/L)
- q_e : Birim adsorban üzerinde adsorplanan madde miktarı (mg/g)
- K_L : Adsorbatın adsorplanma kapasitesine bağlı olan sabit (L/g)
- a_L : Adsorpsiyon enerjisine bağlı olan sabit (L/mg)
- Q_{max} : Adsorbanın maksimum adsorplama kapasitesi (mg/g)

Freundlich İzotermi, heterojen yüzeylerdeki adsorpsiyon için kullanılan deneysel olarak geliştirilmiş bir izotermdir (Gürellier, 2004). Aşağıdaki gibi gösterilir;

$$\frac{c_s}{q_m} = \left(\frac{c_g}{p_0}\right)^{\frac{1}{n}} \quad \text{ya da} \quad \frac{c_s}{q_m} = b c_g^{\frac{1}{n}} \quad \text{ya da} \quad c_s = K c_g^{\frac{1}{n}} \quad (2.3)$$

Burada q_m , maksimum adsorpsiyon kapasitesini (mg/g) gösterirken; P_0 , adsorpsiyon sıcaklığındaki adsorbanın basıncıdır. K ve n parametreleri genellikle sıcaklığa bağlıdır ve n 'nin büyük olması daha fazla doğrusal olmayan izotermi gösterir [Pei, 2011]. Bu eşitlik Langmuir eşitliğinden farklı olarak düşük konsantrasyonlarda Henry kanununu uygulamaz ve dengeden sonra tam sabit bir adsorbat değeri elde edemez. Bu da Freundlich izotermin en büyük dezavantajıdır [Şahan, 2007].

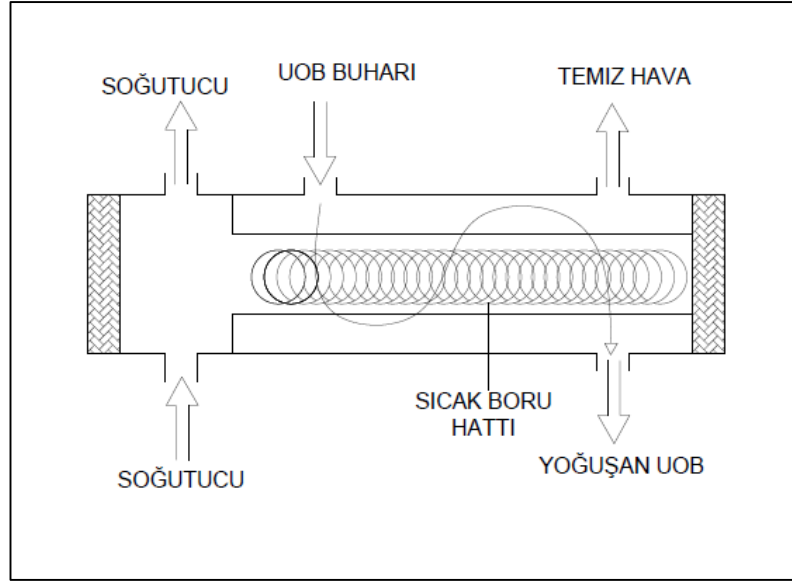
Yakout vd. yaptıkları bir çalışmada pirinç kabuğu aktif karbon kullanarak benzen, toluen, etil-benzen ve p-ksilen (BTEX)'in adsorpsiyon/desorpsiyona karşı davranışındaki farklılıklar incelenmiştir. BTEX bileşiklerinin sulu çözeltilerinden giderilmesinde pirinç kabuğu aktif karbonun oldukça etkili olduğu görülmüştür. Maksimum BTEX adsorpsiyonuna ve desorpsiyonuna ulaşmak için yaklaşık 48 saat gerekmektedir. Adsorpsiyon kinetiği verileri, Weber-Morris modeline daha yakın olduğunu ispatlarken, izoterm deneysel veriler, Freundlich modeline daha iyi uyduğu fark edilmiştir. BTEX adsorpsiyon/desorpsiyonunu kimyasal yapı, çözünürlük ve moleküler ağırlık etkilenmiştir. Yüklenen matris ve reaktif su arasındaki temastan

sonra yaklaşık %22 benzen, %33 tolüen, %58 etilbenzen ve %18.8 p-ksilen pirinç kabuğu aktif karbondan giderimi yapıldı.

Vohra(2015), yaptığı çalışmada hurma çekirdeğinden kimyasal aktivasyon işlemiyle granüler aktif karbon üreterek gaz fazındaki benzeni başarılı bir şekilde adsorbe etmiştir. Ham hurma çekirdeklerinden üretilen granüler aktif karbon numunelerindeki karbon içeriği sırasıyla %47 ve %82 olarak bulunmuştur. Ayrıca, aktif karbonun yüzey alanı 822 m²/g'dır. Benzen gazı konsantrasyonları 5,75 ila 23 ppmv, gaz akış hızları 1,1 ila 2,2 L/dk ve granüler aktif karbon yatak derinlikleri 1 ila 6 cm arasında değişmektedir. Sistemlerin kırılma eğrisi noktaları birkaç saatten birkaç güne kadar değişkenlik göstermektedir. Yüzey fonksiyonel gruplarının rolü ve adsorpsiyon işlemi sırasında benzen halkaları ile etkileşimleri de araştırıldı. Yapılan deneyler ile ham hurma çekirdeği ve üretilen granüler aktif karbon kıyaslanmıştır. Benzen gazı konsantrasyonunun, akış hızının ve yatak yüksekliğinin giderim verimine etkisi analizlenmiştir. Son olarak da yaygın olarak kullanılan granüler aktif karbon ve bu çalışma için üretilen aktif karbon karşılaştırılmıştır. Yapılan deneysel verilere göre çıkarılan sonuç, dinamik akış koşullarında gaz fazındaki benzen giderimi için hurma çekirdeğinden üretilen granüler aktif karbonun, benzen giderimi için yaygın olarak kullanılan spesifik yüzey alanı daha yüksek olan (1100 m²/g) Filtrasorb 400 GAC'dan bile daha başarılı olduğudur.

2.4.5. Yoğuşma

Yoğuşma prosesi, atık gaz akımlarında oldukça yüksek derişime sahip aynı zamanda yüksek kaynama noktalı (>38°C) uçucu organik bileşikleri gidermek için uygulanan bir prosestir. Düşük sıcaklıklarda ve/veya yüksek basınçlarda yoğuşturulan UOB'ler içeriğine bağlı olarak proseste yeniden kullanılabilir, satılabilir veya enerjilerinden yararlanmak için yakılabilirler.

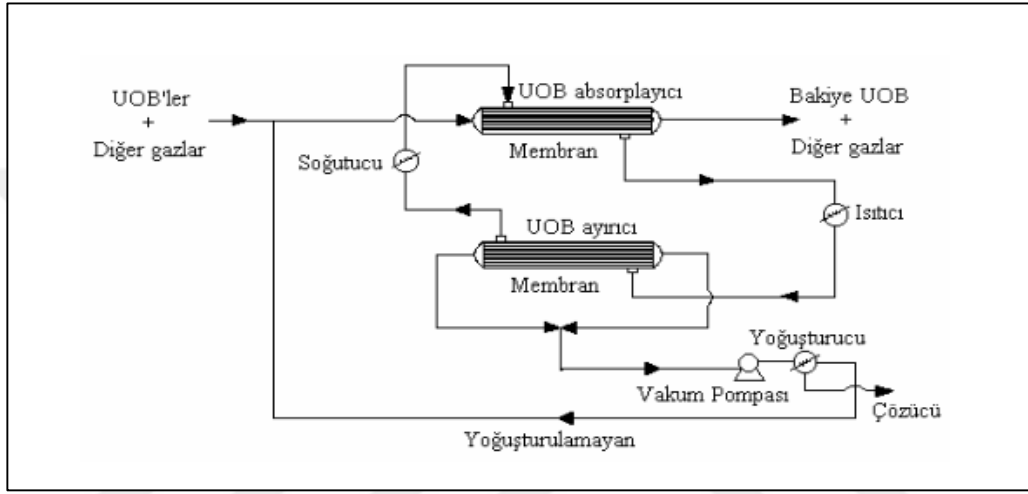


Şekil 2.6: Uçucu organik bileşiklerin yoğuşturulması.

Temelde bir ısı değiştiriciden meydana gelen bu süreçte soğuk akışkan devamlı olarak sistemde dolaşmaktadır ve UOB içeren atık gaz başka bir girişten içeriye verilerek soğuk akışkanın aktığı boruların dış yüzeyinde yoğuşarak yer çekimi etkisiyle aşağıya doğru akar ve çıkış hattından dışarıya alınır. Bir başka çıkış hattından temiz hava dışarıya verilir. Bu metod 500 ppmv'nin üzerindeki uçucu organik bileşiklerin konsantrasyonlarında tercih edilirken sistem verimi %50-90 arasında değişmektedir [Yılmaz,2008]. Bouchra Belaisaoui ve diğer arkadaşlarının yaptıkları bir çalışmada bağımsız bir yoğuşma prosesinin enerji verimliliğinin (geri kazanılan uçucu organik bileşiklerin kilogram başına ihtiyaç duyulan toplam elektrik enerjisi) sistematik analizi, membran konsantrasyonu+yoğuşmaya dayanan bir hibrit proses ile karşılaştırılmıştır. Bağımsız yoğuşma ile yüksek kaynama noktalı UOB (toluen, oktan, aseton) için daha fazla enerji tasarrufu sağlandığını gösterilirken, hibrit sistem ile orta ila düşük kaynama noktalı UOB (propan, etan, etilen) için enerji verimliliğinde önemli bir iyileşme elde edilmiştir.

2.4.6. Membran

Membran prosesinde atık gazdaki kirleticiler veya uzaklaştırmak istediğimiz diğer bileşikler yarı geçirgen bir membran yardımıyla ana akımdan daha derişik bir şekilde ayrılır. Bu yöntem neredeyse her türlü kirletici için uygulaması olağan bir yöntemdir. Genellikle kirlilik yükü >1000 ppm, tercihen >5000 ppm olan endüstriyel atık gaz akımlarında uygulanır.



Şekil 2.7: Membran proses ile atık gazdan UOB giderimi.

Süreç boyunca membranın bir yüzünden gidermek istediğimiz uçucu organik bileşikleri iyi absorplayabilecek uçucu olmayan bir sıvı akarken diğer yüzünde atık gaz akmaktadır. Absorplayacak sıvı yerine vakum uygulaması da yapılabilir. Uçucu organik bileşikle doygunlaşmış absorpsiyon sıvısı ısıtılarak içindeki uçucu organik bileşik buharlaştırılarak sıvıdan ayrılır ve daha sonra yoğusturularak yeniden kazanılır. Sıvı ise soğutulduktan sonra tekrar geri devir yaptırılır. Li Rui vd. yaptıkları çalışmada membran bazlı gaz absorpsiyonu işlemi, C_6H_6/N_2 karışımına dayalı uçucu organik bileşiklerin uzaklaştırılması için değerlendirilmiştir. Benzenin (C_6H_6) C_6H_6/N_2 karışımından absorpsiyonu, bir hidrofobik polipropilen içi boş fiber membran kontaktörü ve emici olarak N-formil morfolinin (NFM) sulu çözeltisi kullanılarak araştırılmıştır. Çeşitli faktörlerin genel kütle transfer katsayısı üzerindeki etkileri araştırılmış ve deney sonuçları, C_6H_6 'nın uzaklaştırılma verimliliğinin, çalışılan sistemde %99,5'e ulaşabileceği kanısına varılmıştır. Tahmin edilen değerler ve deneysel değerler arasındaki ortalama hata %7,9 olmuştur. Ek olarak, VOC'lerin

uzaklaştırılması için paketlenmiş kolonlar da karşılaştırma için denenmiştir. Geleneksel tekniklerle karşılaştırıldığında, membran gaz absorpsiyonu işlemi yüksek spesifik yüzey alanı sunmaktadır ve bu nedenle, aynı çalışma koşulları altında hesaplanan transfer ünitesi yüksekliği önemli ölçüde daha küçük olmaktadır.

2.5. Dimetilasetamid (DMAC)

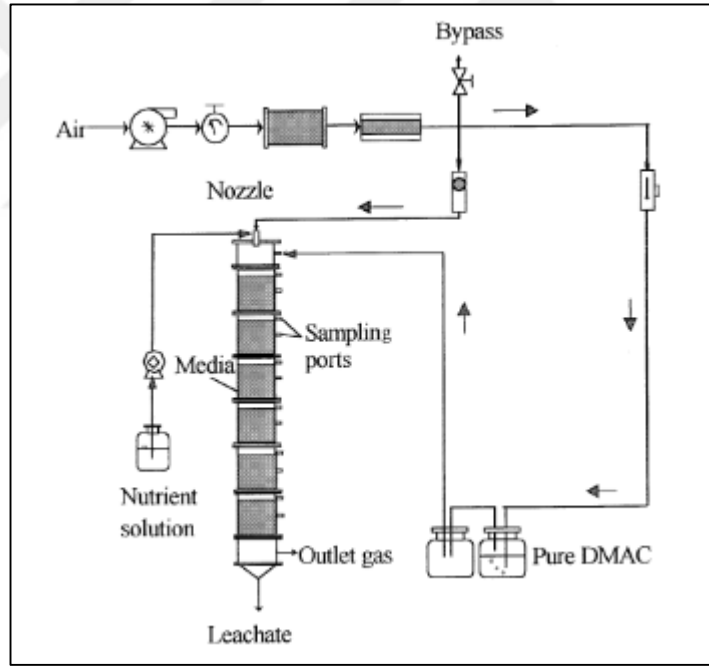
Dimetilasetamid (DMAC), polar, renksiz ve higroskopik (nem çeken) bir sıvıdır. Agrokimyasallar, farmasötikler, sentetik elyaflar, kaplamalar ve boya sıyrıcılar gibi birçok uygulamada yaygın olarak kullanılan iyi bir endüstriyel çözücüdür. Düşük sıcaklıklarda bile kolayca buharlaşabilme özelliğine sahip olmasından dolayı depolamada, kullanım sırasında ve sızıntılar sonucu rahatça ortam havasına karışabilen bu çözücü, çevre ve insan sağlığı açısından büyük öneme sahiptir. Çünkü DMAC oral, dermal ve inhalasyon sonucu insanlar tarafından kolayca emilir. DMAC maruziyeti esas olarak karaciğer toksisitesine, cilt tahrişine, baş ağrısına, iştahı, yorgunluğa ve hepatik hasara neden olur. DMAC'ın fiziksel ve kimyasal özellikleri Tablo 2.5 [Taminco N.V., 2008]'de verilmiştir.

Tablo 2.5: DMAC fiziksel ve kimyasal özellikleri.

Özellik	Değer	Birim
Renk	Renksiz	-
Koku	Amonyak benzeri	-
Moleküler Formül	C_4H_9NO	
Moleküler Ağırlık	87,12	g/mol
Kaynama Noktası	166	°C
Donma Noktası	-20	°C
Özgül Ağırlık ; 20°C	942	kg/m ³
40°C	923	kg/m ³
Buhar Basıncı ; 20°C	0,178	kPa
40°C	0,660	kPa
60°C	2,016	kPa
Tutuşma Noktası	490	°C
Yoğunluk ; 15,6 °C	0,9448	-

2.6. Dimetilasetamid'in Giderim Yöntemleri

Dimetilasetamid'in giderimi hakkında literatürde çok az sayıda çalışma mevcuttur. Bu çalışmalardan bir tanesi olan Lu vd. nin yapmış oldukları damlatma yataklı biyofiltre (TBAB) ile gaz fazındaki atık dimetilasetamitin arıtılmasıdır. Deneysel olan bu araştırmada giderim verimi için farklı akış hızları ve giriş konsantrasyonları değerlendirilmiştir. Kararlı hal durumunda DMAC ayırma kapasitesi artmış ancak yükleme yükü arttıkça giderim verimi azalmıştır. Sırasıyla 20,2 ve 34,5 g DMAC/m³/sa giriş yüklemeleri için %90 ve %80'den daha fazla DMAC giderim verimi elde edilmiştir. Damlatma yataklı biyofiltre düşük ve orta dereceli yüklemelerle DMAC emisyonunu kontrol etmek için etkili bir yöntem olarak görülmektedir. Laboratuvar ölçekli bir damlatma yataklı biyofiltre inşa edilmiştir. Şekil 2.8'de deney düzeneği gösterilmiştir.



Şekil 2.8: DMAC atık gazının kontrolü için damlatma yatağı hava biyofiltresinin şematik diyagramı.

Bu yatak cam malzemeden elde edilmiş ve 10 cm'lik iç çapa sahip 15 cm uzunluğunda altı bölümden meydana gelmektedir. Biyofiltrenin üst kısmında DMAC atık gaz girişi ve püskürtme için boşluk bırakıldı. Sızıntı içinde alt kısmında bir bölüm ayrıldı. Biyofiltre içerisindeki ambalaj malzemesi ortalama 20,34 mikrometre gözenek büyüklüğüne ve 0,66 m²/g yüzey alanına sahip kömür

partiküldür. DMAC atık gazının ve biyoreaktörün sıcaklığını $25\pm 2^{\circ}\text{C}$ de tutabilmek için TBAB sıcaklık kontrol kutusunun içerisine yerleştirilmiştir. Basınçlı hava ilk olarak nemden uzaklaştırılmak için hava kurutucu silika jelden geçirilip daha sonra partikül maddelerden uzaklaştırılmak için filtrasyon aletinden geçirilmiştir. Saflaştırma işleminden sonra 2,4 mL/dk hızla bir besin çözeltisi ile büyük hava akımı karıştırılarak biyofiltre sistemine yukarıdan verilirken; kararlı DMAC buharı üretmek için küçük hava akımı sırasıyla saf DMAC (%99) ve buharlaştırılmış DMAC içeren iki cam şişeden geçirilmiştir. DMAC buharı daha sonra ana boşluktaki ana hava akımı ile karıştırılmış ve aşağıya doğru akan akışlarla yatağa geçirilmiştir. Besin çözeltisi mikroorganizmaların büyümesi için hayati önem taşıyan vitamin ve inorganik tuzları içermesinin yanı sıra pH değerini 7 ± 8 de tutabilmek için pH tamponu olarak NaHCO_3 içermektedir. Aktif çamur 1,02 kg/L yoğunluğa, 7000 mg/L'lik askıda katı madde (SS) ve 4700 mg/L'lik uçucu askıda katı madde (VSS) içeriğine sahip bir atık su arıtma tesisinin ikincil temizleyicisinden elde edilmiştir.

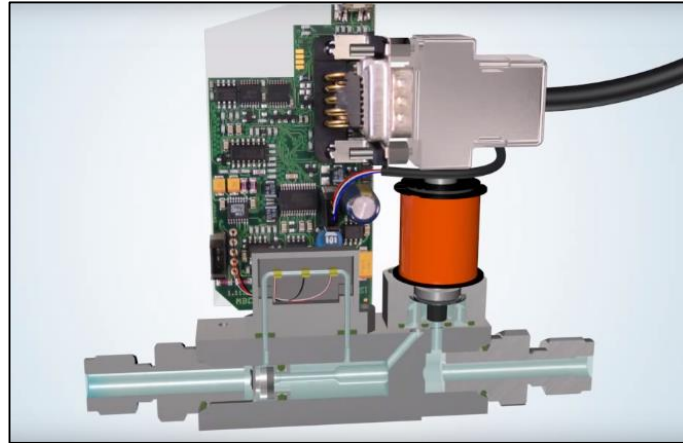
3. GEREÇ VE YÖNTEM

3.1. Kütle Akış Ölçer (MFM)



Şekil 3.1: a) Kütle akış ölçer görünümü, b) Dijital Ekranlı görünümü.

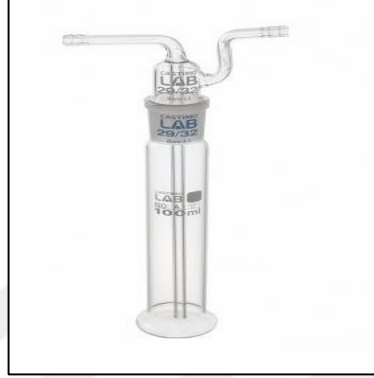
DeneySEL düzenekte Bronkhorst serisine ait El-Flow Select cihazı gaz akışını ölçmek amacıyla kullanılmıştır. Bu cihaz basınç ve sıcaklık değişimlerinden bağımsız olarak 700 bara kadar gaz akışlarını ölçmek için tasarlanmış bir cihazdır. Çalışma şartlarına uygun olarak 0-5 L/dk arasında ölçüm yapabilen model tercih edilmiştir. Ana hava hattından sağlanan hava cihaz yardımıyla sabit hızda tutularak hem seyreltme işlemi gerçekleştirilmiş hem de yıkama şişesinde bulunan çözücü gaz fazına geçirilmiştir.



Şekil 3.2: Kütle akış ölçerin çalışma prensibinin görünümü.

3.2. Gaz Yıkama Şişesi

Gaz yıkama şişesi sıvıların içerisinde gaz geçirilmesini sağlayan cam şişelerdir. Gazların temizlenmesi, gazlarla sıvıların reaksiyonunun sağlanması, belli bir gazın belli bir sıvı içinde tutulması ya da belirli bir sıvının gaz fazına geçirilmesi gibi işlemlerde kullanılır.



Şekil 3.3: Gaz yıkama şişesinin görünümü.

Deneysel düzende yıkama şişesinin içerisine bir miktar saf DMAC konulmuş ve içerisine sabit hızda hava verilerek DMAC'in belirli bir doygunluğa ulaşmasının ardından gaz fazında bu şişenin içerisinden ayrılması gerçekleştirilmiştir. Çalışma boyunca 100 mL ve 250 mL'lik yıkama şişesi kullanılmıştır.

3.3. Su Banyosu

Laboratuvarlarda temel bir cihaz olarak kullanılan su banyosu içerisine, sıvı halde bir çözelti veya saf çözücü koyarak, kontrol ve işletim elemanlarının bulunduğu pano üzerinden istenilen sıcaklık ayarlanıp numune sıcaklığı sabitlenir.

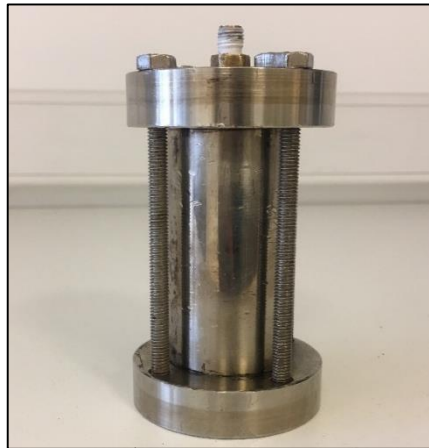


Şekil 3.4: Su banyosunun görünümü.

Yıkama şişesi içerisine konulan DMAC su banyosuna yerleştirilmiş ve deneysel parametrelere uygun olarak daha önceden belirlenen sıcaklık değerleriyle çalışılmıştır. Farklı sıcaklıklarda DMAC buharlaştırılarak gaz fazında içerisi aktif karbon veya silika jel ile dolu olan kolona adsorpsiyon işlemi için gönderilmiştir.

3.4. Adsorpsiyon Kolonu

Adsorpsiyon işlemi için kullanılan kolon 3 cm iç çapına, 4 cm dış çapına ve 12 cm yüksekliğe sahip sıcaklık ve darbelere karşı dayanıklı çelik malzemedен yapılmış bir kolondur. Kolon boyutlarına karar verirken literatürde yapılmış olan diğer çalışmalar yol gösterici olmuştur. Kolon bir adet silindir şeklinde gövde ve iki adet alt ve üst yuvarlak tabladan oluşmaktadır. Hava kaçağının önlenmesi açısından alt-üst tablalara viton contalar yerleştirilmiştir.

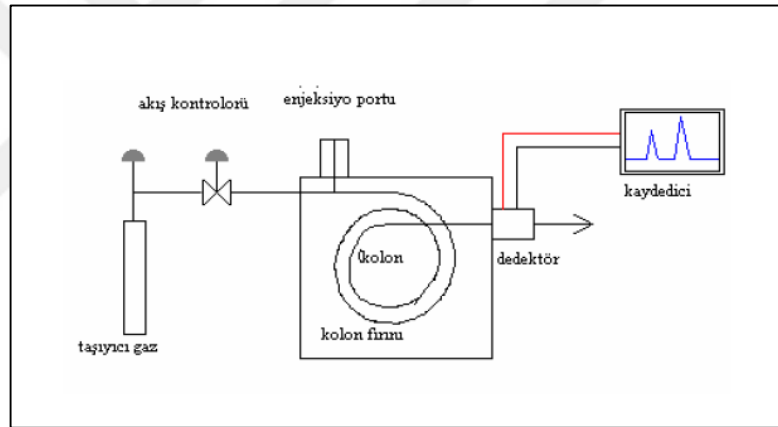


Şekil 3.5: Çelik kolon görüntüsü.

Kolonun içi tamamen dolacak Şekilde yaklaşık olarak 40 gram aktif karbon veya silika jel ile doldurulmuŐtur. Silindirik olan gövdenin alt ve st kısmına elik filtre kesilip yerleştirilmiş ve bu sayede aktif karbon veya silika jelin hava akışı ile kolon dıŐına taşınımı engellenmiŐtir.

3.5. Gaz Kromatografi (GC)

Gaz kromatografisi, uçucu organik bileşiklerin adsorpsiyon ve daŐılım farkına göre birbirlerinden ayrılmasını saŐlayan kimyasal analiz enŐtrmanıdır. Sabit faz ve mobil fazdan oluşan bu cihaz uçucu olan ya da uçucu hale getirilebilen numunelerin analizleri için kullanıma uygundur. Gaz kromatografi cihazının Şematik görünümü Şekil 3.6 de verilmiştir.



Şekil 3.6: Gaz kromatografi cihazının Şematik görünümü.

Sabit faz çok ince bir tabaka olup kolonun içi kısmında kaplıdır ve bu yüzey sayesinde absorpsiyon işlemi gerçekleşir. Azot, argon ve helyum gibi inert gazlardan olabilen sabit bir basınç ve akış hızına sahip mobil faz, analizi yapılmak istenen numuneyi kolon içerisinde taŐımaya yarar. GC sistemi;

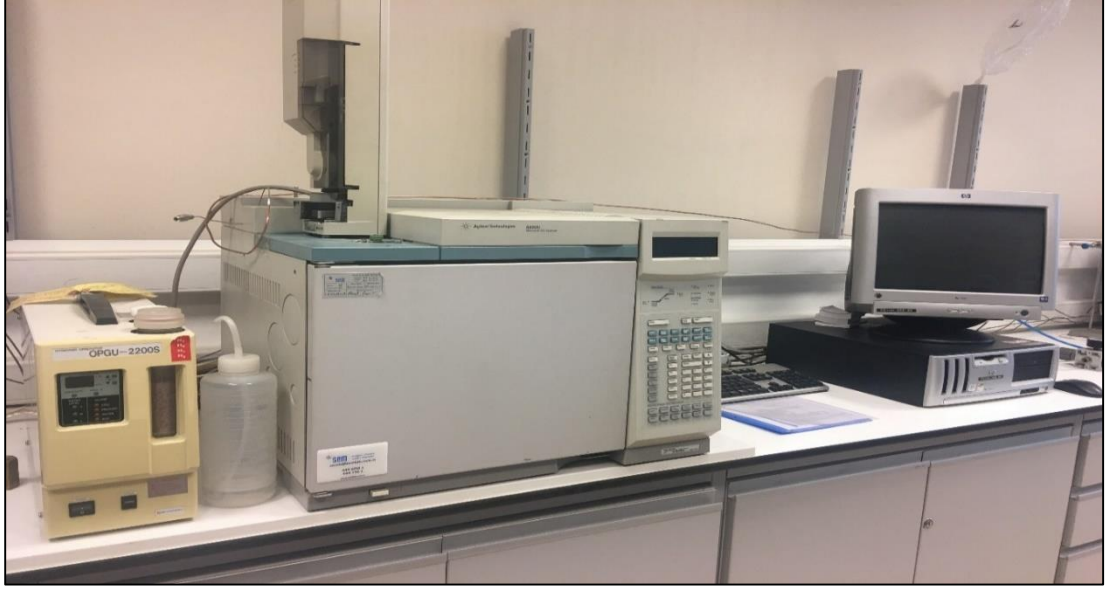
- taŐıyıcı gaz,
- enjeksiyon nitesi,
- kolon, dedektör ve
- bilgisayardan oluşur.

İki tür kolon vardır; dolgulu ve kapiler kolon. Kolonların boyları 2-60 m veya daha büyük olabilirken yapıldığı malzeme paslanmaz çelik, cam, alüminyum ve bakır olabilir. Kapiler kolonlar, uzun boyları, küçük çapları ve düşük miktarda örnekle çalışılabilmelerinden dolayı dolgulu kolonlara göre daha çok kullanım alanı bulur. Numune kolona mümkün olan en küçük hacimde ve en kısa sürede verilmelidir. Otomatik enjektörlü cihazlarda split ve splitless enjeksiyon yapmak mümkündür. Splitless; numune seyreltilmeden enjektöre çekilen kısmın tamamı sisteme verilir. Split; numune belli oranda seyreltilip verilir. Gaz kromatografide kullanılan bazı dedektörler;

- alev iyonlaşma dedektörü (FID),
- kütle dedektörü (MS),
- termo iyonik dedektör (TID),
- elektron yakalama dedektörü (ECD) ve
- termal iletkenlik dedektörü (TCD)'dir.

Cihaza verilecek numunenin özelliğine göre dedektör tercihinde farklılıklar olabilmektedir. Bu cihaz ilaç sanayisinde, uçucu yağların bileşimi ve miktarının saptanmasında, hava kirliliği analizlerinde ve petrol endüstrisinde oldukça sık kullanılmaktadır.

Proje kapsamında yapmış olduğumuz deneysel çalışmalar sırasında kullanılan GC cihazı Agilent markasına ait 6890N model bir cihazdır. Şekil 3.7'de GC cihazına ait bir fotoğraf yer alırken Tablo 3.1'de de cihazın kullanım parametreleri yer almaktadır.



Şekil 3.7: Gaz kromatografi cihazının fotoğrafı.

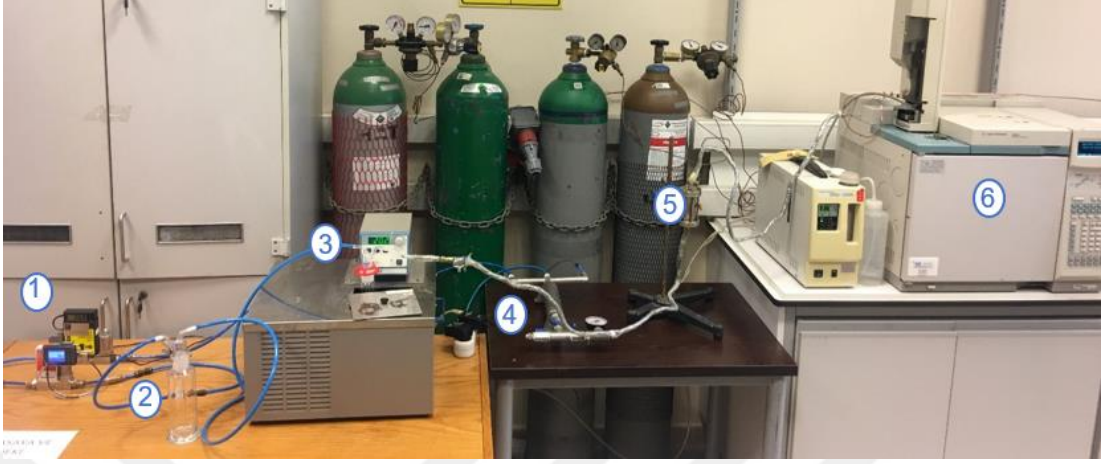
Tablo 3.1: GC kullanım parametreleri.

Kolon Markası	<i>DB_WAX</i>
Kolon Boyutları	<i>30 m × 53 µm × 0,50 µm</i>
Inlet (Giriş) Sıcaklığı	<i>250°C</i>
Inlet Modu	<i>Splitless</i>
Oven (Fırın) Sıcaklığı	<i>160°C</i>
Aux Sıcaklığı	<i>160°C</i>
Dedektör Sıcaklığı	<i>250°C</i>
Dedektör Tipi	<i>Alev İyonizasyon (FID)</i>

3.6. Deneysel Düzenek

Proje kapsamında hazırlanan deneysel düzeneğin çalışma prensibi şu şekildedir; hava debisini MFM yardımıyla istediğimiz hızda ayarlayarak öncelikle boş bir gaz yıkama şişesine oradan da içerisi DMAC dolu olan ve su banyosunda sıcaklığı sabit tutulan gaz yıkama şişesine verilir. Burada belirli bir doygunluğa ulaştıktan sonra gaz fazına geçen DMAC içerisi aktif karbon ile dolu olan kolona gider ve burada adsorplanır. Kolon çıkışı direk olarak valf bölümünden GC'ye bağlıdır ve online

olarak saat başı analiz yapılarak DMAC pikleri izlenir ve konsantrasyon değerleriyle giderimi takip edilir. Şekil 3.8’de deney düzeneğine ait bir fotoğraf yer almaktadır.



Şekil 3.8: Deney düzeneğine ait bir fotoğraf. 1: Kütle Akış Ölçer (MFM), 2: Gaz Yıkama Şişesi, 3: Su Banyosu, 4: Karıştırıcı, 5: Adsorpsiyon Kolonu, 6: Gaz Kromatografi Cihazı (GC).

MFM ile DMAC debisini istediğimiz gibi ayarlayarak farklı hızlarda adsorpsiyon işleminin nasıl reaksiyon gösterdiği izlenebilmektedir. Su banyosu sıcaklığı ile DMAC’in buhar basıncından faydalanarak farklı miktarlarda DMAC buharlaştırıp kolondaki adsorpsiyon işlemine katkısı takip edilebilmektedir. Ayrıca karıştırıcı yardımı ile bir girişinden hava diğer girişinden gaz fazındaki DMAC verilerek burada hava ile seyretme işlemi yapılmış ve farklı konsantrasyonlarda aktif karbon adsorpsiyonu değerlendirilmiştir. Proje kapsamında iki farklı adsorbent ile DMAC giderimi denenmiş, bu iki farklı adsorbent için en uygun çalışma koşulları belirlenmeye çalışılmıştır. Bunun için deneysel bir matris oluşturulmuştur. Tablo 3.2’de bu matrise yer verilmiştir.

Tablo 3.2: Deneysel matris.

Adsorpsiyon	Sıcaklığın Adsorpsiyona Etkisi	2 Adsorbent x 3 Sıcaklık x 1 Konsantrasyon x 1 Debi
	Gaz Debisinin Adsorpsiyona Etkisi	2 Adsorbent x 1 Sıcaklık x 1 Konsantrasyon x 3 Debi
	Başlangıç Gaz Konsantrasyonunun Etkisi	2 Adsorbent x 1 Sıcaklık x 3 Konsantrasyon x 1 Debi
Rejenerasyon	Rejenerasyon Sıcaklığının Etkisi	2 Adsorbent x 3 Sıcaklık x 1 Debi
	Rejenerasyon Havaasının Etkisi	2 Adsorbent x 1 Sıcaklık x 3 Debi

4. BULGURLAR

4.1. DMAC'in Aktif Karbon ile Adsorpsiyonu

Proje kapsamında adsorpsiyon işlemi için adsorbent olarak kullanılan aktif karbon TEKKİM markasına ait granüler aktif karbondur. Tablo 4.1'de bu aktif karbonun özellikleri yer almaktadır.

Tablo 4.1: Aktif karbonun özellikleri.

Spesifikasyon	Yaklaşık Değer	Birim
İyot Sayısı	≥ 950	mg/gr
Metilen Blue	≥ 200	mg/gr
Yığın Yoğunluğu	~510	gr/l
Islanabilirlik	$\geq 99,5$	%
Nem	$\leq 2,0$	%
pH	7,0-8,0,	-
Partikül Boyut Aralığı	0,60-2,36	mm
Etkili Boyut	0,8	mm
BET Yüzey alanı	900	m ² /gr
Yatak Yüksekliği	8	cm

DMAC'in aktif karbon ile adsorpsiyonu çalışmalarında farklı sıcaklık, hız ve konsantrasyonun etkileri çalışılmıştır. Aktif karbonun desorpsiyonu sıcak hava ile gerçekleştirilememiştir. Bu nedenle tüm çalışmalarda taze aktif karbon kolona yerleştirilerek çalışmalar yürütülmüştür. Kolon paketlemesi yapılırken yaklaşık olarak 40,2 gram aktif karbon kullanılmıştır.

Gaz fazında ölçülen DMAC konsantrasyonları ile teorik olarak hesaplanan DMAC konsantrasyonları karşılaştırılmıştır. DMAC'in 20°C'de buhar basıncı 0,178 kPa olarak raporlanmıştır (Taminco N.V., 2008). Buna göre, 20°C'de DMAC'in gaz fazındaki denge konsantrasyonu aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

$$[\text{DMAC}] = \frac{0,178}{8,3144621 \times 10^{-3} \times (273 + 20)} = 7,31 \times 10^{-5} \frac{\text{mol}}{\text{L}} = 6,37 \frac{\text{mg}}{\text{L}} \quad (4.1)$$

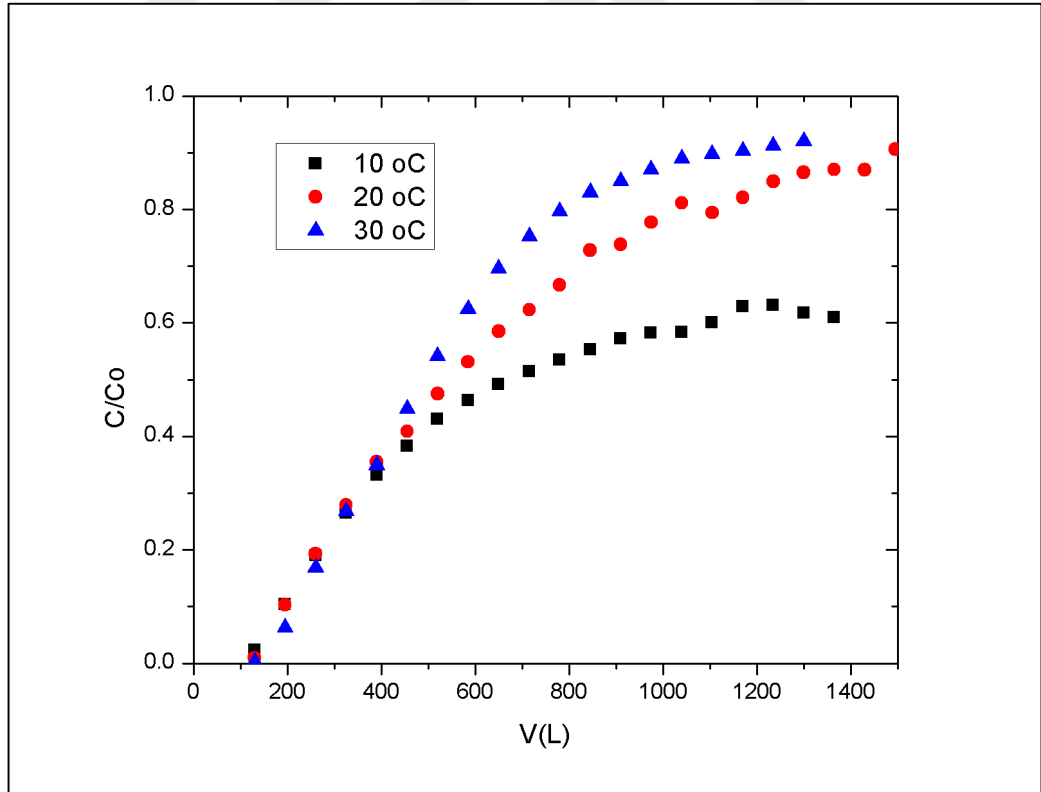
Benzer şekilde 30°C'deki DMAC'in gaz fazındaki denge konsantrasyonu,

$$[\text{DMAC}] = \frac{0,393}{8,3144621 \times 10^{-3} \times (273 + 20)} = 1,56 \times 10^{-4} \frac{\text{mol}}{\text{L}} = 13,59 \frac{\text{mg}}{\text{L}} \quad (4.2)$$

olarak hesaplanabilir.

4.1.1. Sıcaklık Etkisi

Yapılan ilk çalışmalardan birisi aktif karbon ile adsorpsiyon işleminde sıcaklığın etkisi olmuştur. Hava debisi 1000 mL/dk olarak sabit tutularak sıcaklığın DMAC adsorpsiyonuna etkisi üç farklı sıcaklıkta (10, 20 ve 30°C) çalışılmış ve sonuçlar Şekil 4.1 'de gösterilmiştir.



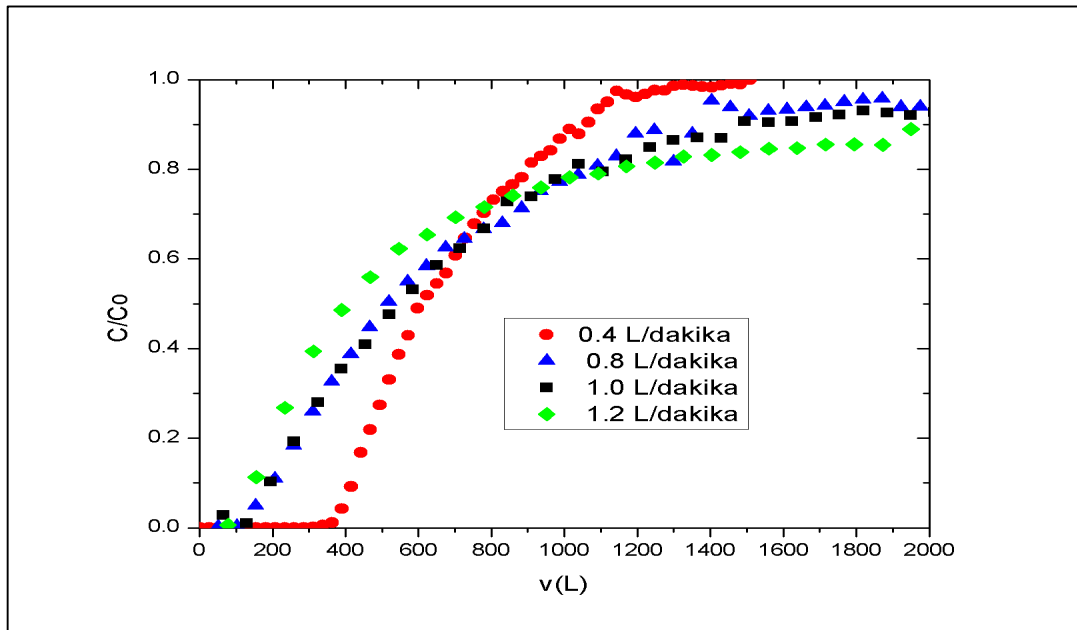
Şekil 4.1: Sıcaklığın DMAC adsorpsiyonuna olan etkisi (10°C'de Co=3,83 mg/L, 20°C'de Co=6,37 mg/L, 30°C'de Co=13,60 mg/L).

Her sıcaklıkta kolona giriş konsantrasyonları farklı olmasına rağmen hemen hemen tüm sıcaklıklarda DMAC yaklaşık 120 L civarında kolondan çıkmaya başlamıştır. 1250 L gaz hacmi geçirildikten sonra kolonun adsorplama kapasitesi, kırılma eğrisinin üstünde kalan alanın hesaplanması ile bulunmuştur. Buna göre 10, 20 ve 30°C sıcaklıklarda kolonun tuttuğu toplam DMAC miktarları sırasıyla 2,54, 4,01 ve 7,60 g (63,52, 100,2 ve 189,91 mg DMAC/g AK) olarak hesaplanmıştır.

Grafikte de görüldüğü gibi DMAC'in aktif karbon ile adsorpsiyonu için çalışılabilecek en uygun sıcaklık 20°C dir ve adsorpsiyon işlemi yaklaşık 30 sa sürmüştür. Diğer sıcaklarda aktif karbonun kapasite çok daha hızlı dolmuştur ve analiz süresi daha kısa sürmüştür. Hem kapasitesinin en yüksek olduğu sıcaklık olmasından dolayı hem de oda sıcaklığından uzak olmaması ile GC'ye giden boru hatlarından oluşabilecek yoğuşmayı engelleyeceğinden diğer adsorpsiyon deneylerinde bu sıcaklıkla çalışmaya devam edilmiştir.

4.1.2. Gaz Hızı Etkisi

DMAC adsorpsiyonu için en uygun sıcaklık değeri 20°C olarak karar verildikten sonra, bu sıcaklık değeri ile 4 farklı gaz hızı test edilmiş ve adsorpsiyon üzerindeki etkisi gözlemlenmiştir. Şekil 4.2 de adsorpsiyonun gaz hızı ile değişimini gösteren grafik yer almaktadır.

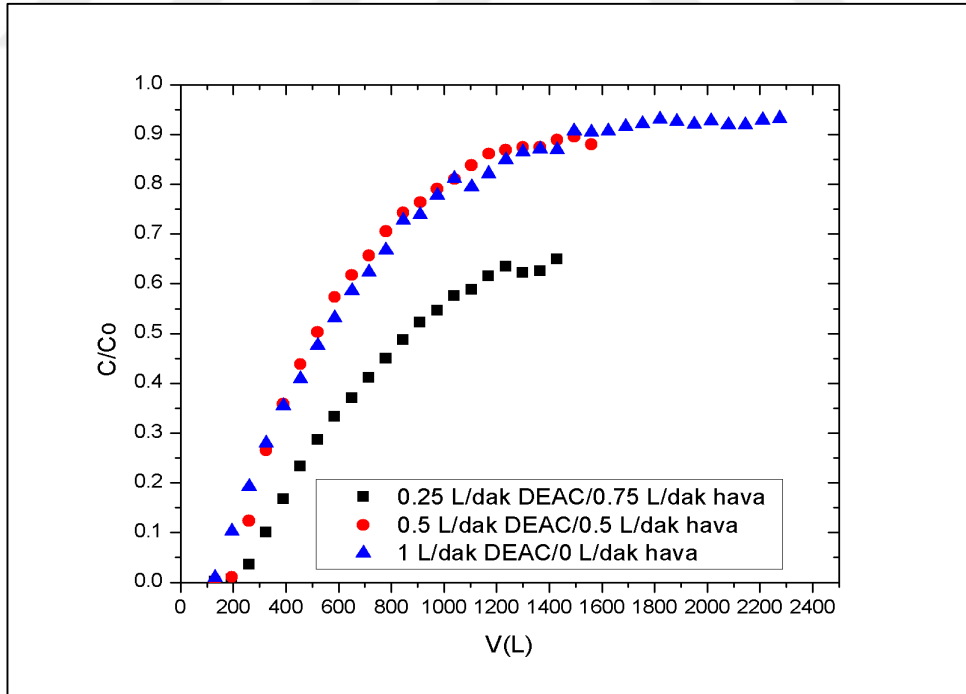


Şekil 4.2: Gaz Hızının DMAC adsorpsiyonuna olan etkisi.

0.4 L/dakika gaz hızı ile gerçekleştirilen deneyde kırılma eğrisi diğer hızlara oranla çok daha sonra çıkmıştır. Çıkış konsantrasyondaki ilk yükselme 0,4 L/dakika hızda yaklaşık 380 L'de gözlemlenirken, diğer hızlarda bu değer yaklaşık 100 L seviyelerindedir. Bu temel olarak kinetik kısıtlamadan kaynaklanmaktadır. Daha düşük hızlarda, DMAC'in aktif karbon gözeneklerine düfuzlenmek için gerekli zaman yüksek hızlara kıyasla daha fazladır. Deneysel sonuçlardan görüleceği üzere en hızlı çalışma olan 1,2 L/dakika debili deneyde gözlenmiştir. Farklı hızlarda adsorpsiyon kapasiteleri incelendiğinde, 0,4, 0,8, 1,0 ve 1,2 L/dakika hızlar için sırasıyla 108,16, 108,73, 115,3 ve 109,04 mg DMAC/g AK olarak bulunmuştur.

4.1.3. Konsantrasyon Etkisi

Saf DMAC konsantrasyonuna ilave olarak DMAC $\frac{1}{4}$ ve $\frac{1}{2}$ oranlarında hava ile seyreltilerek adsorpsiyon çalışmaları yürütülmüştür. Bu çalışmalar, 1 L/dakika toplam debide ve 20°C'de gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar Şekil 4.3'da sunulmuştur.

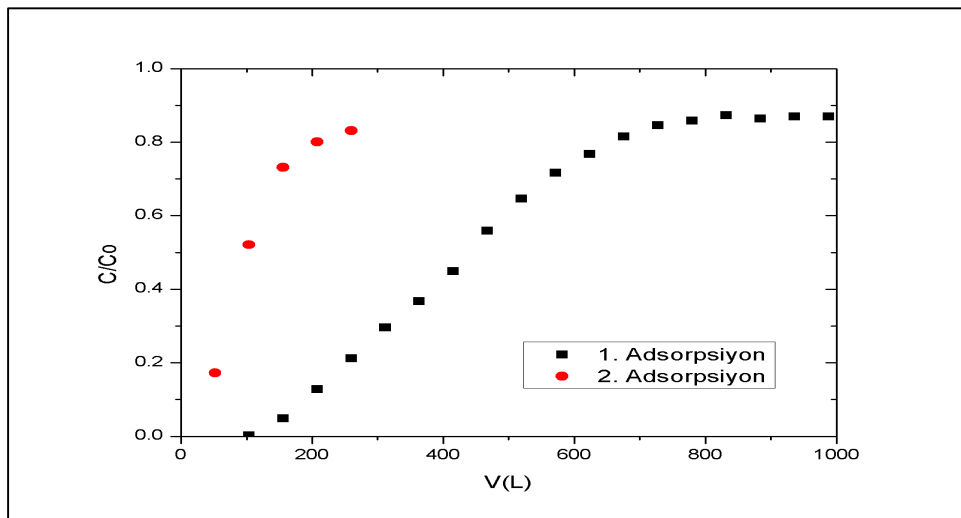


Şekil 4.3: Farklı DMAC konsantrasyonları ile gerçekleştirilen adsorpsiyon çalışmaları.

Adsorpsiyon kolonuna giren DMAC konsantrasyonu azaldıkça kırılma eğrisinde gözlenen ilk konsantrasyon artışı için gerekli olan hacim miktarı bir miktar artmaktadır. Saf DMAC gazı ile gerçekleştirilen deneyde kırılma eğrisi yaklaşık 130-140 L seviyelerinde görülmeye başlarken, yarı yarıya seyreltilmiş çalışmada bu yaklaşık 200 L, dörtte bir seyreltilmiş çalışmada ise 280 L seviyelerinde görülmüştür. Kırılma eğrileri benzer eğim ile yukarı çıkmış, ancak konsantrasyonu daha yüksek olan çalışmada kolon kapasitesi daha fazla kullanılmıştır. Gerçekleşen deneysel sürelerde adsorplanan DMAC konsantrasyonları $\frac{1}{4}$ ve $\frac{1}{2}$ (DMAC/HAVA) karışım oranları için 36,4 ve 47,1 mg DMAC/g AK olarak bulunurken, seyreltmenin yapılmadığı durumda 115,3 mg/L olarak tespit edilmiştir. Düşük gaz konsantrasyonlarda katı fazdaki adsorplanan miktar daha düşük olacağından, kolon kapasitesi daha yüksek gaz konsantrasyonlarında daha çok kullanılmıştır.

4.2. DMAC'in Aktif Karbondan Desorpsiyonu

Adsorpsiyon işlemi ile aktif karbon yüzeyinde tutulan DMAC'in sıcak hava yardımı ile aktif karbondan yeniden serbest bırakılması yani desorbe edilmesi ve aktif karbonun yeniden kullanılması düşünülmüştür. Öncelikle adsorplanan DMAC'in aktif karbondan desorpsiyonunun mümkün olup olmadığını belirlemek için bir adsorpsiyon çalışması gerçekleştirilmiş, sonrasında ise 200°C'de desorpsiyon yapılarak ikinci bir adsorpsiyon çalışması gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmanın sonuçları Şekil 4.4'de sunulmuştur.



Şekil 4.4: DMAC'in desorpsiyon öncesi ve sonrası adsorpsiyon eğrileri.

Bu çalışma 20°C’de ve 800 mL/dakika debide gerçekleştirilmiştir. Kırılma eğrilerinden görüldüğü gibi taze aktif karbon 100-150 L hacim sonrası görülürken, desorpsiyon sonrası ilk numunelerde DMAC gözlenmiş ve hızla yüksek konsantrasyonlara ulaşılmıştır. Bu çalışmanın dışında da farklı denemeler (farklı sıcaklıklar) çalışılmış ancak desorpsiyon işlemi başarısız olmuştur. DMAC adsorpsiyonunun başarısız olmasının yanında kolon yatağında da deformasyonlar gerçekleşmiştir. Daha sonraki silika deneylerinde verimin aktif karbona kıyasla çok yüksek bulunması sebebi ile farklı desorpsiyon seçenekleri denenmemiştir.

4.3. DMAC’in Silika Jel ile Adsorpsiyonu

Proje kapsamında adsorpsiyon işlemi için kullanılan ikinci adsorbent silika jeldir. Silika jel yüksek rutubet adsorpsiyon yeteneğine sahip sentetik cam esaslı nem alıcı üründür. Deneysel çalışmalarda kullanılan silika jelin özellikleri Tablo 4.2’de yer almaktadır.

Tablo 4.2: Silika jelin özellikleri.

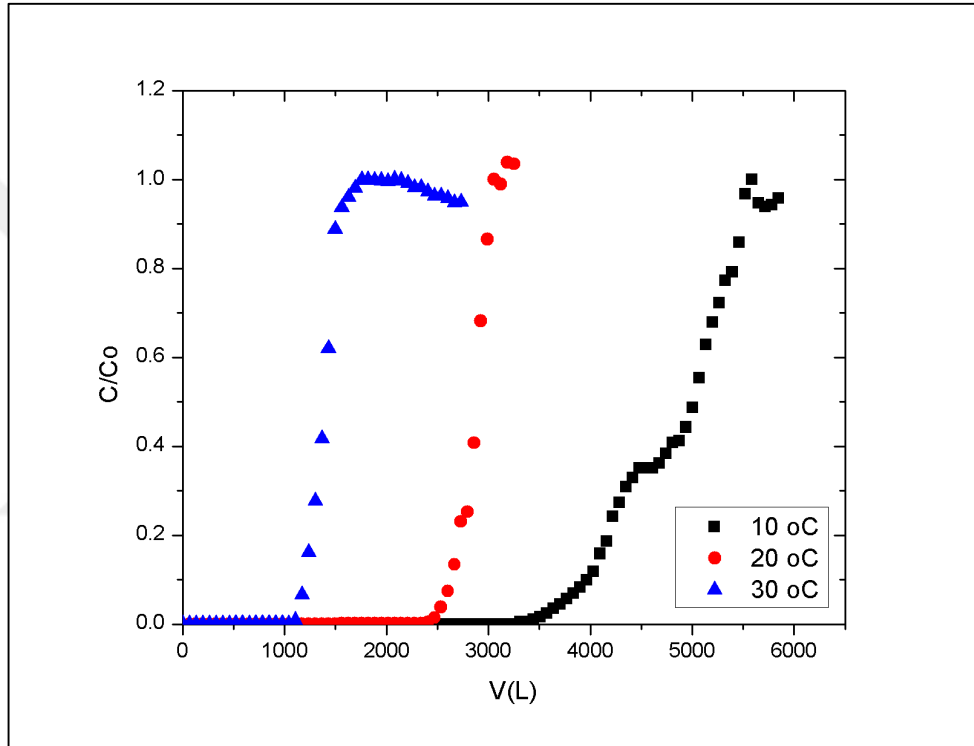
Özellikler	Yaklaşık Değer	Birim
Renk	Şeffaf camsı beyaz	---
Tanecik Şekli	Kırık	---
Partikül Boyut Aralığı	1,68-2	mm
Dökme Yoğunluğu	0,70-0,80	g/mL
Adsorpsiyon Kapasitesi (%80 Rölatif Nem, 25°C)	>33	%
Özgül Direnç	1x10 ³	ohm.cm
Nem İçeriği	0,0-3,0	%
BET Yüzey Alanı	640.1	m ² /g
Gözenek Hacmi	0.365	cm ³ /g
Yatak Yüksekliği	8	cm

Silika jel ile gerçekleştirilen çalışmalarda sıcaklık ve hızın adsorpsiyona etkisi tespit edilmiştir. Aktif karbon çalışmalarının aksine silika jel sıcak adsorpsiyon kolonu

sıcak hava ile kolaylıkla desorbe edilebilmiştir. Bu kısımda gerçekleştirilen çalışmalar ve sonuçları aşağıda özetlenmiştir.

4.3.1 Sıcaklık Etkisi

Üç farklı sıcaklıkta gerçekleştirilen adsorpsiyon çalışmalarına ait kırılma eğrileri Şekil 4.5’de verilmiştir.

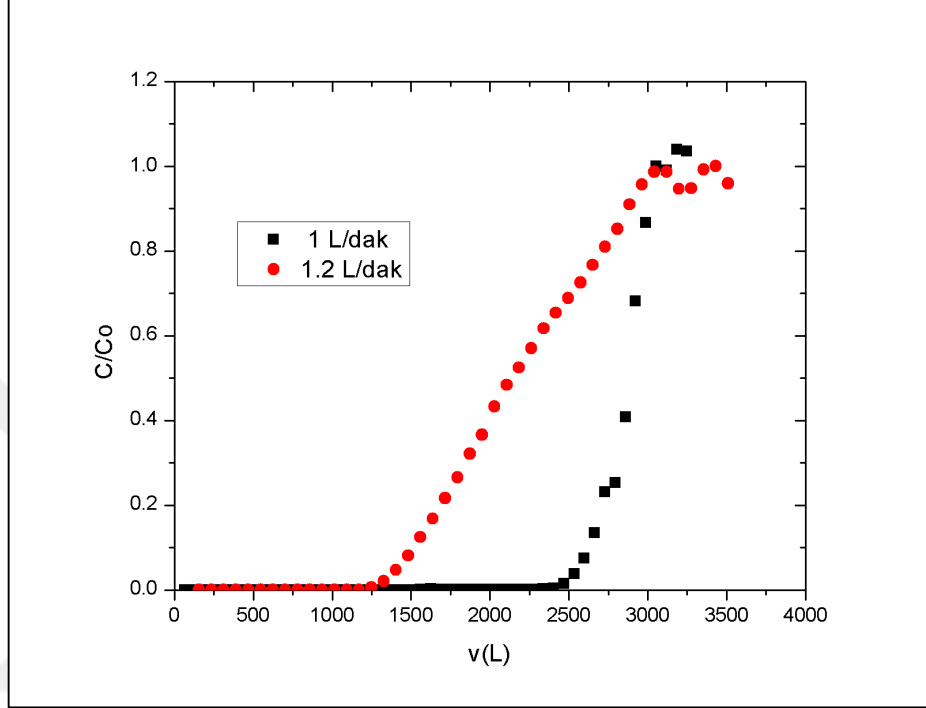


Şekil 4.5: DMAC'in Silika Jel adsorpsiyonuna sıcaklığın etkisi (10°C'de Co=3,83 mg/L, 20°C'de Co=6,37 mg/L, 30°C'de Co=13,60 mg/L).

Aktif karbon adsorpsiyon deneylerinden farklı olarak, sıcaklık azaldıkça (giriş konsantrasyonu düştükçe) kolon çıkışında ilk artış daha yüksek hacimde gerçekleşmiştir. 30°C'de kırılma eğrisinin yukarı çıkışı 1000 L civarında iken 20°C'de bu yaklaşık 2500 L'de gerçekleşmiştir. 10°C'de gerçekleşen çalışmada ise kırılma eğrisi yaklaşık 3500 L sonra görülmeye başlanmıştır. Kırılma eğrilerin çıkışlarındaki farklılık adsorpsiyonun aktif karbona kıyasla daha hızlı gerçekleştiğini göstermektedir. Silika jelin adsorpsiyon kapasitesi de aktif karbona oranla daha yüksektir. 10, 20 ve 30°C sıcaklıklarda, adsorpsiyon kapasiteleri sırasıyla 434,2, 440,2 ve 252,2 mg DMAC/g SJ olarak bulunmuştur.

4.3.2. Akış Hızı Etkisi

Silika jel ile adsorpsiyon çalışmasında akış hızının etkisini görebilmek için iki farklı hız ile çalışma yapılmış ve elde edilen kırılma eğrileri Şekil 4.6’de verilmiştir.

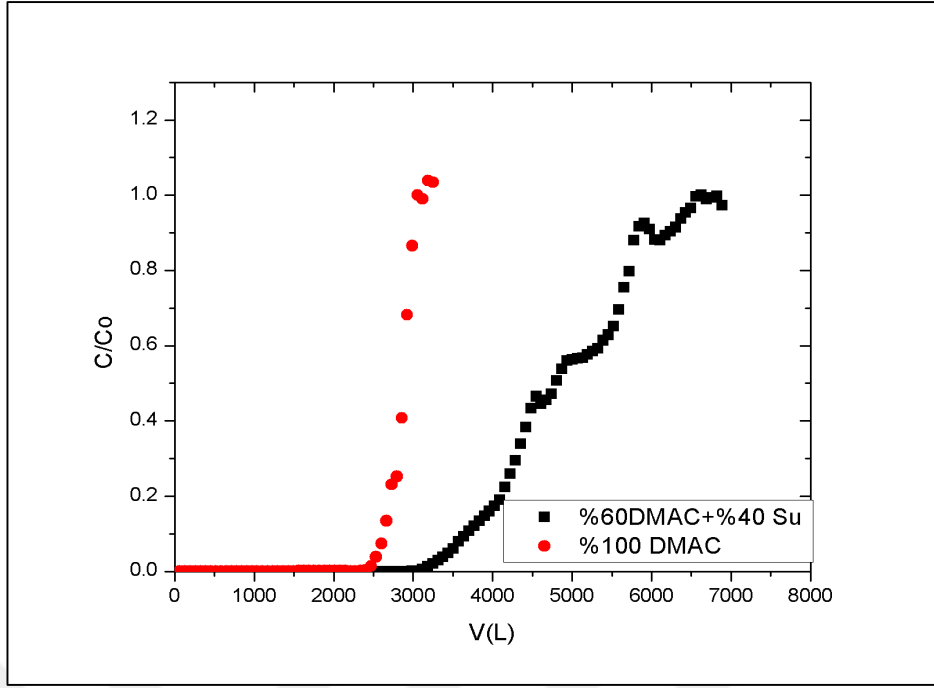


Şekil 4.6: Farklı akış hızlarında silika jele DMAC adsorpsiyonu kırılma eğrileri.

1 L/dakika akış hızında adsorpsiyon kapasitesi 440,2 mg DMAC/g SJ iken 1,2 L/dakika hızda bu değer 334,3 mg DMAC/g SJ olarak bulunmuştur. Artan akış hızlarında daha düşük süreli gaz katı faz teması olduğundan hem kırılma eğrisi daha çabuk çıkmakta hem de kapasitesi azalmaktadır.

4.3.3. Nem Etkisi

Nemin adsorpsiyona etkisinin tespit edilmesi amacıyla öncelikle yıkama şişesine 6/4 hacimsel oranında DMAC/Su karışı konularak adsorpsiyon deneyi gerçekleştirildi. Elde edilen kırılma eğrisi Şekil 4.7’de verilmektedir.



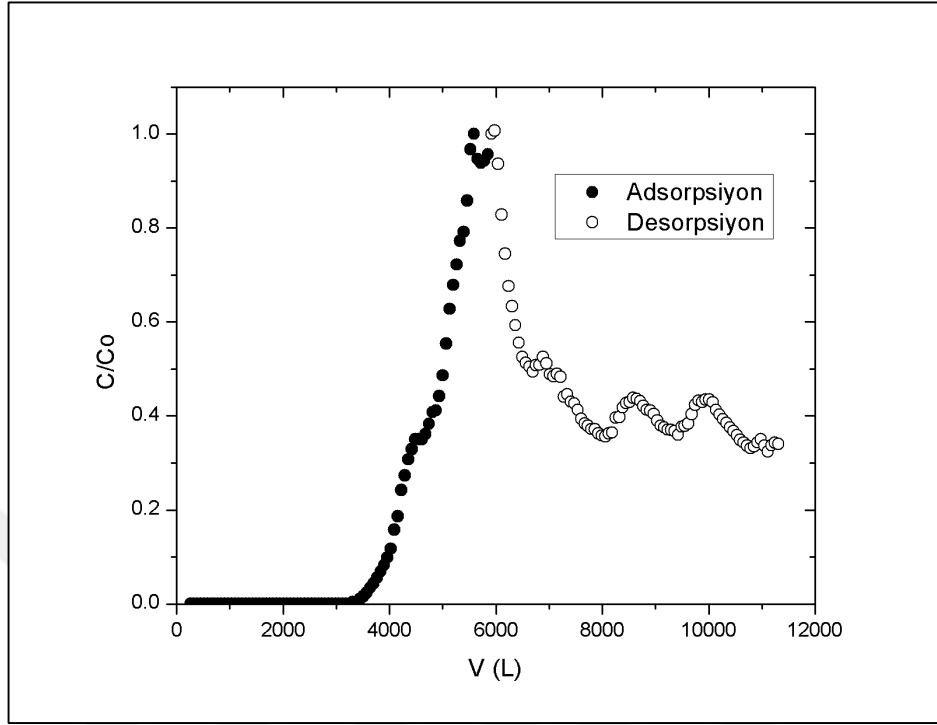
Şekil 4.7: Nemin kırılma eğrisine olan etkisinin belirlenmesi (DMAC su karışımındaki $C_0= 1.44$ mg/L)

Su DMAC karışımında denge konsantrasyonu 1,44 mg/L olup, %100 DMAC gaz fazına göre yaklaşık 4,5 kat daha düşüktür. Bu nedenle kırılma eğrisi %100 DMAC buharında 2500 L civarında çıkmaya başlarken nem varlığında kırılma eğrisi 3300 L seviyesinde çıkmaya başlamıştır. Ancak, adsorpsiyon kapasitesi nem varlığında 163,8 mg DMAC/g SJ seviyesine düşmüştür. Ayrıca, kırılma eğrisinin eğimi de hiç nem olmadığı duruma kıyasla daha düşük olarak gözlenmiştir. Silika jelin suyu da adsorbe etmesi nedeni ile DMAC ile yarışmacı bir adsorpsiyon gerçekleşmektedir. Bu nedenle adsorpsiyon kapasitesi düşmektedir.

4.4. DMAC'in Silika Jelden Desorpsiyonu

İlk desorpsiyon çalışması silika jel adsorpsiyonunu takiben, kolona giren DMAC gaz konsantrasyonunun kesilerek yerine hava verilmesi ile 10°C'de yapılmıştır. Bu deneyde 1 L/dakika hız ile gaz adsorpsiyonu ve aynı hızda hava ile desorpsiyon gerçekleştirilmiştir. Deneye ait sonuçlar Şekil 4.8'de verilmiştir. Silika jelin DMAC gazı adsorpsiyonunun aktif karbona kıyasla çok daha yüksek olduğu görülmektedir. Yaklaşık 3500 L gaz geçişinde kolon çıkışında DMAC konsantrasyonu sıfır olarak

ölçülmüştür. Bu verilere göre silika jelin adsorpsiyon kapasitesi 430,8 mg DMAC/g SJ olarak bulunmuştur.

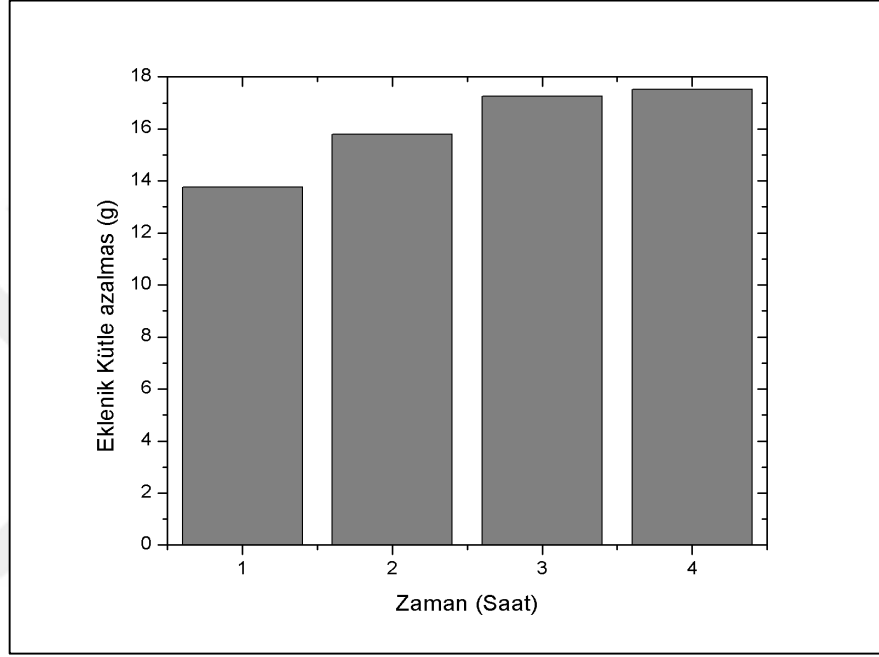


Şekil 4.8: 10°C'de gerçekleştirilen ardışık adsorpsiyon ve desorpsiyon kırılma eğrileri.

Kırılma eğrisi maksimum konsantrasyona (giriş konsantrasyonu) ulaştıktan sonra kolon girişinde aynı hızda kuru hava bağlanmış ve GC'de DMAC konsantrasyonunun düşüşü izlenmiştir. Düşük sıcaklıkta (10°C) kolon çıkış konsantrasyonu yaklaşık 600 L hava geçmesine rağmen sifıra ulaşmamıştır. Ayrıca adsorpsiyon ve desorpsiyon eğrilerindeki farklılıklar (adsorpsiyon kırılma eğrisinin hızlı yukarı çıkışı, desorpsiyon kırılma eğrisinin tedrici azalması) adsorpsiyonun hem kinetik sınırlamasından hem de doğrusal olmamasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Düşük sıcaklıkta desorpsiyon denemesinden adsorpsiyon çalışması tamamlanmış bir kolondan 180°C sıcaklıkta hava geçirilerek desorpsiyon çalışması gerçekleştirildi. 180°C'de desorplanan DMAC çok yüksek konsantrasyonlarda olduğundan doğrudan GC'ye beslenip konsantrasyon ölçülemedi. Bunun yerine kolonun her saat başı tartılması ile ağırlık üzerinden desorpsiyon performansı belirlendi. Başlangıçta 1095 g olan kolon ağırlığı adsorpsiyon sonrası 1112,52 g olarak belirlenmiştir. Kolondan adsorpsiyon sonrası 1 L/dakika hızda sıcak hava (180°C)

geçirilerek her saat başı kolon tartılmıştır. Sonuçlar Şekil 4.9'de görülmektedir. Desorpsiyon sonuçları ilk bir saatlik (60 L hava) periyotta adsorplanan DMAC'in %75'den fazlasının desorbe olduğu sonrasında ise desorpsiyon hızının azalarak dört saat sonunda ise adsorplanan DMAC'in %99'unun desorbe edilebildiği görülmüştür. Desorpsiyon işleminin 180°C'de başarı ile gerçekleştirilmiş olması nedeniyle daha yüksek sıcaklıklar denememiştir.



Şekil 4.9: Sıcak hava ile desorpsiyonda kütle azalması.

Gerek GC'de desorplanan DMAC konsantrasyonunun ölçülememesi (çok yüksek konsantrasyona çıkması nedeni ile) gerekse de daha yüksek akış hızlarında (mass flow metrenin ölçüm sınırları dışında) desorpsiyon çalışmaları planlanan şekilde gerçekleştirilememiş, sadece başlangıç ve sonuç ağırlık farkları ile kontrol gerçekleştirilmiştir. Tüm silika jel çalışmaları tek bir kolon paketlenerek gerçekleştirilmiştir.

5.SONUÇLAR

Aktif karbona adsorpsiyon çalışmalarında tüm sıcaklıklarda (ve dolayısı ile farklı başlangıç konsantrasyonlarında) DMAC'in kolondan çıkışı yaklaşık 100 ile 150 L arasında gerçekleşmektedir. Bu durumun kütle transfer kısıtından kaynaklandığı, adsorpsiyon için yeterli zaman olmaması nedeniyle kırılma eğrilerinin çıkışlarında bir farklılık görünmediği düşünülmektedir. Buna karşılık adsorpsiyon miktarlarında farklılık olup çalışılan sürelerde bu değerler 64 ile 190 mg DMAC/g AK olarak bulunmuştur.

Kütle transfer kısıtının en belirgin görüldüğü durum gaz akışının değiştirilmesi ile ortaya çıkmıştır. 0,4 L/dakika gaz akışı ile gerçekleştirilen deneyde kırılma eğrisindeki yükseliş 380 L'ye kadar çıkmıştır. Düşük hız gaz katı arasında dengeye ulaşmak için gerekli zamanı artıracığından, kırılma eğrisinin geç yükselmesi saha uygulamaları açısından da önemli olacaktır.

Giriş konsantrasyonunun düşmesi durumunda adsorpsiyon kapasitesinde düşüşler gözlenmiştir. Aktif karbondan DMAC desorpsiyonu yüksek sıcaklıklı hava ile başarılı olmamıştır. Aktif karbonun DMAC adsorpsiyon kapasitesinin yüksek olmaması nedeni ile farklı desorpsiyon yöntemleri test edilmemiştir.

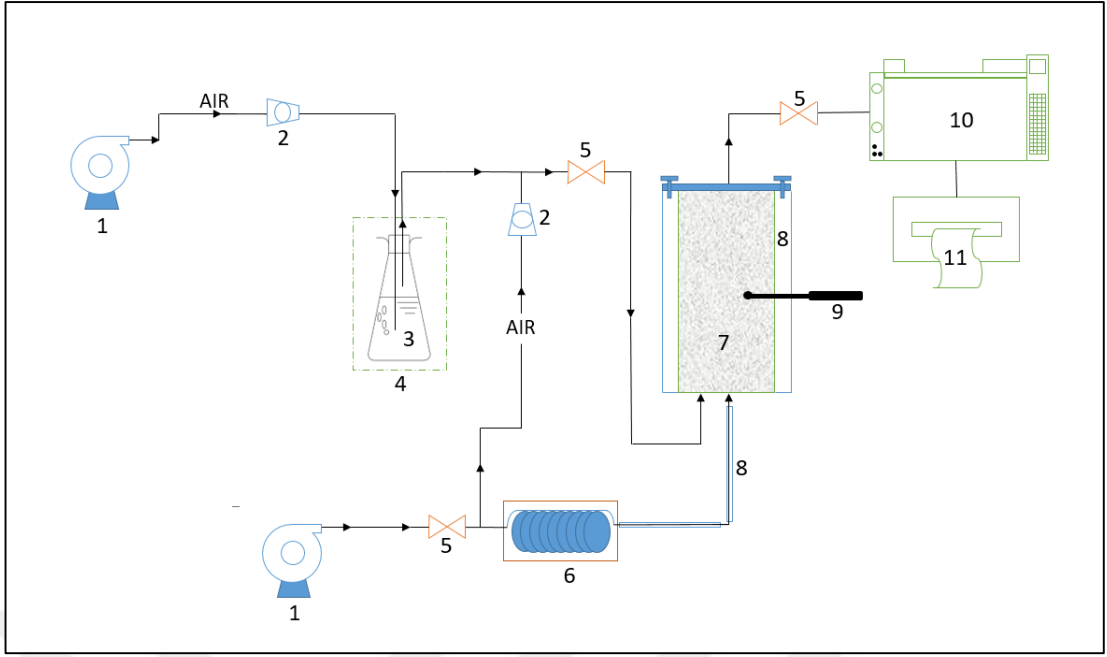
Silika jelin DMAC adsorpsiyon kapasitesi aktif karbona kıyasla çok daha yüksektir. Özellikle saha uygulamalarında kırılma eğrisinin yükselmeye başladığı değer (hacim/zaman/kolon hacmi sayısı) saha uygulamaları açısından oldukça önemlidir. 20°C'de kırılma eğrisinin yükselmeye başladığı hacim silika jel için 2500 L iken aktif karbon için 150 L civarındadır. Kırılma eğrileri de aktif karbondan farklı olarak çok daha dik eğimli olarak belirlenmiştir. Ayrıca DMAC'in adsorpsiyon kapasitesinin aktif karbondan yaklaşık 4,5 kat daha fazla olduğu ve 440 mg DMAC/g SJ seviyelerine ulaştığı tespit edilmiştir. Bu kapasitenin büyük bir kısmında kolon çıkışındaki DMAC konsantrasyonu sıfır olarak gözlenmiştir. Bu nedenle silika jelin aktif karbona oranla DMAC adsorpsiyonu açısından çok daha iyi bir adsorbent olduğu görülmüştür. Ancak gaz fazında bulunan nem silika jelin DMAC adsorpsiyon kapasitesini azaltmaktadır.

Sui vd. (2017) yapmış oldukları benzer bir çalışmada yüksek konsantrasyonlardaki toluen buharının adsorpsiyon ile giderimi için silika jel ve aktif karbon adsorbentlerinin kullanımı karşılaştırılmış ve silika jelin tolueni adsorbe

etmesinin daha kolay ve daha hızlı olduğunu görmüştür. Ancak silika jelin tolüen adsorpsiyon kapasitesi aktif karbona kıyasla daha düşük bulunmuştur. Bu çalışmada tolüenin silika jel ve aktif karbona adsorpsiyon kapasiteleri sırasıyla 205 mg/g ve 370 mg/g olarak bulunmuştur. Proje çalışmalarında DMAC'ın silika jele adsorpsiyonunun, Sui vd. (2017) yaptığı çalışmadan farklı olarak, daha yüksek olduğu (440 mg DMAC/g SJ) tespit edilmiştir. Bunun nedeni DMAC'ın tolüene kıyasla daha hidrofilik olmasından kaynakladığı düşünülmektedir. Başka bir çalışmada silika jele farklı yüzey gurupları eklenerek silika jelin hidrofobitesisi değiştirilerek BTEX adsorpsiyonu gerçekleştirilmiştir (Standaket vd., 2009). Süperhidrobik yüzeyli silika jelin yüzey alanında yüzey modifikasyonu sırasında azalma olmaması durumunda adsorpsiyon kapasitesinin artacağı ifade edilmiştir. Bu çalışmadaki benzen, tolüen, ksilen ve etil benzen adsorpsiyon kapasiteleri silika jelde aktif karbona kıyasla iki kat fazla gözlemlenmiştir. Wang vd. (2004) BTEX adsorpsiyon kapasitesinin daha hidrofobik olan aktif karbondaki, silika jel ve zeolite göre daha yüksek olduğunu belirtmişlerdir.

Silika jelin bir diğer avantajı ise 180°C'de sıcak hava ile kolaylıkla desorbe edilebilmesidir. 1 L/dakika gibi düşük bir hızda bile 4 saatlik bir sürede %99 üzerinde bir desorpsiyon gerçekleştirilebilmektedir. Desorbe edilen gaz fazının soğutulmasıyla kolaylıkla DMAC geri kazanımı gerçekleştirilebilir. Silika jelin adsorplanan uçucu organik maddeleri kolayca desorbe edebildiği diğer çalışmalarda da gözlenmiştir. Standaket vd. (2009) silika jelin en az 14 kez BTEX adsorpsiyon kapasitesini kaybetmeden kullanabileceğini göstermiştir.

Hidrofilik bir çözücü olan ve gaz fazında bulunan DMAC'ın adsorpsiyon ile giderimi hakkında literatürde oldukça sınırlı sayıda çalışma yer almaktadır. Genel olarak adsorpsiyon ile ilgili yapılan çalışmalarda da daha çok BTEX gibi hidrofobik organik maddeler kullanılmıştır. Bu açıdan bakıldığında bu proje ile DMAC solventinin hangi adsorbent ile optimum koşullarda uzaklaştırılabileceği ve hangi şartlar altında rejenere edilebileceği konusunda literatüre katkısı olacaktır ve yapılacak olan diğer çalışmalara yön verecektir. Şekil 5.1'de DMAC giderimi için silika jel kolonu ile önerilen bir sistem şeması verilmiştir.



Şekil 5.1: Tasarlanan deney düzeneğine ait bir çizim, 1: Hava Fanı, 2: Kütle Akış Ölçer (MFM), 3: DMAC Çözeltisi, 4: Gaz Yıkama Şişesi, 5: Çekvalf, 6: Desorpsiyon Fırını, 7: Silika Jel Kolonu, 8: İzolasyon Malzemesi, 9: Termokulp, 10: Gaz Kromatografi Cihazı (GC), 11: Kayıt.

KAYNAKLAR

- Alyüz B., Veli S., (2006), “İç Ortam Havasında Bulunan Uçucu Organik Bileşikler ve Sağlık Üzerine Etkileri”, Trakya University Journal of Natural Sciences, 7 (2), 109-116.
- Belaissaoui B., Le Y., Favre E., (2016), “Energy Efficiency of a Hybrid Membrane/Condensation Process for VOC (Volatile Organic Compounds) Recovery From Air: A Generic Approach”, Energy, 95, 291-302.
- Biard P., Couvert A., Renner C., (2017), “Intensification of Volatile Organic Compound Absorption In A Compact Wet Scrubber At Co-Current Flow”, Chemosphere, 173, 612-621.
- Bruneel J., Walgraeve C., Mukurarinda J., Boon N., Van L., (2018), “Biofiltration of Hexane, Acetone And Dimethyl Sulphide Using Wood, Compost And Silicone Foam”, Journal of Chemical Technology and Biotechnology, 93 (8), 2234-2243.
- Web 1, (2019), [https://productcatalog.eastman.com/tds/ProdDatasheet.aspx?product=71103648&p=Dimethylacetamide+\(DMAc\)](https://productcatalog.eastman.com/tds/ProdDatasheet.aspx?product=71103648&p=Dimethylacetamide+(DMAc)), (Erişim Tarihi: 20/02/2019).
- Guo J., Lua A., (2002), “Microporous Activated Carbons Prepared from Palm Shell by Thermal Activation and Their Application to Sulfur Dioxide Adsorption”, Journal of Colloid and Interface Science, 251, 242.
- Heinsohn R.J., Kabel R.L., (1999), “Sources and Control of Air Pollution: Engineering Principles”, United States.
- Kalafatoğlu E., Örs N., Özdemir S., (2000), “Uçucu Organik Bileşiklerin (VOC) Teknolojik ve Ekonomik Açısından Optimum Geri Kazanılması ve/veya Çevreye Zararsız Duruma Getirilmesi”, Arıtım Dünyası, 18, 37-50.
- Khan F.I., Ghoshal A.K., (2000), “Removal Of Volatile Compounds From Polluted Air”, J. Loss Prevention, 13, 527-545.
- Kim K., Kang C., You Y., Chung M., Woo M., Jeong W., Park N., Ahn H., (2006), “Adsorption-Desorption Characteristics Of Vocs Over Impregnated Activated Carbons”, Catalysis Today, 111, 223-228.
- Koçkaya G., (2016), “Anilin Mavisinin Atıksulardan Uzaklaştırılmasında Yeni Bir Adsorbent Kullanımı”, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi.
- Li R., Xu J., Wang L., Li J., Sun X., (2009), “Reduction Of VOC Emissions By A Membrane-Based Gas Absorption Process”, Journal of Environmental Sciences, 21(8), 1096-1102.

Ligotski R., Sager U., Schneiderwind U., Asbach Christof., Schmidt F., (2018), "Prediction of VOC adsorption performance for estimation of service life of activated carbon based filter media for indoor air purification", *Building and Environment*, 149, 146-156.

Lu C., Lin M., Lin J., (2001), "Treatment Of N , N-Dimethylacetamide Waste Gas By A Trickle-Bed Air Bio-Filter", 44, 173-180.

Orbak İ., (2009), "Aktif Karbon ile Çevre Kirletici Bazı Unsurların Giderilmesi", Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi.

Jingjing P., Jianshun Z., (2011), "Determination of adsorption isotherm and diffusion coefficient of toluene on activated carbon at low concentrations", 48, 66-76.

Saral A., (2011), "Hava Kirliliği Nedir, Ülkemizdeki Durumundan Kesitler. Bilim Ve Akıl Aydınlığında Eğitim", 135, 34-41.

Sui H., Liu H., An P., He L., Li X., Cong S., (2017), "Application of Silica Gel in Removing High Concentrations Toluene Vapor by Adsorption and Desorption Process", *Journal of The Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 218-224.

Standeker S., Novak Z., Knez Z., (2009), "Removal of BTEX Vapours from Waste Gas Streams Using Silica Aerogels of Different Hydrophobicity", *Journal of Hazardous Materials*, 165, 1114-1118.

Şahan A., (2007), "Farmosetik Maddelerin Aktif Çamur Arıtma Prosesinde Abiyotik Gideriminin İncelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi.

Vohra M., (2015), "Adsorption-Based Removal of Gas-Phase Benzene Using Granular Activated Carbon (GAC) Produced from Date Palm Pits", 40, 3007-3017.

Wang C., Chang K., Chung T., (2004), "Adsorption Equilibria of Aromatic Compounds on Activated Carbon, Silica Gel, and 13X Zeolite", *Journal of Chemical and Engineering Data*, 49, 527-531.

Yakout M., Daifullah M., (2014) "Adsorption/Desorption Of BTEX on Activated Carbon Prepared From Rice Husk", *Desalination and Water Treatment*, 52 (22-24), 4485-4491.

Yılmaz D., (2008), "Bazı Uçucu Organik Bileşiklerin Absorbsiyonla Giderimi", *Animal Genetics*, 39 (5), 561-563.

ÖZGEÇMİŞ

Gizem ÇELİK 1993 yılında İstanbul’da doğdu. 2011 yılında başladığı Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Çevre Mühendisliği Bölümünü 2016 yılında başarıyla tamamlayarak 2017 yılında yüksek lisans eğitimine Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Çevre Mühendisliği Anabilim Dalında başladı.

