

154595

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**NÜMERİK ANALİZ YÖNTEMİ İLE
ABSORPSİYON KULESİ TASARIMI**

Çevre Müh. Kaan YETİLMEZSOY

**FBE Çevre Mühendisliği Anabilim Dalında
Hazırlanan**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tez Savunma Tarihi : 06 Şubat 2004

Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. Arslan SARAL (YTÜ)

Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Ferruh ERTÜRK (YTÜ)

: Doç. Dr. Kadir ALP (İTÜ)

İSTANBUL, 2004

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
İÇİNDEKİLER.....	ii
SİMGE LİSTESİ.....	iv
ŞEKİL LİSTESİ.....	vii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	viii
ÖNSÖZ.....	ix
ÖZET.....	x
ABSTRACT.....	xi
1. GİRİŞ.....	1
2. ABSORPSİYON	3
2.1 Kütle Transferi ve Transfer Katsayıları.....	3
2.2 Denge Eğrilerinin Tanımlanması	8
3. EN KÜÇÜK KARELER METODU İLE EĞRİ UYDURULMASI.....	11
4. MİNİMUM İŞLETME EĞİMİNİN HESABI.....	17
4.1 Birinci tip denge eğrisinin ve minimum işletme eğiminin tanımlanması	19
4.2 İkinci tip denge eğrisinin ve minimum işletme eğiminin tanımlanması	20
5. NÜMERİK ANALİZ YAKLAŞIMI İLE TRANSFER BİRİMLERİ SAYISI (NTU) NİN HESAPLANMASI	24
5.1 Net transfer birimleri yüksekliği (net NTU) hesabı için özet bilgiler	28
6. YAKLAŞIM METODUNUN KLASİK ÇÖZÜM YÖNTEMİ İLE MUKAYESESİ	29
6.1 Amonyak bertarafı amacıyla kullanılacak bir dolgulu kulenin tasarımına ait sayısal uygulama	29
6.1.1 Debi değerlerinin ve işletme eğiminin hesaplanması.....	30
6.1.2 Kulenin altı için kütledebilerin ve kule çapının hesaplanması	31
6.1.3 Kulenin üstü için kütledebilerin ve kule çapının hesaplanması.....	33
6.1.4 Kulenin altı ve üstü için birim kesit alandaki kütledebilerin hesaplanması.....	34
6.1.5 Ortalama kütledebilerin hesaplanması	35
6.1.6 Gaz fazı ve sıvı faz için transfer birimleri yüksekliklerinin hesaplanması	35
6.1.7 Kulenin altı ve üstü için molar debilerin hesaplanması	36
6.1.8 Ortalama molar debilerin hesaplanması.....	37

6.1.9	Toplam transfer birimleri yüksekliğinin (HTU) ve absorpsiyon kulesinin yüksekliğinin (Z) hesaplanması.....	37
6.2	MATLAB 5.3 programının tanıtılması	38
6.3	Problemin MATLAB 5.3 algoritmasıyla çözülmesi	39
6.4	MATLAB 5.3 algoritmasının çalışma aşamaları	45
7.	SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRMELER.....	49
KAYNAKLAR.....		52
EKLER.....		54
Ek 1	MATLAB 5.3 programı ile yazılan absorpsiyon kulesi tasarım algoritması.....	55
Ek 2	İşletmede kullanılan dolgu malzemeleri ve özellikleri.....	61
Ek 2.1	Standart Seramik Dolgu Malzemeleri	61
Ek 2.2	Standart Termoplastik Dolgu Malzemeleri	63
Ek 2.3	Standart Karbon/Grafit Dolgu Malzemeleri	64
Ek 2.4	Standart Metal Dolgu Malzemeleri	65
Ek 2.5	Yüksek Performanslı Kule Malzemeleri	66
Ek 2.6	Gaz absorpsiyon ekipmanları ve dolgu malzemelerine ait şematik çizimler (Wu, C. Y., 2003)	68
Ek 3	Değişen İşletme Koşulları İçin Elde Edilen Grafikler.....	70
ÖZGEÇMİŞ		76

SİMGE LİSTESİ

J	Kirleticinin (A maddesi) kütle transfer akısı
y_A	Kirleticinin gaz fazındaki molar oranı (A kirletici maddesi için)
y_{Ai}	Kirleticinin (A maddesinin) arakesittesi mol oranı (Gaz filmi tarafındaki)
x_A	Kirleticinin gaz fazındaki mol oranı (A kirletici maddesi için)
x_{Ai}	Kirleticinin (A maddesinin) arakesittesi mol oranı (Sıvı filmi tarafındaki)
y_A	Kirleticinin sıvı fazındaki molar oranı x_A ile dengede olan gaz fazındaki molar konsantrasyonu
x_A^*	Kirleticinin gaz fazındaki molar oranı y_A ile dengede olan sıvı fazındaki molar konsantrasyonu
Δy_{LM}	Logaritmik mol oranı
D	A kirletici maddesi için diffüsitivite veya diffüzyon katsayısı
ρ	İdeal gazlar için molar konsantrasyon
M	Transfer olan kütle değeri
A	Arakesit yüzey alanı
k	Kütle transfer katsayısı (k_G : Gaz fazı için, k_L : Sıvı faz için)
K_{OL}	Toplam sıvı fazın kütle transfer katsayısı
K_{OG}	Toplam gaz fazının kütle transfer katsayısı
p_G	Gaz fazındaki basınç değeri
p_i	Arafazdaki basınç değeri
C_i	Arafazdaki konsantrasyon
C_L	Sıvı fazdaki konsantrasyon değeri
C^*	Tüm gaz basıncına eşit eşdeğer konsantrasyon
p^*	Sıvı faz içerisindeki eşdeğer konsantrasyona eşit eşdeğer basınç
H	Henry sabiti
a	Kulenin birim hacmi için arakesit alanı [=] m^2/m^3
L	Sıvı fazın debisi
G	Gaz fazının debisi
L'	Birim kesit alandaki sıvı fazın debisi
G'	Birim kesit alandaki gaz fazının debisi
HTU	Transfer birimleri yüksekliği [=] m veya ft
NTU	Transfer birimleri sayısı
Z	Absorpsiyon kulesi yüksekliği [=] m veya ft
X	Kirleticinin mol miktarının suyun mol miktarına oranı
Y	Kirleticinin mol miktarının havanın mol miktarına oranı
x	Kirleticinin mol miktarının sıvının mol miktarına oranı
y	Kirleticinin mol miktarının gazın mol miktarına oranı
$g(x)$	Regresyon analizinde denge eğrisi için uydurulacak fonksiyon
ξ	Eğri uydurmadaki yaklaşım hatası
E	Yaklaşım hatalarının karelerinin toplamı
c	Regresyon analizindeki sabit terim
d	Regresyon katsayısı
n	Regresyon analizinde kullanılan veri sayısı
R	Kritik katsayı
R^2	Korelasyon katsayısı
L_w	Suyun molar veya hacimsel debisi
G_a	Havanın molar veya hacimsel debisi
Y_0	Sınır koordinat değeri
Y_1	İşletme eğrisinin sabit terimi ($X=0$ için)

$(x_0)_{\min}$	Denge eğrisi ile işletme çizgisinin minimum kesim apsisi
$(y_0)_{\min}$	Minium kesim apsisine karşı gelen minimum ordinat
$(x_0)_{\text{design}}$	Tasarım apsisi
$X(1,2,...N)$	Denge eğrisinin apsis değerleri
$Y(1,2,...N)$	Denge eğrisinin ordinat değerleri
X	Denge eğrisine ait apsis değerlerinin matris cebiri
Y	Denge eğrisine ait ordinat değerlerinin matris cebiri
N	X ve Y değerlerinin sayısı
p	Hesap aralığının tanımı için seçilen harf
R	X değerlerine ait logaritma matrisi
T1	R'nin elemanlarının toplamı
r	Hesap aralığının tanımı için seçilen harf
B	Y değerlerine ait logaritma matrisi
T2	B'nin elemanlarının toplamı
T3	R ve B elemanlarının çarpımı
D	Denge eğrisi için uydurulan kuvvet regresyon fonksiyonunun regresyon katsayısı
c	Lineer formdaki kuvvet regresyon fonksiyonunun sabit çarpan terimi
C	Uydurulan kuvvet regresyon fonksiyonunun sabit çarpan terimi
Q	Gaz karışımının debisi [=] m^3/saat
y_0	Gaz karışımındaki kirleticinin yüzdesi [=] %
e	Kirleticinin artırılacak yüzdesi [=] %
t	Gaz karışımının sıcaklığı [=] $^{\circ}\text{C}$
Mk	Kirleticinin moleküler ağırlığı [=] kg/mol
w	Minimum debinin üzerinde olacak su debisinin yüzdesi [=] %
Hh	Havanın hacimsel debisi [=] m^3/saat
Hm	Havanın molar debisi [=] kgmol/saat
Hk	Havanın kütleli debisi [=] kg/saat
Kh	Kirleticinin hacimsel debisi [=] m^3/saat
Km	Kirleticinin molar debisi [=] kgmol/saat
Kk	Kirleticinin kütleli debisi [=] kg/saat
Km1	Absorbe edilen kirleticinin molar debisi [=] kgmol/saat
Km2	Absorbe edilmeyen kirleticinin molar debisi [=] kgmol/saat
Kk1	Absorbe edilen kirleticinin kütleli debisi [=] kg/saat
Kk2	Absorbe edilmeyen kirleticinin kütleli debisi [=] kg/saat
Y0	Denge eğrisinin sınır değeri
n	İşletme çizgisinin sabit terimi
Xmin	Denge eğrisi ve işletme çizgisinin kesişim noktasının apsis değeri
mmin	İşletme çizgisinin minimum eğimi
mopr	İşletme çizgisinin gerçek (tasarım) eğimi
Xopr	Gerçek işletme çizgisinin apsis değeri
Sm	Suyun molar debisi [=] kgmol/saat
Sk	Suyun kütleli debisi [=] kg/saat
Gk	Gazın kütleli debisi [=] kg/saat
Lk	Sıvının kütleli debisi [=] kg/saat
Mg	Gaz karışımının moleküler ağırlığı [=] kg/mol
pg	Gaz karışımının işletme şartlarındaki yoğunluğu [=] kg/m^3
abscissa	Taşma eğrisinin apsis değeri
ordinate1	Taşma eğrisinin logaritmik formdaki ordinat değeri
ordinate	Taşma eğrisinin ordinat değeri
F	Dolgu malzemesinin boyut faktörü
u	Suyun viskozitesi [=] cp (centipoise)

G	Birim kesit alandaki sıvının kütleli debisi [=] lb/s-ft ²
k	Dolgu kulenin işletildiği taşma hızı yüzdesi [=] %
Gopr	Birim kesit alandaki sıvının tasarım veya gerçek kütleli debisi [=] lb/s-ft ²
A	Absorpsiyon kulesinin kesit alanı [=] m ² veya ft ²
d	Absorpsiyon kulesinin çapı [=] m veya ft
Sch1	Kirleticinin gaz fazındaki Schmidt sayısı
Sch2	Kirleticinin sıvı fazındaki Schmidt sayısı
Gk1	Absorpsiyon kulesinin altı için birim kesit alandaki gaz karışımının kütleli debisi [=] lb/saat-ft ²
Lk1	Absorpsiyon kulesinin altı için birim kesit alandaki sıvı karışımının kütleli debisi [=] lb/saat-ft ²
Gk2	Absorpsiyon kulesinin üstü için birim kesit alandaki gaz karışımının kütleli debisi [=] lb/saat-ft ²
Lk2	Absorpsiyon kulesinin üstü için birim kesit alandaki sıvı karışımının kütleli debisi [=] lb/saat-ft ²
Gkort	Kulenin her iki tarafı için hesaplanan gaz karışımının ortalama kütleli debisi [=] lb/saat-ft ²
Lkort	Kulenin her iki tarafı için hesaplanan sıvı karışımının ortalama kütleli debisi [=] lb/saat-ft ²
alfa	Transfer birimi sabiti
beta	Transfer birimi sabiti
gama	Transfer birimi sabiti
fi	Transfer birimi sabiti
ita	Transfer birimi sabiti
u1	Suyun işletme sıcaklığındaki viskozitesi [=] lb/ft-saat
HtG	Gaz için transfer birimi yüksekliği [=] m
HtL	Sıvı için transfer birimi yüksekliği [=] m
Gm1	Absorpsiyon kulesinin altı için gaz karışımının molar debisi [=] kgmol/saat
Lm1	Absorpsiyon kulesinin altı için sıvı karışımının molar debisi [=] kgmol/saat
Gm2	Absorpsiyon kulesinin üstü için gaz karışımının molar debisi [=] kgmol/saat
Lm2	Absorpsiyon kulesinin üstü için sıvı karışımının molar debisi [=] kgmol/saat
Gmort	Absorpsiyon kulesinin her iki tarafı için hesaplanan gaz karışımının ortalama molar debisi [=] kgmol/saat
Lmort	Absorpsiyon kulesinin her iki tarafı için hesaplanan sıvı karışımının ortalama molar debisi [=] kgmol/saat
HTU	Transfer birimleri yüksekliği [=] m
x(1,2,...n)	NTU hesabı için bulunan apsis değerleri
y(1,2,...n)	NTU hesabı için bulunan ordinat değerleri
r	x ve y değerlerinin hesap aralığının tanımı için seçilen harf
I	Y0'dan büyük olan y değerlerinin sırasını belirten matris cebiri
At	Fraksiyon hesabında kısmi üçgenden kaynaklanan trapezin alanı
Au	Tam üçgenin alanı
fraction	Kısmi üçgenin fraksiyonu
NTU	Transfer birimleri sayısı
netNTU	Fraksiyon hesabındaki net üçgenlerin sayısı
Z	Absorpsiyon kulesinin yüksekliği [=] m veya ft

ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2.1	Absorpsiyon kulesinde kütle bilançosu..... 3
Şekil 2.2	Kirletici maddenin gaz fazından sıvı fazına transferi – Çift Film Teorisi..... 4
Şekil 2.3	Dolgulu kule üzerinde alınan diferansiyel kontrol hacmi 6
Şekil 2.4	Birinci tip denge eğrisi 9
Şekil 2.5	İkinci tip denge eğrisi 10
Şekil 3.1	En küçük kareler metodu ile eğri uydurulması..... 11
Şekil 3.2	Metanol (CH_3OH)’e ait denge datası için uydurulan kuvvet fonksiyonu 15
Şekil 3.3	Metanol (CH_3OH)’e ait denge datası için uydurulan 4. derece fonksiyon..... 16
Şekil 4.1	Absorpsiyon kulesinin şematik çizimi..... 18
Şekil 4.2	Birinci tip denge eğrisi ile işletme çizgisi arasındaki ilişki 19
Şekil 4.3	İkinci tip denge eğrisi ile işletme çizgisi arasındaki ilişki..... 20
Şekil 5.1	Gerçek işletme eğrisi ve uydurulan denge eğrisi arasındaki tam ve kısmi üçgenler 24
Şekil 5.2	NTU hesabındaki tam ve kısmi üçgenler 25
Şekil 6.1	MATLAB 5.3 programı ile yazılan algoritmanın akış diyagramı 46
Şekil 6.2	Net transfer birimleri sayısının (net NTU) hesabına ait detaylı akış diyagramı..... 47
Şekil 6.3	MATLAB 5.3 algoritmasının notasyonlar cinsinden çalışma şeması 48

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 3.1	Metanol (CH_3OH) içeren gaz karışımı için 40°C ve 1 atm basınçtaki denge datası.....	13
Çizelge 3.2	Metanol (CH_3OH) için lineerize edilmiş denge eğrisinin hesabı	14
Çizelge 5.1	Metanol için verilen denge datası ile net NTU hesabı.....	27
Çizelge 6.1	Amonyak (NH_3) içeren gaz karışımı için 20°C ve 1 atm basınçtaki denge datası.....	29



ÖNSÖZ

Hızla çoğalan nüfus ve gelişen teknoloji ile birlikte insanların ihtiyaçları artmakta ve çevre kirliliği küresel bir boyut kazanmaktadır. Bu durum karşımıza fiziksel, kimyasal ve biyolojik açıdan çıkabildiği gibi sosyal ve kültürel bağlamda da etkilerini göstermektedir. Örneğin; katı atık sorunu, su kalitesinin bozulması, hava kirliliği, radyoaktif kirlenme ve toprak kirlenmesi gibi temel problemlerin yanında, günümüzde gürültü kirliliği, görüntü kirliliği ve kültür kirlenmesi gibi sosyal boyutlardaki kavramlar da incelenmektedir. Bu açıdan sürdürülebilir bir toplum oluşturma mantığı, Çevre Mühendisliği'nin temel hedefidir. Bu konuda bilgi, beceri ve tecrübeyi sorumluluk duygusu ile pekiştirerek, çevre ve insan için yapılacak her olumlu faaliyet, gelecek nesillere açılacak yepyeni umutlar ve güven dolu günlerin temelini oluşturacaktır.

Çevre kirlenmesinin önlemesi ve kontrolü için kirlilik türüne göre bertaraf yöntemi seçilmeli; ekonomik faktörler, sosyal çevreler ve standart kriterleri göz önünde bulundurularak en uygun ve doğru karar verilmelidir. Düşünülen arıtma alternatiflerinin kirlletici parametreleri giderme verimleri, fayda – maliyet analizleri ve işletme koşulları, çağın gerektirdiği teknolojiler çerçevesinde değerlendirilmeli ve uygulanacak yöntem bunlara göre tercih edilmelidir.

Günümüzün en büyük çevre problemlerinden biri olan hava kirlenmesinin önemi günden güne artmakta ve kirlletici maddelerin bertarafı amacıyla her geçen gün yeni teknolojiler geliştirilmektedir. Hava kirliliği kontrolü, atıkgaz ve buharların bertarafı ve partiküllerin kontrolü şeklinde iki ana kısma ayrılmaktadır. Bu çalışmada, atıkgaz ve buharların absorbant olarak sıvı solventler kullanılmasıyla kontrolünün sağlandığı sistemlerden biri olan absorpsiyon kulesinin, transfer birimleri sayısının bulunması esasına dayanan ve MATLAB 5.3 algoritmasının desteklediği nümerik analiz yaklaşımı ile tasarımı sunulmuştur. Önerilen yaklaşım ile dolgulu kulenin hesabına ait sonuçlar, değişen işletme koşulları için hızlı, pratik ve yüksek hassasiyetle elde edilmektedir.

Öncelikle, çalışmanın ilerletilmesi için büyük destek veren ve benden değerli bilgilerini esirgemeyen kıymetli hocam, Çevre Mühendisliği Bölüm Başkanımız, Sayın Prof.Dr. Ferruh Ertürk'e şükranlarımı arz ederim.

Çalışmanın yürütülmesinde büyük katkılarından ve gösterdiği yakın ilgiden dolayı tez danışmanım, kıymetli hocam, Sayın Yrd.Doç.Dr. Arslan Saral'a şükranlarımı sunarım.

Çalışmanın temelini teşkil eden MATLAB 5.3 programını, kendisinden lisans eğitimimde yaz okulundan aldığım ders ile öğrenmemi sağlayan ve bana yaz okulunda laboratuarda çalışma imkanı tanıyan, Makine Mühendisliği Bölümü'nden, değerli hocam Sayın Öğr.Gör.Dr. Tamer Kepçeler'e şükranlarımı sunarım.

Ayrıca benden, gerek lisans gerek yüksek lisans eğitimim boyunca değerli bilgilerini esirgemeyen değerli hocalarım, Çevre Mühendisliği Bölümü'nden, Sayın Prof.Dr. Mustafa Öztürk'e, Sayın Prof.Dr. Ahmet Demir'e, Sayın Prof.Dr. M.Talha Gönüllü'ye, Sayın Doç.Dr. Beyza Üstün'e, Sayın Yrd.Doç.Dr. F.İlter Türkoğlu'na, Sayın Yrd.Doç.Dr. Süleyman Şakar'a, Sayın Yrd.Doç.Dr. Gürdal Kanat'a, Sayın Yrd.Doç.Dr. Ertan Arslankaya'ya, Sayın Öğr.Gör.Dr. Hürrem Bayhan'a, Sayın Dr. Bülent İ. Goncaloğlu'na ve İnşaat Mühendisliği Bölümü'nden, Sayın Yrd.Doç.Dr. Yeşim Çelikoğlu'na teşekkürlerimi sunarım.

ÖZET

Atıkgazlar ve buharlar genel olarak Absorpsiyon, Adsorpsiyon ve Yakma yöntemleri ile kontrol edilmektedir. Burada üzerinde durulan absorpsiyon kulesi, atıkgazların sıvı solventler kullanılarak bertaraf edildiği bir absorpsiyon sistemidir.

Absorpsiyonda sıvı faz ile gaz fazı arasında Whitman Çift Film Teorisine göre konvektif taşınım ve moleküler diffüzyonlar neticesinde, konsantrasyon gradyanı yani itici güç sıfır oluncaya kadar birim zamanda ve birim kesit alanda gaz fazındaki kirletici maddenin sıvı fazına doğru molar akısı devam etmektedir.

Bu çalışmada; Nümerik Analiz yaklaşımıyla milimetrik kağıt veya grafik kağıdı ile yapılan klasik çözüm yöntemlerinin yanında, MATLAB 5.3 algoritmasıyla desteklenen bir hesaplama yolu sunularak, dolgulu kule tasarımı verilmiştir. Bu yöntemin esası, denge eğrisi ve işletme çizgisi arasında nümerik bağıntıların kurulması ile minimum eğimin hesaplanması ve bu değerlerden yararlanılarak transfer birimleri sayısının (Number of Transfer Units = NTU) bulunmasıdır. Mevcut denge verilerine en iyi uyan denge eğrisi denklemi regresyon analizi ile belirlendikten sonra, eğrinin tipi MATLAB 5.3 algoritması ile nümerik olarak saptanmakta ve bu adımları debi, kule çapı, esas alınan NTU hesabı ve kule yüksekliği hesapları izlemektedir. Bu yaklaşım yöntemi ile absorpsiyon kulesinin çapı ve yüksekliği, değişen proses koşulları için çok hızlı ve pratik bir şekilde yüksek hassasiyetle elde edilmektedir.

Anahtar kelimeler: Absorpsiyon, dolgulu kule, nümerik analiz, denge eğrisi, transfer birimleri sayısı, kütle transferi.

ABSTRACT

In general, stack gases and vapors are controlled by absorption, adsorption and incineration. The absorption tower based on here, is an absorption system in which stack gas is treated by using liquid solvents.

In absorption, according to Whitman Double Film Theory, molar flux of pollutant takes place from gas phase to liquid phase in unit time and unit sectional area until the concentration gradient becomes zero.

In this study, an absorption tower design is given by presenting a calculation method supported by MATLAB 5.3 algorithm in addition to classical solutions of millimetric or graph paper by using numerical analysis approach. The principle of the proposed method is based on determining the Number of Transfer Units = NTU from utilization of the minimum slope which is acquired from the numerical relations between equilibrium curve and operating line. After application of regression analysis in order to create best fitted equilibrium curve for existing equilibrium data, the types of curves are defined numerically with MATLAB 5.3 algorithm. This definition is followed by the determination of flow rates, diameter and the neural approach of NTU. By using this method, height of the absorption tower can be determined rapidly and practically with a high sensitivity for varying process conditions.

Keywords: Absorption, packed tower, numerical analysis, equilibrium curve, number of transfer units, mass transfer.

1. GİRİŞ

Atık gaz ve buhar halindeki kirleticilerin bertaraf edilmesi için genel olarak 4 kontrol metodundan söz edilebilir. Bu yöntemler:

1. Absorpsiyon,
2. Adsorpsiyon,
3. Yakma (Incineration)
4. Biyofiltre sistemleri

şeklindedir.

Absorpsiyonda, mevcut kirletici gazlar bertaraf etmek için sıvı solventler kullanılmaktadır. Genellikle absorbant olarak su kullanılmakla birlikte, suda çözünürlüğü az olan gazlar (hidrokarbonlar, H_2S v.b) için düşük buhar basıncına sahip organik sıvılarda absorbant olarak kullanılmaktadır.

Absorbant olarak kullanılan su, absorbe edilen gaz ile reaksiyona giren alkali, asit, oksidantlar, indirgeyiciler gibi kimyasal maddeler içerebilir. Bu durumda absorpsiyon prosesi ile reaksiyon birlikte meydana gelir.

Bu tezde, atık gaz ve buharların genel kontrol yöntemlerinden absorpsiyon prosesi incelenmiş ve bu kirleticilerin bertaraf edilmesi için sıvı solventlerin kullanıldığı bir absorpsiyon sistemi olan absorpsiyon kulesinin nümerik analiz metodu ile tasarımına yer verilmiştir. Bunun için öncelikle kütle transferi ve transfer katsayıları açıklanmıştır. İkinci aşamada, koordinat eksenleri, bertaraf edilecek kirleticinin mol miktarının, havanın ve suyun mol miktarlarına oranları olan bir eksen takımı üzerinde çizilen denge eğrilerinin tipleri belirtilmiştir. Bu amaçla en küçük kareler metodu baz alınarak, kuvvet regresyonu uygulanmıştır. Her tip denge eğrisine göre, kütle transferinin bittiği yani itici güç olan konsantrasyon gradyanının sıfır olduğu kesişim noktaları nümerik olarak hesaplanmış ve formülize edilmiştir. Molar akının sıfır olduğu bu noktalardan yola çıkılarak, minimum işletme eğimi elde edilmiştir. Daha sonra gerçek değeri yansıtmayan bu işletme eğiminin % 20 – 50 (U.S. EPA/CATC, 2002) arasında katı alınarak gerçek işletme eğimine geçilmiştir. Buna “adjustment factor” denilmektedir. Denge eğrisi ile nümerik bağlantılar oluşturacak işletme çizgisi için matematiksel hesaplamalara göre lineer doğru denklemi elde edilmiştir. Bu lineer doğru denklemi ile mevcut denge verilerine kuvvet regresyonunun uygulanması ile elde edilen denge eğrisi denkleminin kesişim noktası bulunarak minimum işletme eğimi hesaplanmıştır.

Minimum işletme eğiminden gerçek işletme eğimine geçilerek gerçek işletme çizgisinin denklemini elde edilmiştir. Gerçek işletme çizgisi ile denge eğrisi arasındaki üçgen sayısı, x ve y koordinatlarının adım adım geçişi şeklinde hesaplanmıştır. Son değerın sınır değeri ile mukayesesi yapılarak, kısmi üçgenin veya trapezin fraksiyonu belirlenmiş ve bulunan bu değeri tam üçgen sayısına ilave edilerek net transfer birimleri sayısı elde edilmiştir. Bu net değeri de transfer birimleri yüksekliği ile çarpılmasıyla absorpsiyon kulesinin yüksekliği nümerik olarak hesaplanmıştır.

Yaklaşım metoduna ait sonuçların, klasik çözüm yöntemi ile kıyaslanması açısından sayısal bir tasarım uygulamasına yer verilmiştir. Metodun uygulanmasını destekleyen algoritma ile elde edilen sonuçlar yüksek hassasiyetle elde edilmektedir.

Tez yazısının sonunda, absorpsiyon kulesinin nümerik analiz yaklaşımı ile tasarımında kullanılan MATLAB 5.3 programına ait algoritma yer almaktadır. Bu algoritma ile değışen proses koşulları için sonuçlar çok hızlı ve pratik bir şekilde yüksek hassasiyetle elde edilmektedir.

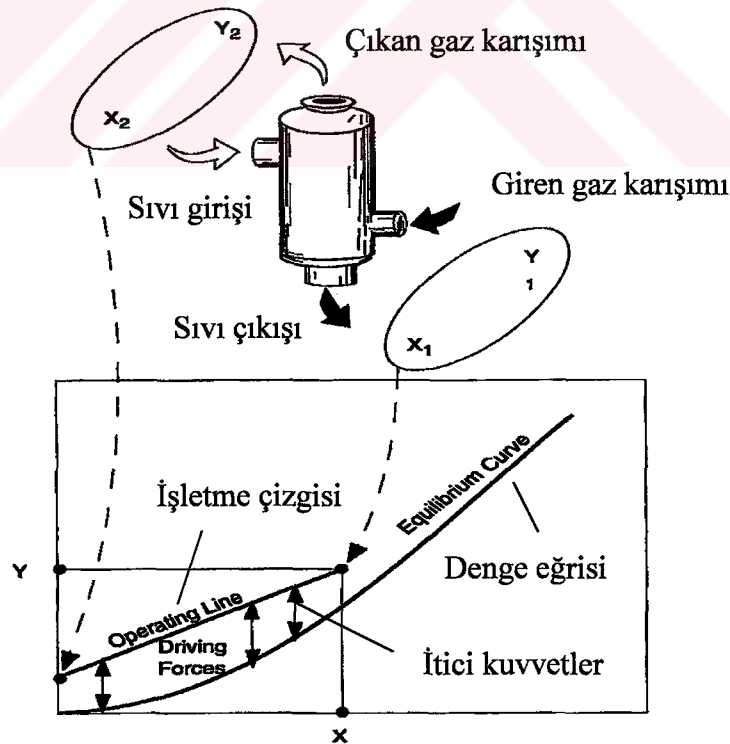
2. ABSORPSİYON

2.1 Kütle Transferi ve Transfer Katsayıları

Absorpsiyonda sıvı faz ile gaz fazı arasında Whitman Çift Film Teorisine (Cussler, 1997) göre konvektif taşınım ve moleküler diffüzyonlar neticesinde konsantrasyon gradyanı yani itici güç sıfır oluncaya kadar birim zamanda ve birim kesit alanda gaz fazındaki kirletici maddenin sıvı fazına doğru molar akısı devam etmektedir (Badger, W. L., & Banchemo, J.T., 1955).

Moleküler diffüzyon, rasgele molekül hareketlerinden meydana gelmektedir. Bu akım, yüksek konsantrasyon bölgesinden düşük konsantrasyon bölgesine doğru olan net bir hareket şeklindedir. Driving Force dediğimiz itici güç, bu bölgeler arasındaki konsantrasyon farkıdır. Kirletici maddelerin transferi gaz fazından, gaz – sıvı ara sınır tabakasına, ara sınırdan da penetrasyon ile sıvı fazına itici güç sıfır oluncaya kadar devam eder. Absorpsiyon olayı, gaz karışımının (absorbat) bir gaz – sıvı ara yüzeyi boyunca sıvı fazına transferidir (Wu, C. Y., 2003).

Şekil 2.1’de görülen sistemde giren ve çıkan değerlere göre bir kütle dengesi yazılmıştır.



Şekil 2.1 Absorpsiyon kulesinde kütle bilançosu

Burada seyreltik bir sistem (dilute system) için ;

L_m : Sıvı fazın molar debisi,

G_m : Gaz fazın molar debisi,

x : Kirletici maddenin sıvı fazındaki mol oranı,

y : Kirletici maddenin gaz fazındaki mol oranı

olarak tanımlanmaktadır. Kütle dengesi yazıldığında ;

$$G_{m1} + L_{m2} = G_{m2} + L_{m1} \quad (2.1)$$

$$G_m(y_1 - y_2) = L_m(x_1 - x_2) \quad (2.2)$$

şeklinde elde edilmektedir. Kütle transferinde akı değeri Denklem 2.3'te tanımlanmıştır.

$$Aka = (\text{Transfer olan kütle}) / (\text{Arakesit yüzey alanı}) = k(\text{Konsantrasyon farkı}) \quad (2.3)$$

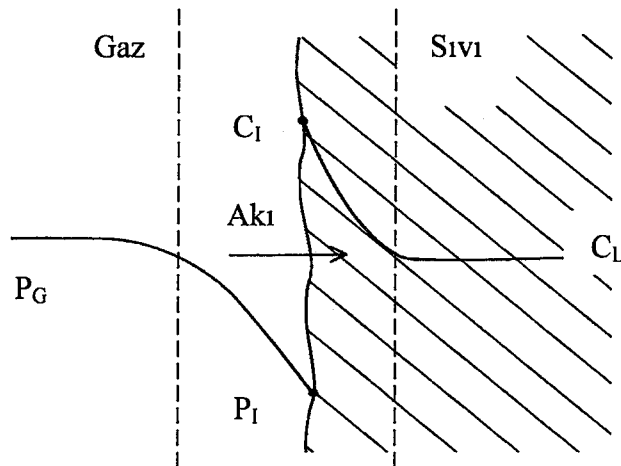
$$J: Ak_1 \left(\frac{\text{kütle}}{\text{alan} \times \text{zaman}} \right)$$

k : Kütle transfer katsayısı

şeklinde belirtilirse birim zamanda birim kesit alanda, kirletici maddenin gaz fazından sıvı fazına doğru molar akısı (Corbitt, 1990);

$$J(= \dot{M} / A) = k(C_i - C) \quad (2.4)$$

şeklinde yazılmaktadır. Burada çift film teorisine (two – double film theory) Cussler'in verdiği çizim üzerinde mikroskopik bir bakış yapılmıştır (Şekil 2.2).



Şekil 2.2 Kirletici maddenin gaz fazından sıvı fazına transferi – Çift Film Teorisi

Gaz fazındaki akı değeri ;

$$J = k_G (p_G - p_I) \quad (2.5)$$

şeklinde yazılabilir. Sıvı fazındaki akı değeri ise Denklem 2.6'da ifade edilmiştir.

$$J = k_L (C_I - C_L) \quad (2.6)$$

Burada, "I" indisi "interface" olarak ara yüzeyi, "G" indisi "gaz fazını" ve "L" indisi ise "sıvı fazını" temsil etmektedir. Ara fazdaki basınç değeri Henry Kanunu'na göre ;

$$p_I = HC_I \quad (2.7)$$

yazılmaktadır. Buradan toplam akı ;

$$J = \frac{1}{1/k_G + H/k_L} (p_G - HC_L) \quad (2.8)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Diğer ifadelerle toplam akı değeri, Denklem 2.9'daki gibidir.

$$J = K_{OL} (C^* - C_L) = K_{OG} (p_G - p^*) \quad (2.9)$$

Burada görülen K_{OL} ve K_{OG} parametreleri ;

K_{OL} : Toplam sıvı fazı kütle transfer katsayısı

K_{OG} : Toplam gaz fazı kütle transfer katsayısı

olarak tanımlanmaktadır. Bu katsayılar daha açık ifadelerle Denklem 2.10'da görülmektedir.

$$K_{OL} = \frac{1}{1/k_L + 1/k_G H} \quad (2.10)$$

$$K_{OG} = \frac{1}{1/k_G + H/k_L}$$

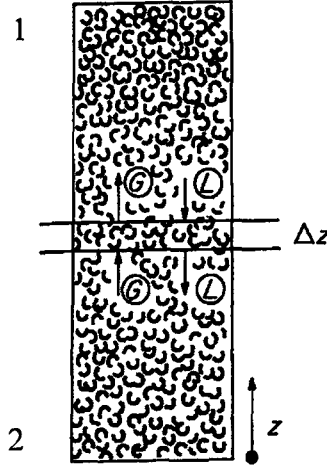
Denklem 2.9 içerisinde yer alan C^* ve p^* parametreleri ise Denklem 2.11'de tanımlanmıştır.

$$C^* = \frac{p_G}{H} \quad (2.11)$$

$$p^* = HC_L$$

Burada, C^* değeri tüm gaz basıncına eşit eşdeğer konsantrasyonu, p^* değeri ise sıvı faz içerisindeki eşdeğer konsantrasyona eşit eşdeğer basıncı ifade etmektedir.

Şimdi, dolgulu kulede makroskopik bir analiz yapılacaktır. Burada, kule kesitinde diferansiyel bir kontrol hacmi alınarak kirletici üzerinde molar denge yazılacaktır (Şekil 2.3).



Şekil 2.3 Dalgulu kule üzerinde alınan diferansiyel kontrol hacmi

Kirletici üzerinde molar denge yazılırsa ;

$$0 = -G'_m \frac{dy}{dz} + L'_m \frac{dx}{dz} \quad (2.12)$$

ifadesinden ;

$$\Rightarrow x = x_1 + \frac{G'_m}{L'_m} (y - y_1) \quad (2.13)$$

yazılmaktadır. Burada ;

L'_m : Sıvı fazın molar akısı,

G'_m : Gaz fazının molar akısı

şeklinde ifade edilmektedir. Eğer molar denge sadece gaz karışımı üzerinde yazılırsa ;

$$0 = -G'_m \frac{dy}{dz} - K_{OG} a P (y - y^*) \quad (2.14)$$

$$\Rightarrow Z = \int_0^Z dz = -\frac{G'_m}{K_{OG} a P} \int_{y_1}^{y_2} \frac{dy}{(y - y^*)} \quad (2.15)$$

olarak dolgulu kulenin yüksekliği elde edilmektedir. Burada ;

a : Kulede kullanılacak dolgu malzemesinin yüzey alanı [=] m^2 / m^3 (Benett & Myers, 1983).

$\frac{G'_m}{K_{OG}aP} \rightarrow$ *sabit* olarak (Bennett & Myers, 1983) integral dışına çıkarılmıştır. Burada ;

$$y^* = Hx \quad (2.16)$$

olduğundan dolgulu kulenin yüksekliği daha açık bir şekilde Denklem 2.17'de gösterilmiştir.

$$\begin{aligned} \Rightarrow Z &= \frac{1}{K_{OG}aP} \frac{1}{(1/G'_m - H/L'_m)} \ln \left(\frac{y_1 - Hx_1}{y_z - Hx_z} \right) \\ &= \frac{G'_m}{K_{OG}aP} \times \frac{1}{(1 - HG'_m/L'_m)} \ln \left(\frac{y_1 - Hx_1}{y_z - Hx_z} \right) \end{aligned} \quad (2.17)$$

Burada gaz filmi uzunluğu L 'nin ve y_1 değerlerinin belirlenmesi çok zordur. Çünkü ara kesitten numune almak imkansızdır. Bu nedenle alternatif bir çözüm olarak logaritmik mol oranı ifadesinden yararlanılmaktadır. Logaritmik mol oranı ve kule yüksekliği ;

$$Z = \frac{G'_m}{K_{OG}aP} \times \frac{y_1 - y_z}{\Delta y_{LM}}; \quad \Delta y_{LM} = \frac{(y_1 - y_1^*) - (y_z - y_z^*)}{\ln \left(\frac{y_1 - y_1^*}{y_z - y_z^*} \right)} \quad (2.18)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Burada dolgulu kulenin diferansiyel hacmindeki gaz üzerinde molar dengenin yazılması ve logaritmik mol oranı ifadesinden yararlanılması ile dolgulu kule yüksekliği ;

$$\begin{aligned} 0 &= -\frac{G'_{m0}}{(1-y)^2} \frac{dy}{dz} - K_{OG}aP(y - y^*) \\ \Rightarrow Z &= \int_0^Z dz = \frac{G'_{m0}}{K_{OG}aP} \int_{y_z}^{y_1} \frac{dy}{(1-y)^2(y - y^*)} = HTU \times NTU \end{aligned} \quad (2.19)$$

olarak tanımlanır. Burada transfer birimleri yüksekliği HTU değeri;

$$HTU = \frac{G'_{m0}}{K_{OG}aP} \quad (2.20)$$

ve transfer birimleri sayısı NTU değeri ise ;

$$NTU = \int_{y_z}^{y_1} \frac{dy}{(1-y)^2(y - y^*)} \quad (2.21)$$

şeklinde ifade edilmektedir.

Burada, Denklem 2.21’de görülen integral ifadesinin yani transfer birim yüksekliği olan NTU’nun nümerik analiz yöntemi ile hesabı anlatılacaktır. Bu değer, denge eğrisi ile işletme çizgisi arasında kalan üçgen sayısının bulunması ile elde edilmektedir. Bu üçgen sayılarının bulunması için burada bazı nümerik yaklaşımlar açıklanacaktır.

2.2 Denge Eğrilerinin Tanımlanması

Absorpsiyon kulesi tasarımlarında denge eğrisi verilen X ve Y değerlerine göre çizilmektedir. Bu değerler :

$$X : (\text{mol kirletici}) / (\text{mol su})$$

$$Y : (\text{mol kirletici}) / (\text{mol hava})$$

şeklinde ifade edilmektedir.

Önemli Not : Bu X ve Y değerleri, x ve y değerleri ile karıştırılmamalıdır. Çünkü x ve y değerleri ;:

$$x : (\text{mol kirletici}) / (\text{mol sıvı})$$

$$y : (\text{mol kirletici}) / (\text{mol gaz})$$

şeklinde tanımlanmaktadır.

Mol gaz = mol hava + mol kirletici’den oluştuğundan Y şu şekilde ifade edilebilir ;

$$Y = \frac{y}{1-y} = \frac{\frac{\text{mol(kirletici)}}{\text{mol(gaz)}}}{1 - \left(\frac{\text{mol(kirletici)}}{\text{mol(gaz)}} \right)} = \frac{\frac{\text{mol(kirletici)}}{\text{mol(gaz)}}}{\frac{\text{mol(gaz)} - \text{mol(kirletici)}}{\text{mol(gaz)}}} = \frac{\frac{\text{mol(kirletici)}}{\text{mol(gaz)}}}{\frac{\text{mol(hava)}}{\text{mol(gaz)}}} = \frac{\text{mol(kirletici)}}{\text{mol(hava)}} \quad (2.22)$$

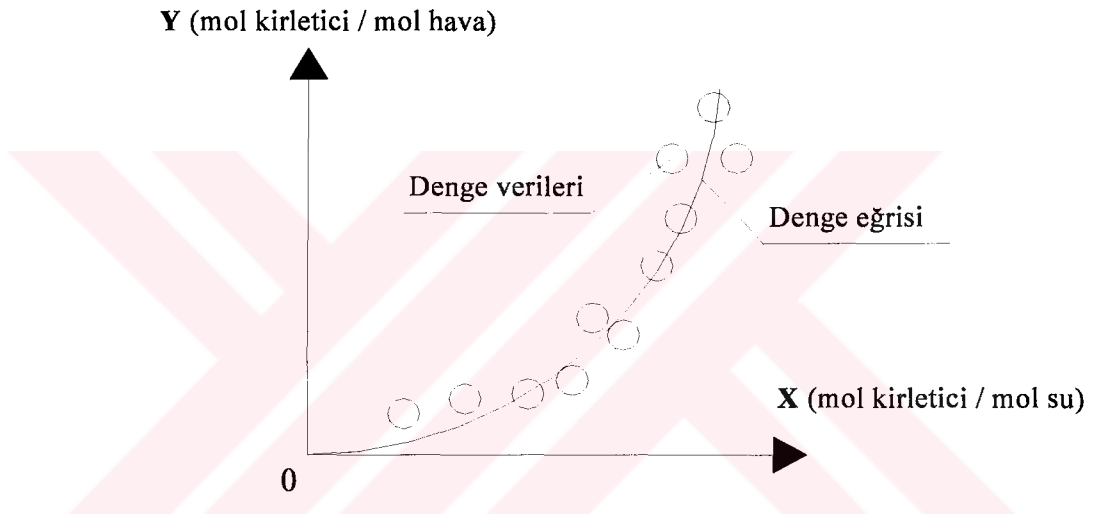
olarak görülmektedir. Yine X değeri de $X = x/(1-x)$ olarak hesaplanmaktadır (Treybal, 1981).

Absorpsiyon kulesi tasarım hesaplamalarında karşımıza genel olarak 2 tip denge eğrisi çıkmaktadır. Bu denge eğrileri içbükey ve dış bükey şeklinde olabildiği gibi gelişigüzel bir eğriye de sahip olabilmektedir. Genel anlamdaki eğri tiplerini şu şekilde ifade etmemiz mümkündür :

Bunları birinci ve ikinci tip olarak ifade edersek; örneğin birinci tip denge eğrisi, amonyak (NH_3) içeren bir gaz karışımının denge verilerine, ikinci tip denge eğrisi de metanol (CH_3OH)

içeren bir gaz karışımının denge verilerine uymaktadır. Bu eğrileri, matematiksel olarak şu şekilde de tanımlamamız mümkündür:

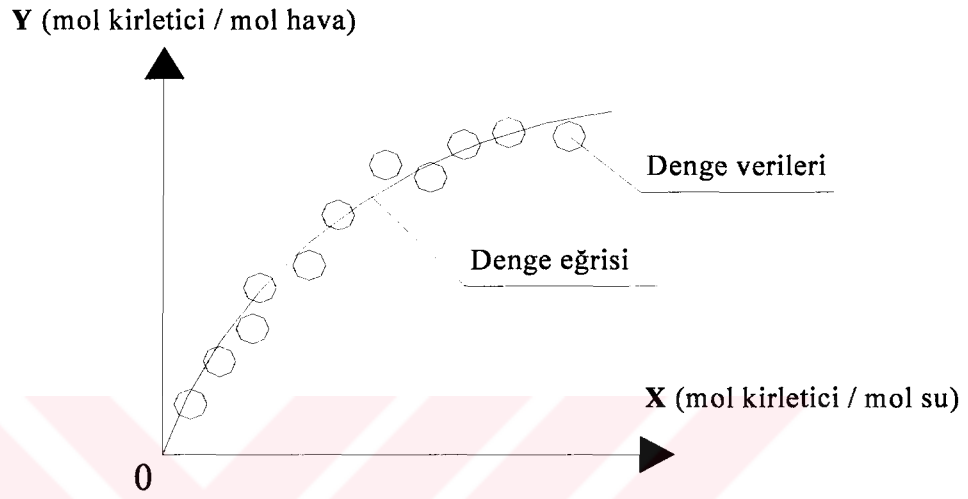
Birinci tip denge eğrisinde, X değerlerinin yani kirleticinin mol miktarının suyun mol miktarına oranının, Y değerlerine yani kirleticinin mol miktarının havanın mol miktarına oranına göre artış hızı daha fazla olmaktadır. Ayrıca, ilerleyen bölümlerde de belirtileceği gibi, mevcut denge verileri için regresyon analizi uygulanarak uydurulacak en iyi kuvvet fonksiyonunun regresyon katsayısı birinci tip denge eğrisi için 1'den büyük olmaktadır. Şekil 2.4'te birinci tip denge eğrisi görülmektedir.



Şekil 2.4 Birinci tip denge eğrisi

İkinci tip denge eğrisinde ise X değerlerinin artış hızı Y değerlerine göre daha yavaş olmaktadır. Ayrıca şu da söylenebilir ki uydurulan kuvvet fonksiyonunun regresyon katsayısı 1'den küçük olmaktadır.

Şekil 2.5'te İkinci tip denge eğrisi verilmiştir.



Şekil 2.5 İkinci tip denge eğrisi

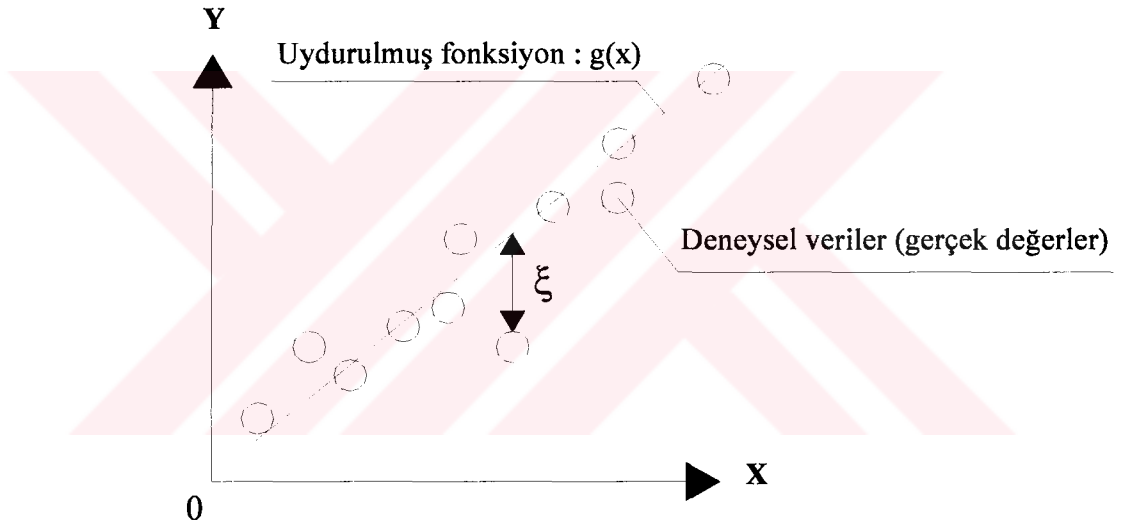
3. EN KÜÇÜK KARELER METODU İLE EĞRİ UYDURULMASI

Verilen X ve Y datalarına göre denge eğrilerinin denklemleri, nümerik tasarımın bir parçası olarak regresyon analizi ile oluşturulacaktır. Regresyon analizi yani eğri uydurma (Farlow & Haggard, 1990) yöntemi, en küçük kareler metodu ile açıklanmıştır.

Gerçek fonksiyon değerleri ($x_i ; y_i$) ise bu matematiksel değerler absorpsiyon kulesi (Zenz, 1988) verileri olan X ve Y'ye karşılık gelmektedir. Denge eğrisini çizimi için uydurulacak en yakın eğrinin fonksiyonu ise $g(x)$ olarak tanımlanırsa gerçek değerler ile yaklaşık değerler arasındaki fark yaklaşım hatasını vermektedir. Bu hata değeri ise ξ ile ifade edilirse ;

$$\xi = g(x) - y_i \quad (3.1)$$

olarak hata değeri tanımlanabilir.



Şekil 3.1 En küçük kareler metodu ile eğri uydurulması

Tüm gerçek verilere göre bu hataların kareleri toplamı E ile gösterilirse bu değer ;

$$E = \sum \xi^2 = \sum (g(x) - y_i)^2 \quad (3.2)$$

olacaktır. Uydurulması istenen $g(x)$ fonksiyonu;

$$g(x) = a + bx + cx^2 \quad (3.3)$$

gibi 2. dereceden bir fonksiyon ise bu ifade hataların kareleri toplamı ifadesinde yerine yazılırsa ;

$$E = \sum \xi_i^2 = \sum (a + bx + cx^2 - y_i)^2 \quad (3.4)$$

olur. Bu hataların toplamının minimum olması için türev tanımına göre (Edgar & Himmelblau, 1989);

$$\frac{\partial E}{\partial a} = 0; \frac{\partial E}{\partial b} = 0; \frac{\partial E}{\partial c} = 0 \quad (3.5)$$

olmalıdır. Şimdi ayrı ayrı kısmi türevleri alırsak ifadeler şu hale gelmektedir :

$$\begin{aligned} \frac{\partial E}{\partial a} &= 2 \sum (a + bx + cx^2 - y_i) * 1 = 0 \rightarrow a \sum 1 + b \sum x + c \sum x^2 = \sum y_i \\ \frac{\partial E}{\partial b} &= 2 \sum (a + bx + cx^2 - y_i) * x = 0 \rightarrow a \sum x + b \sum x^2 + c \sum x^3 = \sum y_i * x \\ \frac{\partial E}{\partial c} &= 2 \sum (a + bx + cx^2 - y_i) * x^2 = 0 \rightarrow a \sum x^2 + b \sum x^3 + c \sum x^4 = \sum y_i * x^2 \end{aligned} \quad (3.6)$$

olarak kısmi türev ifadeleri görülmektedir. Bu eşitlikler bilinenler ve bilinmeyenler olarak matris formatında düzenlenirse ;

$$\begin{bmatrix} n & \sum x & \sum x^2 \\ \sum x & \sum x^2 & \sum x^3 \\ \sum x^2 & \sum x^3 & \sum x^4 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum y_i \\ \sum y_i x \\ \sum y_i x^2 \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

olarak yazılmaktadır. Bulunacak parametreler değişik tipteki denge eğrileri için uydurulacak en yakın fonksiyonun derece katsayılarıdır. Eğer bu fonksiyon 2. derece değil 1. derece olsaydı o zaman matris formatı ;

$$\begin{bmatrix} n & \sum x \\ \sum x & \sum x^2 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum y_i \\ \sum y_i x \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

şeklinde olacaktır. Bu denklemi yukarıda daire içerisine alınan şekilde çözersek ;

$$\begin{aligned} -\sum x / a n + b \sum x &= \sum y_i \rightarrow -\cancel{a n} \sum x - b (\sum x)^2 = -\sum x \sum y_i \\ n / a \sum x + b \sum x^2 &= \sum y_i x \rightarrow \cancel{a n} \sum x + b n \sum x^2 = n \sum y_i x \\ b (n \sum x^2 - (\sum x)^2) &= n \sum xy - \sum x \sum y \rightarrow b = \frac{n \sum xy - \sum x \sum y}{n \sum x^2 - (\sum x)^2} \\ a &= \frac{\sum y - b \sum x}{n} \end{aligned} \quad (3.9)$$

olarak bulunur. Burada b regresyon katsayısı (regression coefficient), a ise sabit terim

(constant term) dir.

Eğer biz denge eğrisi için $y = cx^d$ gibi bir kuvvet fonksiyonu (power regression function) uyduracaksak bu ifadeyi lineer forma dönüştürmemiz gereklidir. Bu da ;

$$y = cx^d \rightarrow \text{Lineerizasyon} \rightarrow \ln y = \ln c + d \ln x \quad (3.10)$$

olarak ifade edilmektedir.

Ancak yukarıdaki b ve a katsayıları burada $b = d$, $a = \ln c$ olmaktadır. Hesaplamalarda kullanılacak x ve y değerleri ise artık $\ln x$ ve $\ln y$ olarak modifiye edilecektir.

Uydurulacak kuvvet fonksiyonu $y = cx^d$ için katsayı ve sabit terim hesap ifadeleri sonuç olarak yazılırsa ;

$$d = b = \frac{n \sum \ln x \ln y - \sum \ln x \sum \ln y}{n \sum (\ln x)^2 - (\sum \ln x)^2} \quad (3.11)$$

$$\ln c = a = \frac{\sum \ln y - d \sum \ln x}{n} \rightarrow c = \text{Exp}(a)$$

olarak hesaplanacaktır. Çizelge 3.1’de eğri uydurma yönteminin uygulaması bakımından, kirletici olarak metanol (CH_3OH) ihtiva eden bir gaz karışımına ait denge datası verilmiştir. Bir dolgulu kule için 1 atm basınç ve 40°C ’de metanol – su karışımı için denge verileri Çizelge 3.1’de ki gibidir. Buna göre;

Çizelge 3.1 Metanol (CH_3OH) içeren gaz karışımı için 40°C ve 1 atm basıncındaki denge datası

X	0.020	0.040	0.070	0.100	0.140
Y	0.024	0.046	0.076	0.102	0.128

X [=] mol metanol / mol su ; **Y** [=] mol metanol / mol hava

Çizelge 3.1’den görüldüğü gibi denge eğrisi için deneysel sonuçlar verilmiştir. Denge eğrisinin denklemini nümerik analiz yöntemi ile elde edelim. Uydurulacak fonksiyon $y = cx^d$ gibi bir kuvvet fonksiyonu olsun. X ve Y ifadeleri lineerize edilmiş halde $\ln x$ ve $\ln y$ ’ye dönüştüğünden bunları formülde kullanmak amacıyla hesaplayalım. Bu işlem için Çizelge 3.2’yi oluşturursak ;

Çizelge 3.2 Metanol (CH₃OH) için lineerize edilmiş denge eğrisinin hesabı

No	Inx	Iny	Inx*Iny	(Inx) ²
1	-3.912	-3.730	14.592	15.304
2	-3.219	-3.079	9.911	10.362
3	-2.659	-2.577	6.852	7.070
4	-2.303	-2.283	5.258	5.304
5	-1.966	-2.056	4.042	3.865
Σ	-14.059	-13.725	40.655	41.905

Şimdi hesaplanan toplam değerlerini formülde yerine koyalım :

$$d = b = \frac{n \sum Inx Iny - \sum Inx \sum Iny}{n \sum (Inx)^2 - (\sum Inx)^2} = \frac{5(40.655) - (-14.059)(-13.725)}{5(41.905) - (-14.059)^2} = \frac{10.315225}{11.869519} = 0.869$$

$$Inc = a = \frac{\sum Iny - d \sum Inx}{n} = \frac{(-13.725) - (0.869)(-14.059)}{5} = -0.3015459 \rightarrow c = \exp(A) = 0.74$$
(3.12)

olarak hesaplanır. Sonuç olarak denge eğrisi için uydurulan kuvvet fonksiyonunun denklemi ;

$$y = cx^d = 0.74 x^{0.869}$$
(3.13)

olarak hesaplanmıştır.

Bir regresyon analizinin doğruluğu korelasyon katsayısı (Spiegel, 1975) ile belirlenir. Korelasyon katsayısı 1'e ne kadar yakın ise analiz o kadar doğru yapılmış demektir. Bu değer R kritik katsayısının karesi ile ifade edilen değer olup R² ile gösterilir.

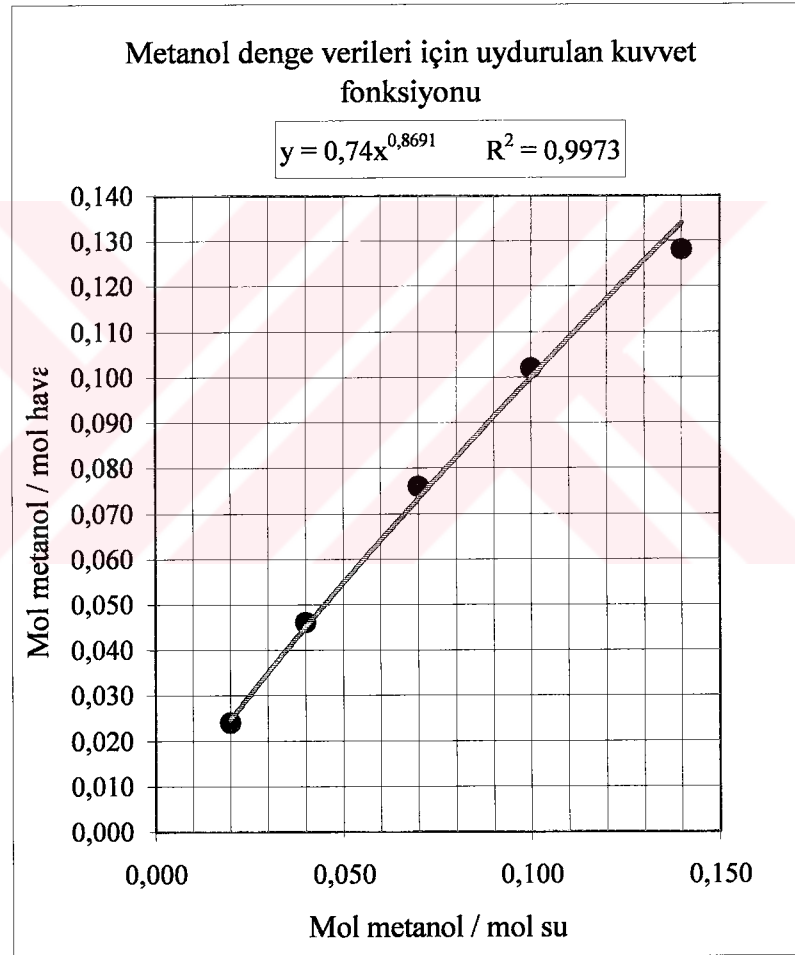
R kritik katsayısı Denklem 3.14'teki gibi ifade edilmektedir :

$$R = \frac{n \sum xy - \sum x \sum y}{\sqrt{\{n \sum x^2 - (\sum x)^2\} * \{n \sum y^2 - (\sum y)^2\}}} \rightarrow R^2 : \text{Korelasyon_kats.}$$
(3.14)

ifadesinden uydurulan fonksiyonun doğruluğu belirlenir.

Çizelge 3.2’de verilen değerler için bu değer $R^2 = 0.9973$ olarak hesaplanmıştır. Görüldüğü gibi 1’e çok yakın bir değer olup analiz %99.73 doğruluk payına sahiptir. Uydurulan denklemlerin tipleri değiştikçe korelasyon katsayısı da değişmektedir. Örneğin yukarıdaki denge verilerine 4. dereceden bir denklem uydurulduğunda $R^2 = 1$ olmaktadır. Yani analiz %100 doğrudur. Ancak nümerik olarak 4. dereceden bir denklemi hesaplamak daha zor olduğundan diğer denklem tipleri tercih edilebilir. Zaten bunların doğrulukları da 1’e oldukça yakındır.

Çizelge 3.1’de verilen metanol için denge datası için uydurulan kuvvet fonksiyonu Şekil 3.2’de verilmiştir. Burada denge eğrisinin denklemi ile birlikte korelasyonu da (R^2) görülmektedir.



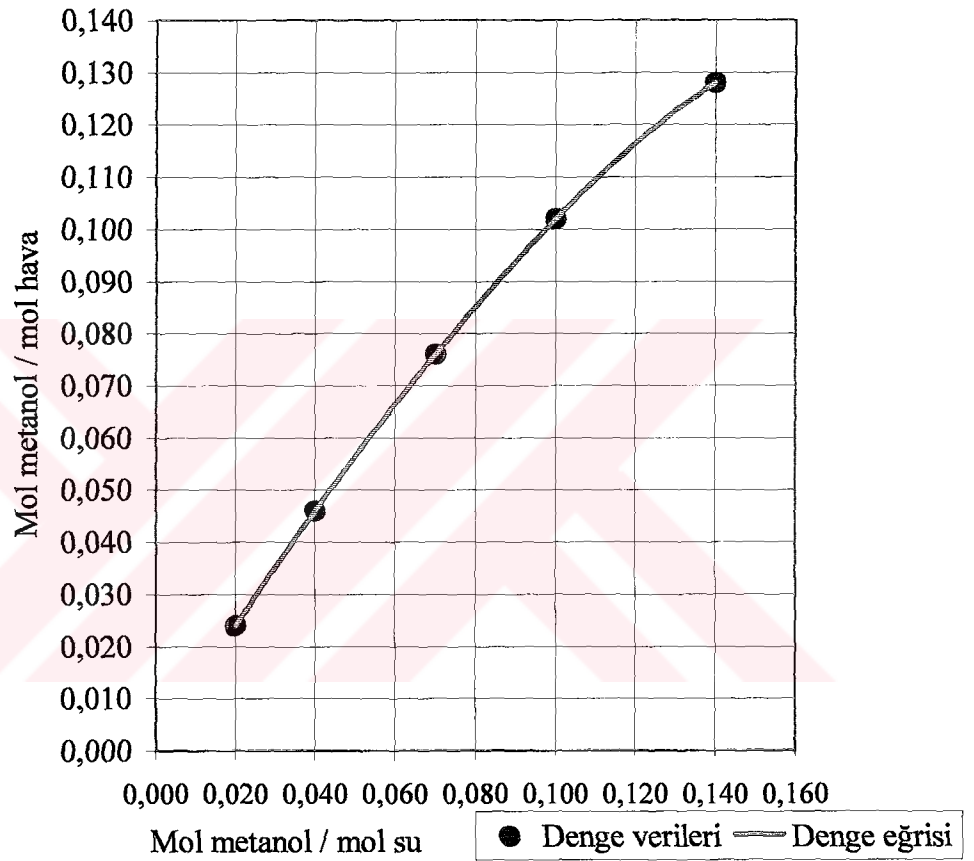
Şekil 3.2 Metanol (CH_3OH)’e ait denge datası için uydurulan kuvvet fonksiyonu

Daha önce de bahsedildiği gibi 4. dereceden bir fonksiyon uydurulması durumunda korelasyon %100 sağlanmaktadır. Bu da bilgisayarla hesaplanmış ve sonuç grafiği Şekil 3.3’te verilmiştir.

Metanol denge verileri için uydurulan dördüncü derece fonksiyon

$$y = -49,603x^4 + 8,631x^3 - 2,5317x^2 + 1,2337x + 0,0003$$

Korelasyon : $R^2 = 1$



Şekil 3.3 Metanol (CH_3OH)'e ait denge datası için uydurulan 4. derece fonksiyon

4. MINIMUM İŞLETME EĞİMİNİN HESABI

Absorpsiyon kulelerinde sıvı faz olarak kullanılan su debisi, minimum debinin %20 – %50 (U.S. EPA/CATC, 2002) üzerinde sağlanmaktadır. Konunun başında da bahsedildiği gibi gaz fazı ile sıvı faz arasındaki kütle transferi konsantrasyon gradyanının sıfır olduğu noktaya kadar devam etmektedir. İşte bu sınır noktası işletme çizgisi ile denge eğrisinin kesim noktasıdır. Bu noktada zorlayıcı kuvvet olan konsantrasyon gradyanı sıfırdır ve transfer yoktur. Nümerik analiz yöntemi ile bu nokta bulunarak buradan işletme çizgisinin gerçek işletme halindeki eğimi hesaplanacaktır. Şimdi genel ifade yazılırsa ;

$$\left(\frac{L_w}{G_a}\right)_{design} = (1.20 - 1.50) * \left(\frac{L_w}{G_a}\right)_{minimum} \quad (4.1)$$

olarak yazılabilir. Burada ;

L_w : Suyun molar veya hacimsel debisi

G_a : Havanın molar veya hacimsel debisi

olarak ifade edilmektedir. İşletme çizgisi ve denge eğrisi hakkındaki nümerik analiz (Salvador & Baran, 1966) yöntemlerinin hesabında kullanılan ifadeler şu şekildedir :

$$Y_0 = \frac{y_0}{1 - y_0} \quad (4.2)$$

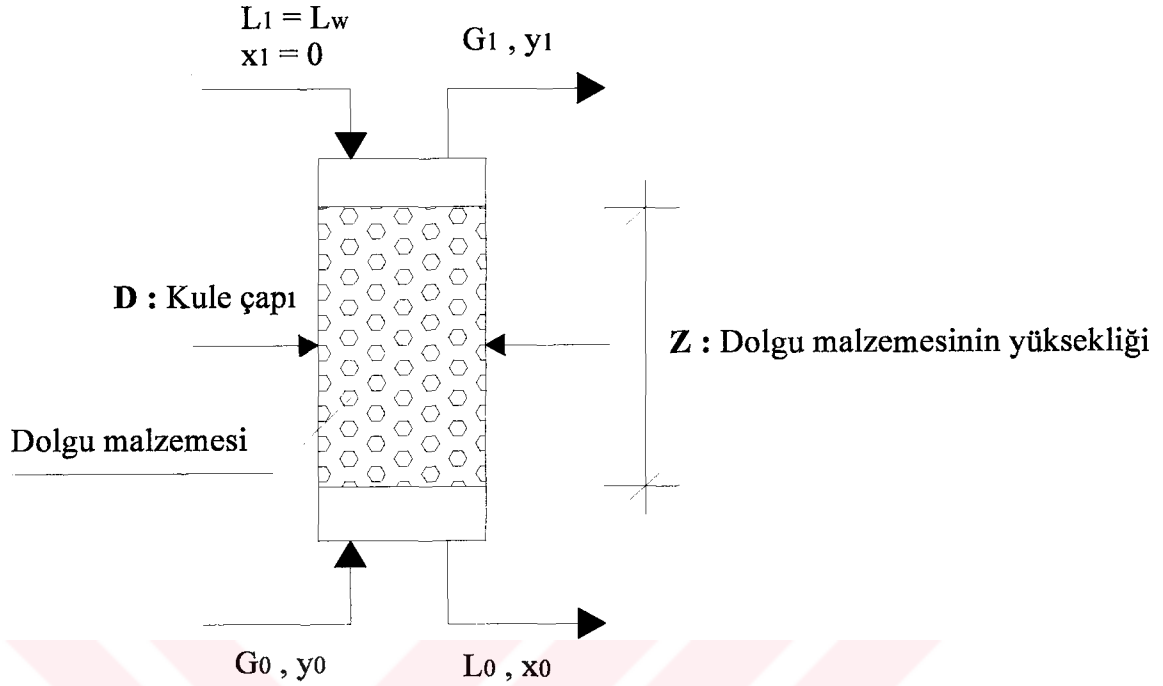
değeri nümerik yaklaşımda denge eğrisi için bir sınır ordinatını temsil etmektedir. Burada konunun esas olan transfer birimleri sayısının (NTU) hesabında adım adım elde edilen her değer bu sınır değeri ile mukayese edilerek net üçgen sayısının bulunması hedeflenmiştir.

$$Y_1 = \frac{y_1}{1 - y_1} \quad (4.3)$$

Denklem 4.3'te görülen Y_1 değeri ise işletme çizgisinin denkleminde $x = 0$ değeri elde edilen y ordinatıdır. Yani bu lineer doğrunun, söz konusu kirleticinin mol miktarının suyun mol miktarına olan oranının sıfır olduğu değere karşılık gelen, mol kirletici / mol hava oranının değerini ifade etmektedir.

Denklem 4.2 ve Denklem 4.3'te ifade edilen Y_0 ve Y_1 değerleri tezdeki nümerik yaklaşımın altyapısını teşkil etmektedir.

Şekil 4.1’de absorpsiyon kulesinin şematik çizimi verilmiştir.



Şekil 4.1 Absorpsiyon kulesinin şematik çizimi

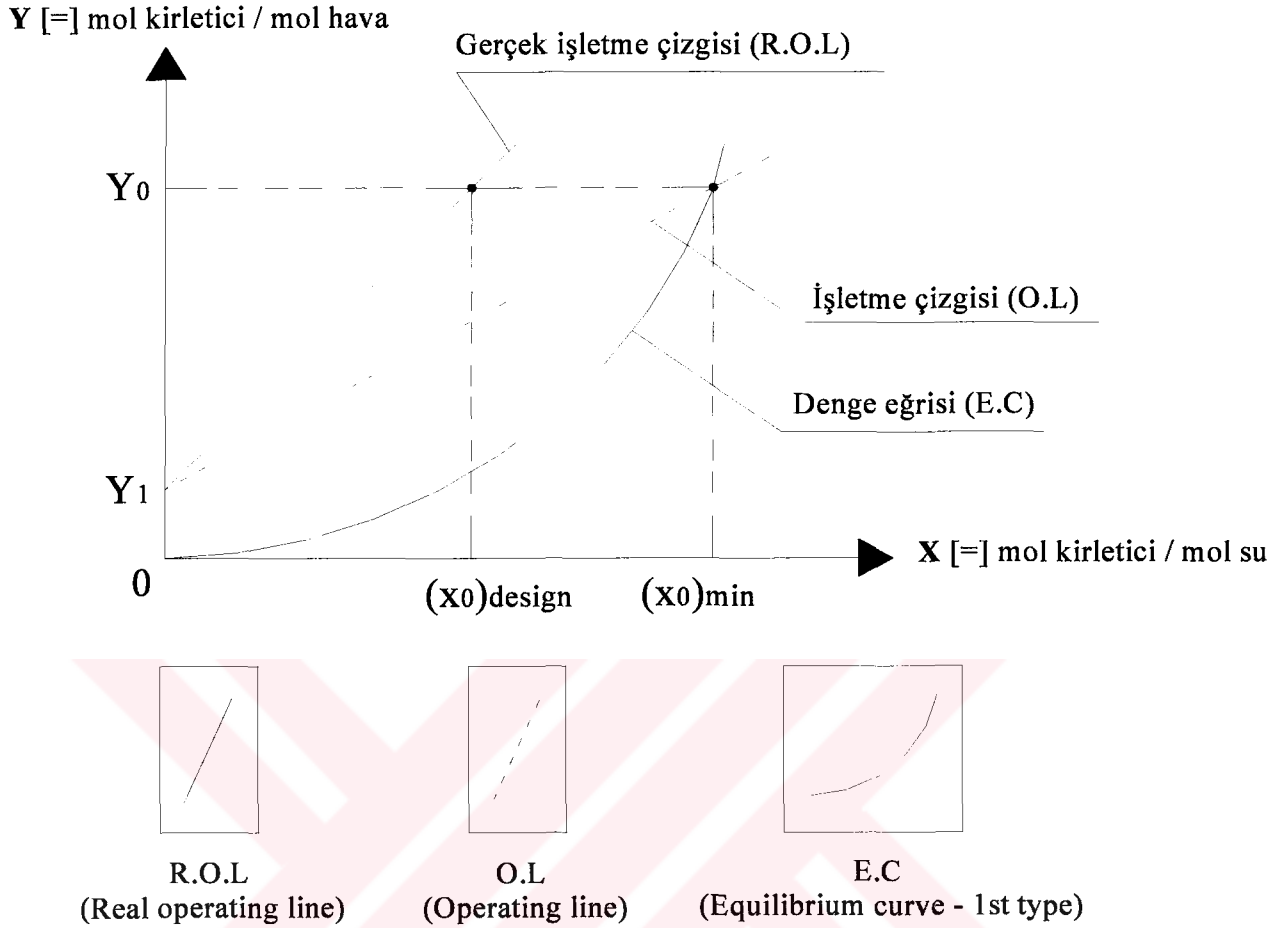
Şekil 4.1’de dolgulu kuleye ait şematik çizim görülmektedir. Şimdi işletme çizgisinin denge eğrisi ile kesişimi ile ilgili açıklamalar yapılırsa;

İşletme çizgisinin denklemi : $y = mx + n$ (Lineer fonksiyon)

Denge eğrisinin denklemi : $y = cx^d$ (Regresyon analizinden elde edilen kuvvet fonksiyonu)

olarak tanımlanırsa bu iki fonksiyonun kesişim noktasını bulmak için fonksiyonları birbirine eşitlemek gerekir. Bu kesişim noktası, bize transferin (Nishimura & Nakamura, 1995) olmadığı yani zorlayıcı kuvvet olan konsantrasyon gradyanının sıfır olduğu, başka bir deyişle gaz fazından sıvı faza kütle transferinin durduğu noktayı verecektir. Bu değer ile işletme çizgisinin minimum eğimi hesaplanacak, bunun istenen belirli bir katı alınarak tasarım eğimine geçilecektir. Önce bu durum Şekil 4.2’de verilen 1. tip denge eğrisi için incelenmiştir.

4.1 Birinci tip denge eğrisinin ve minimum işletme eğiminin tanımlanması



Şekil 4.2 Birinci tip denge eğrisi ile işletme çizgisi arasındaki ilişki

Şekil 4.2’de verilen birinci tip denge eğrisinde minimum eğimin hesabı, denge eğrisi ile çakışan kesikli durumda gösterilen işletme çizgisinin koordinatları ile Denklem 4.4’te verilmiştir. Buna göre;

$$\left(\frac{L_w}{G_a} \right)_{\min imum} = \frac{Y_0 - Y_1}{(x_0)_{\min}} \quad (4.4)$$

Kesişim noktasının koordinatları bu tip denge eğrisi için $((x_0)_{\min} ; Y_0)$ ’dır. Burada aynı zamanda işletme çizgisinin fonksiyonundan görüldüğü gibi $n = Y_1$ değeridir. ($x = 0$ için) Yani bu kesişim noktasını her iki fonksiyonda da yerine koyarsak ;

Operating Line : O.L

Equilibrium Curve : E.C

olarak ifade edilirse, denge eğrisi ve işletme çizgisinin denklemleri;

$$\text{O.L (İşletme çizgisi)} : Y_0 = m(x_0)_{\min} + Y_1 \quad (4.5)$$

ve

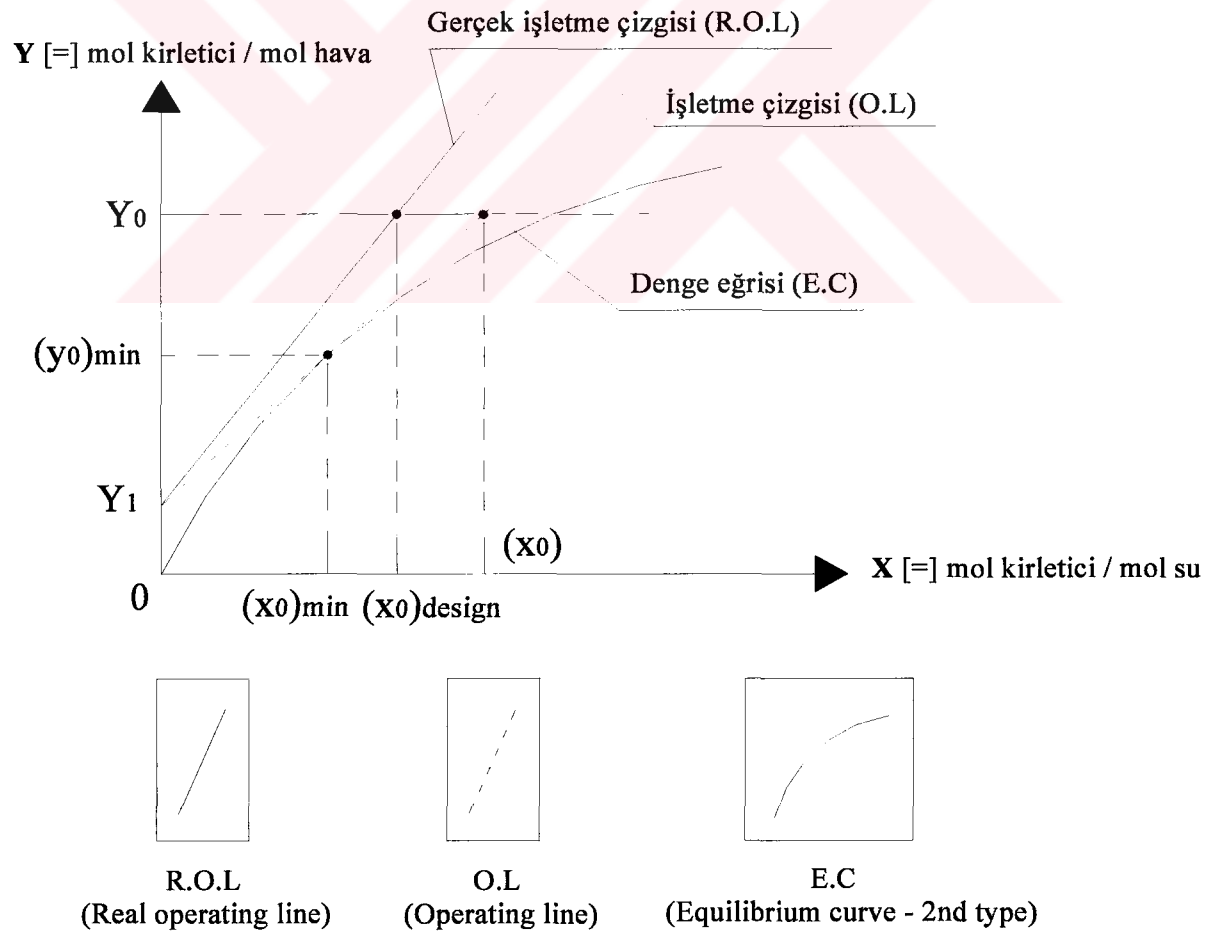
$$\text{E.C (Denge eğrisi)} : Y_0 = c(x_0)^d_{\min} \quad (4.6)$$

şeklinde yazılabilir. Birinci tip denge eğrisi için bu iki fonksiyonun kesişim noktası olan minimum nokta ;

$$(x_0)_{\min} = \sqrt[d]{\frac{Y_0}{c}} \quad (4.7)$$

olarak hesaplanır. İşte bu noktada itici güç olan konsantrasyon gradyanı ya da kirleticinin gaz fazından sıvı fazına doğru molar akısı sıfır olmaktadır. Bu noktadan yola çıkılarak önce minimum eğim, daha sonra gerçek işletme çizgisinin eğimi hesaplanmaktadır.

4.2 İkinci tip denge eğrisinin ve minimum işletme eğiminin tanımlanması



Şekil 4.3 İkinci tip denge eğrisi ile işletme çizgisi arasındaki ilişki

Bu tip denge eğrisi 1. tip'ten farklı olup minimum nokta $(y_0)_{\min}$ 'da elde edilmektedir. Burada kesişim noktasının koordinatlarını her iki fonksiyonda da yazarsak işletme çizgisi için;

$$\text{O.L (İşletme çizgisi)} : (y_0)_{\min} = m(x_0)_{\min} + Y_1 \quad (4.8)$$

Ve denge eğrisi için;

$$\text{E.C (Denge eğrisi)} : (y_0)_{\min} = c(x_0)_{\min}^d \quad (4.9)$$

olarak yazılmaktadır. Bu fonksiyonların $(x_0)_{\min}$ noktasındaki türevleri birbirine eşit olmalıdır. Buna göre ;

İşletme çizgisi (O.L) için kesişim noktasındaki türev ifadesi;

$$d(y_0)_{\min} / d(x_0)_{\min} = m \quad (4.10)$$

olarak linner doğrunun o noktadaki eğimini vermekte ve denge eğrisi (E.C) için yine kesişim noktasındaki türev ifadesi de ;

$$d(y_0)_{\min} / d(x_0)_{\min} = cd (x_0)_{\min}^{d-1} \quad (4.11)$$

olacaktır. Bu ifadeler birbirine eşitlenirse minimum eğim;

$$m = cd (x_0)_{\min}^{d-1} \quad (4.12)$$

olacaktır. Bu ifade işletme çizgisi (O.L)'nin denkleminde yerine yazılırsa ;

$$(y_0)_{\min} = m(x_0)_{\min} + Y_1 = (cd (x_0)_{\min}^{d-1}) * (x_0)_{\min} + Y_1 = c(x_0)_{\min}^d \quad (4.13)$$

ifadesinden ;

$$cd (x_0)_{\min}^d + Y_1 = c(x_0)_{\min}^d \quad (4.14)$$

yazılır. Buradan ;

$$Y_1 = c(x_0)_{\min}^d (1-d) \quad (4.15)$$

olur. Ve kesişim noktası ;

$$(x_0)_{\min}^d = \frac{Y_1}{(1-d)c} \rightarrow (x_0)_{\min} = \sqrt[d]{\frac{Y_1}{(1-d)c}} \quad (4.16)$$

olarak bulunmuştur.

Şekil 4.3'te verilen ikinci tip denge eğrisinin şeklinden de görüldüğü gibi minimum eğim ;

$$\left(\frac{L_w}{G_a} \right)_{\min} = \frac{(y_0)_{\min} - Y_1}{(x_0)_{\min}} = \frac{Y_0 - Y_1}{(x_0)} \quad (4.17)$$

değerlerinden hesaplanır.

Çizelge 3.1'de metanol için verilen denge datası ikinci tipe uyduğundan (X değerleri Y'ye göre daha yavaş artıyor. Ayrıca uydurulan kuvvet fonksiyonun üs değeri 1'den küçük) minimum kesişim noktası Denklem 4.16'da verilen ifadeden hesaplanacaktır. Şimdi problemdeki diğer veriler yazılırsa;

Gaz karışımındaki metanol (CH_3OH) miktarı : %10

Hava miktarı : %100 - %10 = % 90

Giderilmesi istenen miktar : %96

Geriye kalan miktar : %4

ise buradan Y_0 ve Y_1 değerleri hesaplanacaktır. Buna göre;

$$Y_0 = \frac{y_0}{1 - y_0} = \frac{10}{100 - 10} \cong 0.111 \quad (4.18)$$

olarak mukayese sınır değeri ve

$$Y_1 = \frac{y_1}{1 - y_1} = \frac{(10 * 0.04)}{100 - (10 * 0.04)} \cong 0.004 \quad (4.19)$$

olarak işletme çizgisinin y eksenini kestiği noktanın koordinatı ya da bir başka ifadeyle neural yaklaşımın başlangıç değeri elde edilmiştir.

Buna göre minimum eğimi veren kesişim noktası hesaplanırsa (Çizelge 3.1'de metanol için verilen denge datası için uydurulan denge eğrisi kuvvet fonksiyonu ;

$$y = 0.74 x^{0.869} \quad (4.20)$$

olduğundan ($c = 0.869$ ve $d = 0.74$)) ;

$$(x_0)_{\min}^d = \frac{Y_1}{(1-d)c} \rightarrow (x_0)_{\min} = \sqrt[d]{\frac{Y_1}{(1-d)c}} = \sqrt[0.869]{\frac{0.004}{(1-0.869)(0.74)}} \cong 0.0255 \quad (4.21)$$

olarak bulunur. Bu sonuç kesin değerdir. Milimetrik kağıt ile bulunan sonuçlar değişik olabildiği gibi yaklaşık veya hatalı okuma ile bulunan değerler olabilir. Bu değer ise matematiksel nümerik yöntem ile bulunduğundan kesin değerdir. Minimum kesişim noktası Denklem 4.22'de hesaplanmıştır. Buna göre ;

$$(x_0)_{\min}^d = \frac{Y_1}{(1-d)c} \rightarrow (x_0)_{\min} = \sqrt[d]{\frac{Y_1}{(1-d)c}} = \sqrt[0.869]{\frac{0.004}{(1-0.869)(0.74)}} \cong 0.0255 \quad (4.22)$$

Minimum işletme eğimi ise;

$$m = cd (x_0)_{\min}^{d-1} = (0.74) * (0.869) (0.0255)^{0.869-1} = 1.04 \quad (4.23)$$

olarak bulunur. Şekil 4.3'te verilen ikinci tip denge eğrisi için diğer koordinat değerleri ise ;

$$(y_0)_{\min} = m(x_0)_{\min} + Y_1 = (1.04) * (0.0255) + 0.004 = 0.0305 \quad (4.24)$$

olur. (x_0) ise ;

$$0.111 = Y_0 = (1.04) * (x_0) + 0.004 \quad (4.25)$$

ifadesinden $x_0 = 0.103$ olarak hesaplanır. İşletme eğimi için kule eğer minimum su debisinin % 40 üzerinde işletilecekse tasarım eğimi Denklem 4.26'da hesaplanmıştır. Buna göre;

$$\left(\frac{L_w}{G_a} \right)_{\text{design}} = (1.40) * \left(\frac{L_w}{G_a} \right)_{\text{minimum}} = (1.40) * (1.04) = 1.456 \quad (4.26)$$

olarak bulunur. Buradan tasarım koordinatı yani $(x_0)_{\text{design}}$ değeri hesaplanırsa ;

$$\left(\frac{L_w}{G_a} \right)_{\text{design}} = \frac{Y_0 - Y_1}{(x_0)_{\text{design}}} \rightarrow 1.456 = \frac{0.111 - 0.004}{(x_0)_{\text{design}}} \rightarrow (x_0)_{\text{design}} \cong 0.0735 \quad (4.27)$$

olarak elde edilmiştir. Bu nokta ile işletme çizgisi çizilir. Sonuç olarak, Çizelge 3.1'de metanol için verilen denge datasından yol çıkılarak hesaplanan işletme çizgisinin denklemi ;

$y = mx + n$ ifadesi için;

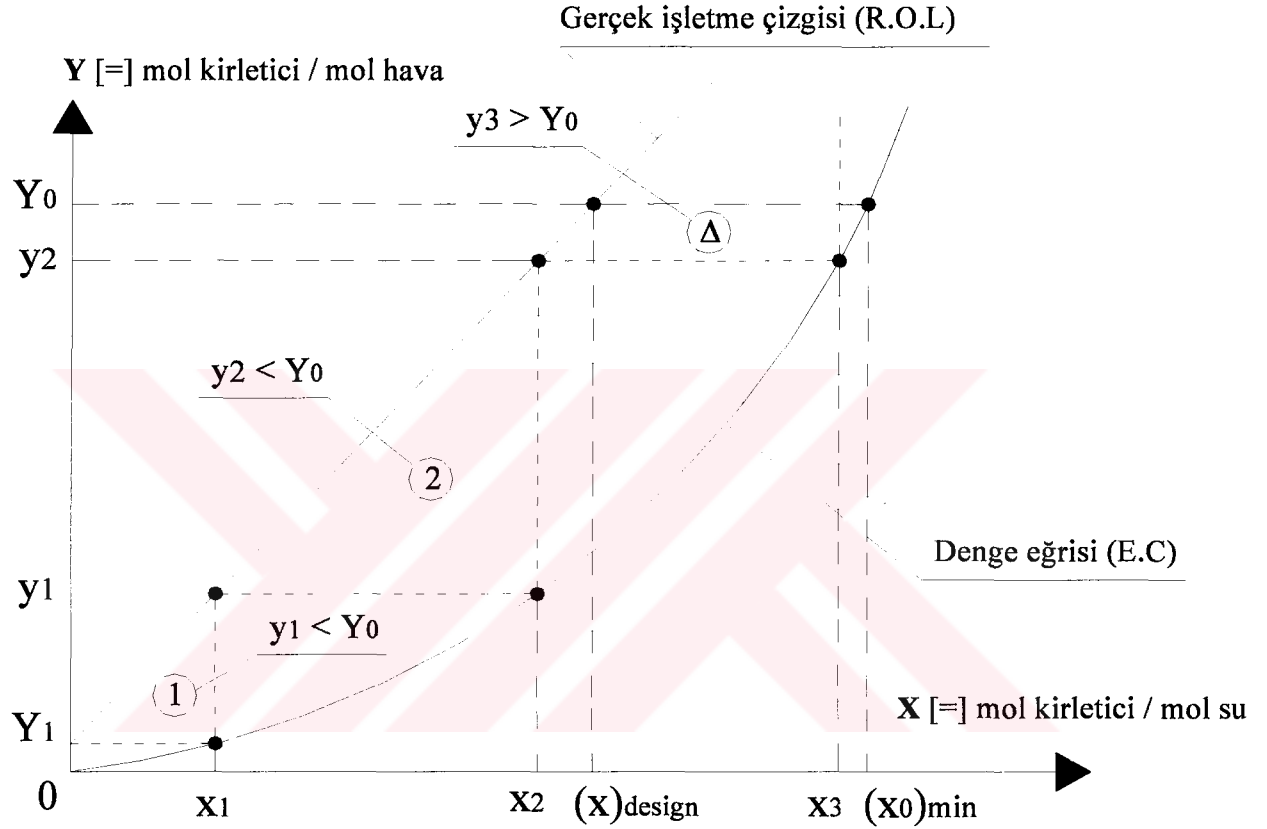
$$y = 1.456x + 0.004 \quad (4.28)$$

olarak, denge eğrisi için uydurulan kuvvet fonksiyonunun

denklemini ise $y = 0.74 x^{0.869}$ olarak elde edilmiştir.

5. NÜMERİK ANALİZ YAKLAŞIMI İLE TRANSFER BİRİMLERİ SAYISI (NTU) NIN HESAPLANMASI

Daha önce de ifade edildiği gibi transfer birimleri sayısı, (NTU = Number of Transfer Units) tasarım eğimine göre çizilen işletme çizgisi ile denge eğrisi arasında üçgen sayısına eşittir. Burada NTU'nun hesabı nümerik olarak yapılacaktır. Bu yaklaşım 1. tip denge eğrisi üzerinde açıklamıştır. Buna göre;



Şekil 5.1 Gerçek işletme eğrisi ve uydurulan denge eğrisi arasındaki tam ve kısmi üçgenler

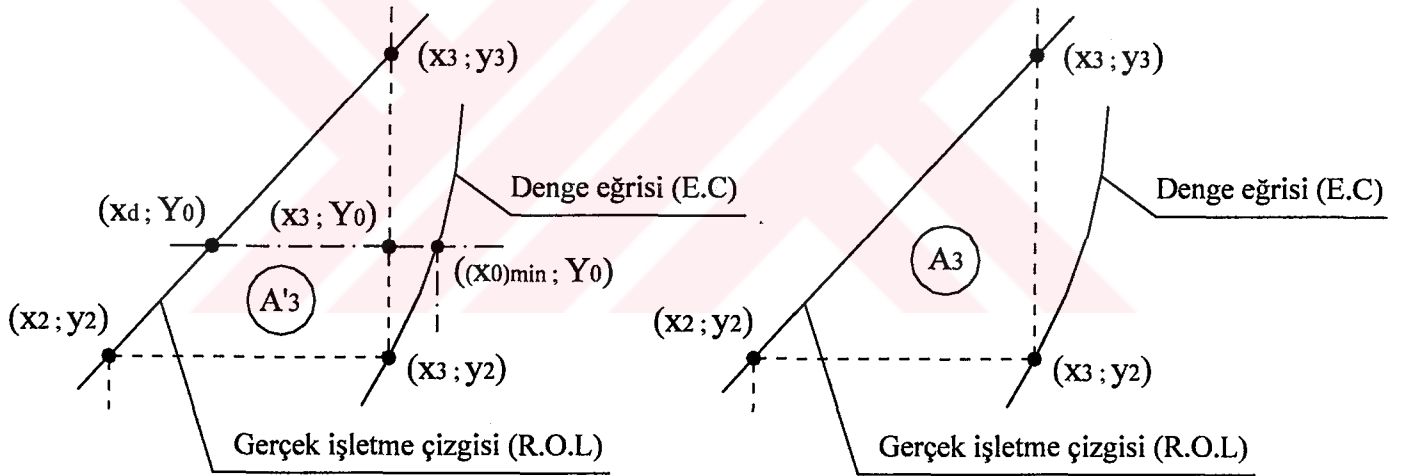
Şekil 5.1'den görüldüğü gibi işletme çizgisi ile denge eğrisi arasında dik çizimler ile üçgenler elde edilmiştir. Üçgen sayısı denklemlere ve eğimlere bağlı olarak değişmektedir. Şimdi bu üçgen sayısının, yani esas alınan transfer birimleri sayısının (NTU değerinin) belirtilen yaklaşım metodu ile nasıl hesaplanacağı açıklanacaktır.

Burada bilinmesi gerekenler işletme çizgisinin ve denge eğrisinin denklemleridir. Bu denklemler yardımıyla adım adım hesaplamalar yapılacaktır.

İşlemin sırası şu şekildedir:

$Y_1 = n$ değeri ile hesaplamaya başlanacaktır. Bu değer önce denge eğrisinin denkleminde y yerine yazılacak ve x_1 değeri elde edilecektir. Elde edilen x_1 değeri bu sefer işletme çizgisinin denkleminde x yerine yazılacak ve y_1 değeri bulunacaktır. Eğer bu değer (y_1) sınır değeri olan Y_0 'dan küçük ise bir üçgen elde edilecektir. Sıra ile yine işleme devam edilecek ve her bulunan yeni y değeri Y_0 ile karşılaştırılacaktır. Her küçük değer, bir üçgen daha verecektir. Eğer geline y değeri Y_0 sınır değerinden büyük çıkarsa işlem bitirilecek ve bu değer ne kadar üzerinde olduğu belirlenerek kalan parçanın da fraksiyonu hesaplanıp diğer bulunan üçgen sayısına ilave edilecek ve böylece toplam üçgen sayısı yani net NTU belirlenmiş olacaktır

Şekil 5.1'te verilen birinci tip denge eğrisinde bu durum izah edilmiştir. Burada 2. üçgenden sonra $y_3 > Y_0$ olduğundan işlem bitmiştir. Görüldüğü gibi burada kısmi bir üçgen vardır. Bunun oranı şu şekilde bulunacaktır:



Şekil 5.2 NTU hesabındaki tam ve kısmi üçgenler

Şekil 5.2'de görülen A'_3 yamuk alanı ;

$$A'_3 = \left[\frac{(x_3 - x_{design}) + (x_3 - x_2)}{2} \right] * (Y_0 - y_2) \quad (5.1)$$

olarak hesaplanacaktır. Eğer tam üçgen olsaydı bunun alanı ;

$$A_3 = \frac{[(y_3 - y_2) * (x_3 - x_2)]}{2} \quad (5.2)$$

olacaktır. Burada Y_0 limitini aşan değerin üçgen fraksiyonu ;

$$\Delta = \frac{A'_3}{A_3} \quad (5.3)$$

ile hesaplanacak ve limiti aşmayan değer sayısı kadar olan diğer üçgen sayısına ilave edilerek toplam üçgen sayısı ile NTU değeri elde edilecektir. Eğer son değer olarak bulunan y değeri (örneğin Şekil 5.2'de y_3 değeri) Y_0 sınır değerine çok yakın veya eşit çıkarsa bu fraksiyon hesabı ihmal edilebilir çünkü yamuk alanı sıfır veya sıfıra çok yakın bir sayı çıkar. Bu nedenle Y_0 'ı belirli bir şekilde aşan değerler için fraksiyon hesabı yapılmalıdır. Fraksiyon hesabı için genel bir ifade yazılırsa ve Y_0 'ı aşan değerin no'su 'n' ile ifade edilirse yamuk alanı ;

$$A'_n = \left[\frac{(x_n - x_{design}) + (x_n - x_{n-1})}{2} \right] * (Y_0 - y_{n-1}) \quad (5.4)$$

olarak ifade edilir. Tam üçgen alanı ise ;

$$A_n = \frac{[(y_n - y_{n-1}) * (x_n - x_{n-1})]}{2} \quad (5.5)$$

olarak hesaplanacaktır. Çizelge 3.1'de metanol için verilen denge verilerinden yararlanılarak işletme çizgisi ve denge eğrisinin denklemleri belirlenmişti. Şimdi bu iki fonksiyon arasında kalan üçgen sayısı yani net NTU değeri nümerik yaklaşım ile hesaplanacaktır. Buna göre;

İşletme çizgisinin denklemi, O.L : $y = 1.456x + 0.004$ ve denge eğrisinin denklemi de E.C : $y = 0.74 x^{0.869}$ şeklinde hesaplanmıştı. $Y_1 = n = 0.004$ olduğuna göre bu değer ile hesaba başlanacaktır. Burada adım adım yapılan işlemler Çizelge 5.1'de verilmiştir.

Çizelge 5.1 Metanol için verilen denge datası ile net NTU hesabı

Denge Eğrisi	Gerçek İşletme Çizgisi	Sınır değer	Üçgen Sayısı
X	Y	$Y_0 = 0.111$	Δ
$2.46 * 10^{-3}$	0.0076	$< Y_0$	1
$5.15 * 10^{-3}$	0.0115	$< Y_0$	2
$8.295 * 10^{-3}$	0.0161	$< Y_0$	3
0.0122	0.0218	$< Y_0$	4
0.0173	0.0292	$< Y_0$	5
0.0242	0.0393	$< Y_0$	6
0.0341	0.0537	$< Y_0$	7
0.0489	0.0751	$< Y_0$	8
0.0719	0.109	$< Y_0$	9

Çizelge 5.1’de de görüldüğü gibi, son değer 9. üçgeni oluşturmuştur. Bu değerden sonra Y_0 sınır değeri aşılabacaktır. Ve işlem bitecektir. Ancak daha önce de açıklandığı gibi bulunan son değer Y_0 ’a çok yakın olduğundan fraksiyon hesabı ihmal edilebilir. O halde burada net NTU yaklaşık 9 alınabilir.

Kulenin toplam dolgu malzemesinin yüksekliğinin (Henry & Heinke, 1996) elde edilmesi için hesaplanan net NTU değeri, transfer birimleri yüksekliği (HTU =Height of Transfer Units) ile çarpılarak Z dolgu malzemesi yüksekliği hesaplanacaktır. Bu da Denklem 5.6’da verilmiştir.

$$Z = (HTU) * (NTU) \quad (5.6)$$

5.1 Net transfer birimleri yüksekliği (net NTU) hesabı için özet bilgiler

- 1-) Eğri uydurma yöntemi ile en küçük kareler metodundan yararlanılarak, mevcut kirleticiye ait denge verileri için en yüksek korelasyonlu denge eğrisinin regresyonla oluşturulması.
- 2-) Birinci veya ikinci tip olarak tanımlanan denge eğrilerinin tipine göre işletme çizgisi ile kesim noktasının elde edilmesi ve önce minimum eğimin daha sonra da gerçek işletme eğiminin hesaplanmasıyla gerçek işletme çizgisinin denkleminin yazılması.
- 3-) Denge eğrisinin ve işletme çizgisinin denklemlerinden ve daha önce hesaplanan Y_0 ve Y_1 değerlerinden faydalanılarak adım adım hesap yapılmasıyla işlemin bittiği sınır bulunması ve fraksiyon hesabının da uygulanmasıyla net NTU değeri elde edilmesi.



6. YAKLAŞIM METODUNUN KLASİK ÇÖZÜM YÖNTEMİ İLE MUKAYESESİ

Giriş kısmında da bahsedildiği gibi, yaklaşım metoduna ait sonuçların, klasik çözüm yöntemi ile kıyaslanması açısından sayısal bir tasarım uygulamasına yer verilmesi uygun bulunmuştur. Sayısal tatbikattan sonra, problemin MATLAB 5.3 algoritması ile çözümü sunulmuş ve elde edilen sonuçlar klasik çözüm ile mukayese edilmiştir.

6.1 Amonyak bertarafı amacıyla kullanılacak bir dolgulu kulenin tasarımına ait sayısal uygulama

Bir dolgulu kule, hacimsel olarak 20°C sıcaklıkta ve 1 atm basınçta % 8 amonyak (NH_3) ve %92 hava içeren bir gaz karışımından, amonyağın % 96'sını gidermek amacıyla işletilecektir. Söz konusu gaz karışımı kulenin altından $1630 \text{ m}^3/\text{saat}$ 'lik hacimsel debiyle girmekte olup, sıvı faz olarak su kullanılmaktadır. Dolgu malzemesi olarak 1 inçlik seramik 'raschig' halkaları kullanılacak ve dolgulu kule taşıma hızının % 60 değerinde işletilecektir. Su debisi ise minimum debinin % 30 üzerinde olacaktır. Bu bilgilere ve Çizelge 6.1'de verilen denge datasına göre bu absorpsiyon kulesinin yüksekliğinin hesaplanması istenmektedir.

Çizelge 6.1 Amonyak (NH_3) içeren gaz karışımı için 20°C ve 1 atm basınçtaki denge datası

X	0.0206	0.0310	0.0407	0.0502	0.0735	0.0962
Y	0.0158	0.0240	0.0329	0.0418	0.0660	0.0920

X [=] mol amonyak / mol su ; Y [=] mol amonyak / mol hava

Kirleticiye ve diğer parametrelere ait bilgiler aşağıda verilmiştir. Buna göre;

μ_L = Suyun 20°C 'deki viskozitesi [=] 1 cp (centipoise) or 2.42 lb/ft-saat

Havanın moleküler ağırlığı [=] 29.0 kg/kgmol

Amonyağın moleküler ağırlığı (NH_3) [=] 17.0 kg/kgmol

Amonyak için hava fazındaki Schmidt Sayısı ($\mu/\rho \cdot D$) [=] 0.66

Amonyak için su fazındaki Schmidt Sayısı ($\mu/\rho \cdot D$) [=] 570

1 lb = 0.454 kg ve 1 m = 3.28 ft olarak alınacaktır.

Dolgulu kulenin tasarımında kullanılacak önemli formüller ise;

Gaz fazı için transfer birimleri yüksekliği (HtG);

$$H_{tG} = \left[\frac{\alpha * (G')^\beta}{(L')^\gamma} \right] * \left(\frac{\mu_G}{\rho_G * D_G} \right)^{0.50} \quad (6.1)$$

olarak ifade edilmektedir. Sıvı faz için transfer birimleri yüksekliği (HtL) ise;

$$H_{tL} = \phi * \left(\frac{L'}{\mu_L} \right)^\eta * \left(\frac{\mu_L}{\rho_L * D_L} \right)^{0.50} \quad (6.2)$$

şeklinde hesaplanacaktır. Bu iki transfer birimleri yüksekliğinin hesaplanmasından sonra toplam transfer birimleri yüksekliği ise;

$$H_{tOG} = H_{tG} + \left(\frac{m * G_m}{L_m} \right) * H_{tL} \quad (6.3)$$

ifadesi ile hesap edilecektir.

6.1.1 Debi değerlerinin ve işletme eğiminin hesaplanması

Burada, havaya ait hacimsel, molar ve kütleli debiler hesaplanmıştır. Yine absorbe edilen ve absorbe edilmeyen amonyak için de molar ve kütleli debiler elde edilmiştir.

$$\text{Havanın hacimsel debisi} = 1630 * 0.92 = 1499.6 \text{ m}^3/\text{saat} \quad (6.4)$$

$$\text{Havanın molar debisi} = \frac{1499.6 * 1.0}{0.082 * 293} = 62.42 \text{ kgmol} / \text{saat} \quad (6.5)$$

$$\text{Havanın kütleli debisi} = 62.42 * 29 = 1810.18 \text{ kg/saat} \quad (6.6)$$

$$\text{Amonyakın hacimsel debisi} = 1630 * 0.08 = 130.4 \text{ m}^3/\text{saat} \quad (6.7)$$

$$\text{Amonyakın molar debisi} = \frac{130.4 * 1.0}{0.082 * 293} = 5.43 \text{ kgmol} / \text{saat} \quad (6.8)$$

$$\text{Amonyakın kütleli debisi} = 5.43 * 17 = 92.31 \text{ kg/saat} \quad (6.9)$$

$$\text{Absorbe edilmeyen amonyakın molar debisi} = 5.43 * 0.04 = 0.21 \text{ kgmol/saat} \quad (6.10)$$

$$\text{Absorbe edilen amonyakın kütleli debisi} = 92.31 * 0.96 = 88.62 \text{ kg/saat} \quad (6.11)$$

$$\text{Absorbe edilmeyen amonyağın kütleli debisi} = 92.31 * 0.04 = 3.69 \text{ kg/saat} \quad (6.12)$$

Denge eğrisinin mukayese sınır değeri olan Y_0 ifadesi;

$$Y_0 = \frac{8}{92} \cong 0.087 \quad (6.13)$$

olarak hesaplanmıştır. Nümerik yaklaşımın başlangıç değeri yada lineer işletme çizgisinin y eksenini kesen noktanın değeri ise;

$$Y_1 = \frac{(8 * 0.04)}{100 - (8 * 0.04)} \cong 0.0032 \quad (6.14)$$

şeklinde elde edilmiştir. Buradan tasarım yani gerçek işletme çizgisinin eğimin minimum debinin % 30 üzerindeki işletme hali için hesaplanmıştır. Buna göre;

$$\left(\frac{L_w}{G_a} \right)_{design} = (1.3) * \left(\frac{L_w}{G_a} \right)_{minimum} = (1.3) * \left[\frac{0.087 - 0.0032}{0.092 - 0} \right] = (1.3) * (0.91) = 1.18 \quad (6.15)$$

değeri elde edilmiştir. Denklem 6.15'te görülen 0.092 değeri işletme çizgisi ile denge eğrisinin kesişim noktası olan yani molar akının yada kütle transferinin sıfır olduğu noktadır. Bu değer, minimum eğim için milimetrik kağıt üzerine, Çizelge 6.1'de verilen denge datasının çizilmesi ile elde edilen denge eğrisinin işletme çizgisi ile kesiştirilmesi ile elde edilmiştir. Buradan suyun molar ve kütleli debileri hesaplanmıştır. Buna göre;

$$\text{Suyun molar debisi} = 62.42 * 1.18 = 73.66 \text{ kgmol/saat} \quad (6.16)$$

$$\text{Suyun kütleli debisi} = 73.66 * 18 = 1325.88 \text{ kg/saat} \quad (6.17)$$

olarak hesaplanmıştır.

6.1.2 Kulenin altı için kütleli debilerin ve kule çapının hesaplanması

Kulenin altı için gaz karışımı hava ile kirletici gazdan oluşmaktadır. Buna göre ;

$$(\text{Gaz karışımının kütleli debisi})_{kule altı} = (\text{Hava})_{kütleli} + (\text{Amonyak})_{kütleli} = 1810.18 + 92.31 = 1902.49 \text{ kg/saat} \quad (6.18)$$

olarak hesaplanmıştır. Kulenin altı için sıvı fazın kütleli debisi ise, su ve absorbe edilmiş amonyak solüsyonundan oluşmaktadır. Buna göre ;

$$(\text{Sıvı fazın kütleli debisi})_{\text{kule altı}} = (S_u)_{\text{kütleli}} + (A_{\text{monyak, absorbe edilmiş}})_{\text{kütleli}} = 1325.88 + 88.62 = 1414.5 \text{ kg/saat} \quad (6.19)$$

şeklinde elde edilmiştir. Gaz karışımının moleküler ağırlığı, havanın moleküler ağırlığının 29 kg/mol ve amonyağın moleküler ağırlığının 17 kg/mol olarak alınmasıyla yüzdelerine göre;

$$\text{Gaz karışımının moleküler ağırlığı} = 0.92 * 29 + 0.08 * 17 = 28.04 \text{ kg/mol} \quad (6.20)$$

olarak hesaplanmıştır. Bu değere göre gaz karışımının yoğunluğu;

$$\text{Gaz karışımının yoğunluğu} = \rho_{\text{gaz}} = \frac{28.04 * 1.0}{0.082 * 293} = 1.17 \text{ kg/m}^3 \quad (6.21)$$

şeklinde hesaplanmıştır. Taşma eğrisinin (Flooding Curve) apsis değeri ;

$$\text{Taşma eğrisinin apsis değeri} = \frac{L'}{G'} \sqrt{\frac{\rho_G}{\rho_L}} = \frac{1414.5}{1902.49} \sqrt{\frac{1.17}{1000}} \cong 0.025 \quad (6.22)$$

olarak hesaplanmıştır. Denklem 6.22'de ki L' ve G' değerleri lb/s-ft² biriminde ifade edilmektedir. Ancak kök ifadesinin başında (L'/G') bir oran olduğundan bu ifadelerde doğrudan Denklem 6.18'de ve Denklem 6.19'da hesaplanan sonuçlar alınmıştır. Suyun yoğunluğu da 1000 kg/m³ olarak kök içine yazılmış ve taşma eğrisinin apsis değeri yaklaşık olarak elde edilmiştir. Bu değere karşılık gelen ordinat değeri de yine taşma eğrisinden (Peters & Timmerhaus, 1991) yaklaşık olarak 0.21 olarak okunmuştur. Denklem 6.23'ten birim kesit alandaki gaz fazının kütleli debisi hesaplanmıştır. Burada ;

$$F = 155 \text{ (McCabe, Smith \& Harriott, 1993)}$$

$$g_C = 32.2 \text{ lb-ft/lb}_f\text{-sec}^2$$

$$\rho_G = 1.17 \text{ kg/m}^3 = 0.073 \text{ lb/ft}^3$$

$$\rho_L = 1000 \text{ kg/m}^3 = 62.4 \text{ lb/ft}^3$$

olarak alınırsa;

$$y = \frac{(G')^2 * F * \mu_L^{0.2}}{g_c * \rho_G * \rho_L} \rightarrow G' \left(\frac{lb}{s - ft^2} \right) = \sqrt{\frac{0.21 * 32.2 * 0.073 * 62.4}{155 * (1)^{0.2}}} \cong 0.446 lb / s - ft^2 \quad (6.23)$$

ifadesinden birim kesit alandaki sıvı fazın kütleli debisi hesaplanmıştır. Dolgulu kule taşıma hızının % 60 değerinde işletileceğinden;

$$(G')_{dizayn} = 0.60 * 0.446 = 0.2676 lb/s-ft^2 \quad (6.24)$$

tasarım debisi elde edilmiştir. Kulenin altı için gaz karışımının kütleli debisi, $(G)_K = 1902.49 \text{ kg/saat} = 1.16 \text{ lb/s}$ olduğundan kulenin altı için kesit alanı ve kule altı çapı;

$$A = 1.16 / 0.2676 = 4.33483 \text{ ft}^2 \rightarrow D = 2.3493 \text{ ft} = 0.7163 \text{ m} \quad (6.25)$$

olarak hesaplanmıştır. Transfer birimleri sayısının yani gerçek işletme çizgisi ile denge eğrisi arasında kalan üçgen sayısının hesaplanması için milimetrik kağıtta çizilecek olan işletme çizgisine ait tasarım kesim noktası belirlenmelidir. Buna göre;

$$\left(\frac{L_w}{G_a} \right)_{design} = (1.3) * (0.91) = 1.18 = \frac{0.087 - 0.0032}{(x_0)_{design} - 0} \rightarrow (x_0)_{design} = 0.071 \quad (6.26)$$

olarak elde edilmiştir. Bu değerden yararlanılarak gerçek işletme çizgisi milimetrik kağıtta çizilmiştir. Bu lineer doğru ile denge eğrisi arasında kalan üçgen sayısı yaklaşık 6 olarak bulunmuştur.

6.1.3 Kulenin üstü için kütleli debilerin ve kule çapının hesaplanması

Kulenin üstü için gaz karışımının kütleli debisi hava ile absorbe edilmeden dolgulu kuleyi terk eden kirletici gazın kütleli debisinden meydana gelmektedir. Buna göre;

$$(Gaz \text{ karışımının kütleli debisi})_{kule \text{ üstü}} = (Hava)_{kütlesel} + (Amonyak, \text{ terk eden})_{kütlesel} = 1810.18 + 3.69 = 1813.87 \text{ kg/saat} \quad (6.27)$$

olarak hesaplanmaktadır. Kulenin üstünde ise sıvı faz olarak sadece su olduğundan bunun kütleli debisi ;

$$(Sıvı fazın kütleli debisi)_{kule \text{ üstü}} = (Su)_{kütlesel} = 1325.88 \text{ kg/saat} \quad (6.28)$$

şeklinde elde edilmiştir. Buradan yine taşıma eğrisinin apsis ve ordinat değerleri (Rowan University, Piché, S. et al., 2001) hesaplanırsa ;

$$\frac{L'}{G'} \sqrt{\frac{\rho_G}{\rho_L}} = \frac{1325.88}{1813.87} \sqrt{\frac{1.17}{1000}} \cong 0.025 \rightarrow y = 0.21 \quad (6.29)$$

olarak hesaplanmıştır. Birim kesit alandaki gaz fazının kütleli debisi ;

$$G' \left(\frac{lb}{sec-ft^2} \right) = \sqrt{\frac{0.21 * 32.2 * 0.073 * 62.4}{155 * (1)^{0.2}}} \cong 0.446 lb/s-ft^2 \quad (6.30)$$

olarak bulunmuştur. Dolgulu kule taşma noktasının % 60 altında işletileceğinden birim kesit alandaki gaz fazına ait tasarım debisi ;

$$(G')_{dizayn} = 0.60 * 0.446 = 0.2676 lb/s-ft^2 \quad (6.31)$$

şeklinde hesaplanmıştır. Burada kulenin üstü için gaz karışımının kütleli debisi

$(G)_K = 1813.87 \text{ kg/saat} = 1.1 \text{ lb/s}$ olduğundan kule üstü için kesit alanı ve kule üstü çapı ;

$$A = 1.1 / 0.2676 = 4.11 \text{ ft}^2 \rightarrow D = 2.29 \text{ ft} = 0.698 \cong 0.70 \text{ m} \quad (6.32)$$

olarak hesaplanmıştır. Eğer kulenin her iki tarafı için hesaplanan değerler birbirinden farklı ise maksimum veya ortalama değer alınabilir. Buna göre, kule çapı $2.348 \text{ ft} = 0.716 \text{ m}$ olarak alınacaktır.

6.1.4 Kulenin altı ve üstü için birim kesit alandaki kütleli debilerin hesaplanması

Kulenin altı için ;

Gaz karışımının kütleli debisi ;

$$(G)_K = 1902.49 \text{ kg/saat} = 4185.478 \text{ lb/saat} \quad (6.33)$$

şeklindedir. Gaz karışımının birim kesit alandaki kütleli debisi ;

$$(G')_K = (G)_K / A = 4185.478 / 4.33 = 966.62 \text{ lb/ft}^2\text{-saat} \quad (6.34)$$

olarak elde edilmiştir. Sıvı fazın kütleli debisi ;

$$(L)_K = 1414.5 \text{ kg/saat} = 3111.9 \text{ lb/saat} \quad (6.35)$$

şeklindedir. Birim kesit alandaki sıvı fazın kütleli debisi ise ;

$$(L')_K = (L)_K / A = 3111.9 / 4.33 = 718.68 \text{ lb/ft}^2\text{-saat} \quad (6.36)$$

olarak hesaplanmıştır.

Kulenin üstü için ;

Gaz karışımının kütleli debisi ;

$$(G)_K = 1813.87 \text{ kg/saat} = 3990.514 \text{ lb/saat} \quad (6.37)$$

şeklinde hesaplanmıştır. Gaz fazının birim kesit alandaki kütleli debisi ise;

$$(G')_K = (G)_K / A = 3990.514 / 4.33 = 921.6 \text{ lb/ft}^2\text{-saat} \quad (6.38)$$

olarak elde edilmiştir. Kulenin üstü için sıvı fazın kütleli debisi ;

$$(L)_K = 1325.88 \text{ kg/saat} = 2916.936 \text{ lb/saat} \quad (6.39)$$

şeklinde ifade edilmiştir. Bu sıvı fazın birim kesit alanı için kütleli debisi ise ;

$$(L')_K = (L)_K / A = 2916.936 / 4.33 = 673.66 \text{ lb/ft}^2\text{-saat} \quad (6.40)$$

olarak hesaplanmıştır.

6.1.5 Ortalama kütleli debilerin hesaplanması

Birim kesit alanındaki kütleli debilerin kulenin her iki tarafı için hesaplanmasından sonra buradan ortalama debilerin hesabına geçilmiştir. Buna göre ;

$$\begin{aligned} (\overline{G'})_{\text{kütleli}} &= \frac{966.62 + 921.6}{2} = 944.11 \text{ lb / ft}^2 - \text{saat} \\ (\overline{L'})_{\text{kütleli}} &= \frac{718.68 + 673.66}{2} = 696.17 \text{ lb / ft}^2 - \text{saat} \end{aligned} \quad (6.41)$$

olarak gaz ve sıvı faz için ortalama kütleli debiler elde edilmiştir.

6.1.6 Gaz fazı ve sıvı faz için transfer birimleri yüksekliklerinin hesaplanması

Bu hesaplamalar için ortalama kütleli debiler için 'Transfer birimleri yükseklikleri için kullanılan sabitler' tablosundan transfer birimi katsayıları şu şekilde alınmıştır :

$$\alpha = 7.00 ,$$

$$\beta = 0.39 ,$$

$$\gamma = 0.58,$$

$$\phi = 0.0100 \text{ ve}$$

$$\eta = 0.22$$

olarak alınmıştır. Buna değerler ve Schmidt sayısı Denklem 6.42'de yerine yazıldığında,

Gaz fazı için transfer birimleri yüksekliği ;

$$H_{IG} = \left[\frac{\alpha * (G')^\beta}{(L')^\gamma} \right] * \left(\frac{\mu_G}{\rho_G * D_G} \right)^{0.50} = \left[\frac{7.00 * (944.11)^{0.39}}{(696.17)^{0.58}} \right] * (0.66)^{0.50} \cong 1.85 \text{ ft} \quad (6.42)$$

olarak elde edilmiştir.

Sıvı faz için transfer birimleri yüksekliği ;

$$H_{IL} = \phi * \left(\frac{L'}{\mu_L} \right)^\eta * \left(\frac{\mu_L}{\rho_L * D_L} \right)^{0.50} = (0.0100) * \left(\frac{696.17}{2.42} \right) * (570)^{0.50} \cong 0.83 \text{ ft} \quad (6.43)$$

şeklinde bulunmuştur. Denge verilerinden eğim değeri yaklaşık olarak ;

$$m \cong \frac{\Delta Y}{\Delta X} \cong \frac{0.092}{0.0962} \cong 0.96 \quad (6.44)$$

şeklinde hesaplanmıştır.

6.1.7 Kulenin altı ve üstü için molar debilerin hesaplanması

Kulenin altı için ;

Gaz karışımının molar debisi ;

$$(G)_{\text{molar}} = (Hava)_{\text{molar}} + (NH_3)_{\text{molar}} = 62.42 + 5.43 = 67.85 \text{ kgmol/saat} \quad (6.45)$$

olarak hesaplanmıştır.

Sıvı fazın molar debisi ise ;

$$(L)_{\text{molar}} = (Su)_{\text{molar}} + (NH_3, \text{absorbe edilen})_{\text{molar}} = 73.66 + 5.43 * 0.96 = 78.87 \text{ kgmol/saat} \quad (6.46)$$

şeklinde elde edilmiştir.

Kulenin üstü için ;

Gaz karışımının molar debisi ;

$$(G)_{\text{molar}} = (\text{Hava})_{\text{molar}} + (\text{NH}_3, \text{terk eden})_{\text{molar}} = 62.42 + 5.43 * 0.04 = 62.64 \text{ kgmol/saat} \quad (6.47)$$

şeklinde bulunmuştur. Kulenin üstü için sıvı fazın molar debisi ise ;

$$(L)_{\text{molar}} = (\text{Su})_{\text{molar}} = 73.66 \text{ kgmol/saat} \quad (6.48)$$

olarak elde edilmiştir.

6.1.8 Ortalama molar debilerin hesaplanması

Kulenin altı ve üstü için elde edilen molar debilerin hesaplanmasından sonra, gaz fazı ve sıvı faz için ortalama molar debilerin hesabına geçilmiştir. Buna göre ;

$$\begin{aligned} (\overline{G'})_{\text{molar}} &= \frac{67.85 + 62.64}{2} = 65.25 \text{ kgmol / saat} \\ (\overline{L'})_{\text{molar}} &= \frac{78.87 + 73.66}{2} = 76.27 \text{ kgmol / saat} \end{aligned} \quad (6.49)$$

olarak elde edilmiştir.

6.1.9 Toplam transfer birimleri yüksekliğinin (HTU) ve absorpsiyon kulesinin yüksekliğinin (Z) hesaplanması

Gaz fazı ve sıvı faz için hesaplanan transfer birimleri yüksekliklerinin hesaplanmasından sonra, toplam transfer birimleri yüksekliğinin ve absorpsiyon kulesinin yüksekliğinin hesabına geçilmiştir. Buna göre ;

$$HTU = H_{iOG} = H_{iG} + \left(\frac{m * G_m}{L_m} \right) * H_{iL} = 1.85 + \left(\frac{0.96 * 65.25}{76.27} \right) * 0.83 \cong 2.532 \text{ ft} \cong 0.772 \text{ m}$$

$$Z = HTU * NTU = 0.772 * 6 \cong 4.632 \text{ m}$$

(6.50)

olarak elde edilmiştir.

Bu sonuçlara göre ;

Absorpsiyon kulesinin çapı : $D = 2.3 \text{ ft} \cong 0.716 \text{ m}$ ve kulenin yüksekliği ise $Z = 4.632 \text{ m}$ olarak elde edilmiştir.

6.2 MATLAB 5.3 programının tanıtılması

Absorpsiyon kulesinin tasarımında ;

MATLAB

The Language of Technical Computing

Version 5.3.0.10183 (R11)

January 21,1999

License Number : 76297

CD Serial Number : 11-10224-43044-38818-03811-61063-11324

Nümerik analiz programından yararlanılmıştır. Program çalıştırıldığında '*MATLAB Command Window*' ekrana gelmektedir. Bu pencere programda analizlerin gerçekleştiği ana bölümdür. Bu pencerenin üzerinde '*File, Edit, View, Window ve Help*' menüleri yer almaktadır. Bu menülerden '*File*' menüsüne ait alt menülerden '*New/M-file*' çalıştırıldığında, '*MATLAB Command Window*' penceresinin üzerine programların yazılacağı '*MATLAB Editor/Debugger – [Untitled1]*' penceresi yerleşecektir. Açılan bu pencerede absorpsiyon kulesi tasarım programı yazılmış ve program '*Absorption kulesi.m*' adı altında kaydedilmiştir. Yine '*File*' menüsünden '*Open*' alt menüsü çalıştırılarak yazılan program, yazılım penceresine çağırılmaktadır. Program ekrana geldikten sonra, programın işletilmesi için '*Edit*' menüsünden '*Select All*' alt menü komutu ile programın tüm satırlarının seçilmesi sağlanır. Siyah renk alan seçilmiş program satırlarının işletilmesi için sağ mouse tuşu ile seçili durumdaki satırların üzerine gelinerek '*Evaluate Selection*' komutuyla programın değerlendirilmesi sağlanır. Bundan sonra tekrar '*MATLAB Command Window*' penceresine dönülerek program işletilir.

6.3 Problemin MATLAB 5.3 algoritmasıyla çözülmesi

Absorpsiyon kulesinin tasarımı için yazılan program Bölüm 6.2'de açıklandığı gibi çalıştırılarak, 'MATLAB Command Window' penceresine dönülmüştür. Burada ;

Prg : Programın sorularını ve çıktılarını,

Kmt : Verilen komutları veya girdileri,

göstermek üzere programın amonyağın absorpsiyonuna ait problemin çözümü aşağıdaki adımlarda verilmiştir. Buna göre ;

Prg : Aşağıdaki değerleri (mol kirletici)/(mol su) olarak giriniz...

Prg : Denge eğrisine ait birinci X koordinatını giriniz X1=?

Kmt : 0.0206

Prg : Denge eğrisine ait ikinci X koordinatını giriniz X2=?

Kmt : 0.0310

Prg : Denge eğrisine ait üçüncü X koordinatını giriniz X3=?

Kmt : 0.0407

Prg : Denge eğrisine ait dördüncü X koordinatını giriniz X4=?

Kmt : 0.0502

Prg : Denge eğrisine ait beşinci X koordinatını giriniz X5=?

Kmt : 0.0735

Prg : Denge eğrisine ait altıncı X koordinatını giriniz X6=?

Kmt : 0.0962

Prg : Aşağıdaki değerleri (mol kirletici)/(mol hava) olarak giriniz...

Prg : Denge eğrisine ait birinci Y koordinatını giriniz Y1=?

Kmt : 0.0158

Prg : Denge eğrisine ait ikinci Y koordinatını giriniz Y2=?

Kmt : 0.0240

Prg : Denge eğrisine ait üçüncü Y koordinatını giriniz Y3=?

Kmt : 0.0329

Prg : Denge eğrisine ait dördüncü Y koordinatını giriniz Y4=?

Kmt : 0.0418

Prg : Denge eğrisine ait beşinci Y koordinatını giriniz Y5=?

Kmt : 0.0660

Prg : Denge eğrisine ait altıncı Y koordinatını giriniz Y6=?

Kmt : 0.0920

Prg : Girdiğiniz X veya Y değerleri sayısını yazınız N=?

Kmt : 6

Prg : Denge eğrisi için regresyon analizine göre $Y=C*(X^D)$ şeklinde kuvvet fonksiyonu oluşturuluyor...

Prg : D = 1.1487

Prg : C = 1.3234

Prg : Denge verileri birinci tip denge eğrisine uymaktadır...

Prg : Gaz debisini m3/saat olarak giriniz Q=?

Kmt : 1630

Prg : Gaz karışımındaki kirletici yüzdesini giriniz y0=?

Kmt : 8

Prg : Giderilecek kirletici yüzdesini giriniz e=?

Kmt : 96

Prg : Gaz karışımı sıcaklığını derece olarak giriniz t=?

Kmt : 20

Prg : Kirleticinin mol ağırlığını giriniz Mk=?

Kmt : 17

Prg : Su debisi minimum debinin yüzde kaç üzerinde olacaktır w=?

Kmt : 30

Prg : Hacimsel,molar ve kütleli debiler hesaplanıyor...

Prg : $Y_0 = 0.0870$

Prg : $n = 0.0032$

Prg : $X_{min} = 0.0935$

Prg : $m_{min} = 0.8961$

Prg : $m_{opr} = 1.1650$

Prg : $X_{opr} = 0.0719$

Prg : Kulenin altı için hesaplama yapılıyor...

Prg : Taşma eğrisi(Flooding Correlation) koordinatları, Wankat denklemi ile hesaplanıyor...

Prg : Kullanılan dolgu malzemesi için $F=?$

Kmt : 155

Prg : Suyun hesaplanan sıcaklıktaki viskozitesini centipoise olarak giriniz u=?

Kmt : 1

Prg : Kule taşma hızının yüzde kaç değerinde işletilecektir k=?

Kmt : 60

Prg : $d = 0.7234$

Prg : Kule çapı metre olarak yukarıdaki gibi hesaplanmıştır...

Prg : Kirletici için Hava Fazındaki Schmidt sayısını giriniz Sch1=?

Kmt : 0.66

Prg : Kirletici için Su Fazındaki Schmidt sayısını giriniz Sch2=?

Kmt : 570

Prg : Kule altı ve kule üstü için ortalama kütleli debiler hesaplanıyor...

Prg : $G_{kort} = 924.4410$

Prg : $L_{kort} = 673.2213$

Prg : Ortalama kütleli debiler, lb/ft²-saat biriminde gaz ve sıvı faz için yukarıda verilmiştir...

Prg : Bu debileri ve kullanılan dolgu malzemesini dikkate alarak transfer birimi sabitlerini giriniz...

Prg : Birinci transfer birimi yükseklik sabitini giriniz alfa=?

Kmt : 7

Prg : İkinci transfer birimi yükseklik sabitini giriniz beta=?

Kmt : 0.39

Prg : Üçüncü transfer birimi yükseklik sabitini giriniz gama=?

Kmt : 0.58

Prg : Dördüncü transfer birimi yükseklik sabitini giriniz fi=?

Kmt : 0.0100

Prg : Beşinci transfer birimi yükseklik sabitini giriniz ita=?

Kmt : 0.22

Prg : Suyun hesaplanan sıcaklıktaki viskozitesini lb/ft-saat olarak giriniz u1=?

Kmt : 2.42

Prg : Gaz ve sıvı faz için transfer birim yükseklikleri hesaplanıyor...

Prg : Kule altı ve kule üstü için ortalama molar debiler hesaplanıyor...

Prg : $HTU = 0.7773$

Prg : Transfer birimi yüksekliği metre olarak yukarıdaki gibi hesaplanmıştır...

Prg : $x_1 = 0.0053$

Prg : $y_1 = 0.0093$

Prg : $x_2 = 0.0134$

Prg : $y_2 = 0.0188$

Prg : $x_3 = 0.0247$

Prg : $y_3 = 0.0319$

Prg : $x_4 = 0.0391$

Prg : $y_4 = 0.0487$

Prg : $x_5 = 0.0564$

Prg : $y_5 = 0.0690$

Prg : $x_6 = 0.0764$

Prg : $y_6 = 0.0922$

Prg : $x_7 = 0.0983$

Prg : $y_7 = 0.1178$

Prg : $x_8 = 0.1217$

Prg : $y_8 = 0.1450$

Prg : $x_9 = 0.1458$

Prg : $y_9 = 0.1731$

Prg : $x_{10} = 0.1702$

Prg : $y_{10} = 0.2015$

Prg : $x_{11} = 0.1942$

Prg : $y_{11} = 0.229$

Prg : $x =$ Columns 1 through 7

0.0053 0.0134 0.0247 0.0391 0.0564 0.0764 0.0983

Columns 8 through 11

0.1217 0.1458 0.1702 0.1942

Prg : y = Columns 1 through 7

0.0093 0.0188 0.0319 0.0487 0.0690 0.0922 0.1178

Columns 8 through 11

0.1450 0.1731 0.2015 0.2295

Prg : I = 6 7 8 9 10 11

Prg : NTU = 6

Prg : NTU değeri yukarıdaki gibi hesaplanmıştır. Şimdi fraksiyon hesabı yapılıyor...

Prg : At = 1.1695e-005

Prg : A = 2.3140e-004

Prg : fraction = 0.9495

Prg : netNTU = 5.9495

Prg : Z = 4.6246

Prg : Kule yüksekliği metre olarak yukarıda hesaplanmıştır...

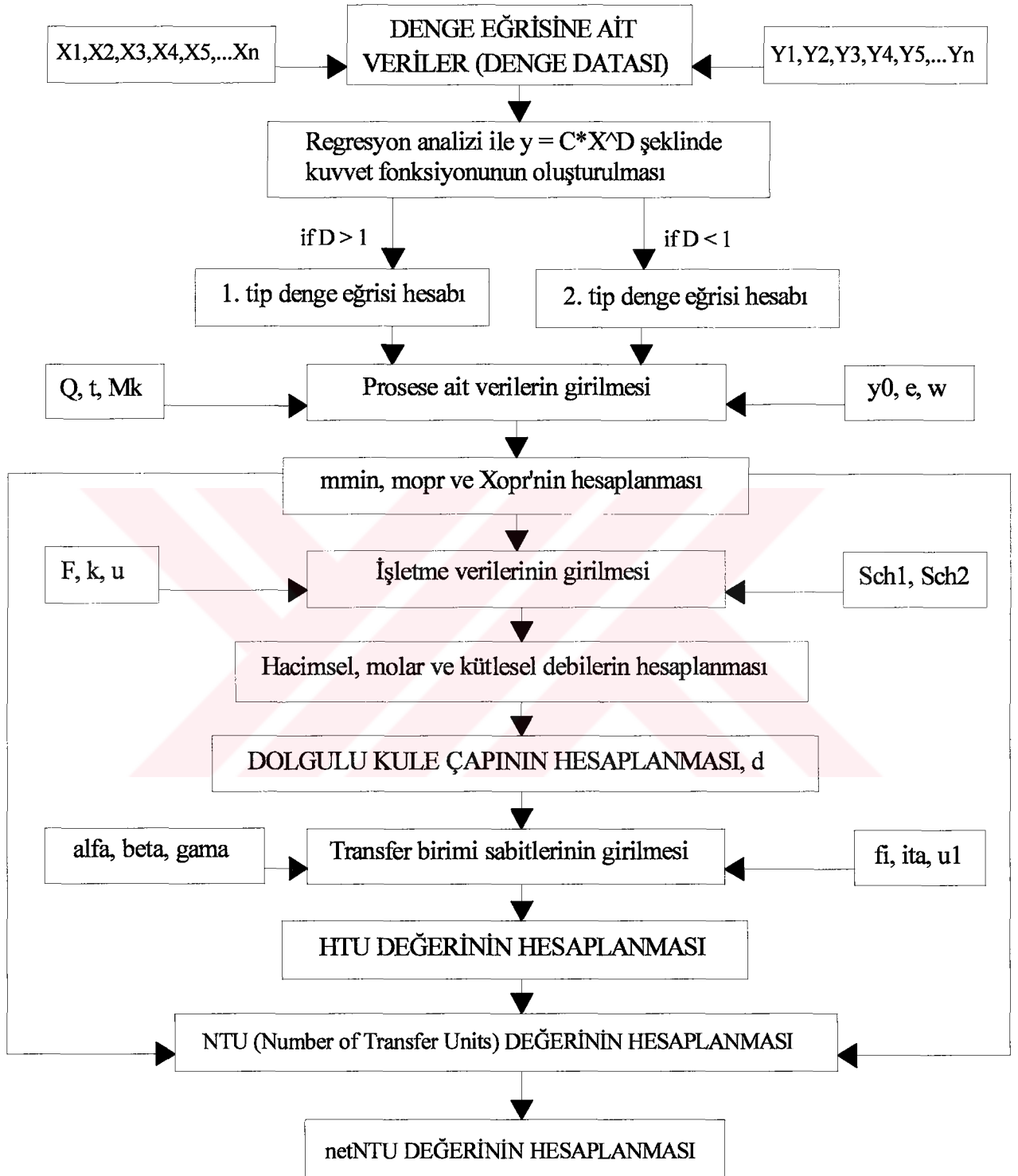
6.4 MATLAB 5.3 algoritmasının çalışma aşamaları

Absorpsiyon kulesinin tasarımı amacıyla MATLAB 5.3 programı ile yazılan algoritmanın çalışma aşamaları ;

- 1) Kirletici maddeyi içiren gaz karışımına ait denge verilerinin girilmesi
- 2) Programın bu denge verilerini kullanarak regresyon analizine göre en uygun kuvvet fonksiyonunu oluşturması
- 3) $y = c * x^d$ şeklindeki kuvvet fonksiyonunun regresyon katsayısı olan d'ye göre hangi tip denge eğrisine uyduğunun belirlenmesi
- 4) Algoritmanın bundan sonraki aşamalarının belirlenen denge eğrisinin tipine göre işletilmesi
- 5) Önce minimum eğimin, daha sonra gerçek işletme eğiminin hesaplanmasıyla gerçek işletme çizgisinin denkleminin oluşturulması
- 6) Ortalama kütleli ve ortalama molar debilerin hesaplanması ve absorpsiyon kulesinin çapının bulunması
- 7) Transfer birimleri yüksekliği (HTU) nin hesaplanması
- 8) Belirlenen bir koordinat aralığı için Y_0 sınır değerini aşan değerin ve sıralamasının belirlenmesi
- 9) Fraksiyon hesabı ve net transfer birimleri sayısının (net NTU) belirlenmesi
- 10) Absorpsiyon kulesinin yüksekliğinin hesaplanması

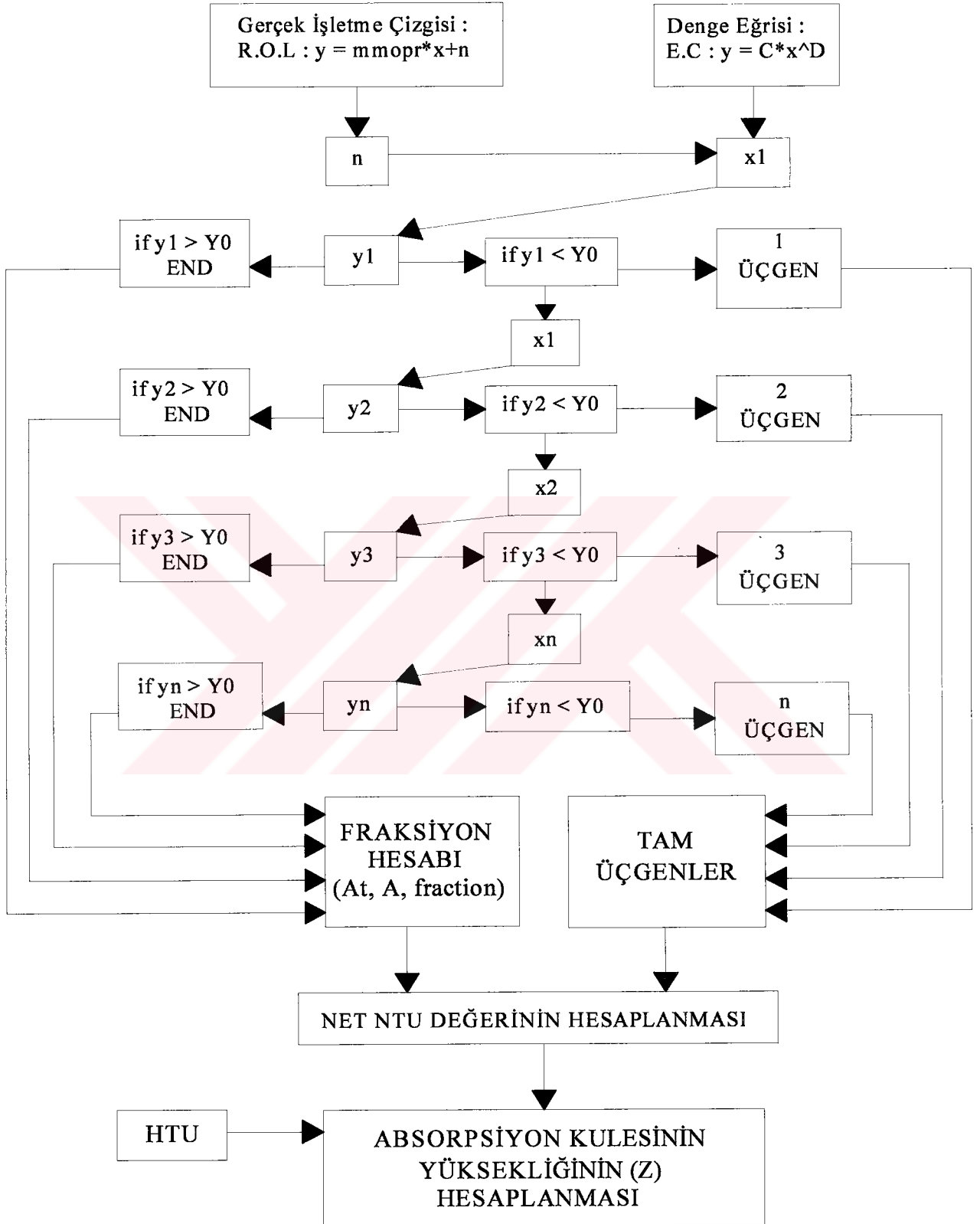
şeklinde özetlenebilir.

Verilen bu özet bilgilerine ait akış diyagramı Şekil 6.1'de görülmektedir.

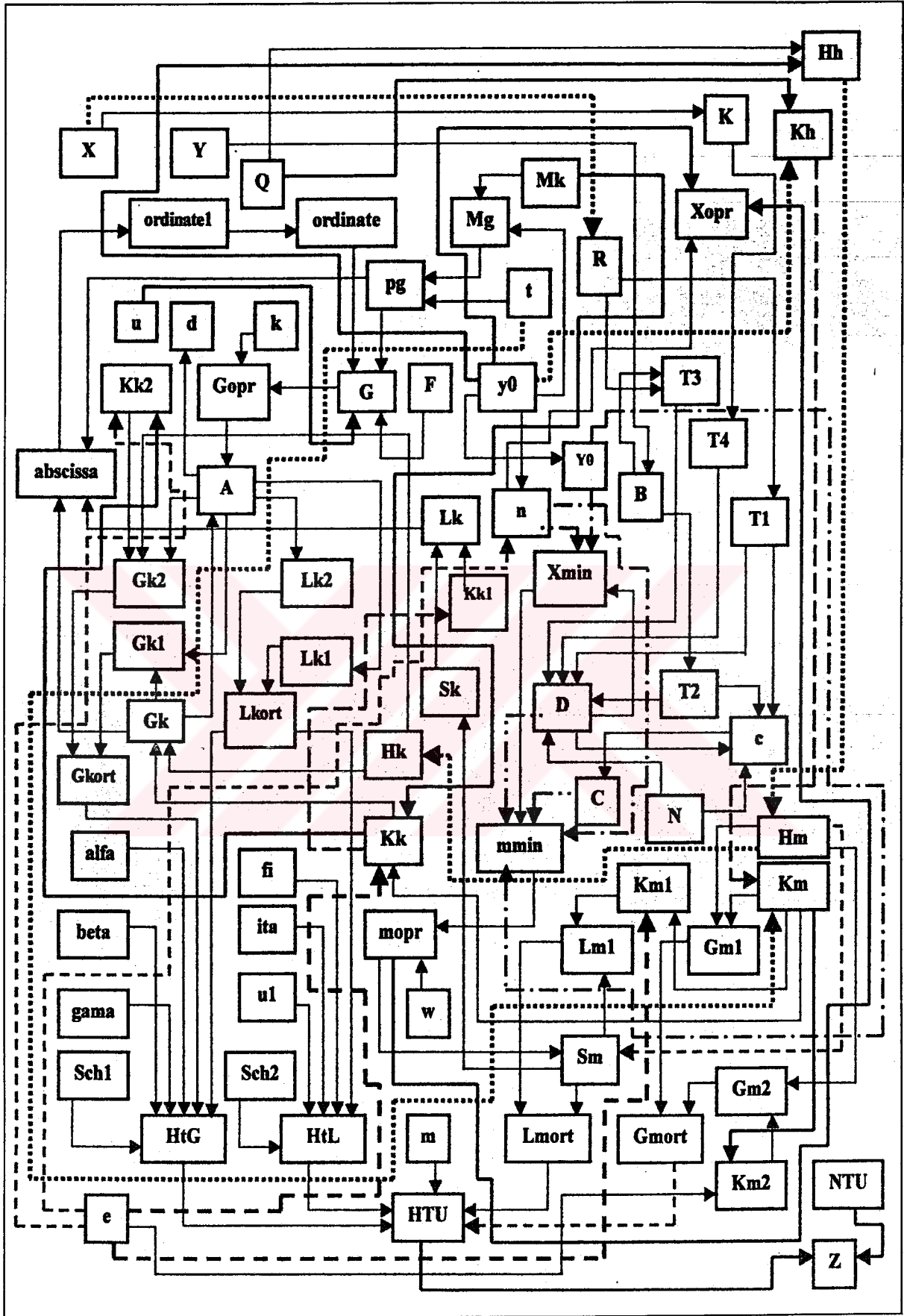


Şekil 6.1 MATLAB 5.3 programı ile yazılan algoritmanın akış diyagramı

Net NTU hesabına ait akış diyagramı da Şekil 6.2’de verilmiştir.



Şekil 6.2 Net transfer birimleri sayısının (net NTU) hesabına ait detaylı akış diyagramı



Şekil 6.3 MATLAB 5.3 algoritmasının notasyonlar cinsinden çalışma şeması

7. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRMELER

Bu tezde, atıkgaz ve buharların sıvı solventler kullanılarak bertarafına olanak veren absorpsiyon kulesinin tasarımında, net transfer birimleri sayısının (net NTU) nümerik bir yaklaşımla hesaplanması esas alınmıştır. Bunun için denge eğrisi tipleri tanımlanmış ve her tip için, molar akının veya başka bir ifadeyle kirletici maddenin gaz fazından sıvı fazına doğru kütle transferinin durduğu minimum nokta ve koordinatları nümerik olarak elde edilmiştir. Kirletici madde için mevcut olan denge verilerine regresyon analizi uygulanarak, yüksek korelasyonlu kuvvet fonksiyonları elde edilerek denge eğrileri tanımlanmıştır. Minimum eğimin, prosese göre %20 – 50 (U.S. EPA/CATC, 2002) fazlasının alınmasıyla gerçek işletme eğimine geçilmiş ve buradan da gerçek işletme çizgisi oluşturulmuştur. Gerçek işletme çizgisi ile kuvvet fonksiyonundan meydana gelen denge eğrisi arasındaki net üçgen sayısını elde etmek için önce adım adım değerler bulunmuş ve bu değerlerin sınır değeri (Y_0) ile mukayese edilmesinden sonra fraksiyon hesabına geçilmiştir. Buradan net transfer birimleri sayısının hesaplanmasından sonra bu değer transfer birimleri yüksekliği ile çarpılarak absorpsiyon kulesinin dolgu malzemesinin yüksekliği elde edilmiştir.

MATLAB 5.3 programı ile yazılan tasarım algoritmasıyla desteklenen yaklaşım metoduna ait sonuçlar, klasik çözüm sonuçları ile mukayese edilerek, yaklaşım hataları ve sonuç hassasiyetleri aşağıda verilmiştir. Buna göre ;

Birinci tip denge eğrisine uyan X ve Y değerleri ;

$$X = [0.0206, 0.0310, 0.0407, 0.0502, 0.0735, 0.0962] ;$$

$$Y = [0.0158, 0.0240, 0.0329, 0.0418, 0.0660, 0.0920] ;$$

olarak bilinmektedir. Bu değerlere göre denge eğrisinin sabit terimi ve katsayısı ;

$$C = 1.3234$$

$$D = 1.1487 \text{ (} D > 1 \rightarrow \text{1.tip denge eğrisi)}$$

olarak elde edilmiştir. Proses koşulları için ;

$Q = 1630 \text{ m}^3/\text{saat}$ (Gaz karışımının hacimsel debisi), $y_0 = \% 8$ (Kirletici maddenin gaz karışımındaki yüzdesi) $e = \% 96$ (Kirletici maddenin giderilmesi istenen yüzde), $t = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ (Gaz karışımının sıcaklığı) , $M_k = 17 \text{ kg/mol}$ (Kirletici maddenin moleküler ağırlığı [Burada amonyak için]) ve $w = \%30$ (Minimum debinin üzerinde çalışılması istenen yüzde)

yukarıda verilen değerler ile minimum ve işletme eğimi, minimum kesim noktası ve işletme noktası aşağıdaki gibi elde edilmiştir. Buna göre ;

$Y_0 = 0.087$ (sınır değeri = boundary value), $n = 0.0032$ (İşletme çizgisinin y eksenini kesim noktası), $X_{min} = 0.0935$ (Kütle transferinin durduğu noktasının apsisi veya minimum kesişim noktası), $m_{min} = 0.8961$ (Minimum işletme eğimi), $m_{opr} = 1.1650$ (Gerçek işletme eğimi) ve $X_{opr} = 0.0719$ (İşletme noktasının apsisi),

şeklinde bulunmuştur.

Dolgu malzemesi faktörü (raschig halkaları için) $F = 155$, $u = 1$ cp (Suyun gaz karışımı sıcaklığındaki Centipoise olarak viskozitesi) ve $k = \% 60$ (Taşma eğrisinin altındaki işletme yüzdesi) değerleri için absorpsiyon kulesinin çapı ;

Yaklaşım yöntemi sonucu için : $d = 0.7234$ m

Normal çözüm sonucu için : $d = 0.7163$ m

Yaklaşım hatası (approximation error) = % 0.009814763

olmaktadır. Ayrıca ;

$Sch_1 = 0.66$ (Hava fazındaki Schmidt sayısı), $Sch_2 = 570$ (su fazındaki Schmidt sayısı), $\alpha = 7.00$ (Birinci transfer birimi yüksekliği sabiti), $\beta = 0.39$ (İkinci transfer birimi yüksekliği sabiti), $\gamma = 0.58$ (Üçüncü transfer birimi yüksekliği sabiti), $\iota = 0.22$ (Dördüncü transfer birimi yüksekliği sabiti), $\phi = 0.0100$ (Beşinci transfer birimi yüksekliği sabiti) ve $u_1 = 2.42$ lb/ft – saat (Suyun gaz karışımı sıcaklığındaki viskozitesi) değerleri için toplam transfer birimleri yüksekliği ;

Yaklaşım yöntemi sonucu için : $HTU = 0.7773$ m

Normal çözüm sonucu için : $HTU = 0.772$ m

Yaklaşım hatası (approximation error) = % 0.006818474

olmaktadır. Bu verilere göre, net NTU hesabındaki üçgenlerin koordinatları, aşağıda matris cebiri formunda onbir hesap adımı için verilmiştir. Buna göre koordinatlar ;

$x = [0.0053, 0.0134, 0.0247, 0.0391, 0.0564, 0.0764, 0.0983, 0.1217, 0.1458, 0.1702, 0.1942]$;

$y = [0.0093, 0.0188, 0.0319, 0.0487, 0.0690, 0.0922, 0.1178, 0.1450, 0.1731, 0.2015, 0.2295]$;

şeklinde elde edilmiştir.

y matrisi elemanlarından;

$y(6) = 0.0922 > Y_0 = 0.087$ (sınır değeri) programın bu aşaması sonlandırılmış ve program fraksiyon hesabına geçmiştir. Fraksiyon hesabından ;

$$\text{Trapezin alanı} = A_t = 1.1695e-005$$

$$\text{Tam üçgenin alanı} = A_u = 2.3140e-004$$

$$\text{Üçgen fraksiyonu} = \Delta = 0.9495$$

olarak elde edilmiştir. Buna göre ;

Diğer tam üçgen sayısı = 5 olduğundan, net üçgen sayısı yani net transfer birimleri sayısı ;

$$\text{net NTU} = 5.9495 \text{ (gerçek NTU değeri)}$$

olarak hesaplanmıştır. Bu değere göre absorpsiyon kulesinin yüksekliği ;

$$\text{Yaklaşım yönteminin sonucu için} : Z = 4.6246 \text{ m}$$

$$\text{Normal çözüm (Gielen, 2000) sonucu için} : Z = 4.632 \text{ m}$$

$$\text{Yaklaşım hatası (approximation error)} : \% 0.001597582$$

olmaktadır.

Şekil 6.3'te MATLAB 5.3 algoritmasının çalışma şeması, notasyon formunda verilmiştir. Uzun kesikli – noktalı hat (Y_0 -mmin, Y_0 -Xmin ve n-mmin hattı), birinci tip denge eğrisinin (if $D > 1$) hesabını göstermektedir. Uzun kesikli – noktalı – noktalı hat ise (n-Xmin, D-mmin ve C-mmin hattı), ikinci tip denge eğrisinin (if $D < 1$) hesabını belirtmektedir. Diğer koyu, kesikli ve noktalı çizgiler, ağı daha kolay görebilmek için seçilmiştir. Şekil 6.1 ve Şekil 6.2'de ise akış diyagramları (Lipchutz, 1982) sunulmuştur.

MATLAB 5.3 algoritmasının kullanılmasıyla gerçek işletme eğimi, kesin olarak elde edilmektedir. Ayrıca transfer birimleri sayısı, nümerik analiz yaklaşımının uygulanması ile farklı bir yoldan hesaplanmaktadır. Koordinat değerleri için, denge eğrisi tipleri yüksek korelasyonla, regresyon analiziyle saptanmaktadır. Net NTU değerinin hesaplanmasını esas alan bu programın kullanılması ile, absorpsiyon kulesinin çapı ve yüksekliği hızlı ve kolay bir şekilde yüksek hassasiyetle hesaplanmaktadır. Ayrıca farklı işletme şartları için sonuçlar pratik olarak elde edilmektedir.

KAYNAKLAR

Badger, W. L., & Banchero, J.T. (1955), "Gas Absorption. Introduction to Chemical Engineering", International Student Edition, 9, 418, New York, USA : McGraw – Hill.

Benett, C.O., & Myers J.E. (1983), "Convective Mass – Transfer Coefficients / Application to a Packed Tower – Dilute Solutions", Momentum, Heat and Mass Transfer, 31, 541, (3rd ed.). New York, USA : McGraw – Hill.

Corbitt, R.A. (1990), "Air Quality Control / Absorption / Absorber Design", Standart Handbook of Environmental Engineering, 4.60, New York, USA : McGraw – Hill.

Cussler, E.L. (1997), "Absorption. Diffusion Mass Transfer in Fluid Systems", University of Minnesota, 9, (pp. 245 – 264, 2nd ed.), Cambridge University Press.

Edgar, T.F., & Himmelblau, D.M. (1989), "Fitting Models to Data / The Method of Least Square", Optimization of Chemical Processes, 2.4, 50, Chemical Engineering Series, New York, USA : McGraw – Hill.

Farlow, S.J., & Haggard, G.M. (1990), "Multivariable Calculus / Curve Fitting (The Least Square) ", Introduction to Calculus with Applications, 6, (pp.474 – 487), Mathematic Series, New York, USA : McGraw – Hill.

Gielen, J.L.W. (2000), "The general packed column : An analytical solution. IMA Journal of Applied Mathematic, Subdepartment of Mathematics", Wageningen Agricultural University, Volume 65, Issue 2, (pp.123-146), Oxford University Press.

Henry, J.G., & Heinke, G.W. (1996), "Air Pollution / Gas Emission Control / Absorption Processes", Environmental Science and Engineering, (13, 536, 2nd ed.), Prentice Hall International Editions.

Lipchutz, S. (1982), "Algorithms, Flowcharts, Pseudocode Programs", Theory and Problems of Essential Computer Mathematics, Department of Mathematics, Temple University, 5, 95, International Editions : Shaum's Outline Series.

McCabe, W.L., Smith J.C., & Harriott, P. (1993), "Gas Absorption", Unit Operations of Chemical Engineering, 22, (pp. 686 – 738, 5th ed.), Chemical and Petroleum Engineering Series, New York, USA : McGraw – Hill.

Nishimura, H., & Nakamura, Y. (1995), "Effects of Heat Resistance in the Liquid Phase on the Characteristics of Heat and Mass Transfer in Packed Towers, Trans. of AIJ", Journal of Architecture, Planning and Environment, No.477, (pp.29-37), Nov.

Peters, M.S., & Timmerhaus, K.D. (1991), "Mass Transfer and Reactor Equipment – Design and Cost / Continuous Contactors – Packed Towers", Plant Design and Economic for Chemical Engineers, 16,687, (4th ed.), Department of Chemical Engineering, University of Colorado, Chemical and Petroleum Engineering Series, New York, USA : McGraw – Hill.

Piché, S., Grandjean, B.P.A., Iliuta, I., & Larachi, F. (2001), "Interfacial Mass Transfer in Randomly Packed Towers: A Confident Correlation for Environmental Applications", Environmental Science & Technology, 35, 4817-4822, Department of Chemical Engineering & CERPIC Laval University.

Piché, S., Larachi, F., & Grandjean, B.P.A. (2001), "Flooding Capacity in Packed Towers: Database, Correlations and Analysis", Department of Chemical Engineering & CERPIC Laval University, Industrial and Engineering Chemistry Research, 40, 476-487.

Rauschert Process Technologies (2003), "Tower Packings", Web address: www.thomasregister.com/olc/72987910/ptech.htm

Rowan University, "Packed Towers Hydraulics", Department of Chemical Engineering, Web address : sun00.rowan.edu/~savelski/uol/absorbtion.html

Salvador, M.G., & Baran, M.L. (1966), "Solution of Algebraic and Transcendental Equations / Matrices", Numerical Methods in Engineering, 1.9, 25, Department of Civil Engineering, University of Columbia, Prentice – Hall of India (Private) Ltd., New Delhi.

Spiegel, M.R. (1975), "Curve Fitting, Regression and Correlation", Theory and Problems of Probability and Statistics, 8, 258, Mathematics, Rensselaer Polytechnic Institute of Connecticut, Schaum's Outline Series, New York, USA : McGraw – Hill.

Treybal, R.E. (1981), "Gas Absorption / One Component Transferred", Material Balances. Mass – Transfer Operations, (8, 282, 3rd ed.), Department of Chemical Engineering, University of Rhode Island. Chemical Engineering Series, New York, USA : McGraw – Hill.

U.S. Environmental Protection Agency (2002), "Control Air Technology Center", cs5-2ch1.pdf, Packed Tower Operation, 1.2.4, pp. 15, Web address: www.epa.gov/ttn/catc/dir1/cs5-2ch1.pdf

Wu, C. Y. (2003), "ENV4121/6126 : Air Pollution Control Design", Classnote, Absorption, Web address : www.ees.ufl.edu/homepp/cywu/ENV4121/absorption.ppt

Zenz, F.A. (1988), "Design of Gas Absorption Towers", Handbook of Separation Techniques for Chemical Engineers, P.A. Schweitzer (ed.), (pp. 3-50 to 3-66, 3-102 to 3-108, 2nd ed.), New York, USA : McGraw – Hill.

EKLER

- Ek 1 MATLAB 5.3 programı ile yazılan absorpsiyon kulesi tasarım algoritması
Ek 2 İşletmede kullanılan dolgu malzemeleri ve özellikleri



Ek 1 MATLAB 5.3 programı ile yazılan absorpsiyon kulesi tasarım algoritması

```

clear
%Absorpsiyon kulesi tasarım algoritması
%Programmed by Kaan YETİLMEZSOY
disp('Aşağıdaki değerleri (mol kirletici)/(mol su) olarak giriniz...')
X1=input('Denge eğrisine ait birinci X koordinatını giriniz X1=?');
X2=input('Denge eğrisine ait ikinci X koordinatını giriniz X2=?');
X3=input('Denge eğrisine ait üçüncü X koordinatını giriniz X3=?');
X4=input('Denge eğrisine ait dördüncü X koordinatını giriniz X4=?');
X5=input('Denge eğrisine ait beşinci X koordinatını giriniz X5=?');
X6=input('Denge eğrisine ait altıncı X koordinatını giriniz X6=?');
disp('Aşağıdaki değerleri (mol kirletici)/(mol hava) olarak giriniz...')
Y1=input('Denge eğrisine ait birinci Y koordinatını giriniz Y1=?');
Y2=input('Denge eğrisine ait ikinci Y koordinatını giriniz Y2=?');
Y3=input('Denge eğrisine ait üçüncü Y koordinatını giriniz Y3=?');
Y4=input('Denge eğrisine ait dördüncü Y koordinatını giriniz Y4=?');
Y5=input('Denge eğrisine ait beşinci Y koordinatını giriniz Y5=?');
Y6=input('Denge eğrisine ait altıncı Y koordinatını giriniz Y6=?');
N=input('Girdiğiniz X veya Y değerleri sayısını yazınız N=?');
X=[X1 X2 X3 X4 X5 X6];
Y=[Y1 Y2 Y3 Y4 Y5 Y6];
disp('Denge eğrisi için regresyon analizine göre  $Y=C*(X^D)$  şeklinde kuvvet fonksiyonu
oluşturuluyor...')
for p=1:length(X)
R(p)=log(X(p));
end
T1=sum(R);
for r=1:length(Y)
B(r)=log(Y(r));
end
T2=sum(B);
T3=R*B';
for s=1:length(X)
K(s)=(log(X(s)))^2;
end
T4=sum(K);
D=((N*T3)-(T1*T2))/((N*T4)-(T1^2))
c=(T2-(D*T1))/N;
C=2.718281828^c
if D<1
%İkinci Tip Denge Eğrisi için hesaplama
disp('Denge verileri ikinci tip denge eğrisine uymaktadır...')
Q=input('Gaz debisini m3/saat olarak giriniz Q=?');
y0=input('Gaz karışımındaki kirletici yüzdesini giriniz y0=?');
e=input('Giderilecek kirletici yüzdesini giriniz e=?');
t=input('Gaz karışımı sıcaklığını derece olarak giriniz t=?');
Mk=input('Kirleticinin mol ağırlığını giriniz Mk=?');
w=input('Su debisi minimum debinin yüzde kaç üzerinde olacaktır w=?');
disp('Hacimsel,molar ve kütleli debiler hesaplanıyor...')
Hh=Q*(1-(y0/100));

```

```

Hm=(Hh*1.0)/(0.082*(t+273));
Hk=Hm*29;
Kh=Q*(y0/100);
Km=(Kh*1.0)/(0.082*(t+273));
Kk=Km*Mk;
Km1=Km*(e/100);
Km2=Km*(1-(e/100));
Kk1=Kk*(e/100);
Kk2=Kk*(1-(e/100));
Y0=y0/(100-y0)
n=(y0*(1-(e/100)))/(100-(1-(e/100)))
Xmin=(n/((1-D)*C))^(1/D)
mmin=C*D*(Xmin^(D-1))
mopr=mmin*(1+w/100)
Xopr=(Y0-n)/mopr
Sm=Hm*mopr;
Sk=Sm*18;
disp('Kulenin altı için hesaplama yapılıyor...')
Gk=Hk+Kk;
Lk=Sk+Kk1;
Mg=(1-(y0/100))*29+(y0/100)*Mk;
pg=(Mg*1.0)/(0.082*(t+273));
apsis=(Lk/Gk)*((pg/1000)^0.5);
disp('Taşma eğrisi (Flooding Correlation) koordinatları, Wankat denklemi ile hesaplanıyor...')
ordinat1=-1.6678-1.085*log10(apsis)-0.29655*((log10(apsis))^2);
ordinat=10^(ordinat1);
F=input('Kullanılan dolgu malzemesi için F=?');
u=input('Suyun hesaplanan sıcaklıktaki viskozitesini centipoise olarak giriniz u=?');
G=((ordinat)*(32.2*(pg*2.2/(3.28^3)))*(1000*2.2/(3.28^3)))/(F*(u^0.20))^0.50;
k=input('Kule taşma hızının yüzde kaç değerinde işletilecektir k=?');
Gopr=G*(k/100);
A=(Gk*2.2/3600)/(Gopr);
d=((4*A/3.141592654)^0.5)/3.28
disp('Kule çapı metre olarak yukarıdaki gibi hesaplanmıştır...')
Sch1=input('Kirletici için Hava Fazındaki Schmidt sayısını giriniz Sch1=?');
Sch2=input('Kirletici için Su Fazındaki Schmidt sayısını giriniz Sch2=?');
disp('Kule altı ve kule üstü için ortalama kütleli debiler hesaplanıyor...')
Gk1=(Gk*2.2)/A;
Lk1=(Lk*2.2)/A;
Gk2=(Hk+Kk2)*2.2/A;
Lk2=(Sk*2.2)/A;
Gkort=(Gk1+Gk2)/2
Lkort=(Lk1+Lk2)/2
disp('Ortalama kütleli debiler, lb/ft2-saat biriminde gaz ve sıvı faz için yukarıda verilmiştir...')
disp('Bu debileri ve kullanılan dolgu malzemesini dikkate alarak transfer birimi sabitlerini giriniz...')
alfa=input('Birinci transfer birimi yükseklik sabitini giriniz alfa=?');
beta=input('İkinci transfer birimi yükseklik sabitini giriniz beta=?');
gama=input('Üçüncü transfer birimi yükseklik sabitini giriniz gama=?');
fi=input('Dördüncü transfer birimi yükseklik sabitini giriniz fi=?');

```

```

ita=input('Beşinci transfer birimi yükseklik sabitini giriniz ita=?');
u1=input('Suyun hesaplanan sıcaklıktaki viskozitesini lb/ft-saat olarak giriniz u1=?');
disp('Gaz ve sıvı faz için transfer birim yükseklikleri hesaplanıyor...')
HtG=(alfa*(Gkort^beta)/(Lkort^gama))*(Sch1^0.5);
HtL=fi*((Lkort/u1)^ita)*(Sch2^0.5);
m=Y(N)/X(N);
disp('Kule altı ve kule üstü için ortalama molar debiler hesaplanıyor...')
Gm1=Hm+Km;
Lm1=Sm+Km1;
Gm2=Hm+Km2;
Gmort=(Gm1+Gm2)/2;
Lmort=(Lm1+Sm)/2;
HTU=(HtG+(m*Gmort/Lmort)*HtL)/3.28
disp('Transfer birimi yüksekliği metre olarak yukarıdaki gibi hesaplanmıştır...')
%NTU hesabı
x1=(n/C)^(1/D)
y1=mopr*x1+n
x2=(y1/C)^(1/D)
y2=mopr*x2+n
x3=(y2/C)^(1/D)
y3=mopr*x3+n
x4=(y3/C)^(1/D)
y4=mopr*x4+n
x5=(y4/C)^(1/D)
y5=mopr*x5+n
x6=(y5/C)^(1/D)
y6=mopr*x6+n
x7=(y6/C)^(1/D)
y7=mopr*x7+n
x8=(y7/C)^(1/D)
y8=mopr*x8+n
x9=(y8/C)^(1/D)
y9=mopr*x9+n
x10=(y9/C)^(1/D)
y10=mopr*x10+n
x11=(y10/C)^(1/D)
y11=mopr*x11+n
x=[x1 x2 x3 x4 x5 x6 x7 x8 x9 x10 x11]
y=[y1 y2 y3 y4 y5 y6 y7 y8 y9 y10 y11]
r=1:1:11;
I=find(y(r)>Y0)
NTU=min(I)
disp('NTU değeri yukarıdaki gibi hesaplanmıştır.Şimdi fraksiyon hesabı yapılıyor...')
At=(x(NTU)-Xopr)*(y(NTU)-Y0)/2
Au=((y(NTU)-y(NTU-1))*(x(NTU)-x(NTU-1)))/2
fraction=(Au-At)/Au
netNTU=(NTU-1)+fraction
Z=(HTU)*(netNTU)
end
if D>1
%Birinci Tip Denge Eğrisi için hesaplama

```

```

disp('Denge verileri birinci tip denge eğrisine uymaktadır...')
Q=input('Gaz debisini m3/saat olarak giriniz Q=?');
y0=input('Gaz karışımındaki kirletici yüzdesini giriniz y0=?');
e=input('Giderilecek kirletici yüzdesini giriniz e=?');
t=input('Gaz karışımı sıcaklığını derece olarak giriniz t=?');
Mk=input('Kirleticinin mol ağırlığını giriniz Mk=?');
w=input('Su debisi minimum debinin yüzde kaç üzerinde olacaktır w=?');
disp('Hacimsel,molar ve kütleli debiler hesaplanıyor...')
Hh=Q*(1-(y0/100));
Hm=(Hh*1.0)/(0.082*(t+273));
Hk=Hm*29;
Kh=Q*(y0/100);
Km=(Kh*1.0)/(0.082*(t+273));
Kk=Km*Mk;
Km1=Km*(e/100);
Km2=Km*(1-(e/100));
Kk1=Kk*(e/100);
Kk2=Kk*(1-(e/100));
Y0=y0/(100-y0)
n=(y0*(1-(e/100)))/(100-(1-(e/100)))
Xmin=((Y0/C)^(1/D)
mmin=(Y0-n)/Xmin
mopr=mmin*(1+w/100)
Xopr=(Y0-n)/mopr
Sm=Hm*mopr;
Sk=Sm*18;
disp('Kulenin altı için hesaplama yapılıyor...')
Gk=Hk+Kk;
Lk=Sk+Kk1;
Mg=(1-(y0/100))*29+(y0/100)*Mk;
pg=(Mg*1.0)/(0.082*(t+273));
apsis=(Lk/Gk)*((pg/1000)^0.5);
disp('Taşma eğrisi (Flooding Correlation) koordinatları, Wankat denklemi ile hesaplanıyor...')
ordinat1=-1.6678-1.085*log10(apsis)-0.29655*((log10(apsis))^2);
ordinat=10^(ordinat1);
F=input('Kullanılan dolgu malzemesi için F=?');
u=input('Şuyun hesaplanan sıcaklıktaki viskozitesini centipoise olarak giriniz u=?');
G=((ordinat)*(32.2*(pg*2.2/(3.28^3)))*(1000*2.2/(3.28^3)))/(F*(u^0.20))^0.50;
k=input('Kule taşma hızının yüzde kaç değerinde işletilecektir k=?');
Gopr=G*(k/100);
A=(Gk*2.2/3600)/(Gopr);
d=((4*A/3.141592654)^0.5)/3.28
disp('Kule çapı metre olarak yukarıdaki gibi hesaplanmıştır...')
Sch1=input('Kirletici için Hava Fazındaki Schmidt sayısını giriniz Sch1=?');
Sch2=input('Kirletici için Su Fazındaki Schmidt sayısını giriniz Sch2=?');
disp('Kule altı ve kule üstü için ortalama kütleli debiler hesaplanıyor...')
Gk1=(Gk*2.2)/A;
Lk1=(Lk*2.2)/A;
Gk2=(Hk+Kk2)*2.2/A;
Lk2=(Sk*2.2)/A;
Gkort=(Gk1+Gk2)/2

```

```

Lkort=(Lk1+Lk2)/2
disp('Ortalama kütsel debiler,lb/ft2-saat biriminde gaz ve sıvı faz için yukarıda
verilmiştir...')
disp('Bu debileri ve kullanılan dolgu malzemesini dikkate alarak transfer birimi sabitlerini
giriniz...')
alfa=input('Birinci transfer birimi yükseklik sabitini giriniz alfa=?');
beta=input('İkinci transfer birimi yükseklik sabitini giriniz beta=?');
gama=input('Üçüncü transfer birimi yükseklik sabitini giriniz gama=?');
fi=input('Dördüncü transfer birimi yükseklik sabitini giriniz fi=?');
ita=input('Beşinci transfer birimi yükseklik sabitini giriniz ita=?');
u1=input('Suyun hesaplanan sıcaklıktaki viskozitesini lb/ft-saat olarak giriniz u1=?');
disp('Gaz ve sıvı faz için transfer birim yükseklikleri hesaplanıyor...')
HtG=(alfa*(Gkort^beta)/(Lkort^gama))*(Sch1^0.5);
HtL=fi*((Lkort/u1)^ita)*(Sch2^0.5);
m=Y(N)/X(N);
disp('Kule altı ve kule üstü için ortalama molar debiler hesaplanıyor...')
Gm1=Hm+Km;
Lm1=Sm+Km1;
Gm2=Hm+Km2;
Gmort=(Gm1+Gm2)/2;
Lmort=(Lm1+Sm)/2;
HTU=(HtG+(m*Gmort/Lmort)*HtL)/3.28
disp('Transfer birimi yüksekliği metre olarak yukarıdaki gibi hesaplanmıştır...')
%NTU hesabı
x1=(n/C)^(1/D)
y1=mopr*x1+n
x2=(y1/C)^(1/D)
y2=mopr*x2+n
x3=(y2/C)^(1/D)
y3=mopr*x3+n
x4=(y3/C)^(1/D)
y4=mopr*x4+n
x5=(y4/C)^(1/D)
y5=mopr*x5+n
x6=(y5/C)^(1/D)
y6=mopr*x6+n
x7=(y6/C)^(1/D)
y7=mopr*x7+n
x8=(y7/C)^(1/D)
y8=mopr*x8+n
x9=(y8/C)^(1/D)
y9=mopr*x9+n
x10=(y9/C)^(1/D)
y10=mopr*x10+n
x11=(y10/C)^(1/D)
y11=mopr*x11+n
x=[x1 x2 x3 x4 x5 x6 x7 x8 x9 x10 x11]
y=[y1 y2 y3 y4 y5 y6 y7 y8 y9 y10 y11]
r=1:11;
I=find(y(r)>Y0)
NTU=min(I)

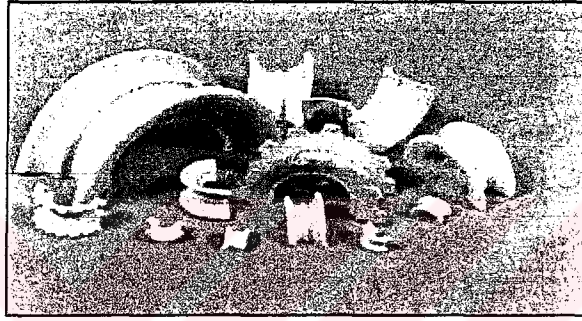
```

```
disp('NTU değeri yukarıdaki gibi hesaplanmıştır.Şimdi fraksiyon hesabı yapılıyor...')
At=(x(NTU)-Xopr)*(y(NTU)-Y0)/2
Au=((y(NTU)-y(NTU-1))*(x(NTU)-x(NTU-1)))/2
fraction=(Au-At)/Au
netNTU=(NTU-1)+fraction
Z=(HTU)*(netNTU)
disp('Kule yüksekliği metre olarak yukarıda hesaplanmıştır...')
end
```

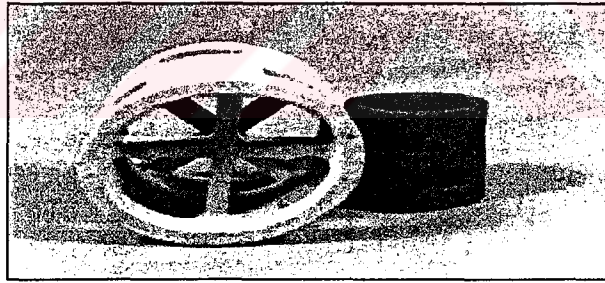
Ek 2 İşletmede kullanılan dolgu malzemeleri ve özellikleri

Ek 2.1 Standart Seramik Dolgu Malzemeleri

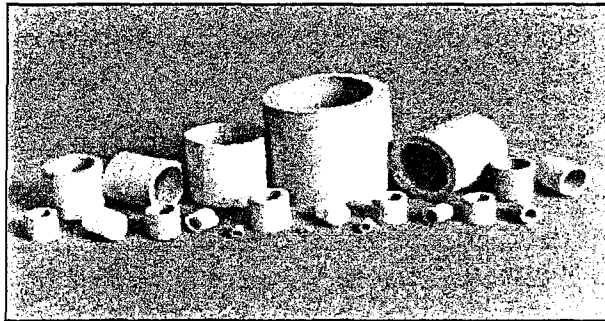
Standart seramik dolgu malzemeleri burada seramik eyer/semer (ceramic saddles) tiplerini, küre/top (balls) modellerini, Raflux (Pall) halkalarını (Raflux rings), silindirik halkaları (raschig rings), çapraz bölmeli halkaları (cross partition rings) ve Lessing halkalarını (Lessing rings) kapsamaktadır. Standart seramik dolgu malzemeleri, mevcut bir kolonun dolgu malzemesinin yenilemesinde ekonomik bir opsiyon olmaktadır. Bu malzemelerin ağırlıkları seramik taş malzemesine bağlıdır (Rauschert Process Technologies, 2003).



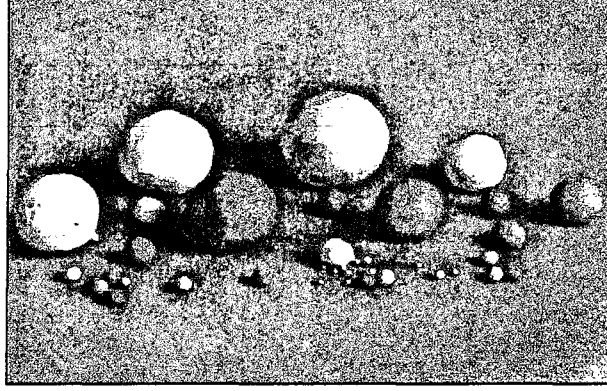
Şekil Ek 2.1.1 Seramik eyer/semer (Ceramic saddle)



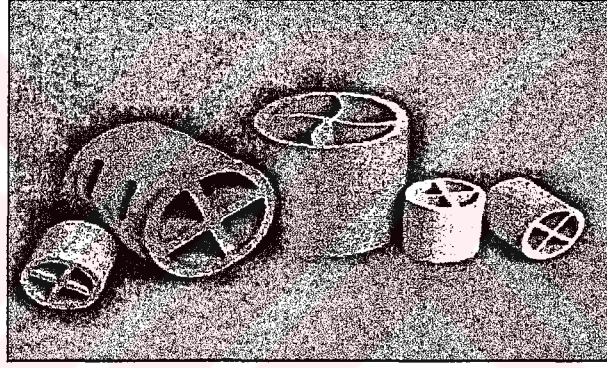
Şekil Ek 2.1.2 Seramik Raflux halkaları (Ceramic Raflux (Pall) rings)



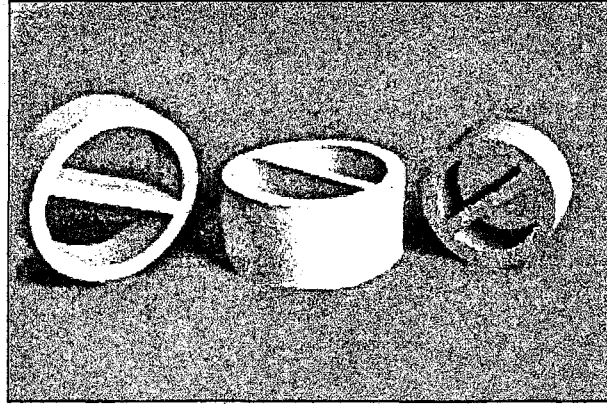
Şekil Ek 2.1.3 Seramik silindirik halkalar (Ceramic cylindrical (Raschig) rings)



Şekil Ek 2.1.4 Seramik küreler/toplar (Ceramic balls)



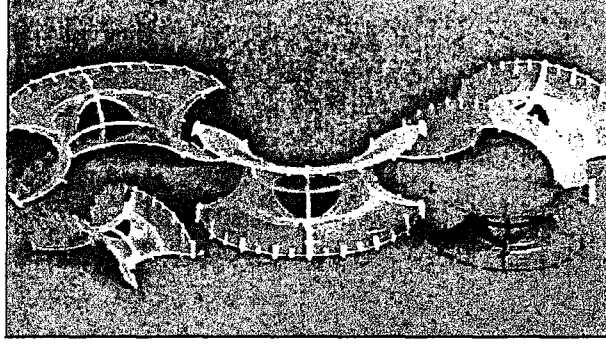
Şekil Ek 2.1.5 Seramik çapraz bölmeli halkalar (Ceramic cross partition rings)



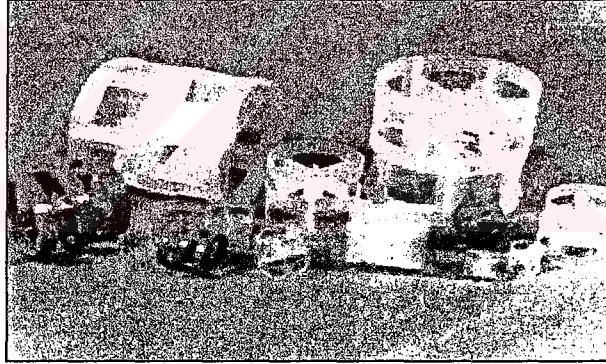
Şekil Ek 2.1.6 Seramik Lessing halkaları (Ceramic Lessing rings)

Ek 2.2 Standart Termoplastik Dolgu Malzemeleri

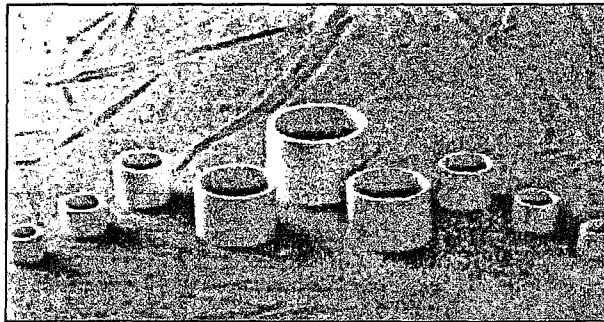
Standart plastik dolgu malzemeleri burada eyer/semer (saddles) çeşitlerini, küreleri/topları (balls), Raflux (Pall) halkalarını (Raflux rings), silindirik halkaları (raschig rings) ve Raushert Proses Teknolojilerine ait bir ürün olan Munipak halkalarını içermektedir (Rauschert Process Technologies, 2003).



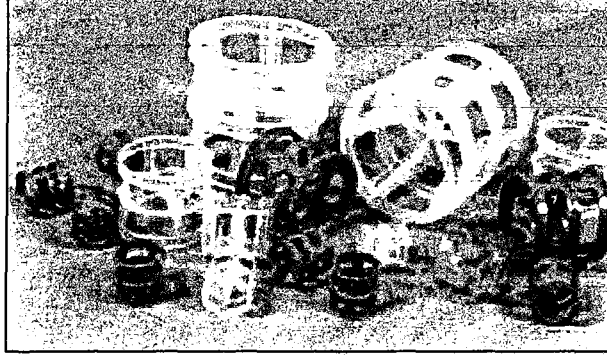
Şekil Ek 2.2.1 Plastik eyerler/semerler (Plastic saddles)



Şekil Ek 2.2.2 Plastik Raflux (Pall) halkaları (Plastic Raflux (Pall) rings)



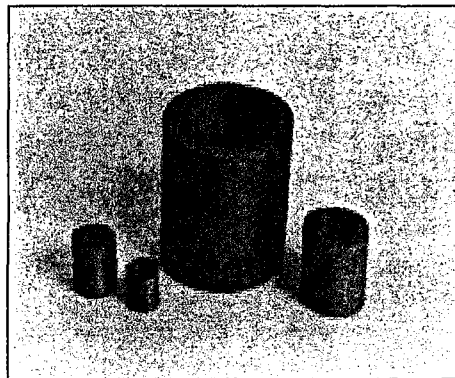
Şekil Ek 2.2.3 Plastik silindirik halkalar (Plastic cylindrical (Raschig) rings)



Şekil Ek 2.2.4 Plastik Munipak halkaları (Plastic Munipak rings)

Ek 2.3 Standart Karbon/Grafit Dolgu Malzemeleri

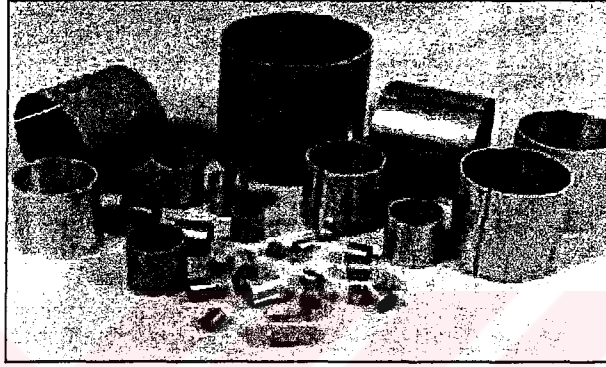
Rauschert Proses Teknolojileri, karbon ve grafit dolgu malzemesi olarak silindirik halkaları (Raschig rings) teklif etmiştir. Burada korozyon ve termal şok dayanımları ve yüksek sıcaklık stabilitesi söz konusudur. Ağırlık, karbon malzemesine bağlı olarak değişir. Şiddetli sıcaklık şoklarından kaynaklanan hasarlara düşük ısıl genleşme katsayısı ile dayanım gösterir. Hafif ağırlığa ve yüksek mukavemete sahiptir. Tamamen karbon dolgusu ile ayrılabilen safsızlıklar bertaraf edilir. Birçok asitlere, alkalilere ve yüksek oksitleyiciliği olmayan çözeltilerde kullanılabilir. Yüksek sıcaklıklarda işletme şartlarında uzun dolgu ömrüne sahiptir. Bu dolgu malzemesi en çok klor – hidroklorik karışımlarda ve fosforik asit uygulamalarında kullanılır.



Şekil Ek 2.3.1 Karbon/Grafit dolgu malzemesi (Carbon/Graphite packing material)

Ek 2.4 Standart Metal Dolgu Malzemeleri

Rauschert Proses Teknolojileri, metal dolgu malzemeleri için Raflux (Pall) halkalarını ve silindirik halkaları (Rachig rings) teklif etmiştir. Burada, aynı tip dolgu malzemesi içeren bir kolonun yeniden doldurulmasında ekonomik bir seçenek olarak önerilmektedir. Mevcut olarak karbon çeliği, nikel, paslanmaz çelik, bakır, titanyum, alüminyum gibi malzemeler kullanılmaktadır.



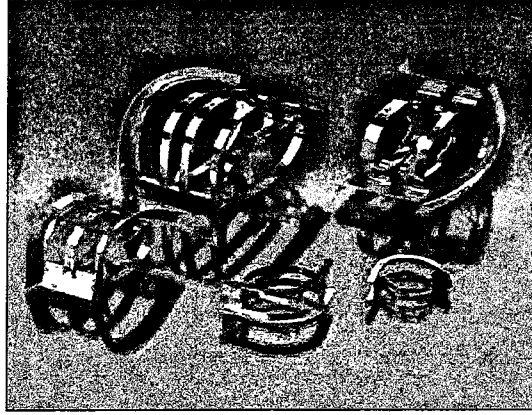
Şekil Ek 2.4.1 Metal silindirik (Raschig) halkalar (Metal cylindrical (Raschig) rings)



Şekil Ek 2.4.2 Metal Raflux (Pall) halkaları (Metal Raflux (Pall) Rings)

Ek 2.5 Yüksek Performanslı Kule Malzemeleri

Burada, Rauschert Proses Teknolojilerinin teklif ettiği metal, plastik ve seramik modeller verilmiştir.

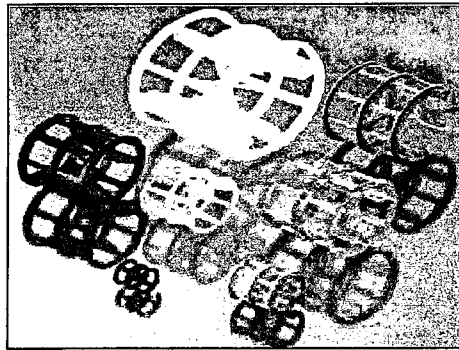


Şekil Ek 2.5.1 Rauschert metal eyer halkaları (Rauschert metal saddle rings – RMSR)

Bu malzemenin başlıca özellikleri şöyle özetlenebilir : Mükemmel kütle transfer verimi, son derece düşük basınç azalması, mükemmel mekanik mukavemet, yüksek kapasite, kirliliğe dayanım, mükemmel gaz ve sıvı dağılımı, kolay yerleştirme ve kaldırma şeklindedir.

Tipik uygulama alanları ise şu şekildedir : H_2S absorpsiyonu ve sıyırma, buhar sıyırma, distilasyon, CO_2 absorpsiyonu ve sıyırma, SO_2 absorpsiyonu ve sıyırma, NH_3 absorpsiyonu ve sıyırma, doğrudan soğutma şeklindedir.

RMSR dolgu malzemeleri özel siparişe göre karbon çeliğinden, paslanmaz çelikten, titanyumdan, nikelden, bakırdan veya alüminyumdan imal edilmektedir. Malzemelerin ağırlıklarında 304 paslanmaz çeliği esas alınmıştır.

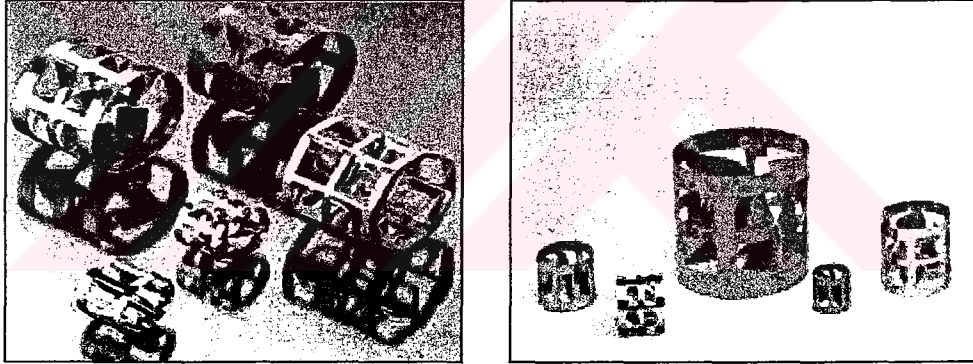


Şekil Ek 2.5.2 Plastik Hiflow halkaları (Plastic Hiflow rings)

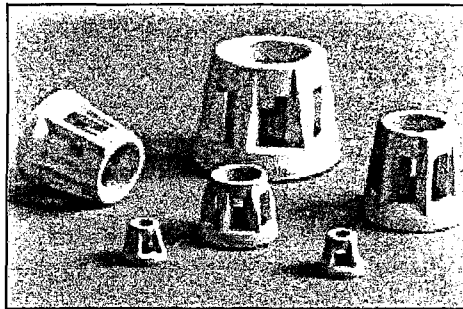
Rauschert'in önerdiği Hiflow halkaları, en çok talep edilen kütle transfer uygulamaları için oldukça uygundur. Açık yapı tarzıyla, düşük basınç azalması ve kirliliğe çok iyi dayanmaktadır. Tasarım yapısı aynı zamanda mükemmel bir kütle transfer verimi sağlamaktadır. Bu durumlar, Hiflow halkalarını hem yüksek hacimli uygulamalarda hem de yüksek katı maddeli proseslerde Rauschert'in mükemmel bir seçeneği yapmaktadır.

Hiflow halkalarının tipik uygulama alanlarını şöyle özetlemek mümkündür : atık gazların arıtılması, VOC sıyırma, amonyak sıyırma, biyoreaktörler, distilasyon, doğrudan soğutma, damlatmalı filtreler, nemlendirme, ozon sıyırma, havalandırma, SO₂ sıyırma, CO₂ sıyırma, H₂S sıyırma ve koku kontrolü şeklindedir.

Termoplastik malzemeler düşük maliyetli olma ve kimyasallara yüksek mekanik dayanım göstermeleri sebebiyle mükemmel bir dolgu malzemesi olarak önerilmektedir. Termoplastikler aynı zamanda yüksek proses sıcaklıklarına karşı yüksek performans göstermektedirler.

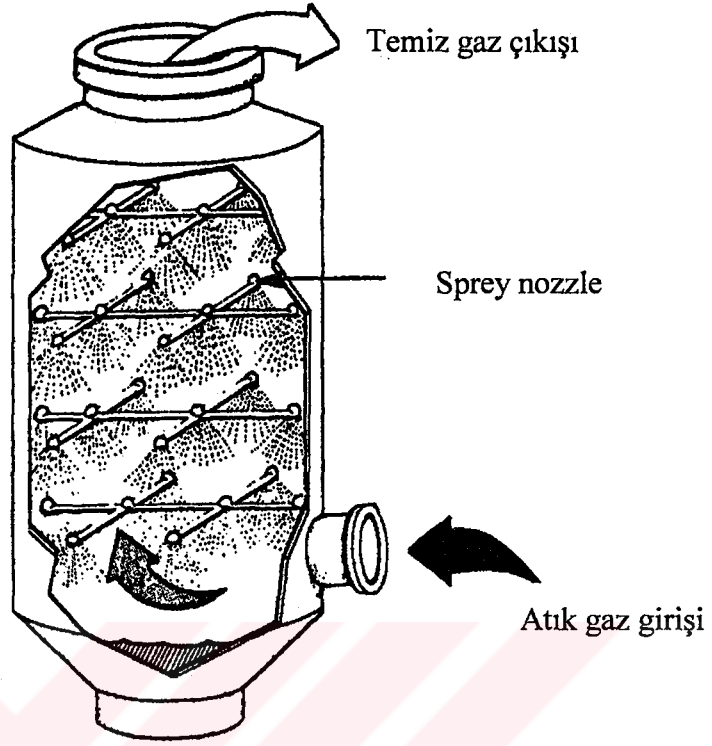


Şekil Ek 2.5.3 Metal Hiflow halkaları (Metal Hiflow rings)

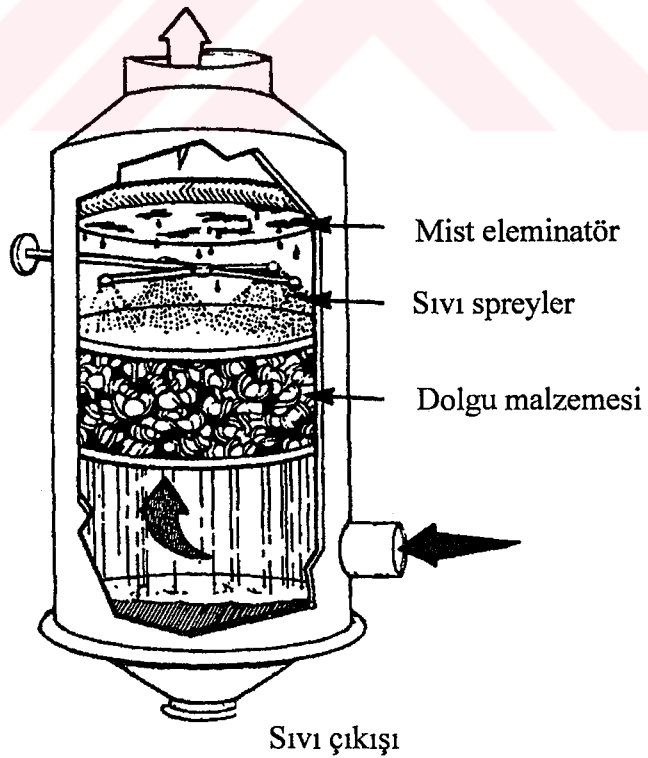


Şekil Ek 2.5.3 Seramik Hiflow halkaları (Ceramic Hiflow rings)

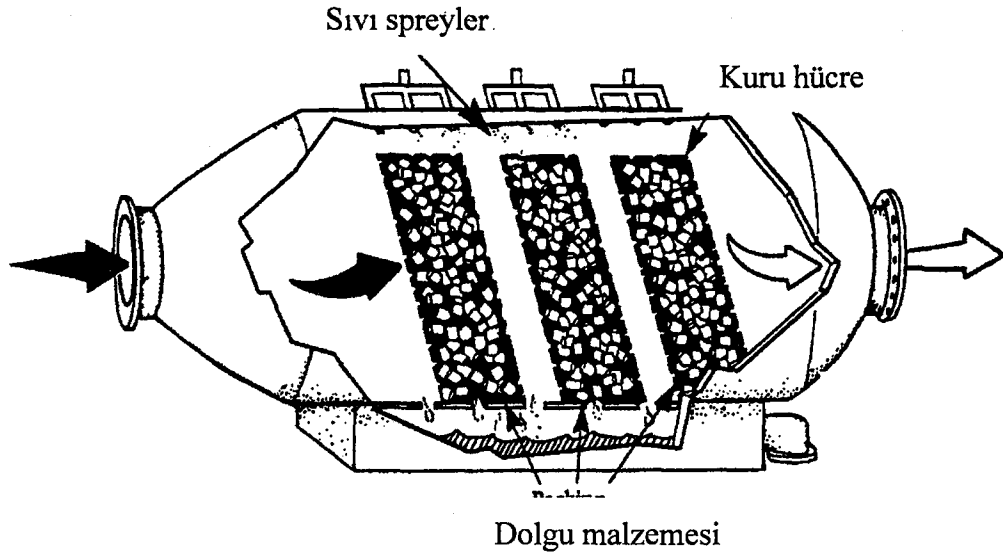
Ek 2.6 Gaz absorpsiyon ekipmanları ve dolgu malzemelerine ait şematik çizimler
(Wu, C. Y., 2003)



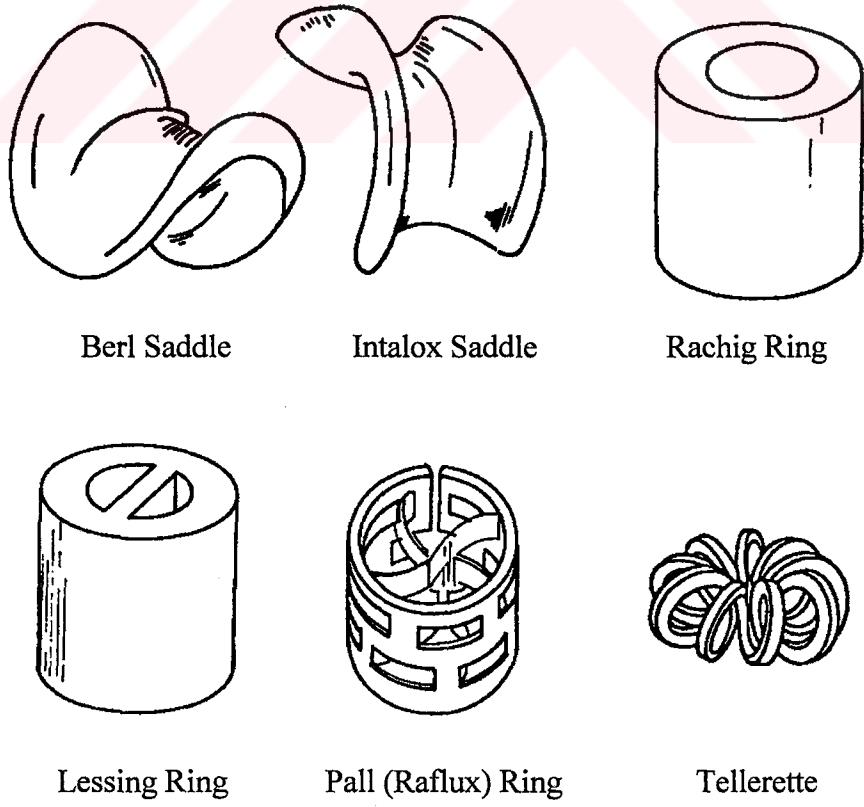
Şekil Ek 2.6.1 Püskürtme kulesi (Spray tower)



Şekil Ek 2.6.2 Ters akışlı dolgulu kule (Countercurrent packed tower)



Şekil Ek 2.6.3 Üç yataklı yatay akışlı dolgulu kule (Three-bed cross flow packed tower)



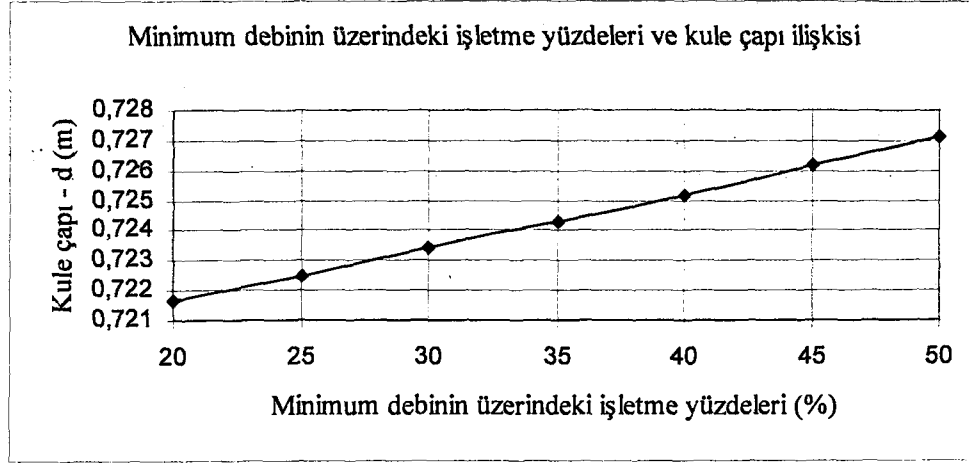
Şekil Ek 2.6.4 Dolgu malzemeleri (Packing materials)

Ek 3 Değişen İşletme Koşulları İçin Elde Edilen Grafikler

Bu kısımda, MATLAB 5.3 algoritmasında “w” olarak ifade edilen bu debi fazlasının %20’den %50’ye kadar farklı değerleri için, değişik işletme koşulları oluşturulmuş ve buna göre tasarım algoritmasının verdiği cevaplar ile kule yüksekliği, kule çapı, transfer birimleri yüksekliği (HTU), transfer birimleri sayısı (NTU) ve net transfer birimleri sayısı (netNTU) değerleri elde edilmiş ve bunlara ait grafikler çizilmiştir. Burada sadece “w” parametresi değiştirilmiş, diğer parametreler sabit tutulmuştur. Bunun yanında daha farklı işletme şartları için değişik sonuçlar ve grafikler de elde etmek mümkündür. Örneğin gaz debisinin artırılması veya azaltılması, kirletici konsantrasyonunun değiştirilmesi, farklı dolgu malzemesinin kullanılması gibi çeşitli işletme şartları için, verilen tasarım algoritması ile kısa sürede ve yüksek hassasiyetle absorpsiyon kulesinin çapını ve yüksekliğini hesaplamak mümkündür.

Çizelge Ek 3.1 Farklı debi fazlası değerleri için elde edilen kule çapları

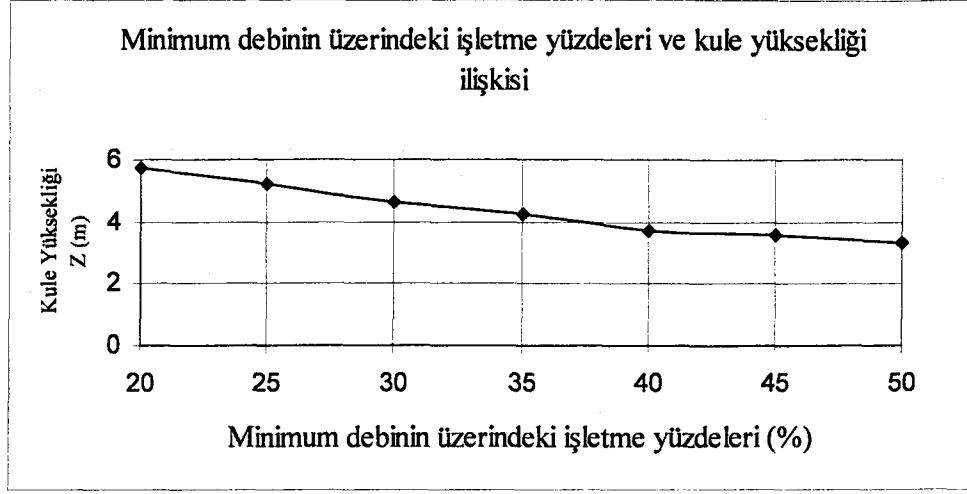
W (%)	d (m)
20	0,7217
25	0,7225
30	0,7234
35	0,7243
40	0,7252
45	0,7262
50	0,7271



Şekil Ek 3.1 Minimum debinin üzerindeki işletme yüzdeleri ve kule çapı ilişkisi

Çizelge Ek 3.2 Farklı debi fazlası değerleri için elde edilen kule yükseklikleri

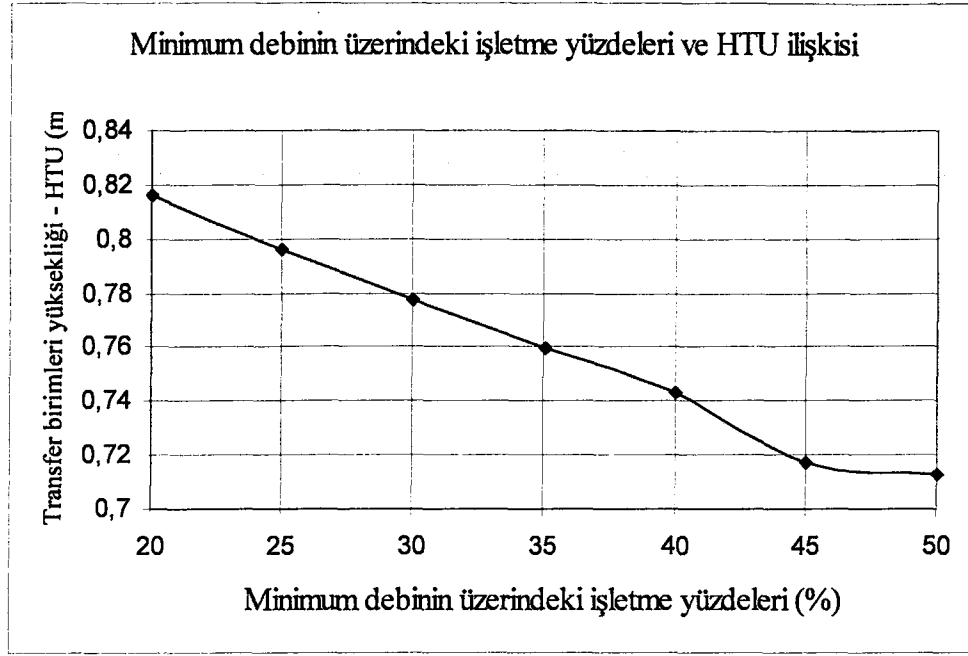
W (%)	Z (m)
20	5,7066
25	5,2011
30	4,6246
35	4,2298
40	3,7309
45	3,5709
50	3,3424



Şekil Ek 3.2 Minimum debinin üzerindeki işletme yüzdeleri ve kule yüksekliği ilişkisi

Çizelge Ek 3.3 Farklı debi fazlası değerleri için elde edilen HTU değerleri

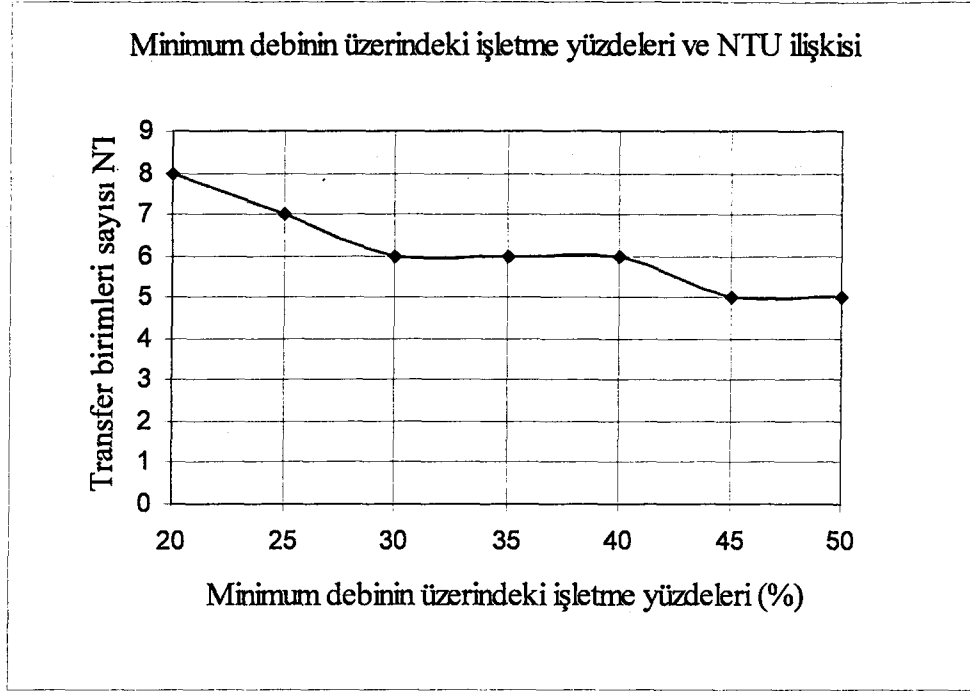
W (%)	HTU (m)
20	0,816
25	0,796
30	0,7773
35	0,7597
40	0,7431
45	0,7174
50	0,7126



Şekil Ek 3.3 Minimum debinin üzerindeki işletme yüzdeleri ve HTU ilişkisi

Çizelge Ek 3.4 Farklı debi fazlası değerleri için elde edilen NTU değerleri

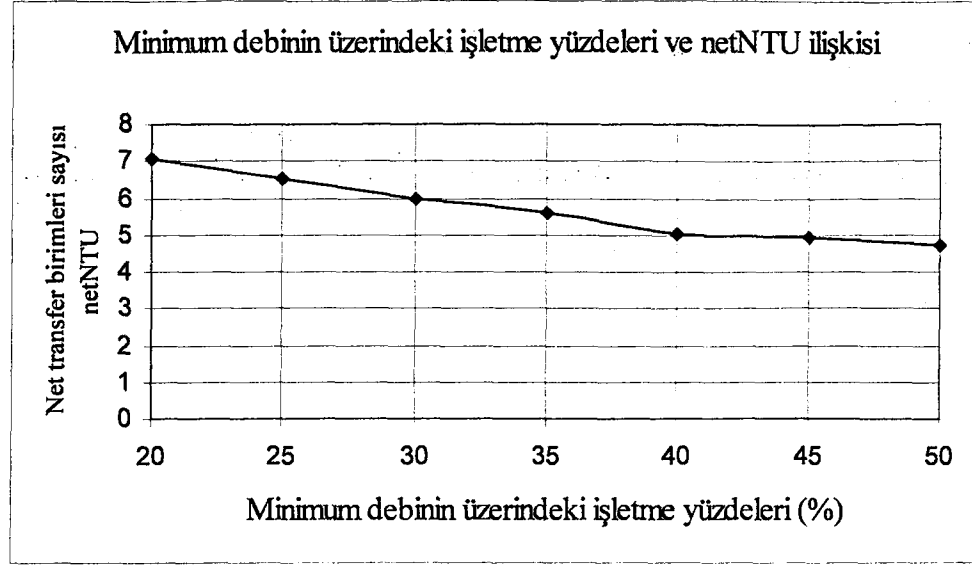
W (%)	NTU
20	8
25	7
30	6
35	6
40	6
45	5
50	5



Şekil Ek 3.4 Minimum debinin üzerindeki işletme yüzdeleri ve NTU ilişkisi

Çizelge Ek 3.5 Farklı debi fazlası değerleri için elde edilen netNTU değerleri

W (%)	netNTU
20	7,0668
25	6,5338
30	5,9495
35	5,5678
40	5,0207
45	4,9089
50	4,6903



Şekil Ek 3.5 Minimum debinin üzerindeki işletme yüzdeleri ve netNTU ilişkisi

ÖZGEÇMİŞ

Doğum tarihi	14.12.1979	
Doğum yeri	İstanbul	
Lise	1993 – 1997	Haydarpaşa Süper Lisesi (Yabancı Dil Ağırlıklı)
Lisans	1998-2002	Yıldız Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi Çevre Mühendisliği Bölümü

Çalıştığı kurum

2003-Devam ediyor YTÜ İnşaat Fakültesi Çevre Mühendisliği Bölümü
Çevre Teknolojisi Anabilim Dalı'nda
Araştırma Görevlisi

