



T.C.
GEBZE YÜKSEK TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

REAKSİYONLU SİSTEMLERDE ÇÖZÜNMÜŞ
GAZ REAKTAN KONSANTRASYONU
KONTROLÜ

GÖKHAN CİVELEK
YÜKSEK LİSANS TEZİ
KİMYA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

GEBZE

2011

T.C.
GEBZE YÜKSEK TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

REAKSİYONLU SİSTEMLERDE ÇÖZÜNMÜŞ
GAZ REAKTAN KONSANTRASYONU
KONTROLÜ

GÖKHAN CİVELEK
YÜKSEK LİSANS TEZİ
KİMYA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DANIŞMAN: Prof. Dr. Mahmut BAYRAMOĞLU

GEBZE

2011



YÜKSEK LİSANS TEZİ JÜRİ ONAY SAYFASI

G.Y.T.E. Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 12.05.2011 tarih ve 2011/12... sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 13 05.2011 tarihinde tez savunma sınavı yapılan Gökhan...CİVELEK'ın tez çalışması Kimya Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.

JÜRİ

ÜYE

(TEZ DANIŞMANI) : Prof. Dr. Mahmut BAYRAMOĞLU

ÜYE

: Prof. Dr. H. Yıldırım ERBİL

ÜYE

: Prof. Dr. Ş. İsmail KIRBAŞLAR

ONAY

G.Y.T.E. Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun
..... ./.. 2011 tarih ve . ./..... sayılı kararı.

İMZA/MÜHÜR

ÖZET

TEZİN ADI: REAKSİYONLU SİSTEMLERDE ÇÖZÜNMÜŞ GAZ REAKTAN KONSANTRASYONU KONTROLÜ

YAZARIN ADI: GÖKHAN CİVELEK

Bu çalışmada, sürekli akış karıştırmalı-tank reaktörde fiziksel ve kimyasal absorpsiyonlu durumlarda çözünmüş oksijen konsantrasyonunun kontrol edilmesi amaçlandı. Bu çerçevede, “Dinamik Matris Kontrol” (DMC) başarılı bir şekilde uygulandı. Kontrol çalışmasında, ayarlanmış değişken hava debisi, kontrol değişkeni ise çözünmüş oksijen konsantrasyonudur.

Günümüzde üzerinde en çok araştırma yapılan ileri kontrol tekniklerinin başında Model Öngörülü Kontrol (MPC) gelmektedir. Burada, sistemin dinamik modeli geçmişteki bilgileri kullanarak gelecek çıktılar ve kontrol hareketleri için öngörülerde bulunur.

Deneysel çalışmanın hazırlık kısmında, sistemdeki oksijen probunun ve orantısal kontrol valfinin gecikme zaman sabitleri hesaplandı. Sistemdeki bütün komponentlerinin dinamikleri dikkate alınarak fiziksel ve kimyasal absorpsiyonlu durumlar için dinamik modeller çıkarıldı ve açık devre bir sistemde deneysel olarak doğrulandı.

Çalışmanın birinci kısmında fiziksel absorpsiyonlu bir sistemde, saf suda çözünmüş oksijen konsantrasyonu kontrol edildi. Açık devre sistemde hava debisine adım değişikliği uygulanarak sistem kararlı hale gelinceye kadar deneysel veri toplandı. Bu verilerle DMC matrisleri elde edildi. DMC ayar parametreleri, MATLAB ortamında “karma tam sayılı kısıtlanmış doğrusal olmayan programlama” çerçevesinde optimize edildi. Kontrol sistemlerinin performansının ölçülmesinde kullanılan iki kriter optimizasyonda amaç fonksiyonu olarak kullanıldı. Daha sonra, gerçek zamanlı servo-kontrol deneyleriyle optimum DMC nin kontrol performansı değişik ayar noktaları kullanılarak test edildi.

Çalışmanın ikinci kısmında, katalizörsüz sodyum sülfid çözeltisinde “çok yavaş kimyasal reaksiyonlu absorpsiyon” rejiminde oksijen konsantrasyonunun kontrolü amaçlandı. Fiziksel absorpsiyona benzer şekilde, çalışma gerekli adımlardan geçilerek yürütüldü ve DMC nin başarı ile uygulanabileceği görüldü.

Anahtar Kelimeler: Model Öngörülü Kontrol, Dinamik Matris Kontrol, Çözünmüş Oksijen Kontrolü, Sürekli Akış Karıştırmalı Tank

SUMMARY

THESIS NAME: CONTROLLING OF DISSOLVED GAS REACTANT CONCENTRATION IN REACTING SYSTEMS

AUTHOR NAME: GÖKHAN CİVELEK

In the this study, it was aimed to control the dissolved oxygen concentration in events of physical and chemical absorption in Continuous Flow Stirred-Tank Reactor (CSTR). In this context, 'Dynamic Matrix Control' (DMC) successfully was carried out. In the control study, the Manipulated Variable has been air flow rate, an the Controlled Variable has been the dissolved oxygen concentration.

Nowadays, MPC comes to at beginning of the advanced control technology, which is the most frequently researched on. Here, the dynamic model of system makes predictions for the future inputs and the control actions by using the past informations.

In the preliminary part of the experimental study, the delay time constants of the oxygen probe and of the proportional control valve in the system were calculated. The Dynamic Models were obtained taking into account the dynamics of all components of the system for situations where the physical and chemical absorption and experimentally validated in an open-loop system.

In the first part of this study, the dissolved oxygen concentration was controlled for a physical absorption system in the pure water. In the open-loop system, experimental data were collected by applying a step-change to the air flow rate, until the system became steady state. With this data, the DMC matrices were obtained. Tuning parameters of DMC were optimized according to 'constrained mixed-integer nonlinear programming' in the MATLAB environment. Two criteria, used to measure the performance of control systems, were used as the objective function in the optimization. Then, with the real-time servo-control experiments, the optimal control performance of the DMC was tested by using different set points.

In the second part of this study, it was aimed to control the oxygen concentration in uncatalyzed solutions of Sodium Sulfite in the "very slow chemical reaction assisted absorption regime". The study was done through the stages in a similar way to the physical absorption and it was seen that the DMC could be successfully applied.

Key words: Model Predictive Control, Dynamic Matrix Control, Dissolved Oxygen Control, Continuous Flow Stirred-Tank Reactor.

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasında, desteğini, rehberliğini ve zamanını esirgemedi bana yol gösteren tez danışmanım sayın Prof. Dr. Mahmut BAYRAMOĞLU hocama en derin saygı ve teşekkürlerimi sunarım.

Laboratuar çalışması sırasında mümkün olduğunca yardımlarını esirgemeyen Arş. Gör. Ömür ARAS ve bölümdeki diğer arkadaşlarıma ayrıca teşekkür ederim.

Çalışmam sırasında daima özverileriyle yanımda bulunan, beni destekleyen aileme ve dostlarıma en içten saygı ve muhabbetlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
SUMMARY	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER	iv
SİMGELER VE KISALTMALAR	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	xii
TABLolar DİZİNİ	xiv
GRAFİKLER DİZİNİ	xvi
BÖLÜM 1	1
GAZ-SIVI SİSTEMLERİ	1
1.1. GAZ-SIVI SİSTEMLERİNE GİRİŞ	1
1.2 GAZ-SIVI TEMASI	2
1.2.1 Kütle Transfer Katsayısı (k_L)	2
1.2.4 Hacımsal Kütle Transfer Katsayısının Deneysel Ölçümü	3
a-) Kararsız Hal Ölçüm Metodları	3
b-) Kararlı Hal Ölçüm Metodları	4
1.3 GAZ-SIVI REAKSİYON KİNETİĞİ	5
1.3.1 Gaz-Sıvı Sistemleri İçin Kütle Transferi (İki Film Modeli)	5
1.3.2 İki Film Modeli İçin Kinetik Rejimler	7
Kimyasal Reaksiyonların Gerçekleştiği Bölgelerin Sınıflandırılması	7
1.3.2.1 Sıvı Ana Kütlesinde Gerçekleşen Reaksiyon	
(Yavaş Reaksiyon)	7
1.3.2.2 Sıvı Filminde Gerçekleşen Reaksiyon	8
1.3.2.3 Sıvı Ana Kütlesinde ve Sıvı Filminde Meydana Gelen	
Reaksiyon	10

BÖLÜM 2	12
GAZ- SIVI REKTÖRLER	12
2.1 REAKTÖR TİPLERİ	12
2.2 KARIŞTIRMALI TANK REAKTÖR	13
2.2.1 Karıştırıcı Tasarımı	14
2.2.2 Gaz Dağıtıcı	15
2.2.3 Sürekli Karıştırmalı Tank Reaktörün Modellenmesi	16
2.2.3.1 Reaksiyonun Olmadığı Durum İçin Matematiksel Model (Fiziksel Absorbsiyon)	17
2.2.3.2 Reaksiyonun Olduğu Durum İçin Matematiksel Model (Fiziksel Absorbsiyon-Reaksiyon)	19
BÖLÜM 3	21
PROSES KONTROL	21
3.1 GİRİŞ	21
3.2 TEMEL PROSES KONTROL KAVRAMLARI	22
3.2.1 Proses Değişkeni	22
3.2.2 Set Noktası (Ayar Noktası)	22
3.2.3 Ölçüm Değişkeni	22
3.2.4 Hata	23
a-) Büyüklük	23
b-) Süre	23
c-) Değişim hızı (Rate of Change)	23
3.2.5 OFFSET(Dengeleme)	24
3.2.6 Yük Bozukluğu (Load Disturbance)	24
3.2.7 Kontrol Algoritması	24
3.2.8 Manuel ve Otomatik Kontrol	25
3.3 PROSES KONTROL EKİPMANLARI VE İLETİŞİMİ	25
3.3.1 Ekipmanlar	25
3.3.1.1 Sensörler	25
3.3.1.2 Güç Çevirici (Transducer) ve Dönüştürücü (Converter)	25

3.3.1.3 Verici (Transmitter)	26
3.3.1.4 Kontrol Ediciler ve Kontrol Donanımları	26
3.3.1.5 Akış Ölçer	26
3.3.2 İletişim	27
Sinyaller	27
a-) Pnömatik Sinyal	27
b-) Analog Sinyal	27
c-) Dijital Sinyal	27
BÖLÜM 4	28
MODEL ÖNGÖRÜLÜ KONTROL	28
4.1. GİRİŞ	28
4.2 MODEL ÖNGÖRÜLÜ KONTROLE TARİHSEL BAKIŞ	30
4.3 MODEL ÖNGÖRÜLÜ KONTROLÜN AVANTAJ VE DEZAVANTAJLARI	34
Avantajları	34
Dezavantajları	34
4.4 MODEL ÖNGÖRÜLÜ KONTROL STRATEJİSİ	35
4.5 KAYAN UFUK KAVRAMI	36
4.6 MODEL ÖNGÖRÜLÜ KONTROL ELEMANLARI	37
4.6.1. Öngörü Modeli	37
4.6.1.1 Proses Modeli	38
4.6.1.2 Bozucuları Tanımlama Modeli	39
4.6.2. Amaç Fonksiyonu (Maliyet Fonksiyonu)	39
4.6.3. Kontrol Kanunu Hesabı	39
4.7 MODEL ÖNGÖRÜLÜ KONTROLÜN GENEL AYAR PARAMETRELERİ	39
4.7.1 Öngörü Ufku (N_P)	40
4.7.2 Kontrol Ufku (N_c)	40
4.7.3 Ağırlık Matrisleri	40

4.8 DİNAMİK MATRİS KONTROL (DMC)	41
4.8.1 Öngörü (Predictive)	41
4.8.2 Ölçülebilir Bozucular (Measurable Disturbances)	43
4.8.3 Kontrol Algoritması	43
4.9 BAZI MODEL ÖNGÖRÜLÜ KONTROL ALGORİTMALARI	45
4.9.1 Model Algoritmik Kontrol(MAC)	45
4.9.2 Öngörülü Fonksiyonel Kontrol(PFC)	46
4.9.3 Genelleştirilmiş Öngörülü Kontrol (GPC)	48
BÖLÜM 5	49
DENEYSEL KISIM	49
5.1 GİRİŞ	49
5.2. DENEY SİSTEMİ	50
Reaktör'ün Boyutlandırılması	52
5.3. CİHAZLARIN ÖZELLİKLERİ VE KALİBRASYONU	54
5. 3.1. Oransal Selenoid Valf	54
5.3.1.1. Oransal Selenoid Valfin Çalışma Prensibi	54
5.3.1.2. SMC® Oransal Selenoid Valfinin Özellikleri	55
5.3.1.3. SMC® Oransal Selenoid Valfinin Akış Karakteristiği	55
5.3.1.4. Selenoid Valfin Dinamiği	56
5.3.1.5. Selenoid Valf Kalibrasyonu	57
5.3.2 Gaz Akış Ölçer	58
5.3.3. Sensörler	59
5.3.3.1 Oksijen Probu	59
5.3.3.2 pH Probu	64
5.3.4. Veri Toplama/Gönderme Kartı (NI® PCI-6221 DAQ Kartı)	64

BÖLÜM 6	66
DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA	66
6.1 FİZİKSEL ABSORBSİYON'DA OKSİJEN KONSANTRASYONU KONTROLÜ	66
6.1.1 Hacımsal Kütle Transfer Katsayısının Belirlenmesi	66
6.1.2 DMC'de Basamak Cevap Modelinin Belirlenmesi	68
Performans İndeksleri	69
6.1.3 Optimum Dinamik Matris Kontrol Parametrelerin Belirlenmesi	69
Duyarlılık Testleri	74
I. Minimum K_1 için Duyarlılık Deneyleri	74
II. Minimum K_2 için Duyarlılık Deneyleri	78
6.1.4 Optimum DMC Parametreleriyle Kontrol Deneyi	84
6.2 SODYUM SÜLFİT-OKSİJEN REAKSİYONUNDA ÇÖZÜNMÜŞ OKSİJEN KONSANTRASYONU KONTROLÜ	85
6.2.1 Reaksiyon Kinetiğinin Belirlenmesi	85
6.2.2 Sodyum Sülfite-Oksijen Reaksiyonu için Basamak Cevap Modelinin Belirlenmesi	86
Sülfite Konsantrasyonunun Analizi	87
Sülfite Deney Şartları	87
6.2.3 Optimum DMC Parametrelerin Belirlenmesi	88
Duyarlılık Testleri	88
6.2.4 Optimum DMC Parametreleriyle Kontrol Deneyi	90
6.3 SONUÇLAR	92
KAYNAKLAR	94
ÖZGEÇMİŞ	99

SİMGELER VE KISALTMALAR

C_A	: Gazın Herhangi Bir Andaki Konsantrasyonu	[mg/L, ppm, mol/m ³]
C_{A0}	: Gazın Başlangıç Konsantrasyonu	[mg/L, ppm, mol/m ³]
C_{AD}	: Gazın Doygunluk Konsantrasyonu	[mg/L, ppm, mol/m ³]
C_{AE}	: Oksijen Sensör Çıktısı	[mg/L, ppm, mol/m ³]
C_{Ai}	: Ara Yüzey Konsantrasyonu	[mol/ m ³]
C_B	: Çözelti Konsantrasyonu	[mol/ m ³]
C_{B0}	: Çözeltinin Başlangıç Konsantrasyonu	[mol/ m ³]
C_f	: Düzeltme Faktörü (0 İle 1 Arasında Değişken)	
C^{set}	: Kontrol Noktası İçin Belirlenen Konsantrasyon Değeri	[mg/L, ppm, mol/m ³]
C_w	: Ağırlık Faktörü (0 İle 1 Arasında Değişken)	
$\bar{C}$	: Reaktörün Çapı	[m]
D	: Karıştırıcının Çapı	[m]
D_{Ag}	: Gaz Film Difüzyon Katsayısı	[m ² /s]
D_{AL}	: Sıvı Film Difüzyon Katsayısı	[m ² /s]
Dd	: MPC’de Ölçülmeyen İleri Besleme Vektörü	
e	: Hatanın Büyüklüğü	
E	: Şiddetlenme Faktörü	
f	: MPC’de Öngörülen Doğal Cevap Vektörü	
F_A	: Molar Debi	[mol/s]
G	: MPC’de Sistemin Dinamik Matris, Karıştırıcı Dizaynında Bıçak eni (Şekil 5.5)	[m]
g	: Yerçekim İvmesi	[9,81 m/s ²]
g_i	: MPC’de Basamak Cevap Modelinin Katsayıları	
Ha	: Hatta Sayısı	
He	: Henry Sabiti	
k, k_A	: Kinetik Hız Sabiti	[1/s]
K_1	: <i>ISE</i> İndeksine Göre Hata	
K_2	: <i>ITSE</i> İndeksine Göre Hata	
k_{Ag}	: Gaz Film Kütle Transfer Katsayısı	
k_L, k_{AL}	: Kütle Transfer Katsayısı	[m/s]

$k_L a$	: Volümetrik Kütle Transfer Katsayısı	$[s^{-1}]$
n_i	: Mol Sayısı	$[mol]$
N	: Karıştırıcı Hızı	$[rpm]$
N_A	: Akı	$[mo/m^2s]$
N_c	: Kontrol Ufku	
N_p	: Öngörü Ufku	
P	: Basınç	$[atm]$
P_A	: Gazın Basıncı	$[atm]$
P_{Ai}	: Gazın Ara Yüzeydeki Basıncı	$[atm]$
Q	: Gaz Debisi	$[m^3/s]$
q	: Sıvı Debisi	$[m^3/s]$
R	: Üniversal Gaz Sabiti	$[m^3 atm/mol K]$
	Karıştırıcı Dizaynında Şekil(5.5) Bıçak Boyu	$[m]$
r_A	: Reaksiyon Hız İfadesi	$[mol/m^3s]$
t	: Zaman	$[s]$
T	: Sıcaklık(^0C) , Tablo 1.3’de Karıştırıcı Çapı	$[m]$
u	: MPC’de Kontrol Ufku İçin Gelecekteki Kontrol Artışlarının Vektörü (Girişi Öngörüsü)	
u_{min}	: Sistemin Çalıştığı Minimum Sinyal	
u_{max}	: Sistemin Çalıştığı Maksimum Sinyal	
$u(t)$	: t Anındaki Giriş Değişkenleri	
V	: Hacim	$[m^3]$
w	: MPC’de Gelecekdeki Referans Vektör	
y	: MPC’de Öngörü Ufku İçin Öngörülen Çıktılar Vektörü (Çıkış Öngörüsü)	
$y(t)$	: t Anındaki Çıkış Değişkenleri	
$\bar{y}(t+k t)$	: MPC’de t Anında (t+k) Anı İçin Öngörülen Çıktı	
Δu	: MPC’de Giriş Değişiminin Öngörüsü	

Yunan Harfleri

α	: Volümetrik Kütle Transfer Katsayısı Sabiti	
β	: Volümetrik Kütle Transfer Katsayısı Denkleminde Gaz Debinin Derecesi	
γ	: Kinetik İfadede Oksijen Konsantrasyonunun Derecesi	
δ	: Kalınlık (Film, Duvar, Tabaka)	[m]
θ	: Kinetik İfadede Sodyum Sülfid Konsantrasyonunun Derecesi	
μ	: Sıvının Viskozitesi	[Pa s]
ρ	: Sıvının Yoğunluğu	[kg/m ³]
σ	:Yüzey Gerilimi	[N/m]
τ_H	: Reaktör İçersinde Kalış Süresi	[s]
τ_S	: Sensörün Gecikme Zamanı veya Cevap Süresi (Response Time)	[s]
v	: Hız, Yüzeysel Hız	[m/s]
Ψ	: Volümetrik Kütle Transfer Katsayısı Denkleminde Karıştırıcı Hızının Derecesi	

KISALTMALAR

CSTR : Sürekli Karıştırmalı Tank Reaktör

DCS : Distributed Control System (Dağıtımli Kontrol Sistemi)

DMC : Dynamic Matrix Control (Dinamik Matris Kontrol)

GPC : Generalized Predictive Control (Genelleştirilmiş Öngörülü Kontrol)

IMC : Internal Model Control (İç Model Kontrol)

ISE : Integral of Squared Error (Karesel Hata İntegrali)

ITSE : Integral of Time Multiply Squared Error (Zaman Çarpanlı Karesel Hata İntegrali)

MPC : Model Predictive Control (Model Öngörülü Kontrol)

PFC : Predictive Functional Control (Öngörülü Fonksiyonel Kontrol)

PLC : Programmable Logic Controller (Programlanabilir Mantıksal Denetleyici)

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
1.1 : Volümetrik Kütle Transfer Katsayısının Belirlenmesinde Uygulanan Monometrik Ölçüm Yönteminin Deney Sistemi	4
1.2 : İki Film Modelinin Şematik Gösterimi	5
1.3 : İki Film Modeline Göre Moleküler Difüzyon İçin Konsantrasyon Gradienti	6
1.4 : Sıvı Ana Kütlelerinde Gerçekleşen Reaksiyon İçin Konsantrasyon Gradienti	7
1.5 : İki Film Modeline Göre Ani Reaksiyon İçin Konsantrasyon Gradienti	8
1.6 : Hatta(Ha) Sayısına Göre Konsantrasyon Gradienti	10
1.7 : Sıvı Ana Kütleleri Ve Sıvı Film’de Meydana Gelen Reaksiyon İçin Konsantrasyon Değişimi	10
2.1 : Bazı Endüstriyel Sıvı-Gaz Reaktörleri	13
2.2 : Sıvıların Farklı Viskozitesine Göre Karıştırıcı Tipleri	14
3.1 : Kontrol Edici ve Proses Parametreleri	22
3.2 : Geri Beslemeli Kontrol Şeması	24
3.3 : Vericiden Kontrol Ediciye Gelen Sinyalle Valf’ın Kontrolü	26
4.1 : Model Öngörülü Kontrol Adımları	29
4.2 : Model Öngörülü Kontrolün Temel Yapısı	35
4.3 : Kayan Ufuk Kavramının Şematik Gösterimi	37
5.1 : Deney Sistemi	50
5.2 : DAQ Kartın Bağlantı Yapısı	50
5.3 : Laboratuarda Çalışılan Deney Sisteminin Fotoğrafı	51

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
5.4 : Gaz Dağıtıcıdan Çıkan Kabarcıkların Bir Fotoğrafı	52
5.5 : CSTR Reaktörünün Boyutlandırılması	52
5.6 : Rushton Disk Tip Karıştırıcının Boyutlandırılması	53
5.7 : Oransal Selenoid Valfin Çalışma Şekli	54
5.8 : Çalışmada Kullanılan Oransal Selenoid Valfin Fotoğrafı	54
5.9 : Akışölçer'in (Flow Metre) Fotoğrafı	58
5.10 : Oksijen Sensörünün Yapısı ve Fotoğrafı	59
5.11 : Oksijen Ölçümü İçin Polagraf Hücre (Clack Tipi) Yapısı	61
5.12 : Veri Toplama/Gönderme Kartı (PCI-DAQ)	64

TABLOLAR DİZİNİ

<u>Tablo</u>	<u>Sayfa</u>
1.1 : Endüstriyel Gaz-Sıvı Sistemlerine Örnekler	1
1.2 : Gaz-Sıvı Sistemlerinin Uygulama Alanları	1
1.3 : Karıştırılmalı Reaktörlerde Volümetrik Kütle Transfer Katsayısı Korelasyonları	2
1.4 : İki Film Modeline Göre Gaz-Sıvı Reaksiyonlar İçin Konsantrasyon Profilleri	11
5.1 : Çalışmada Kullanılan Selenoid Valfin Özellikleri	55
5.2 : Akışölçer'in (Flow Metre) Özellikleri	58
5.3 : Oksijen Probenun Özellikleri	59
5.4 : DAQ Kartın Özellikleri	65
6.1 : Volümetrik Kütle Transfer Katsayısı İçin nonlinear Regresyon Sonuç Tablosu	67
6.2 : C_{A0}; 2 ppm, 3ppm, 4ppm, 5ppm olan ve $C^{set}=6$ ppm için Minimum K_1'e Hasabına Göre Optimum DMC Parametre Tablosu	74
6.3 : Minimum K_1'e Göre Hesaplanan Optimizasyon Sonucunda, Belirlenen Öngörü Ufku (N_p) ve Kontrol Ufku (N_c) İçin Duyarlılık Testi ($C_{A0}=2$ ppm, $C^{set}=6$ ppm)	74
6.4 : Minimum K_1'e Göre Hesaplanan Optimizasyon Sonucunda, Belirlenen Öngörü Ufku (N_p) ve Kontrol Ufku (N_c) İçin Duyarlılık Testi ($C_{A0}=3$ ppm, $C^{set}=6$ ppm)	75
6.5 : Minimum K_1'e Göre Hesaplanan Optimizasyon Sonucunda, Belirlenen Öngörü Ufku (N_p) ve Kontrol Ufku (N_c) İçin Duyarlılık Testi ($C_{A0}=4$ ppm, $C^{set}=6$ ppm)	76
6.6 : Minimum K_1'e Göre Hesaplanan Optimizasyon Sonucunda, Belirlenen Öngörü Ufku (N_p) ve Kontrol Ufku (N_c) İçin Duyarlılık Testi ($C_{A0}=5$ ppm, $C^{set}=6$ ppm)	77
6.7 : C_{A0}; 2 ppm, 3ppm, 4ppm, 5ppm olan ve $C^{set}=6$ ppm için Minimum K_2'e Hasabına Göre Optimum DMC Parametre Tablosu	78

<u>Tablo</u>	<u>Sayfa</u>
6.8 : Minimum K_2 'e Göre Hesaplanan Optimizasyon Sonucunda, Belirlenen Öngörü Ufku (N_p) ve Kontrol Ufku (N_c) İçin Duyarlılık Testi ($C_{A0}=2$ ppm, $C^{set}=6$ ppm)	78
6.9 : Minimum K_2 'e Göre Hesaplanan Optimizasyon Sonucunda, Belirlenen Öngörü Ufku (N_p) ve Kontrol Ufku (N_c) İçin Duyarlılık Testi ($C_{A0}=3$ ppm, $C^{set}=6$ ppm)	79
6.10 : Minimum K_2 'e Göre Hesaplanan Optimizasyon Sonucunda, Belirlenen Öngörü Ufku (N_p) ve Kontrol Ufku (N_c) İçin Duyarlılık Testi ($C_{A0}=4$ ppm, $C^{set}=6$ ppm)	80
6.11 : Minimum K_2 'e Göre Hesaplanan Optimizasyon Sonucunda, Belirlenen Öngörü Ufku (N_p) ve Kontrol Ufku (N_c) İçin Duyarlılık Testi ($C_{A0}=5$ ppm, $C^{set}=6$ ppm)	81
6.12 : Sodyum Sülfid-Oksijen Reaksiyonunun Kinetik Parametreleri Deneysel Veriler Kullanılarak Yapılan Regresyon Sonuç Tablosu	85
6.13 : C^{set} : 4ppm ve 5ppm olan Sodyum Sülfid-Oksijen Reaksiyonu için Minimum K_1 'e Göre Optimum DMC Parametre Tablosu	88
6.14 : C^{set} : 4ppm için Hesaplanan Optimum N_p ve N_c için Duyarlılık Testi	88
6.15 : C^{set} : 5ppm için Hesaplanan Optimum N_p ve N_c için Duyarlılık Testi.	89

GRAFİKLER DİZİNİ

<u>Grafik</u>	<u>Sayfa</u>
3.1 : Hata ile Hatanın Değişim Oranın	23
5.1 : Oransal Selenoid Valfin Basınç Farkına Göre Sinyal-Debi İlişkisi	55
5.2 : Oransal Selenoid Valfin Akış Karakteristiği	56
5.3 : Selenoid Valfin Kararlı Hale Geliş Süresi Deneyi	57
5.4 : Selenoid Valfin Dinamik Modeli	57
5.5 : Akışölçer Flow Metrenin Sinyal-Debi İlişkisinin Belirlendiği Deney Sonucu	58
5.6 : Oksijen Probenun Gecikme Zamanı Deneyi	63
5.7 : Oksijen Probenun Gecikme Zamanının Belirlendiği Grafik	63
6.1 : Fiziksel Absorbsiyon Modelinin DeneySEL Verilerle Karşılaştırılması	67
6.2 : Fiziksel Absorbsiyon Kontrol Deneyleri İçin Basamak Cevap Modeli	68
6.3 : $u_{min}=1$; Aynı DMC parametrelerinde Minimum Sinyalin Belirlenmesi İçin Real-Time Kontrol Deneyi	70
6.4 : $u_{min}=0.5$; Aynı DMC parametrelerinde Minimum Sinyalin Belirlenmesi İçin Real-Time Kontrol Deneyi	71
6.5 : $u_{min}=0$; Aynı DMC parametrelerinde Minimum Sinyalin Belirlenmesi İçin Real-Time Kontrol Deneyi	71
6.6 : Real-Time Kontrol Çalışması İle Model Uyumunun Karşılaştırılması	73
6.7 : Minimum K_1 'e Göre Hesaplanan Optimizasyon Sonucunda Belirlenen Öngörü Ufku (N_p) İçin Duyarlılık Testi ($C_{A0}=2$ ppm, $C^{set}=6$ ppm)	74
6.8 : Minimum K_1 'e Göre Hesaplanan Optimizasyon Sonucunda Belirlenen Kontrol Ufku (N_c) İçin Duyarlılık Testi ($C_{A0}=2$ ppm, $C^{set}=6$ ppm)	75
6.9 : Minimum K_1 'e Göre Hesaplanan Optimizasyon Sonucunda Belirlenen Öngörü Ufku (N_p) İçin Duyarlılık Testi ($C_{A0}=3$ ppm, $C^{set}=6$ ppm)	75
6.10 : Minimum K_1 'e Göre Hesaplanan Optimizasyon Sonucunda Belirlenen Kontrol Ufku (N_c) İçin Duyarlılık Testi ($C_{A0}=3$ ppm, $C^{set}=6$ ppm)	76

<u>Grafik</u>	<u>Sayfa</u>
6.11 : Minimum K_1 'e Göre Hesaplanan Optimizasyon Sonucunda Belirlenen Öngörü Ufku (N_p) İçin Duyarlılık Testi ($C_{A0}=4$ ppm, $C^{set}=6$ ppm)	76
6.12: Minimum K_1 'e Göre Hesaplanan Optimizasyon Sonucunda Belirlenen Kontrol Ufku (N_c) İçin Duyarlılık Testi ($C_{A0}=4$ ppm, $C^{set}=6$ ppm)	77
6.13 : Minimum K_1 'e Göre Hesaplanan Optimizasyon Sonucunda Belirlenen Öngörü Ufku (N_p) İçin Duyarlılık Testi ($C_{A0}=5$ ppm, $C^{set}=6$ ppm)	77
6.14 : Minimum K_1 'e Göre Hesaplanan Optimizasyon Sonucunda Belirlenen Kontrol Ufku (N_c) İçin Duyarlılık Testi ($C_{A0}=5$ ppm, $C^{set}=6$ ppm)	78
6.15 : Minimum K_2 'e Göre Hesaplanan Optimizasyon Sonucunda Belirlenen Öngörü Ufku (N_p) İçin Duyarlılık Testi ($C_{A0}=2$ ppm, $C^{set}=6$ ppm)	79
6.16: Minimum K_2 'e Göre Hesaplanan Optimizasyon Sonucunda Belirlenen Kontrol Ufku (N_c) İçin Duyarlılık Testi ($C_{A0}=2$ ppm, $C^{set}=6$ ppm)	79
6.17 : Minimum K_2 'e Göre Hesaplanan Optimizasyon Sonucunda Belirlenen Öngörü Ufku (N_p) İçin Duyarlılık Testi ($C_{A0}=3$ ppm, $C^{set}=6$ ppm)	80
6.18 : Minimum K_2 'e Göre Hesaplanan Optimizasyon Sonucunda Belirlenen Kontrol Ufku (N_c) İçin Duyarlılık Testi ($C_{A0}=3$ ppm, $C^{set}=6$ ppm)	80
6.19 : Minimum K_2 'e Göre Hesaplanan Optimizasyon Sonucunda Belirlenen Öngörü Ufku (N_p) İçin Duyarlılık Testi ($C_{A0}=4$ ppm, $C^{set}=6$ ppm)	81
6.20: Minimum K_2 'e Göre Hesaplanan Optimizasyon Sonucunda Belirlenen Kontrol Ufku (N_c) İçin Duyarlılık Testi ($C_{A0}=4$ ppm, $C^{set}=6$ ppm)	81
6.21 : Minimum K_2 'e Göre Hesaplanan Optimizasyon Sonucunda Belirlenen Öngörü Ufku (N_p) İçin Duyarlılık Testi ($C_{A0}=5$ ppm, $C^{set}=6$ ppm)	82
6.22 : Minimum K_2 'e Göre Hesaplanan DCM Parametreleri Sabit Tutularak, Kontrol Ufkunun Dört Farklı Değerleri ile Yapılan Simülasyon Deney Sonuçları ($C_{A0}=5$ ppm, $C^{set}=6$ ppm)	82
6.23 : Minimum K_1 'e Göre Hesaplanan DMC parametreleriyle ($N_p:31$, $N_c:2$, $C_f: 0,01$, $C_w:0,055$) $C_{A0}=4$ ppm, $C^{set}=6$ ppm Konsantrasyon Değerlerine Göre Simülasyon Deneyi	83
6.24 : Minimum K_2 'e Göre Hesaplanan DMC parametreleriyle ($N_p:17$, $N_c:2$, $C_f: 0,001$, $C_w:0,029$) $C_{A0}=4$ ppm, $C^{set}=6$ ppm Konsantrasyon Değerlerine Göre Simülasyon Deneyi.	83
6.25 : Optimum DMC parametreleriyle ($N_p:45$, $N_c:2$, $C_f: 0,01$, $C_w:0,354$) $C_{A0}=2$ ppm, $C^{set}=6$ ppm durumunda yapılan Deneysel Çalışma	84
6.26 : Grafik 6.25'de Elde Edilen Deney Sonucu ile Aynı Şartlarda Yapılan Simülasyon Deneyi	84

<u>Grafik</u>	<u>Sayfa</u>
6.27 : Sodyum Sülfite-Oksijen Reaksiyon Sistemi İçin Deney Verileri ile Matematiksel Modelin Ürettiği Verilerin Karşılaştırılması.	86
6.28 : Sodyum Sülfite-Oksijen Reaksiyon Sistemi İçin Basamak Cevap Modeli	86
6.29 : UV Cihazında Farklı Sülfite Konsantrasyonlarıyla Yapılan Analiz Sonucunda Sağlanan Konsantrasyon-Absorbas İlişkisi İçin Regresyonu	87
6.30 : Minimum K_1 'e Göre Hesaplanan Optimizasyon Sonucunda Belirlenen Öngörü Ufku (N_p) İçin Duyarlılık Testi ($C^{set}=4$ ppm)	88
6.31 : Minimum K_1 'e Göre Hesaplanan Optimizasyon Sonucunda Belirlenen Kontrol Ufku (N_c) İçin Duyarlılık Testi ($C^{set}=4$ ppm)	89
6.32 : Minimum K_1 'e Göre Hesaplanan Optimizasyon Sonucunda Belirlenen Öngörü Ufku (N_p) İçin Duyarlılık Testi ($C^{set}=5$ ppm)	89
6.33 : Minimum K_1 'e Göre Hesaplanan Optimizasyon Sonucunda Belirlenen Kontrol Ufku (N_c) İçin Duyarlılık Testi ($C^{set}=5$ ppm)	90
6.34 : Optimum DMC parametreleriyle ($N_p:31$, $N_c:2$, $C_f: 0,001$, $C_w:0,096$) $C^{set}=4$ ppm durumunda yapılan Deneysel Çalışma	90
6.35 : Grafik 6.3'de Elde Edilen Deney Sonucu ile Aynı Şartlarda Yapılan Simülasyon Deneyi.	91
6.36 : Optimum DMC parametreleriyle ($N_p:40$, $N_c:2$, $C_f: 0,55$, $C_w:0,55$) $C^{set}=5$ ppm durumunda yapılan Real-Time Kontrol.	91

Bölüm 1

GAZ-SIVI SİSTEMLERİ

1.1. GAZ-SIVI SİSTEMLERİNE GİRİŞ

Gaz-Sıvı reaksiyonlar kimya endüstrisinin değişik alanlarında geniş bir şekilde uygulanır. Tablo 1.1 ve Tablo 1.2 ‘de bu alanlar ile ilgili örnekler verilmiştir

Tablo 1.1 Gaz-Sıvı Reaksiyonların Endüstriyel Uygulama Alanları

✚	Kimyasal Prosesler: Oksidasyon, Hidrojenasyon, Sülfonasyon, Nitrasyon, Halojenizasyon, Hidro-Halojenizasyon, Alkilasyon, Sülfasyon, Polikondenzasyon, Polimerizasyon vs..
✚	Gaz Yıkama: CO ₂ , H ₂ S, CO, SO ₂ , NO, NO ₂ , N _x O _y , HF, SiF ₄ , Cl ₂ , P ₂ O ₅ , Fosgen, Hidrokarbonlar..(Hava kirliliğine karşı mücadele için)
✚	Biyoloji prosesler: Aerobik Fermentasyon, Hidrokarbonlardan Protein üretimi, Biyolojik Arıtma işlemleri...

Tablo 1.2’de bazı endüstriyel gaz-sıvı reaksiyonlu prosesler için örnekler verilmiştir

Tablo 1.2. Endüstride Gaz-Sıvı Reaksiyonlu Kimyasal Üretim Prosesleri

✚	Petrokimyasal ürünlerin Sıvı faz oksidasyonu
✚	Fenol yapmak amacıyla Molten (Benzoic Asit) oksidasyonu
✚	Kaprolaktam üretmek amacıyla NH ₃ ve Kaprolaktan arasındaki reaksiyon
✚	H ₂ gazı ile UO ₂ , V ₂ O ₃ , MoO ₃ ve WO ₃ çöktürülme prosesi
✚	Alüminyum Trialkillerin Oksidasyonu
✚	Na ₂ S içeren siyah likörün hava ile oksidasyonu
✚	Sülfat Çözeltisinden Cu, Ni ve Co’nın hidrojen gazıyla çöktürülmesi,
✚	Ag, Cu, Ni(CO) ₄ , Fe(CO) ₄ ve Co(CO) ₄ kompleks tuzların CO ile çöktürme

1.2 GAZ-SIVI TEMASI

Gaz-Sıvı proseslerinde hedef yüksek kütle transfer hızıdır. Bu hız ara yüzey ile direkt olarak orantılıdır. Diğer yandan, karıştırıcı, gaz dağıtıcı gibi vasıtalarla uygun gaz kabarcığı ve dispersiyonu sağlanarak kütle transfer katsayısı artırılabilir.

1.2.1 Kütle Transfer Katsayısı (k_L)

Kütle transfer hesaplanmasında; kütle transfer katsayısı (k_L) ile ara yüzey alanının (a) veya bu iki parametreyi içeren hacımsal kütle transfer katsayısının ($k_L a$) bilinmesi gereklidir. Bu parametreler ya fiziksel, ya da kimyasal metotlarla ölçülür. Genellikle, $k_L a$ çalışılan sisteme göre boyutsuz sayılarla ilişkilendirilerek elde edilir. Karıştırmalı bir tankta newtonian akışkan için hacımsal kütle transfer katsayıları veren bazı bağıntılar Tablo 1.3 de verilmiştir.

Tablo 1.3 Karıştırmalı Reaktörde Hacımsal Kütle Transfer Katsayısı Korelasyonları

Perez and Sandall (1974)	$\frac{k_L a T^2}{D_L} = 21.2 \cdot \left(\frac{\rho N T^2}{\mu_a}\right)^{1.11} \cdot \left(\frac{\mu_a}{\rho D_L}\right)^{0.5} \cdot \left(\frac{V_s T}{\sigma}\right)^{0.45} \cdot \left(\frac{\mu_c}{\mu_a}\right)^{0.69}$
Yagi and Yoshida (1975)	$\frac{k_L a T^2}{D_L} = 0.06 \cdot \left(\frac{\mu_a}{\rho D_L}\right)^{0.5} \cdot \left(\frac{T^2 N \rho}{\mu_a}\right)^{1.5} \cdot \left(\frac{\mu_a V_s}{\sigma}\right)^{0.6} \cdot \left(\frac{N^2 T}{g}\right)^{0.19} \cdot \left(\frac{N T}{V_s}\right)^{0.32}$
Nishikawa et al. (1981)	$\frac{k_L a D^2}{D_L} = 0.368 \cdot \left(\frac{\rho N T^2}{\mu}\right)^{1.38} \cdot \left(\frac{\mu}{\rho D_L}\right)^{0.5} \cdot \left(\frac{\mu V_s}{\sigma}\right)^{0.5} \cdot \left(\frac{N^2 T}{g}\right)^{0.367} \cdot \left(\frac{N T}{V_s}\right)^{0.167} \cdot \left(\frac{T}{D}\right)^{0.25} \cdot \left(\frac{P/V}{\rho N^3 T^5}\right)^{0.75}$
Costa et al. (1982)	$\frac{k_L a T^2}{D_L} = 8.38 \cdot \left(\frac{\rho N^2 T^2}{k}\right)^{2/3} \cdot \left(\frac{k}{\rho N^{1-n} D_L}\right)^{1/3} \cdot \left(\frac{\rho N^2 T^3}{\sigma}\right)^{0.43} \cdot \left[1 + 1.5 \cdot 10^{-3} \cdot \left(\frac{\rho N^2 T^3}{\sigma}\right)\right] \cdot \left(\frac{N T}{V_s}\right)^{-0.4} \cdot \left(\frac{T}{D}\right)$
Albal et al. (1983)	$\frac{k_L a T^2}{D_L} = 1.41 \cdot 10^{-3} \cdot \left(\frac{\mu_a}{\rho D_L}\right)^{0.5} \cdot \left(\frac{T^2 N \rho}{\mu_a}\right)^{0.67} \cdot \left(\frac{\rho N^2 T^3}{\sigma}\right)^{1.29}$
Schlüter and Deckwer (1992)	$k_L a \left(\frac{v}{g^2}\right)^{1/3} = C \cdot \left[\frac{P/V}{\rho(v g^4)^{1/3}}\right]^{0.62} \cdot \left[\frac{Q}{V} \cdot \left(\frac{v}{g^2}\right)^{1/3}\right]^{0.23}$

Hacımsal kütle transfer katsayısını veren korelasyonlar özellikleri belirli ve sabit bir reaksiyon ortamı için temel proses değişkenlerin fonksiyonu olarak aşağıdaki genel ifade ile verilebilir:

$$k_L a = \alpha * Q^\beta * N^\Psi \quad (1.1)$$

1.2.4 Hacımsal Kütle Transfer Katsayısının Deneysel Ölçümü

Hacımsal kütle transfer katsayısını ($k_L a$) hesaplamak için kimyasal ve fiziksel birçok yöntem vardır. Proses sırasında zamanla sıvıda meydana gelen değişimler çözünmüş gazın konsantrasyonuna bağlı olarak kararlı hal ve kararsız hal durumları için çeşitli metodlar uygulanabilir.

a-) Kararsız Hal Ölçüm Metodları

Kararsız hal ölçüm metodları; zamana göre birinci derecede, absorpsiyon prosesinin ilerlediği gerçeği üzerine kurulur.

$$\frac{dC_A}{dt} = k_L a (C_{AD} - C_A) \quad (1.2)$$

$$\ln \frac{(C_{AD} - C_{A0})}{(C_{AD} - C_A)} = k_L a t$$

Denklem (1.3)'de elde edilen denklem $\ln \frac{(C_{AD} - C_{A0})}{(C_{AD} - C_A)}$ ya karşı zaman (t)

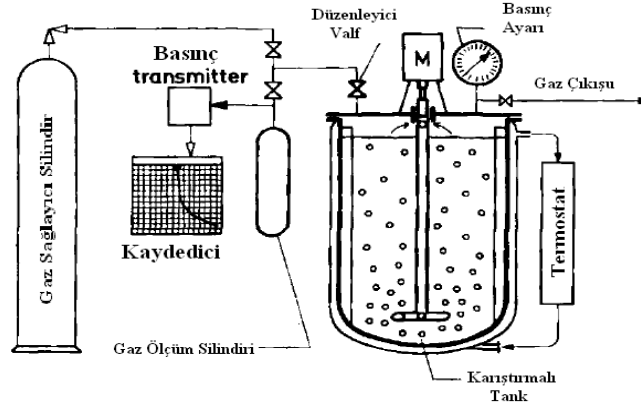
grafik edilirse elde edilen doğrunun eğimi $k_L a$ 'yı verir.

a.1 Oksijen Elektrodu İle Ölçüm

Halen en fazla kullanılan ölçüm metodu; Oksijen probu vasıtasıyla absorpsiyon ve desorpsiyonda zamanla değişen çözünmüş gazın konsantrasyonun takibi şeklindedir. Sulu çözeltiler veya su ile gaz olarak hava veya oksijen ile sınırlı bir yöntemdir. Oksijen ya azotla ya da kimyasal olarak Sodyum Sülfite (Na_2SO_3) stokiometrik oranıyla tükenir.

a.2 Monometrik Yöntem

Monometrik metod; herhangi bir saf gaz (karışım değil) ile sıvı temasında kullanılabilir [8]. Bunun için kurulacak sistemde; gaz ölçüm cihazı, içerisinden gaz geçirilen delikli karıştırıcı, basınç ayarlayıcısı, basınç transduceri ve gaz kaynağından oluşmaktadır.



Şekil 1.1 Saf Gaz ve bir sıvı arasındaki absorpsiyon hızının monometrik ölçümü için test aparatı [8]

Atmosferik basınçta ve test sıcaklığında doygunluk konsantrasyon değerine gaz ulaştığı zaman karıştırıcı ve gaz çıkış vanası kapatılır. Tank içerisindeki basınç artırılır (örneğin; 2 bar'a çıkartılır) ve karıştırıcı açılır. Basınç ayarlandıktan sonra, yüksek basıncın bir sonucu olarak sıvı içerisinde daha fazla gaz çözünür. Ayrıca, absorpsiyon prosesinin izobarik olması için ölçüm kabından gaz beslemesi yapılır. Ölçüm kabındaki düşüş, basınç transmitteri vasıtasıyla belirlenip, kaydedilir ve bunun zamana göre grafiği elde edilir.

b-) Kararlı Hal Ölçüm Metodları

b.1 Sülfid Metodu

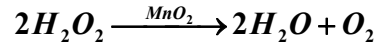
Absorpsiyon metotlarının çoğu sıvıda absorplanan Azot, Oksijen ve Hava'ya uygulanır. Tuzsuz sıvılarda kararsız hal ölçümlarına izin veren Oksijen Elektrodunun geliştirilmesinden önce, katalizörlü (Cu^{+2} , Co^{+2}) Sodyum Sülfid Oksidasyonu bu işlem için uygulanmaktaydı. Çözünen oksijen konsantrasyonu daima sıfıra eşit olur ve absorpsiyon hızı ise, zaman ile Sodyum Sülfid'in konsantrasyonundaki değişimden hesaplanır.

b.2 Sodyum Sülfid Akış Tekniği

Sodyum Sülfid akış tekniği büyük tanklarda (Fermanterler) absorpsiyon hızının ölçülmesi için önerilen bir tekniktir [10]. 0,1-0,3 M Na_2SO_3 çözeltisi tank içerisine sürekli olarak beslenir ve katalizör olarak 10^{-6} mol/L CoSO_4 sıvı içerisine ilave edilir.

b.3 Hidrojen Peroksit (H_2O_2) Metodu

Bu metod, Birmingham Üniversitesinde Prof. Nienow tarafından Hidrojen Peroksit'in katalitik bozunmasına dayalı olarak geliştirildi, kütle transferinin gaz'dan sıvıya (G-S) veya sıvı'dan gaza (S-G) geçişinin önemli olmadığı varsayımında çalışır [11]. Reaksiyon hızı; Hidrojen Peroksit'e göre birinci derece olup katalizör konsantrasyonundan bağımsızdır. Hidrojen peroksit sürekli olarak sisteme beslenir. Kararlı halde ($C_{O_2}=\text{sabit}$) olduğu için, oksijen oluşum hızı ve sıvıdan gaz faza oksijen desorpsiyon hızı aynıdır.



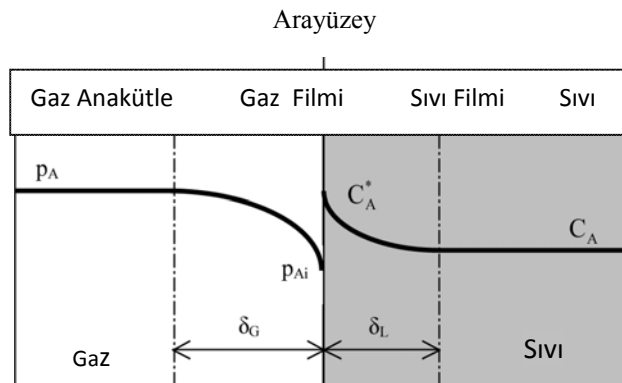
1.3 GAZ-SIVI REAKSİYON KİNETİĞİ

Aşağıda konunun açıklanmasında öncelikle, reaksiyonun olmadığı bir durum için, iki film modeli göz önüne alınarak gaz-sıvı kütle transferi belirlenecektir. Daha sonra reaksiyon kinetiği dikkate alınacaktır.

1.3.1 Gaz-Sıvı Sistemleri İçin Kütle Transferi (İki Film Modeli)

Lewis ve Whitma (1924) tarafından ilk olarak tarif edilen iki film modeli; ara yüzeyde (Şekil1.2) gaz ile sıvı arasındaki kütle transferini tarif etmekte kullanılan basitleştirilmiş bir modeldir. İki film modelinde, ara yüzeyin bir tarafında durgun gaz filmi ile diğer tarafında durgun sıvı filmi bulunduğu varsayımı yapılmıştır. Gaz molekülünün sıvıya taşındığı bir sistem göz önüne alındığı durum için, iki fazda gaz olan maddenin kimyasal potansiyelindeki farklılıktan dolayı (gaz fazda daha yüksek) ölçülebilir bir çözünürlüğe sahiptir. Bu durum iki fazdaki konsantrasyon farklılığı ile açıkça belirlenebilir. Sistemde herhangi bir noktada gaz ve sıvı temas halindedir ve fazlar arasında etkileşim vardır.

Şekil 1.2'de gaz reaktanın(A), gaz fazındaki konsantrasyonu p_A , sıvı fazdaki konsantrasyonu C_A ile gösterilmektedir.



Şekil 1.2 İki film modelinin şeması (Kenig et al. (2003))

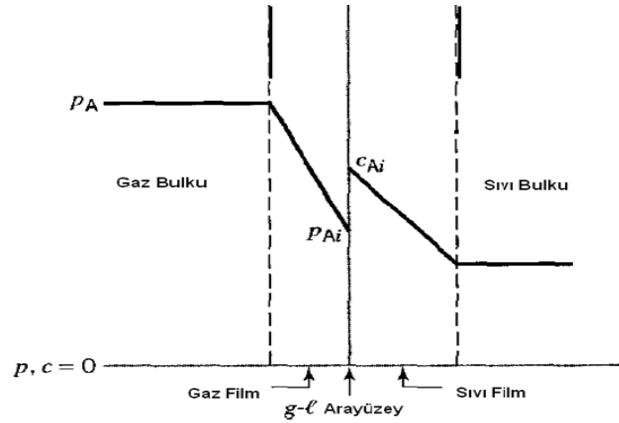
Sıvı film modeli için iki varsayım yapılır;

- 1-) İki film modeli kararlı hal modelidir,
- 2-) Durgun gaz filmi boyunca A'nın kararlı hal taşınımı moleküler difüzyon ile gerçekleşir.

Moleküler difüzyon D_{Ag} ile karakterize edilirse, Fick kanunu ile aşağıdaki eşitlik elde edilir;

$$\begin{aligned} N_A &= D_{Ag} (p_A - p_{Ai}) / RT \delta_g \\ N_A &= k_{Ag} (p_A - p_{Ai}) \end{aligned} \quad (1.3)$$

Benzer şekilde A'nın sıvı film boyunca taşınımı moleküler difüzyon ile gerçekleşir.



Şekil 1.3 Sıvı filmdeki konsantrasyon değişimi

$$\begin{aligned} N_A &= D_{AL} (C_{Ai} - C_A) / \delta_l \\ &= k_{AL} (C_{Ai} - C_A) \end{aligned} \quad (1.4)$$

$$p_{Ai} = H_E C_{Ai} \quad H_E : \text{Henry Sabiti} \quad (1.5)$$

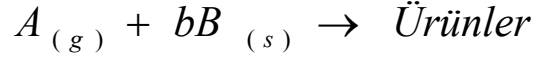
Ayrıca A'nın kütle transfer oranı tüm kütle transfer katsayısı terimi ile aşağıdaki şekilde yazılabilir;

$$\begin{aligned} N_A &= K_{Ag} (p_A - p_A^*) \quad p_A^* = H_E C_A \\ &= K_{AL} (C_A^* - C_A) \quad p_A = H_E C_A^* \end{aligned} \quad (1.6)$$

$$\frac{1}{K_{Ag}} = \frac{1}{k_{Ag}} + \frac{H_E}{k_{AL}} \quad (1.7)$$

1.3.2 İki Film Modeli İçin Kinetik Rejimler

Kimyasal Reaksiyonların Gerçekleştiği Bölgelerin Sınıflandırılması

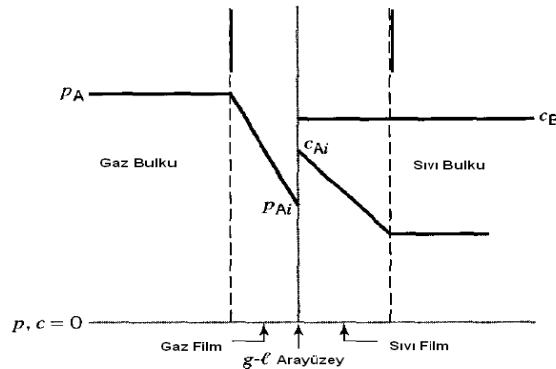


Çıkarılacak tüm kinetik ifadeler için iki film teorisi dikkate alınıp, sıvı faz reaktantının (B) uçucu olmadığı varsayımı yapılacaktır. A gaz reaktantın B ile sıvı ana kütledeki reaksiyonu için, A reaktantı kütle transferiyle sıvı faza girmelidir. Daha sonra A ve B arasındaki kimyasal reaksiyon meydana gelir. Yukarıda verilen Şekil 1.3’de görüldüğü gibi reaksiyonun gerçekleşebileceği iki bölge vardır; Sıvı film ve sıvı ana kütle. Kütle transfer oranı reaksiyon oranına göre hızlı ise, o zaman A reaktantı B ile reaksiyona girmeden sıvı ana kütle içine ulaşır ve burada tepkime gerçekleşir. Diğer taraftan, reaksiyon oranı rölatif olarak hızlı olması halinde (Ani Reaksiyon) A sıvı ana kütleline ulaşmadan sıvı film içerisinde reaksiyona girecektir. Ayrıca ara durumda mümkündür. Kinetik ifadeler üç rejim içerisinde tanımlanabilir:

- 1-) Sadece sıvı ana kütlede meydana gelen reaksiyon,
- 2-) Sadece sıvı filminde meydana gelen reaksiyon,
- 3-) Hem sıvı film hem de sıvı ana kütlede meydana gelen reaksiyon.

1.3.2.1 Sıvı Ana Kütlede Gerçekleşen Reaksiyon (Yavaş Reaksiyon)

Gaz ve sıvı film boyunca A’nın kütle transferine direnç önemsiz olmadığı durumda, reaksiyon sadece sıvı ana kütlede meydana geliyorsa konsantrasyon profili şu şekildedir;



Şekil 1.4 Sıvı ana kütlede gerçekleşen yavaş reaksiyon

Sıvı faz içerisinde B'nin konsantrasyonu A'ya göre büyükse ($C_B \gg C_A$) kinetik ifade içerisinde C_B sabit olarak alınır. Reaksiyonun elementer yürüdüğü düşünülürse; O zaman hız denklemi 1.8 denklemine göre yazılabilir:

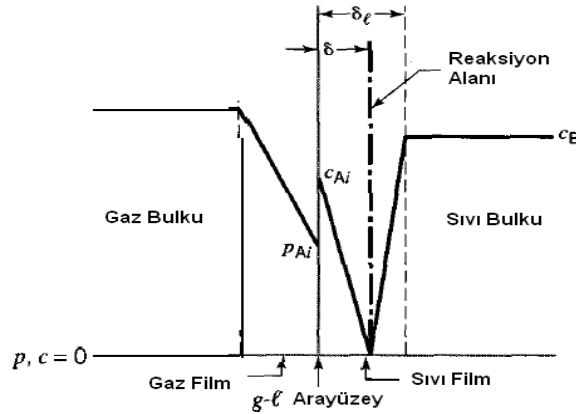
$$\begin{aligned} (-r_A) &= (k_A C_B) C_A \\ &= k'_A C_A \end{aligned} \quad (1.8)$$

Sistem karalı halde olduğu durumda $N_A = (-r_A)$ ifadesi elde edilir.

1.3.2.2 Sıvı Filminde Gerçekleşen Reaksiyon

Ani Reaksiyon

A ve B arasındaki reaksiyon hızı ani bir reaksiyon da sonuçlanacak kadar oldukça yüksek ise o zaman A ve B sıvı fazın herhangi bir yerinde bir arada bulunamaz. Reaksiyon sıvı filmde belli bir noktada meydana gelir. İki reaktanın reaksiyona girdiği nokta reaktanların difüzyon hızı ve konsantrasyonu ile karar verilir. Bu noktada C_A ve C_B 'nin ikisi de sıfırdır.



Şekil 1.5 Sıvı filmdeki ani reaksiyon

Şiddetlenme Faktörü (Enhancement factor, E)

Arttırma veya şiddetlenme faktörü, aynı itici güç (Konsantrasyon Farkı, ΔC) şartları altında gerçek reaksiyon hızı ile reaksiyonun olmadığı durumda sağlanan hızın oranı olarak tarif edilir. Kısaca; reaksiyon hızının, fiziksel absorpsiyon hızına oranıdır. Sadece sıvı filmde meydana gelen reaksiyon için maksimum kütle transfer oranı $C_A = 0$ olduğu durum içindir.

$$E = \frac{\text{A'nın Akısı veya Reaksiyon Hızı}}{\text{Sıvı Film Boyunca A'nın Maksimum Kütle Transfer Oranı}} \quad (1.9)$$

$$= (-r_A)/k_{AL}(C_{Ai}-C_A) = (-r_A)/k_{AL}C_{Ai}$$

E terimi ile hız kanunu $(-r_A)=k_{AL}.E_{CAi}$ şeklinde yeniden yazılabilir.

Hatta Sayısı (Hatta Number, Ha)

Japon bilim adamı Shirôji Hatta tarafında 1932 yılında bulunmuştur (Hatta number (Hatta, 1932)). Gaz-Sıvı sisteminde sıvı film içerisinde bir reaksiyonun dikkate alınıp alınmayacağına karar vermek amacıyla kullanılan boyutsuz bir sayıdır. Bir film-dönüşüm parametresi olarak şu şekilde tanımlanır;

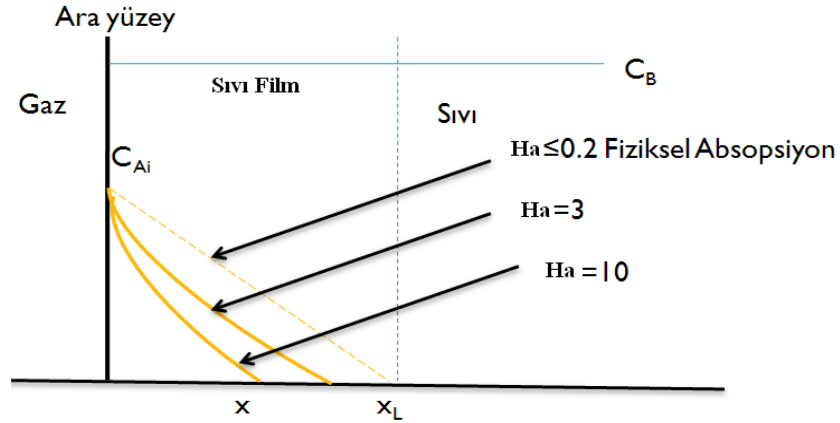
$$Ha = \frac{\text{Sıvı Film Boyunca Maksimum Dönüşüm(Kimyasal Reaksiyon)}}{\text{Sıvı Film Boyunca Maksimum Kütle Transferi}} \quad (1.10)$$

Hatta sayısının aldığı değerler kullanılarak reaksiyonun gerçekleştiği rejim ve reaksiyonun hızı hakkında bilgi sahibi olunabilir. Ayrıca Hatta sayısı kullanılarak komplike denklemlerin sadeleştirilerek çözümlenmesi yapılmaktadır. Özellikle, reaksiyonun sıvı film ve sıvı ana kütlelerinde eş zamanlı gerçekleştiği durum ile kimya endüstrisinde çok sık karşılaşılır. Reaktör tipinin seçimi reaksiyon-difüzyon katsayısının büyüklüğü gaz-sıvı transfer proseslerini sınıflandırmak için önemlidir. Hatta sayısını değerine göre üç bölge ayrı düşünülmelidir.

Ha >> 1: Reaksiyonun büyük bir kısmı sıvı filmde meydana gelir ve ara yüzey (a) kontrollüdür.

Ha << 1: Reaksiyon Film içerisinde çok az meydana gelir büyük kısmı sıvı ana kütlelerinde meydana gelir ve sıvı ana kütlesi kontrollüdür.

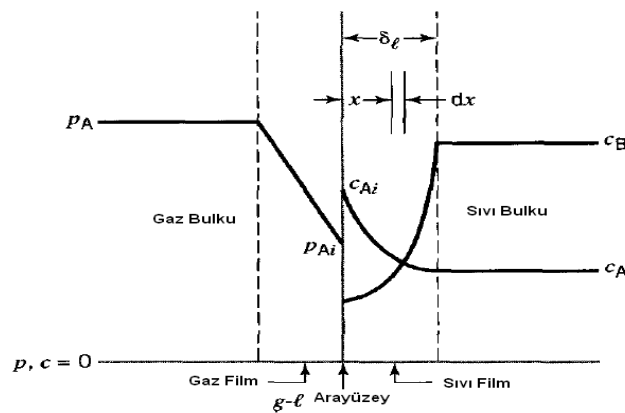
0.3 < Ha < 3: Reaksiyonun hem sıvı filminde hem de sıvı ana kütlelerinde gerçekleştiğini gösteren durumdur ve diğerlerine göre daha kompleksir.



Şekil 1.6_Hatta sayılarına göre konsantrasyon profilleri

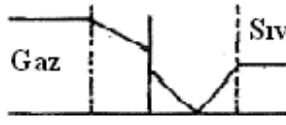
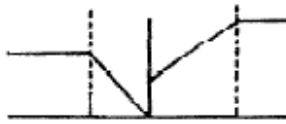
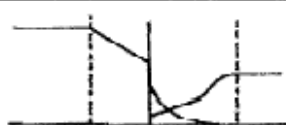
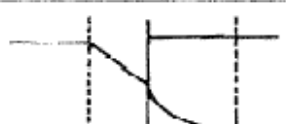
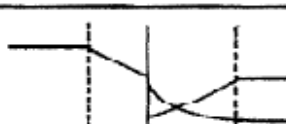
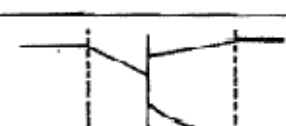
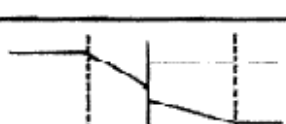
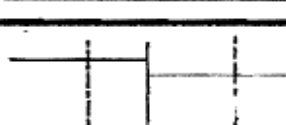
1.3.2.3 Sıvı Ana Kütlelerinde ve Sıvı Filminde Meydana Gelen Reaksiyon

Yukarıda açıklanan durumlarda, sadece sıvı film içerisinde (ani reaksiyon) ve sıvı ana kütlelerinde gerçekleşen reaksiyon için incelenen bölgeye göre eşitlikler türetilir ve çözülür. A ve B'nin difüzyon ve reaksiyonu sıvı filmin tümüne yayılmış ise yukarıda yapılan çözümleme şekli uygulanamaz. Bunun yerine, sıvı film boyunca, A ve B için süreklilik eşitliklerinin çıkartılması dikkate alınır. Şekil 1.7'de A ve B'nin iki film modeline göre konsantrasyon profili şematik olarak gösterilmiştir. Tablo 1.4'de gaz-sıvı reaksiyonların konsantrasyon profili ile genel hız eşitlikleri şartları ile birlikte verilmiştir.



Şekil 1.7 Sıvı ana kütlelerinde ve sıvı filmde gerçekleşen reaksiyon

Tablo 1.4 Reaksiyonlu Sistemlerde ($A_{(g)} + bB_{(s)} \longrightarrow \text{Ürünler}$) Kütle Transferi İçin Ara yüzey Konsantrasyon Profilleri

Rejim	Fazlar arası Konsantrasyon Profili	Hız Eşitlikleri	
Ani		$\frac{p}{H_e} + \frac{D_B}{D_A} \frac{C_{B_0}}{Z}$ $\frac{1}{k_L} + \frac{1}{H_e k_G}$	A
Ani ve Yüzeysel		$N_A = k_G p$	B
Hızlı		$N_A = \frac{p}{\frac{1}{k_G} + \frac{H_e}{E k_L}}$	C
Hızlı 1. derece veya daha yüksek		$N_A = \frac{p}{\frac{1}{k_G} + \frac{H_e}{\sqrt{D_A k_2 C_{B_0}}}}$	D
Orta Seviye		Geliştirilmiş Genel Bir Tanımı Yok	E
Orta Seviye		Geliştirilmiş Genel Bir Tanımı Yok	F
Yavaş Difüzyon Prosesi		$N_A = \frac{p}{\frac{1}{k_G} + \frac{H_e}{k_L} + \frac{H_e \alpha}{\beta k_2 C_{B_0}}}$	G
Çok Yavaş Sıvı Anakütlesinde Kimyasal Reaksiyon		$R_A = k_2 C_A^m C_{B_0} \beta E$	H

Bölüm 2

GAZ- SIVI REKTÖRLER

2.1 REAKTÖR TİPLERİ

Gaz-sıvı reaktörlerde, kimyasal reaksiyon hızı ile kütle transfer hızı oranı reaktör tasarımında temel rol oynar. Gaz-Sıvı reaksiyonlarında verim ve seçicilik, Kütle transferi, Gaz-Sıvı temas şekli ve iki fazdaki geçiş süresi tarafından etkilenir. Gaz-Sıvı reaktör tasarımı iki adımda ilerler ;

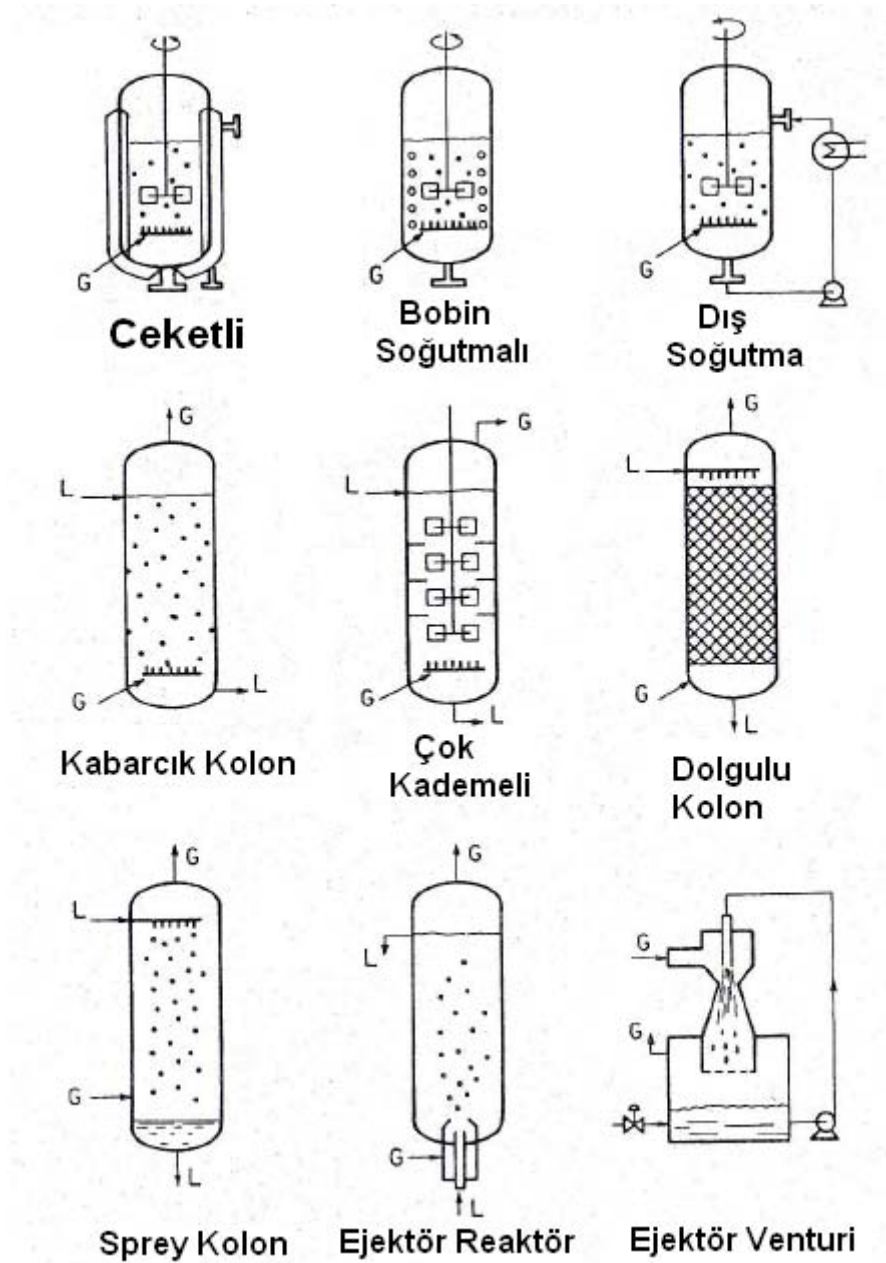
- I. Uygun Reaktör Tipinin seçimi
- II. Reaktörün Geometri Parametrelerinin Tasarımı ve Reaksiyon Koşullarının Tanımlanması.

Sürekli Karıştırmalı Tank Reaktörler (CSTR) gaz dispersiyon için mekanik olarak karıştırıcı ekipmanlıdır. Bu üniteler, yavaş reaksiyonlu uygulamalarda faydalıdır ve ayrıca yüksek ısı etkinliği istenen sistemler için uygundur.

Kabarcık kolon reaktörlerde, gaz sıvı içerisine alttan verilir ve kolonun ideal yüksekliği çapının en az üç katı olması gerekir. Gaz kabarcıkları sıvı boyunca yükselir. Bu üniteler sıvıda meydana gelen yavaş reaksiyonlara uygulanır ve anahtar bileşen genellikle sıvı fazdadır. Ayrıca, endüstriyel uygulamalarda kabarcık kolon reaktör sürekli karıştırmalı tank reaktöre göre daha ekonomiktir.

Sprey Kolon reaktörlerde, sıvı kolonun üstünden ve gaz yukarıya doğru akar. Yüksek bir sıvı alanı püskürtücünün yakınında oluşturulur, ama damlalar birleşir ve alan hızlı bir şekilde düşer. Bu sebepten dolayı bu üniteler genellikle, basit absorpsiyon çalışmalarında kullanılır.

Şekil 2.1 de bazı tipik Gaz-Sıvı Reaktör örnekleri verilmiştir.



Şekil 2.1 Bazı Endüstriyel Gaz-Sıvı Reaktörlerinin Şematik Gösterimi

2.2 KARIŞTIRMALI TANK REAKTÖR

Mekanik karıştırmalı gaz-sıvı reaktörlerinde proses performansı, reaktör içerisindeki hidrodinamik koşullara bağlıdır. Bu hidrodinamik koşullar (Gazın tam dispersiyonu, gaz-sıvı sirkülasyonu, sıvı taşması, boşluk oluşumu vs.) gaz dağıtıcı tasarımı, karıştırıcı tasarımı, gaz dağıtıcı yeri, karıştırıcı hızı ve yüzeyse hız gibi etkenlerle direkt ilişkilidir.

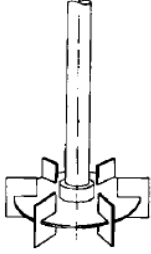
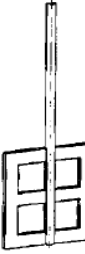
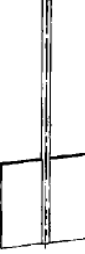
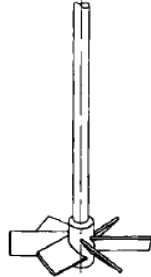
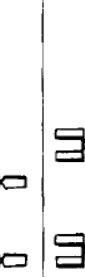
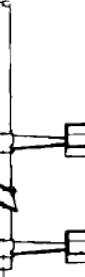
2.2.1 Karıştırıcı Tasarımı

Karıştırıcı tipi kullanılan sıvı özelliğine göre farklılık göstermektedir. Aşağıda belirtildiği gibi beş tip karıştırma işlemi dikkate alınabilir;

- ✓ Homojenizasyon (Farklı sıcaklık ve konsantrasyonları eşitlemek için),
- ✓ Bir sıvı ve bir ısı transfer yüzeyi arasında ısı transferinin artırılması,
- ✓ Sıvı içerisindeki bir katının süspansiyonu veya bulamaç şekli,
- ✓ İki karışmaz sıvının dispersiyonu (emülsiyonlaştırma),
- ✓ Sıvı içerisindeki gazın dispersiyonu (gaz-sıvı teması).

Gaz-sıvı arasında daha fazla ara yüzeyi oluşturmak ve gazın sistem içerisinde kalış zamanını uzatmak için kabarcıkları yeniden sirküle ettirmek karıştırıcının üstelendiği görevlerdendir.

Akış sisteminde karıştırıcının en etkili şekilde kullanılmasına karar vermek, fiziksel özelliklerin ve proses isteklerinin iyi bir şekilde anlaşılması ile gerçekleştirilir. Karıştırıcılar düşük veya yüksek viskoziteli sıvılar olmasına göre gruplandırılır.

Viskozite	< 500		500 – 5 000			$5 \times 10^3 - 5 \times 10^4$
Radyal						
	Turbine	Impeller® (Pfaudler)	Cross beam	Frame	Blade	Anchor
Eksenel						

Şekil 2.2 Farklı Sıvı Viskozite(mPa s) Değerlerine Göre Uygun Karıştırıcı Tipleri

Karıştırıcı tasarımında bıçakların kalınlık ve genişliği tam dispersiyon için önemli bir etkiye sahiptir. Karıştırıcıda kullanılan bıçakların kalınlık ve genişliği artmasıyla tam dispersiyon için kritik karıştırıcı hızının düştüğü bulunmuştur. Bunların belirlenmesi için çeşitli korelasyonlar türetilmiştir.

Rushton Disk karıştırıcı 1950'li yıllardan beri gaz dispersiyon uygulamaları için standart bir karıştırıcı olmuştur. Rushton profilli karıştırıcılar, genellikle gıdalar, pH, oksijen ve diğer kimyasallar içeren reaktörlerde kullanılmaktadır. Bu karıştırıcı tipi, bir disk üzerine altı adet bıçak yerleştirilmesiyle meydana gelir. Karıştırıcı bıçaklarının standart bağıl boyutları, karıştırıcı boyu karıştırıcı çapının %20'si bıçak boyu, bıçak eni karıştırıcı çapının %25 ise olarak hesaplanarak tasarımı yapılır. Rushton Disk karıştırıcı tipi düşük viskoziteli sıvılarda tercih edilir. Etkili bir karıştırmalı tank reaktör tasarımı için sıvı yüksekliğinin reaktör çapına oranı önemlidir. Sıvı yüksekliği/Tank Çapı $>1,5$ olduğunda karıştırıcı sayısı artırılır.

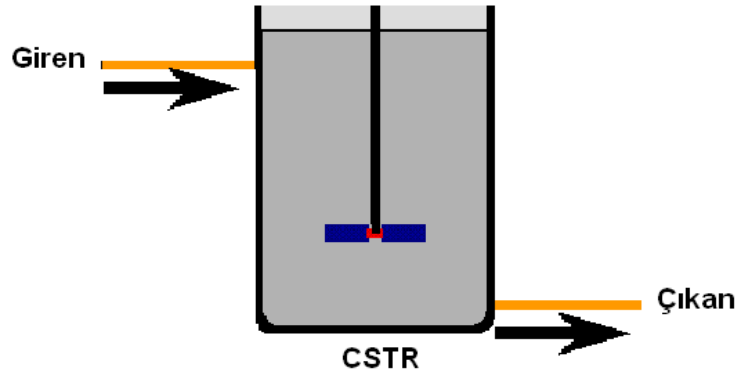
2.2.2 Gaz Dağıtıcı

Gaz dağıtıcı; bir reaksiyon ve/veya kütle transferinde, gaz sıvı temasını sağlamak için sıvı içerisine gaz verilmesi işleminde kullanılır. Bir gaz dağıtıcı, reaktör içerisine giren kabarcıkların giriş boyutunu direkt etkiler. İyi bir gaz dağıtıcı tasarımı ve bunun yerinin belirlenmesi maksimum gaz-sıvı temasını sağlar. Gaz-Sıvı sistemlerinde kullanılan üç gaz dağıtıcı tipi vardır;

- 1-) Poroz Gaz Dağıtıcı,
- 2-) Orifiz veya yuvarlak delikli dağıtıcı,
- 3-) Nozul Gaz Dağıtıcı.

Literatürde birçok araştırmada [19] [20] [21], bir gaz dağıtıcının boyutu ile reaktör içerisindeki yerinin gaz dispersiyonuna etkisi incelenmiş ve gaz dağıtıcı için en önemli parametre karıştırıcıya göre gaz dağıtıcının konumu bulunmuştur. Yapılan bir çalışmada [20] tam dispersiyonu sağlamak için gerekli minimum karıştırma hızı (Gaz dispersiyon için kritik karıştırma hızı) gaz dağıtıcının, karıştırıcının üzerinde olduğu durumda en büyük değerini aldığı, karıştırıcının altında olduğu ve çapının da karıştırıcıdan küçük olduğu durumda ise en düşük değeri aldığı tespit edilmiştir. Yukarıda bahsedilen kriterlere (Çap ve Konum) göre dağıtıcının tasarımı yapılır. Tipik olarak tercih edilen gaz dağıtıcı çapı, karıştırıcı çapının %70-80'e karşılık gelen değeridir.

2.2.3 Sürekli Karıştırılmalı Tank Reaktörün Modellenmesi



Herhangi bir A türü için Genel Reaktör tasarım eşitliği aşağıdaki şekilde yazılabilir;

$$Giren - Çıkan + Oluşan - Tükenen = Birikim$$

$$F_{A0} - F_A + \int^V r_A dV = \frac{dn_A}{dt} \quad (2.1)$$

Kararlı Hal Varsayımı ile

$$\frac{dn_A}{dt} = 0 \quad (2.2)$$

İyi Karıştırıldığı Varsayımı

$$\int^V r_A dV = Vr_A \quad (2.3)$$

Sonuç olarak varsayımlar eşitliğe uygulandığında denklem 2.4 elde edilir;

$$F_{A0} - F_A + Vr_A = 0 \quad (2.4)$$

$$V = \frac{F_{A0} - F_A}{-r_A}$$

2.2.3.1 Reaksiyonun Olmadığı Durum İçin Matematiksel Model (Fiziksel Absorbsiyon)

CSTR Reaktörü içersinde oksijen absorbsiyonu için aşağıdaki varsayımlar dikkate alınarak modelleme yapıldı;

- ✚ Absorbsiyon prosesi, sıcaklığa bağlı özellikler (Viskozite, Yoğunlu gibi) sabit kalsın diye izotermal koşullarda gerçekleştirildi,
- ✚ Çözelti debisi sabit ($q=q_0$),
- ✚ Oksijen Gazı idealdir,
- ✚ Gaz Fazda Oksijen reaksiyonu yoktur,
- ✚ Gaz filmdeki kütle transfer direnci ihmal,
- ✚ Sadece sıvı filmde sıvı ana kütle sine aksiyal (eksenel) yönde kütle transferi var.

Sürekli Karıştırılmalı Tank Reaktöre kimyasal bir reaksiyonun olmadığı, sadece fiziksel absorbsiyon olduğu durum için gaz bileşene madde balansı uygulandığında, aşağıdaki diferansiyel eşitlik elde edilir;

$$\frac{dC_A}{dt} = \frac{q}{V}(C_{AO} - C_A) + k_L a(C_{AD} - C_A) \quad (2.5)$$

$$\frac{dC_A}{dt} = \frac{(C_{AO} - C_A)}{\tau_H} + k_L a(C_{AD} - C_A)$$

Ayrıca, Deneysel çalışmada oksijenin konsantrasyonunu tespit etmede kullanılan Oksijen Sensörünün gecikme süresinin modele dâhil edilmesi gerekir. Bunun için Oksijen Sensörünün Dinamiği aşağıdaki şekildedir;

$$\frac{dC_{AE}}{dt} = \frac{C_A - C_{AE}}{\tau_S} \quad (2.6)$$

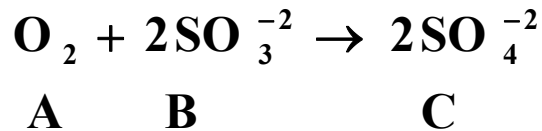
Bu iki denklem (2.5 ve 2.6) $t=0$ 'da $C_A=C_{AO}$ Sınır şartına göre beraber çözüldüğünde fiziksel absorbsiyon için analitik model (2.7) elde edilir;

$$\begin{aligned}
C_{AE} = e^{(-t/\tau_S)} & \left[C_{A0} - (C_{A0} \tau_S + C_{A0} \tau_S k_L a \tau_H \right. \\
& - C_{A0} \tau_H + k_L a \tau_H C_{AD} \tau_S + k_L a^2 \tau_H^2 C_{AD} \tau_S \\
& \left. - C_{A0} \tau_H^2 k_L a) / ((1 + k_L a \tau_H) (\tau_S + \tau_S k_L a \tau_H - \tau_H)) \right] \\
& + \left[C_{A0} \tau_S + C_{A0} \tau_S k_L a \tau_H - C_{A0} \tau_H + k_L a \tau_H C_{AD} \tau_S \right. \\
& + k_L a^2 \tau_H^2 C_{AD} \tau_S - C_{AD} \tau_H^2 k_L a - C_{A0} k_L a \tau_H^2 e^{(-\frac{t^*(1+k_L a \tau_H)}{\tau_H})} \\
& \left. + C_{AD} \tau_H^2 k_L a e^{(-\frac{t^*(1+k_L a \tau_H)}{\tau_H})} \right] / ((1 + k_L a \tau_H) (\tau_S + \tau_S k_L a \tau_H - \tau_H))
\end{aligned} \tag{2.7}$$

Fiziksel Absorbsiyon için elde edilen bu model deneysel olarak elde edilen verilerle karşılaştırıldı. Model, hem nümerik, hem de analitik olarak MATLAB’da deneysel verilerle beraber çizdirildi. Model validasyon deneyleri altıncı bölümde sonuçlar kısmında verilmiştir.

2.2.3.2 Reaksiyonun Olduğu Durum İçin Matematiksel Model (Fiziksel Absorbsiyon-Reaksiyon)

Reaksiyon sistemi olarak Sodyum Sülfite (Na₂SO₃) çözeltisi ile Çözünmüş Oksijen (O₂) arasındaki reaksiyonu kullanıldı. Bu reaksiyonun Sodyum Sülfite ile Oksijen arasında meydana geldiği ve oksijen konsantrasyonunun sıvı fazda sıvının uçucu olmadığı durum için yazıldı.



$$r_A = -k C_A$$

$$2 r_A = r_B \quad \left(\frac{\text{mol}}{\text{L} \cdot \text{s}} \right)$$

Reaktörde fiziksel absorpsiyonun yanında kimyasal bir reaksiyonun olduğu durum için oksijen (O₂) için madde balansı uygulandığında, aşağıdaki diferansiyel eşitlik elde edilir;

$$\frac{dC_A}{dt} = \frac{q}{V} (C_{Ao} - C_A) + k_L a (C_{AD} - C_A) - k C_A \quad (2.8)$$

$$\frac{dC_A}{dt} = \frac{(C_{Ao} - C_A)}{\tau_H} + k_L a (C_{AD} - C_A) - k C_A$$

$$\frac{dC_{AE}}{dt} = \frac{C_A - C_{AE}}{\tau_S} \quad (2.9)$$

Bu iki denklem (2.8 ve 2.9) t=0'da C_A=C_{A0} sınır şartına göre beraber çözülerek analitik çözüm (2.10) elde edilir;

$$C_{AE} = - \left[C_{AD} k_L a \tau_H \left(\tau_H - \tau_S + \frac{\tau_S}{t} - k_L a \tau_H \tau_S - \frac{\tau_H}{e^{k t} e^{k_L a t} e^{\tau_H}} \right. \right. \\ \left. \left. + \frac{k_L a \tau_H \tau_S}{t} \right) - C_{AD} k_L a \tau_H k \left(\tau_H \tau_S - \frac{\tau_H \tau_S}{t} \right) \right] / \\ \left[(k \tau_H + k_L a \tau_H + 1) (\tau_S - \tau_H + k \tau_H \tau_S + k_L a \tau_H \tau_S) \right] \quad (2.10)$$

Reaksiyonun kinetiğinin, deney sisteminden elde edilen verilere göre MATLAB’ da nonlinear regresyon yaptırıldı ve sonuç olarak kinetik ifadenin, oksijene göre birinci, sülfite göre sıfır’ıncı derecede yürüdüğü belirlendi. Bununla ilgili detaylı açıklamalar sonuçlar kısmında verilecektir.

Sürekli Karıştırmalı Tank Reaktörde Na_2SO_3 çözeltisine balans uygulanırsa kararlı halde Sodyum Sülfite konsantrasyonunu veren ifade (2.11) elde edilir;

$$\frac{dC_B V}{dt} = q C_{B0} - q C_B + (r_B) V \\ 0 = \frac{q}{V} (C_{B0} - C_B) + 2(r_A) \\ 0 = \frac{(C_{B0} - C_B)}{\tau_H} + 2(r_A) \\ C_B = C_{B0} + 2(r_A) \tau_H \quad (2.11)$$

Bu kısımda, sistem için belirlenen modellerin analitik çözümleri verildi. Simülasyon deneylerinde analitik olarak elde edilen model kullanılmadı, bunun yerine MATLAB’da Runge-Kutta yöntemine göre nümerik olarak hesaplatılan model kullanıldı.

Bölüm 3

PROSES KONTROL

3.1 GİRİŞ

Proses kontrolünün temel amacı; Sistemde meydana gelen değişimin nedenlerini irdeleyip kritik proses değişkenlerinin kontrol altında tutulması ve kontrol dışı durumları oluşturan nedenlerin ortadan kaldırılmasıyla sürecin istenilen (optimum) durumda tutulmasını sağlamaktır.

Üretim proseslerinde, prosese ait özel nedenler veya güvenlik açısından dolayı proses değişkenlerinin (sıcaklık, basınç, akış rejimi, bileşimler vs) belirli sınırlar içerisinde tutulma zorunluluğu vardır. Manüel kontrolde, operatör tarafından ayarlanan değişkenlerin sürekli olarak izlenmesi zorunluluğu vardır ve operatörün gözleminin etkinliği kaçınılmaz olarak zamanla düşme tehlikesi vardır. Ayrıca kontrol değişkenlerindeki dalgalanmalar çok hızlı olabilir ve bu da manüel kontrolün zorluğunu artırır.

Bir proses kontrol sistemi, kontrol değişkenini istenen değer veya set noktası civarında sabit tutmak için, kontrol değişkeninin ölçüm değeri ile istenen değeri karşılaştırır, kontrol hatasını hesaplar, bu hataya dayanarak ayar değişkenlerini ayarlar.

Bir kontrol sistemini sadece otomatik olarak değil, aynı zamanda etkili bir şekilde çalışmasını sağlamak için, belirli değişkenler arasında hem kararlı hal, hem de dinamik (kararsız hal) hali içermesi gereklidir. Sağlanan bu bilgi, işletilecek kontrol stratejisiyle ve kontrol edilen proses ile büyük ölçüde ilişkilidir. Daha modern ve karmaşık kontrol sistemlerin kullanımı tipleri (tek veya çoklu geri beslemeli kontrol, adaptive kontrol, optimal kontrol, öngörülü ve geri besleme ayarlı vb.) mikroişlemci teknolojisinin gelişmesine paralel olarak gelişmiştir [12].

3.2 TEMEL PROSES KONTROL KAVRAMLARI

Proses kontrol teknolojisinde kullanılan bazı kavramlar aşağıda tanımlanmıştır.

3.2.1 Proses Değişkeni

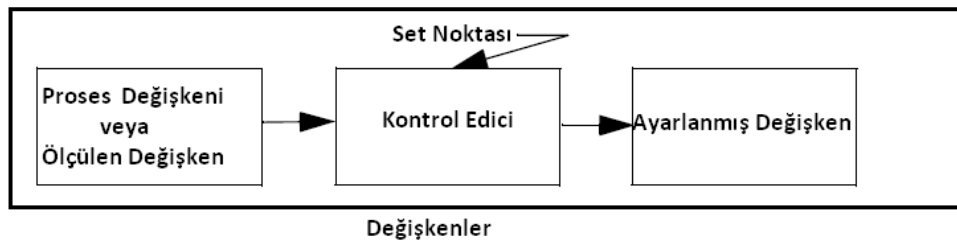
Prosesin değişkeni, farklı açıdan üretim prosesini değiştirebilen proses akış (sıvı veya gaz) durumudur. Yaygın proses değişkenleri şunlardır; basınç, debi, sıcaklık, sıvı seviyesi, yoğunluk, pH, sıvı ara yüzü, kütle, iletkenlik vb.

3.2.2 Set Noktası (Ayar Noktası)

Set noktası, elde edilmek istenen proses değişkeni için bir değerdir. Kontrol edici bu değerde prosesin kalması için gerektiğinde sisteme müdahale eder. Örneğin; Bir sıvı-gaz prosesinde çözülmüş oksijen değeri 4ppm’de tutmak gerekiyorsa, o zaman set noktası 4ppm’dir. Bunun için bir çözülmüş oksijen sensörü prosese dâhil edilir ve sensörün bağlı olduğu transimterden alınan değer ile set noktası bir kontrol edici tarafından mukayese eder. Okuduğu çözülmüş oksijen değeri 5ppm ise, o zaman kontrol edici prosesin set noktasının üzerinde olduğu kararına varır ve kontrol edici, çözülmüş oksijen değeri 4ppm oluncaya kadar prosese müdahale eder. Set noktası ayrıca maksimum veya minimum olabilir. Örneğin, tank’taki sıvı seviyesi 5m geçemez gibi.

3.2.3 Ölçüm Değişkeni

Ölçüm değişkeni, belirlenen set noktasında tutulması gereken proses akış koşuludur. Ölçüm değişkeni ile proses değişkeni aynı olmaz. Ama bazen, ölçüm değişkeni proses değişkenine eşit olabilir. Örneğin; Bir üretim tankında seviyeye karar verebilmek için depo tankının içerisine beslenen debi ölçülür. Bu işlemde debi, ölçülen değerdir, proses akış seviyesi ise proses değişkenidir. Set noktasında ölçüm değişkenini sabit tutmak için değiştirilen faktöre ‘*ayarlanmış değişken*’ adı verilir.



Şekil 3.1 Kontrol Edici ve Proses Parametreleri

3.2.4 Hata

Hata, set noktasındaki değer ile ölçülen değer arasındaki farktır. Bu değer pozitif ya da negatif olabilir. Set noktası açıklamasında verilen örnek dikkate alınır; ölçülen değer 5ppm ve istene değer (set noktası) ise 4ppm'dir. Bu iki değer arasındaki fark ise hata olarak adlandırılır ve +1ppm hata değeri olarak bulunur. Herhangi bir kontrol şemasında amaç; hatayı ortadan kaldırmak ya da minimum yapmaktır. Bu yüzden, hatanın iyi bir şekilde tespiti gereklidir. Bir hata üç unsura sahip olduğu görülebilir. Bu üç öge şunlardır;

a-) Büyüklük

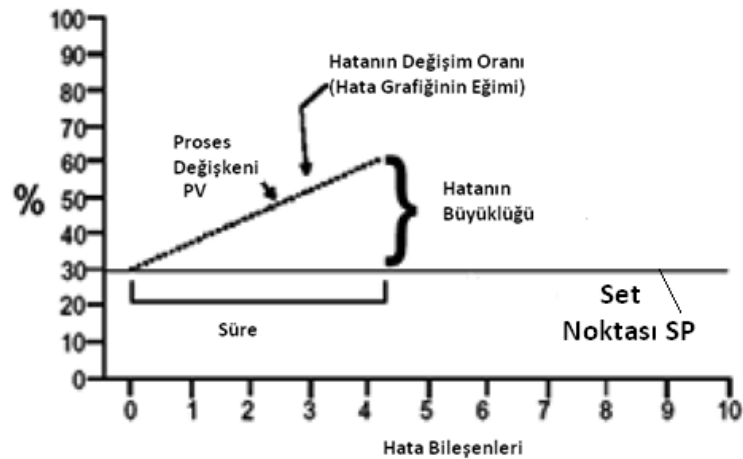
Hatanın büyüklüğü, proses değişkeni ile set noktası değerler arasındaki sapmadır. Bir önceki hataya göre karşılaştırmada, herhangi bir noktada zamanla hatanın büyüklüğü, hata değerinin belirlenmesi için temel oluşturur.

b-) Süre

Bir hata durumunun meydana geldiği zamanın uzunluğunu ifade eder.

c-) Değişim hızı (Rate of Change)

Değişim oranı, hata grafiğinin eğimi ile gösterilir.



Grafik 3.1 Hata ile Hatanın Değişim Oranının

3.2.5 OFFSET(Dengeleme)

Offset, set noktasından proses değişkeninin sürekli olarak sapmasıdır. Yukarıda bahsedilen çözünmüş oksijen örneğinde, set noktası 4ppm olsa bile, kontrol sistemi prosesi tutarlı olarak 4,5ppm’de sabit tutarsa, o zaman 0,5ppm offset hatasıdır.

3.2.6 Yük Bozukluğu (Load Disturbance)

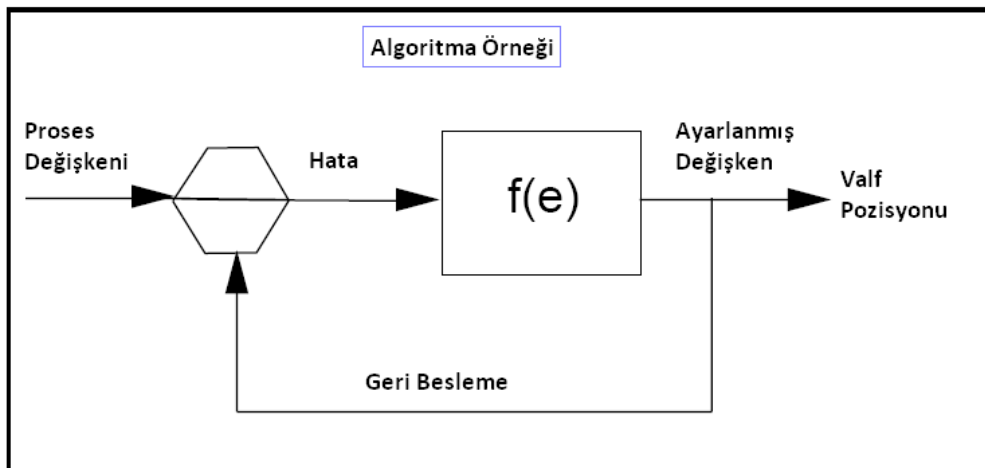
Yük bozukluğu, proses değişkenini etkileyen faktörlerin birinde istenmeyen değişimdir. Çözünmüş oksijen örneğinde, sisteme beslenen gazın debisi yük bozukluğuna neden olabilir. Çünkü sisteme verilen gaz az veya fazla olabilir.

3.2.7 Kontrol Algoritması

Kontrol algoritması, kontrol fonksiyonunun matematiksel tanımıdır. Aşağıda verilen eşitlikte V_p gaz besleme vanasının pozisyonudur ve e ise hatadır. Bir kontrol algoritmasındaki ilişki aşağıdaki şekildedir;

$$V_p = f(\pm e) \quad (3.1)$$

Buradaki kontrol algoritmaları, tarif edilenden daha fazla karmaşık kontrol döngüleri hesaplamalarda kullanılabilir. Daha çok karmaşık döngülerde, “valf set noktasında verilen değişime göre ne kadar uzun açık veya kapalıdır?” ve “valf ne kadar süre, proses değişkeni set noktasına getirdikten sonra aynı pozisyonda tutulmalıdır?” gibi sorulara cevap verilmelidir.



Şekil 3.2 Geri Beslemeli Kontrol

3.2.8 Manuel ve Otomatik Kontrol

Prosesin otomasyonundan önce, makineyi kullanmayı tercih eden insanlar, proses kontrol işlerinin çoğunluğunu kendileri gerçekleştirirdi. Örneğin; Bir insan operatörü bir tankın seviye ayarını takip eder ve istenilen noktada tutmak için vanayı kendisi açıp kapatırdı. Bu şekilde gerçekleşen kontrol sistemi “*Manuel Kontrol Sistemi*” olarak adlandırılır. Ters durum ise; hiçbir insan müdahalesi istemeyen kontrol şeklidir. Bu kontrolü gerçekleştirecek olan ise otomatik valf’dir. Bu gibi dışarıdan insan müdahalesi olmayan kontrol sistemi ise “*Otomatik Kontrol Sistemi*” olarak adlandırılır.

3.3 PROSES KONTROL EKİPMANLARI VE İLETİŞİMİ

Bu kısımda, tez çalışmasında kullanılan bazı kontrol ekipmanları kısaca açıklanıp, bölüm 5’de ekipmanların özellikleri ve kalibrasyonları hakkında bilgi verilecektir.

3.3.1 Ekipmanlar

Proses kontrol işleminde kullanılan materyaller ve bunların bir kontrol programı tarafından haberleşmesi oldukça önemlidir. Bu kısımda, yaygın olarak kullanılan kontrol ekipmanlarından bahsedilecektir.

3.3.1.1 Sensörler

Bir proses işleminde meydana gelen değişimleri ölçer ve proses değişkeninin değerini belirleyen cihazlardır. Proses kontrol alanındaki en önemli gelişmelerden birisi, sensör cihazları olduğu açıktır. Bunun önemi ise, proses kontrol değişkeni ölçer ve proses kontrol döngülerindeki ilk eleman olmasıdır. Örnek olarak; Basınç algılayıcı, pH, çözülmüş oksijen, termokupl vb. sensörler proses kontrol işleminde ilk eleman olarak kullanılmaktadır.

3.3.1.2 Güç Çevirici (Transducer) ve Dönüştürücü (Converter)

Bir güç çevirici(transducer), elektrik sinyalini bir mekanik sinyale çeviren cihazlardır. Örneğin; bir basınç cihazında direnci, dirençteki meydana gelen oransal değişimleri basınç değişimlerine dönüştürür. Dönüştürücü(Converter) ise bir sinyal tipini diğer bir sinyal tipine dönüştüren cihazlardır. Örnek olarak; Akımı voltaja veya voltağı akıma dönüştüren cihazlar verilebilir.

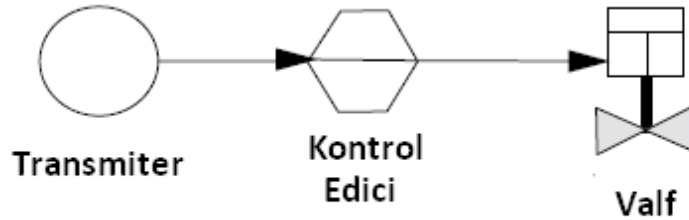
3.3.1.3 Verici (Transmitter)

Bir verici, sensörden okuduğu değeri dönüştürerek standart bir sinyal halinde kontrol edici program/cihaz'a sinyal iletir. Bazı verici tipleri; basınç transmitteri, sıcaklık transmitteri, seviye transmitteri, debi Transmitteri, analitik Oksijen (O₂), Karbon Monoksit (CO) ve pH transmitterleri örnek olarak verilebilir.

3.3.1.4 Kontrol Ediciler ve Kontrol Donanımları

Bir kontrol edici (program veya PLC, DCS gibi cihaz), ölçüm cihazından datayı alan, belirlenen değer (set noktası) ile alına datayı karşılaştıran ve gerekli ise düzenleyici etki yaparak kontrol elemanına sinyal gönderen cihazdır.

Kontrol ekipmanı ise kontrol edici tarafından belirlenen sinyale gören pozisyon alan, bu pozisyonuyla sistemi set notasına getirmek adına müdahale eden proses kontrolün en önemli parçalarından biridir. Örneğin yukarıda bahsedilen çözünmüş oksijen örneğinde, sensörün bağlı olduğu transmitter tarafından iletilen sinyale karşılık gelen değer kontrol edici tarafından değerlendirilip, gaz kaynağı olarak sağlanan havayı ayarlayan oransal bir valf (Solenoid Valf) elemanı sayesinde prosese müdahale edilir.



**Programlanabilir, Elektronik veya
Pnömatik Lokal Kontrol Ediciler**

Şekil 3.3 Kontrol edici ve ekipmanlar ile bağlantısı

3.3.1.5 Akış Ölçer

Çoğu cihazlar proses kontrol sistemine bağlanırken, operatörlerin ölçüm noktasını kontrol etme ihtiyacı vardır. Bu cihazlar proses hakkındaki bilgiyi görüntüler. Bu cihazlar; gaz akışölçer, sıcaklık ölçer, basınç ölçer veya daha kompleks dijital okuyucu gibi cihazlar olabilir.

3.3.2 İletişim

Sinyaller

Kontrol sistemine cihazdan bilgilerin iletimi sinyal vasıtasıyla gerçekleşmektedir. Endüstride üç çeşit sinyal kullanılmaktadır. Bunlar;

- ✓ Pnömatik Sinyal,
- ✓ Analog elektrik Sinyal,
- ✓ Dijital elektrik Sinyal,

a-) Pnömatik Sinyal

Hava basıncının değişmesiyle üretilen sinyaldir. Yaygın olarak kullanılan endüstriyel pnömatik sinyal tipi 3-15psig 'dır.

b-) Analog Sinyal

En yaygın standart elektrik sinyali 4-20mA akım sinyalidir. En düşük ölçüm değerini 0 veya 4mA tarafından temsil eder, en yüksek ölçümü ise 20mA temsil eder. Diğer yaygın standart elektrik sinyali ise 1-5V sinyalidir.

c-) Dijital Sinyal

Dijital sinyal proses kontrol teknolojisine dahil olan en son sinyal tipidir. Dijital sinyal bir protokole göre gerçekleşir. Üreticiler ya serbest yada tescilli dijital protokol kullanabilir. Tescilli protokoller özel şirketler tarafından sahiplenilir ve sadece onların izniyle kullanılır.

Bölüm 4

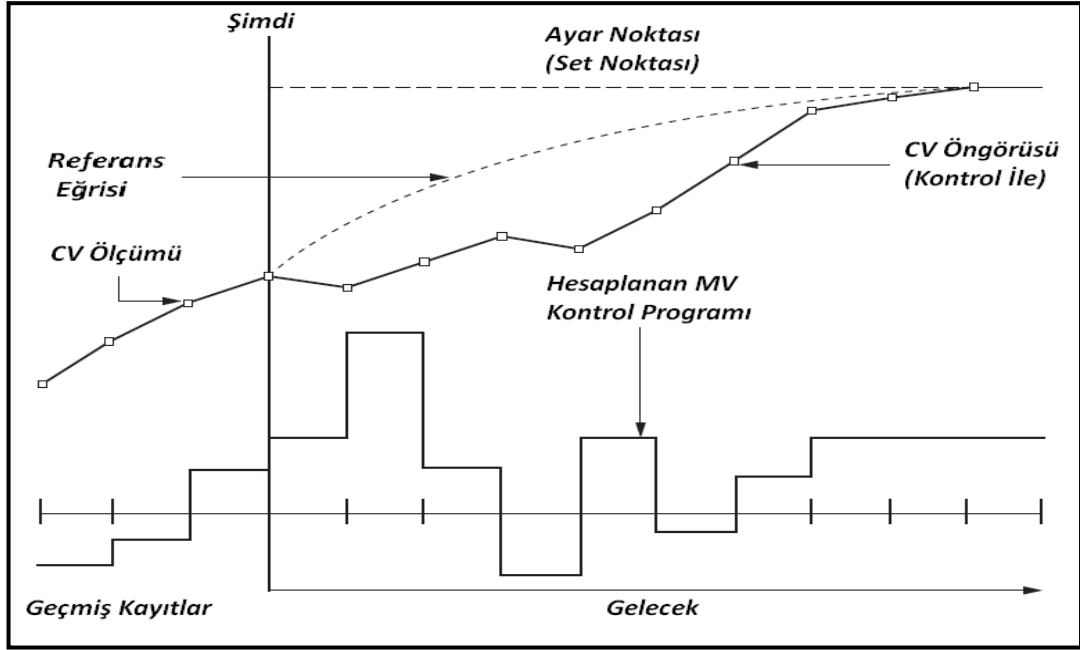
MODEL ÖNGÖRÜLÜ KONTROL

4.1. GİRİŞ

MPC, uygulamaları sadece proses endüstrisinde değil, aynı zamanda robot manipülatörler ve klinik anestezi üzerine uygulamaları vardır. Çimento endüstrisinde, petrol endüstrisi, katalitik parçalanmalar, hidrokraking ve petrol damıtma kuleleri, kurutma kuleleri, PVC işletmeleri, akım jenatörleri bazı uygulama alanlarıdır. Bu gibi prosesler, birçok kısıtlamalar içermesi nedeniyle çok değişkenli olarak tanımlanır. Model Öngörülü Kontrolün en popüler ticari uygulamalarından biri Dinamik Matris Kontrol (DMC) yöntemidir. [14]. Uygulamaların iyi bir performansını, uzun zaman periyotları sırasında başarıyla gerçekleştirmesi Model Öngörülü Kontrol'ün kapasitesi hakkında bilgi vermektedir.[15].

Model Öngörülü Kontrol ailesine mensup birçok kontrol algoritması (Model Algortmik Kontrol(MAC), Öngörülü Fonksiyonel Kontrol(PFC), Dinamik Matris Kontrol(DMC), Genelleştirilmiş Öngörülü Kontrol(GPC)) vardır. Model Öngörülü Kontrol Algoritmalarının arasındaki farklılık; prosesin kontrol ediciye tanıtan model ile minimize edilecek maliyet fonksiyonudur.

Model Öngörülü Kontrolün temel amacı; Kontrol değişkenlerinde belirli arzu edilen bir sonucu gerçekleştirecek ayarlanmış değişkendeki en iyi değişimi hesaplayarak bir proses modelini (lineer veya nonlineer) kullanmaktır. Zamanla her bir noktada çıkış değişkeni ölçer ve gelecekte birkaç kerelik adım için ayarlanmış değişkenlerde hareketi hesaplayan bir optimizasyon işlemini gerçekleştirir. Bu değişimler, kontrol edilmek istenen değişken üzerinde kesin/belirli etkiye sahiptir. Bir sonraki adımda kontrol edilen değişkenlerin yeni değerlerini ölçer ve yeni ayarlanmış değişkenin değerlerini proses uygular. Şekil 4.1'de Model Öngörülü Kontrolün her bir adım için bu durumu gösteren açıklama verilmiştir.



Şekil 4.1 Model Öngörülü Kontrol Adımları [16]

Model öngörülü kontrolü formülize etmek için, ayarlanan değişkene göre proses çıktıları ile ilişkili olan bir modele sahip olduğumuzu düşünersek;

$$y(t) = f[u(t)] \quad (4.1)$$

Ayrıca çıkış değerleri için, $y_{(t)}^{set}$ değeri arzu edilen değer olarak belirtilirse, belirli bir zaman periyodu boyunca kontrol edilen değişkenler ile set noktası arasında farkın karesi olan bir amaç fonksiyonunu (j) minimize edecek bir optimizasyon problemini formülize edilebilir.

$$\min_{u(t)} j = [y_{(t)}^{set} - y_{(t)}]^2 \quad (\text{Amaç Fonksiyonu}) \quad (4.2)$$

Amaç fonksiyonunun en küçük değerini sağlayan, zamanın bir fonksiyonu olarak ayarlanmış çıktılar için bu optimizasyon problemi çözülebilir. Model, gelecekte olacak ($y_{(t+1)}$ öngörü) çıkış değişkenini öngörmede kullanılır. Bu yüzden model mükemmel değildir ve ölçülemeyen bozucu etkiler hakkında bilgi vermez.

4.2’de yazılan amaç fonksiyonu, zaman içinde her noktada ayarlanan değişkendeki (MV) değişimlerin büyüklüğü gibi diğer faktörleri dikkate almaz.

Birçok proses’de ayarlanan değişkendeki hızlı ve büyük salınım hoş karşılanmaz. Bu yüzden; amaç fonksiyonun diğer formları kullanılır. $u(t)$ ‘deki değişimlere ağırlık veren bir terim ($g_i u^2(t)$), amaç fonksiyonuna ilave edilmesiyle ayarlanan değişkenlerdeki değişiklikler cezalandırılabilir.

$$\min_{u(t)} j = [y_{(t)}^{set} - y_{(t)}]^2 + g_i u_{(t)}^2 \quad (4.3)$$

Ayarlanan ve kontrol edilen değişkenler optimizasyonda dikkate alınması gereken fiziksel kısıtlamalara sahiptir. Model tarafından öngörülen çıkış değişkenleri, kısıtlamaları aşmamak için kullanılır. Geleneksel kontrolde, bu kısıtlamalar çiğnenerek/hükümsüz kılınarak yürütülür. Oysa, Model Öngörülü Kontrol’de kısıtlamalar optimizasyon algoritması içerisine ilave edilir [14].

4.2 MODEL ÖNGÖRÜLÜ KONTROLE TARİHSEL BAKIŞ

Model Öngörülü Kontrol ile ilgili ilk yayınlar 1970’li yılların sonunda yayımlandı. Zadeh ve Whalen [44] liner programlama ile minimum zamanlı optimal kontrol arasındaki bağlantıyı kurduğu ve Propoi’de 1963’de ‘açık döngülü optimum geri besleme’ kapsamında ortaya koyduğu [45] kayan ufuk kavramını (model öngörülü kontrolün ana özelliklerinden biri) ilk kez amaçladığı çalışmalar, Model Öngörülü Kontrolün temelini oluşturur. İlk olarak, Açık Döngü Optimum Kontrol olarak ifade edildi, fakat 1970’in sonuna kadar önem verilmedi. Richalet 1978’de Model Öngörülü Sezgisel Kontrol (Model Predictive Heuristic Control) diye adlandırdığı ve sonraları Model Algoritmik Kontrol (Model Algorithmic Control) olarak bilinen başarılı bir uygulama sundu.

Cutler ve Ramarker 1980’de Dinamik Matris Kontrol (Dynamic Matrix Control) adını verdikleri kontrol yöntemini geliştirdiler[31]. Model Öngörülü Kontrol ile ilgili ticari ürünler arasında en fazla tercih edilen uygulaması Dinamik Matris Kontrol’dür. Daha sonra Çok değişkenli Sistemlerde DMC uygulaması Curtler (1983) [32] tarafından tartışıldı.

Rouhani ve Mehra (1982) [33] kontrol yapısının temel komponentlerini tanımladığı ve Model Algoritmik Kontrol (MAC) ün kullanımı için matematiksel konular önerdiler. Onlar referans eğri, kontrolün sağlamlığının kuvvetlendirdiğini analitik ve deneysel olarak kanıtladılar.

Garcia ve Morshedi (1986) [39] Kuadratik Dinamik Matris Kontrolü sundu. Onlar ortak değişken kısıtlamalı üzerine yoğunlaştı. Girişi ve Çıkış eşitsizlik kısıtlamaları arasında ilişki kurdu. Kuadratik Matris Kontrolün kısıtlamalar içerisinde kontrol değişkenlerini sağlayarak tatmin edici bir kontrole imkân sağladığı bulundu.

Clarke (1987) [37] Genelleştirilmiş Öngörülü Kontrol adında yeni bir kontrol algoritması öne sürdü. Bu metotla; açık döngülü kararsız sistemlere, minimum faz olmayan proseslere ve ölü zamanlı ya da derecesi bilinmeyen, kötü tanımlanan proseslere uygulamayı hedefledi. Clarke, bu teknolojiye CARİMA (Controlled Auto Regressive Integrated Moving Average) modelini kullanarak, bozucuları modellemek için kullandı.

Özgülşen (1993) ve diğerleri [35] Nonlinner Model Öngörülü Kontrol Stratejisini geliştirdi. Öngörülü Kontrolün performansı belirsizlikler ve ölçülemeyen bozucular dikkate alınarak incelediler. Geliştirdikleri model için CSTR’de Etilen Oksit üretimi hava ile etilenin oksidasyonu ile gerçekleştirilen sistem kullandılar.

Lee (1994) [36] yeni bir kontrol düzenini amaçladı. Bu plan kararsız nonlinear prosesler için geri beslemeli kontrol ile Uyarlamalı (Adaptive) Kontrol Model Öngörülü Kontrolde meydana gelir. Sonuç Kontrol çıktılarına, geri beslemeli çıktıların ve Uyarlamalı Model Öngörülü Kontrolün toplamı olarak hesaplandı. Bu yeni plan DMC’ye benzerdir, farkı ise Uyarlamalı (Adaptive) Kontrol Model Öngörülü Kontrolde çıkış öngörülleri, model parametreleri belirleme için çok faydalı olan ARMA modelleri tarafından sağlanmasıdır.

Afonso (1996) [38] CSTR’de Kayan Ufuk performansını inceledi. Bunun için kurulan sistemde; yalancı sıfırıncı derece ekzotermik reaksiyon CSTR’de seviye ve sıcaklığını kontrol etmek için simülasyon yapıldı. MPC Kontrol algoritmasının formülasyonu yapılarak, Ayarlanmış Değişkenleri ufuk boyunca istenen eğrileri dikkate alan bir amaç fonksiyonunu minimize edecek şekilde hesaplatıldı. Kontrol kanunu kuadratik program çözümü ile her bir iterasyonda elde edildi.

S.Yüce ve diğerleri (1999) [34], yığın çözücü polimerizasyon reaktöründe DMC'li deneysel ve simülasyon çalışmasıyla incelediler. Çalışmada Proses değişkeni olarak reaksiyon sıcaklığı ve başlatıcı giriş konsantrasyonunu seçtiler. Ayrıca IMC ile karşılaştırma yaptılar ve sonuç olarak set noktasında ve izotermal koşullarda reaktör sıcaklığını sürdürmede iyi bir performans verdiği sonucuna vardılar.

Santos ve diğerleri (2001) [40], bir Newton tip Nonlinear Model Öngörülü Kontrol Algoritmasını CSTR'de soğutma gazı debisi ile reaktörün çıkışı manipüle edilmesiyle sıcaklık ve sıvı seviyesini kontrol etmek için uyguladılar. Nonlinear Model Öngörülü Kontrol, Kontrol edilen değişkenlerdeki kontrol adımlarının karelerinin etkisini öngörmek için nonlinear dinamik model kullandılar. Ayrıca, lineer model tarafından yakalanamayan yakın tek noktalarda ilerleyen prosesler için çok faydalıdır.

Wang (2003) ve diğerleri [41] genelleştirilmiş amaç fonksiyonunu kullanımına dayanan model-deney sistemi uyumsuzluğunun üstesinden gelmek için alternatif MPC dizayn stratejisi önerdiler. Amaçlanan Kontrolün sağlamlığı geleneksel kuadretik fonksiyondan dolayı genelleştirilmiş belirli bir amaç fonksiyonu kullanılmasıyla doğruluğu kanıtlanabilir.

Özkan (2003) ve diğerleri [42] CSTR'de Vinil Asetat ve Metil Metakrilat'ın kopolimerizasyonu uyguladılar ve çoklu parça parça lineer modellere bağlı MPC algoritmasını sundular. Kontrol, kayan ufuk planı ile sınırlı-sınırsız ufuk değerlerini kapsayan kuadratik amaç fonksiyonuna benzemektedir. Sınırlı ufuk değeri, istenilen proses koşullarına ilerlemek için sistemi zorlayan gelecek kontrol çıktılarından meydana gelir.

B. Holenda ve diğerleri (2008) [46], aerobik reaktör içerisinde aktif çamur prosesi için çözülmüş oksijen konsantrasyonunun kontrolünü model öngörülü kontrol yöntemini gerçekleştirdiler. Ayrıca, bazı model öngörülü kontrol ayar parametrelerinin (Öngörü Ufku, Örneklem Zamanı, Giriş Ağırlığı) kontrol performansı üzerine etkisini incelediler. Kontrolcünün performansı, örneklem zamanı azalmasıyla arttığını, fakat bu iyileşmenin ne tüm aktif çamur prosesinde nede enerji tüketiminde önemli bir etkiye sahip olmadığını gösterdiler.

Woohun Kim ve diğerkleri (2010) [43] büyük boyutlardaki buhar kazan sisteminin akış sıcaklığını kontrolünü DMC ile gerçekleştirdiler. Proses girdi ve çıktıları şöyledir; Sprey ve nemli kontrolller iki girdi, kızdırcı ve ısıtıcı sıcaklıkları ise iki çıktıdır. On-line optimizasyon, öngörü kontrolünü bulmak için basamak cevap modeli kullanılarak DMC’de gerçekleştirdiler ve simülasyon çalışmalarıyla, PID ile karşılaştırdıklarında DMC ile daha iyi performans alındığını gösterdiler.

4.3 MODEL ÖNGÖRÜLÜ KONTROLÜN AVANTAJ VE DEZAVANTAJLARI

Avantajları

- ✚ Kavramlar anlaşılır olduğundan, proste çalışanlar için caziptir.
- ✚ Komplike sistemler, uzun zaman gecikmesi olanlar, minimum faz olmayanlar ve kararsız olan sistemlerde kullanılabilir.
- ✚ Çok değişkenli durumlarda kolayca uygulanabilir
- ✚ Ölü zaman gecikmesini telafi edebilir
- ✚ Ölçülebilir bozuklukları ortadan kaldırmanın doğal bir yolu olarak ileri beslemeli kontrolü içerir.
- ✚ Kolayca uygulanabilir doğrusal bir kontrol kanunu uygular
- ✚ Kısıtların uygulanması kavramsal olarak basittir ve dizayn sırasında sistematik olarak dahil edilebilir
- ✚ Sistemin gelecekteki referans değerleri bilinmesi oldukça yararlıdır.
- ✚ Gelecek için gelişmelere izin veren, belirli temel ilkeye dayanan ve geliştirilebilir bir metodolojidir.

Dezavantajları

- ✚ Kontrol Kanunu uygulanması kolay ve az hesaplama istemesine rağmen, klasik PID kontrolünden daha karmaşıktır.
- ✚ Proses Dinamiği değişmiyorsa, kontrol kanunu hesabı önceden yapılabilir, bu durumda tüm hesaplamalar her örnekleme zamanına uygulanması gerekir. Kısıtlamalar dikkate alındığında istenen hesaplama miktarı daha fazladır. Ancak bu durum günümüz bilgisayar teknolojisiyle bu bir problem olmaktan çıkmıştır.
- ✚ En büyük sakıncası ise Model Öngörülü Kontrol prosesi tanımlayan uygun bir modele ihtiyaç duymasındır. Yani modele bağımlı olmasıdır.

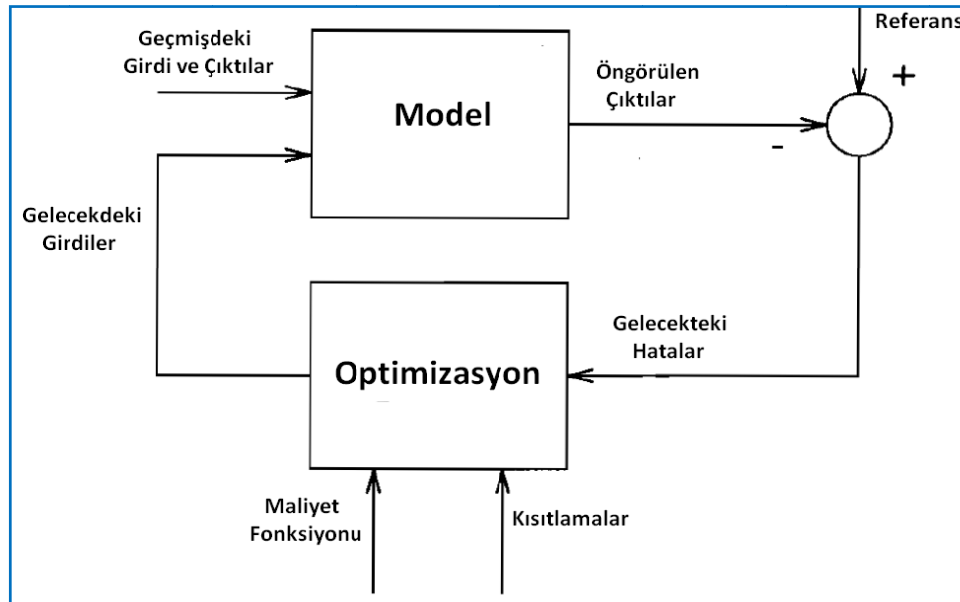
4.4 MODEL ÖNGÖRÜLÜ KONTROL STRATEJİSİ

Model öngörülü kontrol ailesine ait tüm kontrol yöntemleri aşağıdaki stratejilerle karakterize edilir.

Belirlenen öngörü ufuk boyunca (N_p) gelecekteki öngörülen çıktılar, her bir t anında proses modeli kullanılarak belirlenir. Bu t anında öngörülen çıktılar ($y(t+k | t)$), $k=1,2,...,N$) t anına kadar bilinen değerlere (geçmiş girdi ve çıktılar) bağlıdır ve gelecekteki kontrol sinyali hesaplanıp sisteme gönderilir.

Gelecekteki kontrol sinyalinin hesabı, proses referans eğrisine ($w(t+k)$) mümkün olduğu kadar yakın tutmak için optimizasyon yapılır. Bu hesaplamada kullanılan ölçüt, genellikle öngörülen referans eğri ile öngörülen çıkış sinyali arasındaki hataların fonksiyondur. Gelecekteki kontrol kanununun yapısı hakkında bazı varsayımlar bazı durumlarda yapılabilir.

Kontrol sinyali (t anındaki ilk sinyal $u(t | t)$) prosese gönderilir. Kontrol sinyali, kontrol ufkunun (N_c) sonuna kadar hesaplanır. Kontrol ufku ile öngörü ufku arasında kalan sürede kontrol sinyalinin sabit kabulü yapılır. Hesaplanan sonraki kontrol sinyalleri gönderilmez. Çünkü, sonraki örneklem anında $y(t+1)$ zaten bilinir ve adım 1, bu yeni değer ile tekrarlanır ve tüm sıra güncellenir.



Şekil 4.2 MPC'nin Temel Yapısı [15]

Bu yöntemleri uygulamak için, şekil 4.2’de gösterilen temel yapı kullanılır. Bir model, optimum kontrole dayanan gelecekteki proses çıktıları öngörmede kullanılır. Bu gelecekteki kontrol değerleri kısıtlamalar ile birlikte maliyet (amaç fonksiyonu) fonksiyonu içerisine alınarak optimizasyon ile hesaplanır.

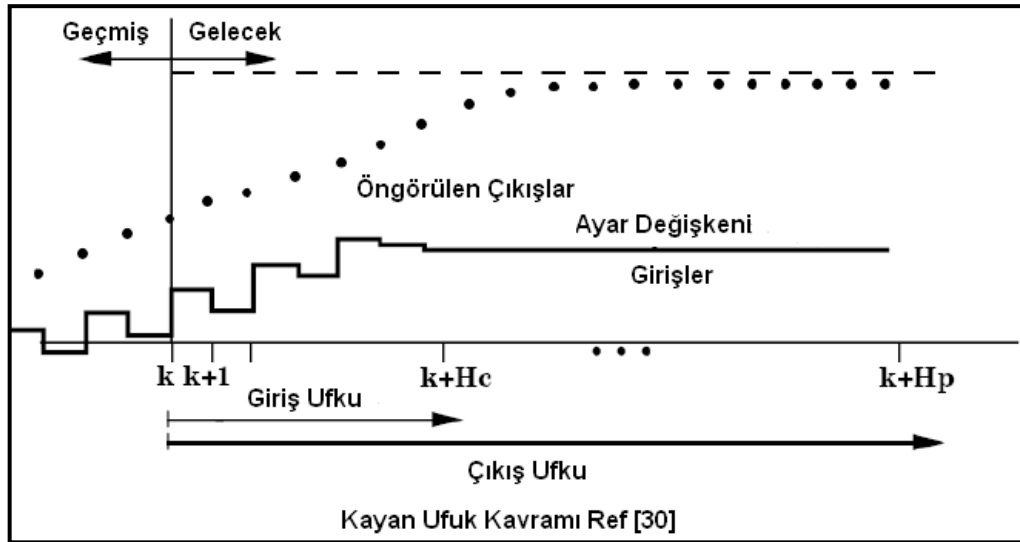
Proses Modeli, kontrolde belirleyici bir rol oynar. Seçilen model, gelecekteki çıktıları öngörmek için proses modelini yakalayabilmelidir. MPC tek bir teknik olmamakla birlikte, aynı zamanda farklı metotların kurulması gibi çeşitli formülasyonları kullanan birçok model tipleri vardır. Transfer Fonksiyon modeli akademik toplulukta çok yaygındır, ve en fazla kontrol dizayn metotlarında kullanılır. Kararlı hal modeli çok değişkenli prosesleri tanımlayabildiği gibi ayrıca bazı formüllerde kullanılabilir.

Optimizasyon, uygun kontrol hareketlerini belirlediği için diğer temel unsurdur. Maliyet fonksiyonunun ikinci dereceden ise, maliyet fonksiyonunun (Amaç Fonksiyonu) minimum değeri, gelecek referans eğrisi ile geçmiş girdi ve çıktıların belirgin bir fonksiyonu (Lineer) olarak elde edilebilir.

4.5 KAYAN UFUK KAVRAMI

Kayan ufuk kavramı MPC’nin en önemli ögesidir. Kayan Ufuk kavramında, her proses anında, proses çıktıları $y(t+k)$ sınırlı zaman ufku (Öngörü Ufku(N_p), $k=1 \dots N_p$) boyunca öngörülür. Öngörülen çıktılar (t anında) $\bar{y}(t+k | t)$ ile gösterilir. Öngörü, proses modeli vasıtasıyla yapılır. Yapılan tahmin, geçmiş girdi ve çıktılarına bağlıdır. Referans yörüngesi (O andaki çıkış değerden başlayarak ilerideki bir zamanda istenen değere) ulaşan yörünge olarak tarif edilir.

Bu çalışma şekli araba kullanma ile örneklendirilirse; Sürüş halinde, genellikle potansiyel tehlikeleri önceden görme durumu, yol boyunca birkaç yüz metre uzaklık için tespit edilir. Yol boyunca ilerlerken, bizim görüşüm içerisinde yolun bir bölümü bizimle hareket eder. Bu durum bize önümüzdeki sürekli olarak yolun belli mesafesini görmemize olanak sağlar. Aynı anda bizim görüş açımızla hareket eden kayan ufuktur. Bunun anlamı; biz yolda sürekli bir sonraki ufukta yeni bilgiler topluyoruz ve bu bilgileri bizim kontrol hareketimizi (kararlar) yenilemede kullanıyoruz. [29]



Şekil 4.3 Kayan Ufuk Kavramı

4.6 MODEL ÖNGÖRÜLÜ KONTROL ELEMANLARI

Tüm MPC algoritmaları ortak elemanlara sahiptir ve bu elemanlara değişik seçenekler uygulandığında, farklı MPC algoritmaları meydana gelir. Bu elemanlar şunlardır;

- ✓ Öngörü Modeli
- ✓ Amaç Fonksiyonu
- ✓ Kontrol Kanunu Hesabı

4.6.1. Öngörü Modeli

Model, MPC'nin temel taşıdır. İyi bir dizaynın, proses dinamiğini tam olarak yansıtan ve en olası modeli sağlayacak gerekli mekanizmaları içermesi gerekir. MPC, ölçülebilir girdiler ile çıktılar arasındaki bağıntıyı açıklayacak çeşitli metotlar kullanabilir. Bunların bazıları ayarlanan değişkenlerdir, diğerleri ise ölçülebilir bozucular olarak dikkate alınabilir. Bir bozucuları tanımlama modeli, ölçülemeyen girdilerin etkisini, gürültü ve model hatalarını içeren proses modeliyle ifade edilemeyen davranışları belirtmek için kontrol hesabı içerisine alınabilir. Model, proses modeli ve bozucuları tanımlama modeli olarak iki bölüme ayrılabilir.

4.6.1.1 Proses Modeli

Aşağıda MPC’de kullanılan en yaygın model tipleri verilmiştir;

a. Darbe Cevabı Modeli (Impulse Response)

Darbe cevabı modeli, Model Algoritmik Kontrol (MAC) ve Genelleştirilmiş Öngörülü Kontrol (GPC)’de uygulanır. Basamak cevabı modeline benzer, tek farkı sisteme darbe (impulse) girişi uygulanması sonucunda elde edilmesidir. Bu metot endüstride geniş ölçüde kabul görür. Bu metodun bir avantajı, proses hakkında önceden herhangi bir ön bilgiye ihtiyaç duyulmamasıdır. Aynı zamanda, kolayca tarif edilebilecek gecikmeler veya minimum faz olmayan gibi kompleks dinamiklere imkan sağlar.

b. Basamak Cevabı Modeli (Step Response)

Dinamik Matris Kontrol (DMC) ve benzer algoritmalar tarafından kullanılır. Sisteme basamak girişi uygulandıktan sonra sistemin verdiği cevaba göre deneysel parametreler elde edilir. Giriş sinyalinin bir adım olmasının dışında darbe cevabı modeli ile çok benzerdir. Darbe cevabı modeli ile aynı avantaj ve dezavantajlara sahiptir. Kararlı sistemlere uygundur, kararsız sistemlere uygulanamaz. En büyük avantajı, yukarıda da açıklandığı gibi modeli çıkartılmak istenen proses hakkında hiçbir ön bilgiye ihtiyaç duyulmamasıdır. Bu modelin diğer bir avantajı, çok fazla sayıda parametre ile elde edilmesidir.

c. Transfer Fonksiyonu Modeli

Yaygın kullanılan MPC ailesinden GPC algoritması tarafından kullanılmaktadır. Kararsız sistemler için uygundur, az parametreye sahiptir ve doğrusal sistemler için uygundur. Çok girişli-çıkışlı sistemlere uygun değildir ve prosesin önceden ön bilgiye sahip olmaya ihtiyaç duyar.

d. Durum Uzay Modeli

Öngörülü Fonksiyonel Kontrol (PFC) tarafından da kullanılır. Çok girişli-çıkışlı sistemler için uygundur. Kontrol kuralı, durum vektörünün doğrusal birleşiminin geri belemesidir.

4.6.1.2 Bozucuları Tanımlama Modeli

Bozucular; ölçülen çıktılar ile modelle hesaplanan değerler arasındaki farktır. Bozucu etkileri tarif etmede kullanılan modelin seçimi proses modelinin seçimi kadar önemlidir. Yaygın olarak kullanılan model CARIMA (Controlled Auto-Regressive Integrated Moving Average)'dır.

4.6.2. Amaç Fonksiyonu (Maliyet Fonksiyonu)

Çeşitli MPC algoritmaları, kontrol kanununu elde etmek için farklı maliyet fonksiyonları önerir. Genel amaç; Belirlenen referans sinyaline göre, dikkate alınan ufukta gelecekteki çıktıyı sağlamasıdır. MPC tipinde kontrolcüler; Çıkışın referanstan sapmasını, giriş sinyalinin değişimini ve giriş sinyalinin hedeflenen değerden sapmasını, önceden belirlenen ağırlık matrisleriyle çarparak bir maliyet oluşturur. Belirlenen öngörü ufku boyunca amaç fonksiyonunu en küçük yapan kontrol kuralı elde edilmek üzere optimizasyon problemi çözülür.

4.6.3. Kontrol Kanunu Hesabı

Öngörülen Çıktıların, gelecekteki kontrol sinyallerinin ve geçmişteki girdi ve çıktı değerlerinin bir fonksiyonu olarak hesaplanır. Analitik çözüm model lineerse ve kısıtlama yoksa elde edilebilir. Aksi taktirde iteratif (yinelemeli) optimizasyon metodu kullanılmalıdır.

4.7 MODEL ÖNGÖRÜLÜ KONTROLÜN GENEL AYAR PARAMETRELERİ

Model Öngörülü Kontrol Algoritmarında iyi bir kontrol performansı için seçilmesi gerekli ayar parametreleri vardır. Bu parametrelerin seçimi sistemi etkilemektedir ve kararlılık, dayanıklılık ve kontrolcü performansını önemli ölçüde değiştirmektedir.

Ayar parametreleri ile ilgili olarak karesel hata (*ISE*) ile kontrol edilen değişkenlerin dinamik hassasiyeti tespit edilebilir. Dikkate alınan ayar parametreleri; öngörü ufku, ayarlanan değişkenlerin sayısı (girdi ufku veya kontrol ufku) ve giriş ve çıkıştaki amaç fonksiyonu elemanlarıdır. Parametre ayarlanması için kullanışlı bilgiler karesel hata (set noktası ile kontrol edilen değişken arasındaki farkın karesi) değeri analiz edilmesiyle sağlanabilir. Genellikle farklı ayar parametrelerine göre küçük değerler için uygun ayarlamalar yapılır.

4.7.1 Öngörü Ufku (N_P)

Öngörü Ufku, hesaplama yapılırken her ufkun ne kadar uzun olacağını belirler. Öngörü ufku genellikle örnekleme zamanına göre karar verilir. Örnekleme zamanı ile öngörü ufkunun çarpımı kapalı çevrim bir sistemi kararlı hale getirecek bir zamanı kapsamalıdır. Öngörü Ufku için tipik değerler 20-30 arasındadır. Kullanılan modele göre daha da büyük olabilir. Büyük seçilmesi durumunda MPC'nin hesaplama yükü artacaktır. Ayrıca, çok değişkenli sistemlerde işlem yükü fazla olacağı için öngörü ufku düşük seçilebilir. Öngörü Ufkunu çok küçük seçilmesi durumunda, kontrolcü agresif olarak çalışacak, bazı durumlarda da kararsızlığa neden olabilecektir. Uzun öngörü ufku değerlerinin seçilmesi durumunda kontrolcü daha az agresif kontrol uygulayacak ve yavaş bir şekilde referans değerine ulaşacaktır.[17]

4.7.2 Kontrol Ufku (N_c)

Öngörü modeli hesaplama yaparken kaç örnekleme süresi boyunca hesaplanacak kontrolcü sinyalinin değişebileceğini belirler ve N_c ile tanımlanır. Kontrol ufkunun büyük değerlerinde, daha agresif bir kontrol davranışı gözlenir. Ayrıca, sistem daha hızlı cevap verir, hesaplama yükü artar, bozuculara karşı daha hassas hale gelir ve daha az dirençlidir (yani dayanıklılığı düşer). Kontrol ufkunun değeri küçük seçilmesi (1-4) durumunda, hesaplama yükü azalacağından iyi bir performans sağlar. Kontrol ufku öngörü ufkunun $1/3$ veya $1/4$ arasında seçilebilir. Alternatif olarak, kontrol ufku ile örnekleme süresinin çarpımının, ulaşmak istenen kararlı hal cevabının %60'ını yakalayacak zamana eşit olması önerilmektedir.[17]

4.7.3 Ağırlık Matrisleri

Kontrol edilen değişkenin katsayılarla ağırlıklandırılması, genellikle belirli diyagonal matrislerde belirlenir. MPC'de giriş değerleri, çıkış değerleri ve giriş değerlerinin değişimi birer ağırlık matrisi ile cezalandırılır. Değişiminin daha küçük olması istenen durum için, onun ağırlık değeri büyük alınır, değişimi önemsiz olan ise onun ağırlık değeri daha küçük olarak belirlenir.[17]

4.8 DİNAMİK MATRİS KONTROL (DMC)

Dinamik Matris Kontrol, yetmişli yılların sonunda Cutler ve Ramaker [31] tarafından geliştirildi ve endüstri dünyasında geniş bir şekilde kabul gördü. Dinamik Matris Kontrol, petrokimya endüstrisinde yaygın olarak kullanılmaktadır.

Dinamik Matris Kontrol (DMC) basamak cevabı modelini kullanır. Uygulanması gayet kolaydır. Endüstride çalışanlar tarafından benimsenmesi hızlıdır. Prosesin mertebesiyle ilgili bir herhangi bir bilgiye ihtiyaç duymaz. Bununla birlikte DMC, kararsız sistemler için uygun değildir. DMC tasarımında kullanılan denklemlerin elde edilmesi ve bu denklemlerin birbirleriyle ilişkilendirilmesi aşağıda açıklanacaktır. Model Öngörülü Kontrolde kullanılan tasarım parametreleri Dinamik Matris Kontrol için aşağıda eşitlikler ile açıklanmıştır.

4.8.1 Öngörü (Predictive)

Burada kullanılan proses modeli, bozucuların ufuk boyunca sabit tutulduğu basamak cevap modelidir. Öngörülerini sağlayacak model aşağıdaki gibidir; Basamak cevap modeli şu şekilde yazılabilir;

$$y(t) = \sum_{i=1}^{\infty} g_i \Delta u(t-i) \quad (4.4)$$

Ufuk boyunca öngörülen değerler aşağıdaki şekilde gösterilebilir;

$$\begin{aligned} \bar{y}(t+k | t) &= \sum_{i=1}^{\infty} g_i \Delta u(t+k-i) + \bar{n}(t+k | t) = \\ &= \sum_{i=1}^k g_i \Delta u(t+k-i) + \sum_{i=k+1}^{\infty} g_i \Delta u(t+k-i) + \bar{n}(t+k | t) \end{aligned} \quad (4.5)$$

Denklemlerde $\bar{y}(t+k | t)$, t anında çıkışın t+k anı için yapılan öngörüsüdür. Bozucuların sabit olduğu dikkate alınır; $\bar{n}(t+k | t) = \bar{n}(t | t) = y_m(t) - y(t | t)$. O zaman denklem şu şekilde yazılabilir;

$$\begin{aligned} \bar{y}(t+k | t) &= \sum_{i=1}^k g_i \Delta u(t+k-i) + \sum_{i=k+1}^{\infty} g_i \Delta u(t+k-i) + y_m(t) - \sum_{i=1}^{\infty} g_i \Delta u(t-i) \\ &= \sum_{i=1}^k g_i \Delta u(t+k-i) + f(t+k) \end{aligned} \quad (4.6)$$

Yukarıdaki denklemde $f(t+k)$ sistemin doğal tepkisidir ve gelecekteki kontrol hareketlerinden bağımsızdır.

$$f(t+k) = y_m(t) + \sum_{i=1}^{\infty} (g_{k+i} - g_i) \Delta u(t-i) \quad (4.7)$$

Proses doğrusal olarak kararlı ise, basamak cevap modelinin katsayıları (g_i) N örneklem periyodundan sonra sabit bir değere gelir.

$$g_{k+i} - g_i = 0 \quad i > N \quad (4.8)$$

Bundan dolayı doğal tepki denklemi aşağıdaki şekilde hesaplanabilir;

$$f(t+k) = y_m(t) + \sum_{i=1}^N (g_{k+i} - g_i) \Delta u(t-i) \quad (4.9)$$

Eğer proses kararlı değilse, o zaman N yoktur ve $f(t+k)$ hesaplanamaz. Öngörüler öngörü ufku boyunca ($k=1, \dots, p$) kontrol ufku dikkate alınmasıyla hesaplanabilir.

$$\begin{aligned} \bar{y}(t+1 | t) &= g_1 \Delta u(t) + f(t+1) \\ \bar{y}(t+2 | t) &= g_2 \Delta u(t) + g_1 \Delta u(t+1) + f(t+2) \\ &\vdots \\ \bar{y}(t+p | t) &= \sum_{i=1}^m g_i \Delta u(t+p-i) + f(t+p) \end{aligned} \quad (4.10)$$

Sistemin dinamik matrisinin tanımlanması aşağıda verilen tanıma göre;

$$G = \begin{bmatrix} g_1 & 0 & \dots & 0 \\ g_2 & g_1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ g_m & g_{m-1} & \dots & g_1 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ g_p & g_{p-1} & \dots & g_{p-m+1} \end{bmatrix} \quad (4.11)$$

$$\bar{y} = Gu + f \quad (4.12)$$

Yukarıdaki denklemde; $\bar{\mathbf{y}}$ =Ufuk boyunca sistem öngörülerini içeren p-boyutlu vektörüdür, $\mathbf{u}$ =Kontrol artışının m-boyutlu vektörü, $\mathbf{f}$ =doğal tepki vektörüdür ve $\mathbf{G}$ ise uygun bir şekilde değiştirilen sistem basamak cevabının kontrol ufku kolonunu gösterir. Bu denklem, kontrol değişimi ile gelecekteki çıktılar arasında ilişki kuran bir tanıımıdır. Spesifik sistem davranışlarını gerçekleştirecek gerekli değişimleri hesaplayacaktır.

4.8.2 Ölçülebilir Bozucular (Measurable Disturbances)

Ölçülebilir Bozucu etkiler öngörü eşitliklerine kolayca ilave edilebilir. Bozucular denklemlere sistem girdileri gibi ele alınabilir. Denklem 4.12 bozucular hesabı için kullanılabilir.

$$\bar{\mathbf{y}}_d = \mathbf{D}\mathbf{d} + \mathbf{f}_d \quad (4.13)$$

$\bar{\mathbf{y}}_d$ = Sistem Çıktıları için ölçülebilir bozucular, $\mathbf{D}$ = Bozucularda bir basamak cevabına göre sistemin katsayılarını içeren $\mathbf{G}$ 'ya benzer bir matris, $\mathbf{d}$ = Bozucuların değişim vektörü, ve $\mathbf{f}_d$ = Bozuculara bağlı olmayan cevabın bir parçasıdır.

Ölçülebilen ve ölçülemeyen bozucuların en genel durumda sistem için tüm doğal tepkisi dört etkenin toplamı olarak dikkate alınabilir. Bunlar girişe göre $\mathbf{u}(t)$, ölçülebilir bozuculara göre $\mathbf{d}(t)$, ölçülemeyen bozuculara ve gerçek proses durumuna göre tepki olarak yazılabilir.

$$\mathbf{f} = \mathbf{f}_u + \mathbf{D}\mathbf{d} + \mathbf{f}_d + \mathbf{f}_n \quad (4.14)$$

Öngörüler genel bilinen tanıımı ile aşağıdaki formülle gösterildiği gibi hesaplanabilir;

$$\bar{\mathbf{y}} = \mathbf{G}\mathbf{u} + \mathbf{f} \quad (4.15)$$

4.8.3 Kontrol Algoritması

Dinamik Matris Kontrolün endüstriyel başarısı kısıtların kullanılmasıyla büyük boyutlu, çok değişkenli sistemlere uygulamasından gelir. Bir DMC kontrolünün amacı; mümkün olduğu kadarıyla set noktasına yakın çıktıyı üretmektir. Bu yüzden

kontrol değişkenleri gelecekteki hataların minimizasyonunu dikkate alan ikinci derece bir denklemi minimize etmek için seçilir.

$$\mathbf{J} = \sum_{j=1}^P [\bar{\mathbf{y}}(\mathbf{t}+\mathbf{j} | \mathbf{t}) - \mathbf{w}(\mathbf{t} + \mathbf{j})]^2 \quad (4.16)$$

Denklem genel formunda sunduğu durumda, kontrol ifadesinin ilavesiyle yazılabilir;

$$\mathbf{J} = \sum_{j=1}^P [\bar{\mathbf{y}}(\mathbf{t}+\mathbf{j} | \mathbf{t}) - \mathbf{w}(\mathbf{t} + \mathbf{j})]^2 + \sum_{j=1}^m \lambda [\Delta \mathbf{u}(\mathbf{t} + \mathbf{j} - 1)]^2 \quad (4.17)$$

Sınırlama olmazsa, amaç fonksiyonunu ($\mathbf{J} = \mathbf{e}^T + \lambda \mathbf{u}^T \mathbf{u}$) minimize edecek çözüm, J'nin türevinin hesaplanmasıyla analitik olarak hesaplanabilir. Burada; e=Öngörü ufku boyunca gelecek hatalar vektör ü, u=Gelecekteki kontrol değişiminden oluşan vektördür. Genel sonuç;

$$\mathbf{u} = (\mathbf{G}^T \mathbf{G} + \lambda \mathbf{I})^{-1} \mathbf{G}^T (\mathbf{w} - \mathbf{f}) \quad (4.18)$$

Tüm öngörülü stratejilerdeki gibi $\mathbf{u}(\Delta \mathbf{u}(\mathbf{t}))$ vektörünün yalnızca ilk elemanı kontrolcü tarafından prosese gönderir. Bunun nedeni ise sistemdeki bozucu etkilerin hepsini tespiti mümkün olmadığı ve bu yüzden de öngörülere uymayan proses çıktılarına neden olan bozucuların önceden bilinmesi imkansız olduğundandır.

Yukarıda çıkarılan denklemlerin temel yapısı çok girdili-çıkıtlı sistem için genişletilebilir. Temel eşitlikler aynı kalır. Kullanılan matris ve vektörlerin boyutu daha da büyür. Çok girdili-çıkıtlı sistem için öngörülen çıktıların vektörü aşağıdaki gibi genel olarak yazılabilir;

$$\bar{\mathbf{y}} = [\bar{\mathbf{y}}_1(\mathbf{t}+\mathbf{j} | \mathbf{t}), \dots, \bar{\mathbf{y}}_1(\mathbf{t}+\mathbf{p}_1 | \mathbf{t}), \dots, \bar{\mathbf{y}}_{n_y}(\mathbf{t}+1 | \mathbf{t}), \dots, \bar{\mathbf{y}}_{n_y}(\mathbf{t}+\mathbf{p}_{n_y} | \mathbf{t})]^T \quad (4.19)$$

Gelecekteki Kontrol Sinyallerinin Serisi;

$$\mathbf{u} = [\Delta \mathbf{u}_1(\mathbf{t}), \dots, \Delta \mathbf{u}_1(\mathbf{t} + \mathbf{m}_1 - 1), \dots, \Delta \mathbf{u}_{n_u}(\mathbf{t}), \dots, \Delta \mathbf{u}_{n_u}(\mathbf{t} + \mathbf{m}_{n_u} - 1)]^T \quad (4.20)$$

Doğal Tepki aşağıdaki şekilde tanımlanır;

$$\mathbf{f} = [\mathbf{f}_1(\mathbf{t}+1 | \mathbf{t})]^T, \dots, \mathbf{f}_1(\mathbf{t}+\mathbf{p}_1 | \mathbf{t}), \dots, \mathbf{f}_{n_y}(\mathbf{t}+1 | \mathbf{t}), \dots, \mathbf{f}_{n_y}(\mathbf{t} + \mathbf{p}_{n_y} | \mathbf{t})]^T \quad (4.21)$$

Öngörü eşitlikleri yukarıda tanımlandığı gibi burada da aynıdır;

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} \mathbf{G}_{11} & \mathbf{G}_{12} & \cdots & \mathbf{G}_{1nu} \\ \mathbf{G}_{21} & \mathbf{G}_{22} & \cdots & \mathbf{G}_{2nu} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{G}_{ny1} & \mathbf{G}_{ny2} & \cdots & \mathbf{G}_{nynu} \end{bmatrix} \quad (4.22)$$

Her $\mathbf{G}_{ij}$ matrisi (j-t)'inci girdiye göre (i-t)'inci basamak cevabının katsayılarını içerir.

4.9 BAZI MODEL ÖNGÖRÜLÜ KONTROL ALGORİTMALARI

Model Öngörülü Kontrol ailesine mensup bir çok kontrol algoritması vardır. Bunların bazıları; Dinamik Matriks Kontrol(DMC), Model Algortmik Kontrol(MAC), Öngörülü Fonksiyonel Kontrol(PFC), Genelleştirilmiş Öngörülü Kontrol(GPC)'dür. DMC bu tez çalışmasında kontrol algoritması olarak kullanıldığından yukarıda geniş bir şekilde açıklandı. Diğer bazı MPC algoritmalarının en fazla göze çarpan özellikleri ise tanımlanıp kısaca açıklanacaktır.

4.9.1 Model Algoritmik Kontrol(MAC)

Herhangi bir t anındaki sistem çıktısı, darbe cevabının katsayılarıyla giriş değerleri ilişkilendirilerek bulunur;

$$\mathbf{y}(t) = \sum_{j=1}^N \mathbf{h}_j \mathbf{u}(t - j) = \mathbf{H}(z^{-1})\mathbf{u}(t) \quad (4.23)$$

Geçmişteki girdi değerlerinin lineer kombinasyonuna bağlı verilen zamandaki çıktıları bu model öngörür. $\mathbf{h}_i$ (Ağırlık) darbe cevabı katsayılarıdır. Cevap Dinamik Matris Kontrolde olduğu gibi N elemanında kesilir ve sistem kararlı olduğu

varsayımı yapılır. İç model kullanılmasıyla gelecekteki öngörüler aşağıdaki denkleme göre yazılabilir;

$$\bar{\mathbf{y}}(\mathbf{t}+\mathbf{k} \mid \mathbf{t}) = \sum_{j=1}^N \mathbf{h}_j \mathbf{u}(\mathbf{t}+\mathbf{k} \mid \mathbf{t}) + \bar{\mathbf{n}}(\mathbf{t}+\mathbf{k} \mid \mathbf{t}) \quad (4.24)$$

Bozucu etkilerin sabit olduğu varsayımına göre öngörü;

$$\bar{\mathbf{y}}(\mathbf{t}+\mathbf{k} \mid \mathbf{t}) = \mathbf{f}_r + \mathbf{f}_o + \bar{\mathbf{n}}(\mathbf{t} \mid \mathbf{t}) \quad (4.25)$$

Öngörü matrislerinin tanımlanması ile öngörülen çıktıların matrisi;

$$\mathbf{y} = \mathbf{H}_1 \mathbf{u}_+ + \mathbf{H}_2 \mathbf{u}_- + \mathbf{n} \quad (4.26)$$

Yukarıdaki denklemde her bir ifade birer matrisi belirtir. Buna göre; $\mathbf{y}$ =Öngörülen Çıktılar, $\mathbf{n}$ =Bozucular, $\mathbf{u}_+$ =Öngörü Kontrol Vektörü, $\mathbf{u}_-$ =Geçmişteki Kontrol Vektörü, $\mathbf{H}$ ise darbe cevabı katsayılarıdır. Bu denklem Ufuk boyunca hesaplanır.

4.9.2 Öngörülü Fonksiyonel Kontrol(PFC)

PFC, Richalet tarafından hızlı prosesler için önerildi. İki karakteristik özelliğe sahiptir; 1-) Önceden tespit edilen temel fonksiyonların lineer bir kombinasyonu olarak kontrol sinyalinin yapısı (Temel Fonksiyonlar Kullanarak), 2) Ufuk boyunca amaç fonksiyonunu değerlendiren rastlantı nokta kavramı.

Rastlantı Noktalar kavramı, öngörü ufku boyundaki noktaların alt kümesi göz önünde bulundurularak hesaplamayı basitleştirmekte kullanılır. Öngörü ufku boyunca istenen ve öngörülen gelecek çıktıların bu noktalara rast gelmesi istenir.

Kontrol edici, polinom temel fonksiyonları kullanarak kontrol sinyalini tanımlar. Bu durum kompleks girdi profiline olanak sağlar. Temel fonksiyonları, girdi profilinin birçok özelliğini oluşturur.

Öngörülü Fonksiyonel Kontrol (PFC) durum uzay modelini kullanır. Durum uzay modeli aşağıda kısaca açıklanmıştır;

$$\begin{aligned}
\mathbf{x}(t+1) &= \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}\mathbf{u}(t) \\
\mathbf{y}(t) &= \mathbf{C}_y \mathbf{x}(t) \\
\mathbf{z}(k) &= \mathbf{C}_z \mathbf{x}(t)
\end{aligned} \tag{4.27}$$

Yukarıdaki denklemlerde (4.27); $\mathbf{x}$; n boyutlu durum vektörü, $\mathbf{u}$; Bir boyutlu giriş vektörü, $\mathbf{y}$; ölçülen çıkışların $m \times y$ boyutlu vektörü ve $\mathbf{z}$ kontrol edilecek olan çıkışların $m \times z$ boyutlu vektörüdür. Genellikle $\mathbf{y}$, $\mathbf{z}$ olarak kabul edilir. Davranışların t zaman adımlarındaki sırası şu şekilde gerçekleşir; Prosesten ölçülen değerler değerleri alınır $\mathbf{y}(t)$, gerekli sistem girişleri hesaplanır $\mathbf{u}(t)$ ve son olarak $\mathbf{u}(t)$ sisteme uygulanır.

PFC algoritmaları, mekanik otomatik kontrol uygulamalarında yararlı minimum ve maksimum giriş kısıtlamalarına uyum sağlayabilir.

Minimize edilecek amaç fonksiyonu;

$$\mathbf{J} = \sum_{j=1}^{n_H} [\bar{\mathbf{y}}(t+j) - \mathbf{w}(t-j)]^2 \tag{4.28}$$

Öngörüler, model ile geçmişteki çıktılar arasındaki izlenen farkların bir fonksiyonu olarak hesaplanan telafi terimlerinin ilavesiyle sağlanır.

$$\bar{\mathbf{y}}(t+k | t) = \mathbf{y}_m(t | k) + \mathbf{e}(t | k) \tag{4.29}$$

Geçmişteki kontrol sinyalleri fonksiyonların bir lineer kombinasyonu olarak planlanır.

$$\mathbf{u}(t+k) = \sum_{j=1}^{n_B} \mu_j(t) \mathbf{B}_j(k) \tag{4.30}$$

PFC rastlantı noktalar kavramını kullanır. Bu noktalar ayar parametresi olarak dikkate alınabilir ve kontrol sisteminin dayanıklılığı ile dengesi bu noktaların etkisi hesap içine alınarak belirlenir.

4.9.3 Genelleştirilmiş Öngörülü Kontrol (GPC)

Genelleştirilmiş Öngörülü Kontrol (GPC) algoritması Model Öngörülü Kontrol uygulamaları içinde en yaygın yöntemlerinden birisidir. Bu metot Clarke tarafından önerilmiştir.

GPC, belirlenen öngörü ufku boyunca amaç fonksiyonun minimize edilmesi ile gelecek kontrol sinyali dizisinin hesaplar. GPC çıkış öngörülerini CARİMA (Controller Auto-Regressive Moving-Average) modelini kullanarak hesaplar.

$$A(z^{-1}) y(t) = z^{-d} B(z^{-1}) u(t^{-1}) + C(z^{-1}) e(t) \quad (4.31)$$

Denklemden (4.31), $u(t)$ kontrol girişi ve $y(t)$ ise proses çıkışıdır. $e(t)$ sistemdeki bozucular, d ise sistemdeki ölü zaman ifade eder. A, B ve C polinomları;

$$\begin{aligned} A(z^{-1}) &= 1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} + \dots + a_{na} z^{-na} \\ B(z^{-1}) &= b_0 + b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2} + \dots + b_{nb} z^{-nb} \\ C(z^{-1}) &= 1 + c_1 z^{-1} + c_2 z^{-2} + \dots + c_{nc} z^{-nc} \end{aligned} \quad (4.32)$$

Bu model CARMA (Controller Auto-Regressive Moving-Average) olarak bilinir. Endüstriyel sistemlerde bu modelin integre edilmiş hali olan CARİMA kullanılmaktadır. Formülasyonu ise;

$$\begin{aligned} A(z^{-1}) y(t) &= B(z^{-1}) z^{-d} u(t-1) + C(z^{-1}) \frac{e(t)}{\Delta} \\ \Delta &= 1 - z^{-1} \end{aligned} \quad (4.33)$$

GPC için amaç fonksiyonu;

$$J(N_1, N_2, N_c) = \sum_{j=N_1}^{N_2} \delta(j) [\bar{y}(t+j | t) - w(t+j)]^2 + \sum_{j=1}^{N_U} \lambda(j) [\Delta u(t+j-1)]^2 \quad (4.34)$$

$y(t+j | t)$; t zamanına kadar j . adım sonra sistem çıkışının öngörü değeridir. N_1, N_2, N_c , sırasıyla minimum, maksimum ve kontrol ufku değerleri ve $w(t+j)$ gelecekteki referans yörüngesidir.

Bölüm 5

DENEYSEL KISIM

5.1 GİRİŞ

Laboratuar'da deney sisteminin kurulumu ve işletilmesi zorlu bir süreçtir. Kurulan sistem elemanları arasındaki iletişimde ayarlar önemli ve bazen zordur. Araştırmada kullanılan cihazların farklılık göstermesi ve sistemin kurulumunda büyük zaman ve emek istemesi süreçteki zorluklara örnek verilebilir.

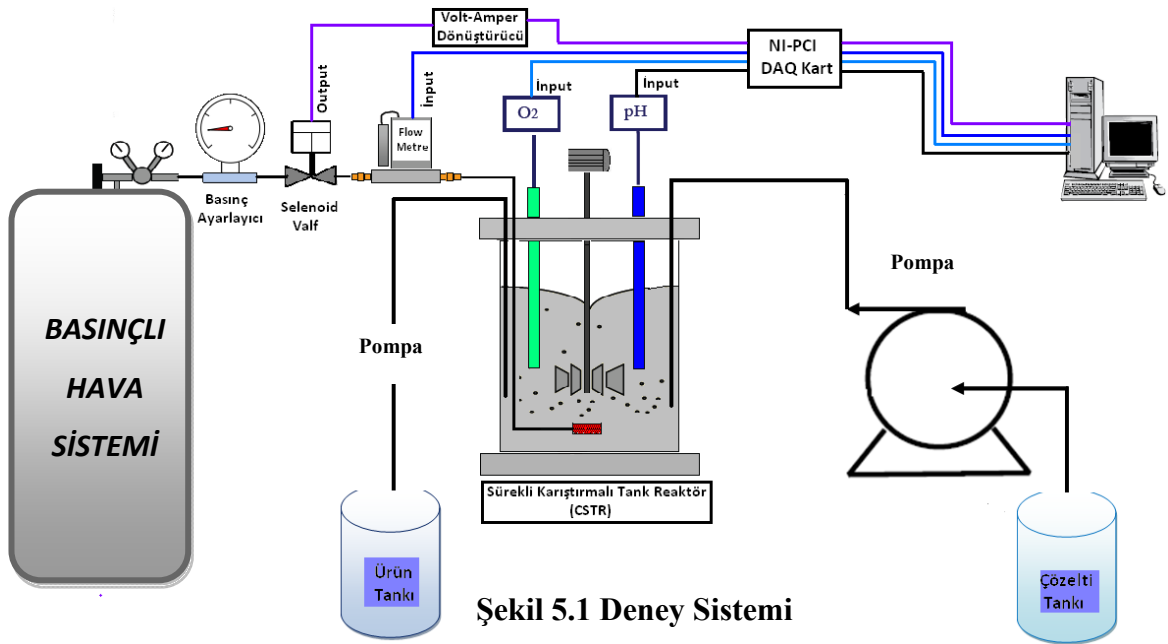
Kurulan deney sisteminde (Şekil 5.1) ilk aşamada DAQ kart ile MATLAB programı arasında gerekli ayarlamalar yapıldı. Bu tanıma işleminden sonra, cihazlardan MATLAB ortamına sinyal almak için her bir cihazın Analog Input/Output bağlantı noktaları ile 37 pin'li bir Konnektör bloğa (DAQ karta bağlantı sağlayan aparat) kablolar bağlandı. Bu aşamada bilgisayar ortamına gelen sinyalin gürültüsünü en aza indirmek amacıyla konektör bloğa bağlanan veri kablolarının her bir bağlantı noktasına Kondansatör bağlantısı gerçekleştirildi. Böylelikle gürültüler minimize edildi. Daha sonra gelen her bir sinyalin hangi değere karşılık geldiğini belirlemek için denemeler yapıldı ve her cihaz için gelen sinyallere bir düzeltme katsayısı belirlendi ve gerçek değere çevrildi.

Laboratuar boyutlarında oluşturulan sistemde, ilk aşamada herhangi bir reaksiyonun olmadığı sadece fiziksel absorpsiyonun olduğu ortam için çözünmüş oksijenin konsantrasyonu kontrol edildi. Bunun için fiziksel absorpsiyonda en fazla etkili parametre olan hacimsel kütle transfer katsayısının belirlenmesi için deneyler sonucunda elde edilen veriler ile regresyon yapıldı.

İkinci aşamada bu defa reaksiyonun olduğu durum için gerekli kinetik ifadenin belirlenmesi amacıyla deneysel datalar toplanıp, datalar ile regresyon yapıldı. Kimyasal reaksiyon için Sodyum Sülfür (Na_2SO_3) çözeltisi ve gaz olarak da hava'dan sağlanan oksijen arasındaki reaksiyon kullanıldı. Akabinde, çözünmüş oksijen konsantrasyonu (O_2) sürekli karıştırmalı tank reaktörde kontrol edildi. Kontrol algoritması olarak kullanılan yöntem ise Model Öngörülü Kontrol ailesinden Dinamik Matris Kontrol kullanıldı.

Bu bölümde, deney sisteminin kurulumu ve deneyde kullanılan enstrümanların özellikleri ile kalibrasyonları hakkında bilgi verilecektir.

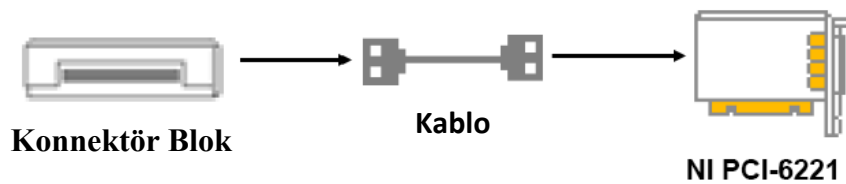
5.2. DENEY SİSTEMİ



Şekil 5.1 Deney Sistemi

Şekil 5.1’de gösterilen deney sistemi, sürekli karıştırılmalı tank reaktör (CSTR) ile buna bağlı deney ekipmanlarından oluşmaktadır. Deneyde oksijen kaynağı olarak basınçlı hava kullanıldı ve havanın basıncı bir basınç regülâtörü ile ayarlandı. Gaz komponent, reaktöre bir poroz gaz dağıtıcısı vasıtasıyla çözelti içerisine beslendi ve verilen gaz, altı kanatlı Rushton disk karıştırıcısı ile karıştırma gerçekleştirildi. Reaktör ortamında pompa yardımı ile çözelti kabından istenilen debide çözelti beslendi ve aynı debi değerinde reaktörden alındı. Reaktöre verilen hava debisi, bir oransal selenoid valf yardımı ile kontrol edildi ve bir gaz akışölçer ile oransal selenoid valf’ten çıkan gazın debi değerleri izlendi. Reaktör kabında, çözünmüş oksijen konsantrasyonu ve pH bir vericiye (transmitter) bağlı sensörler ile ölçüldü ve sağlanan veriler DAQ vasıtasıyla MATLAB ortamına alındı.

Verilerin bilgisayar ortamına alınması, gerekli bilgilerin iletilmesi için National Instruments® firmasının PCI(Peripheral Component Interconnect)-6221 kodlu DAQ kartı ile yapıldı.

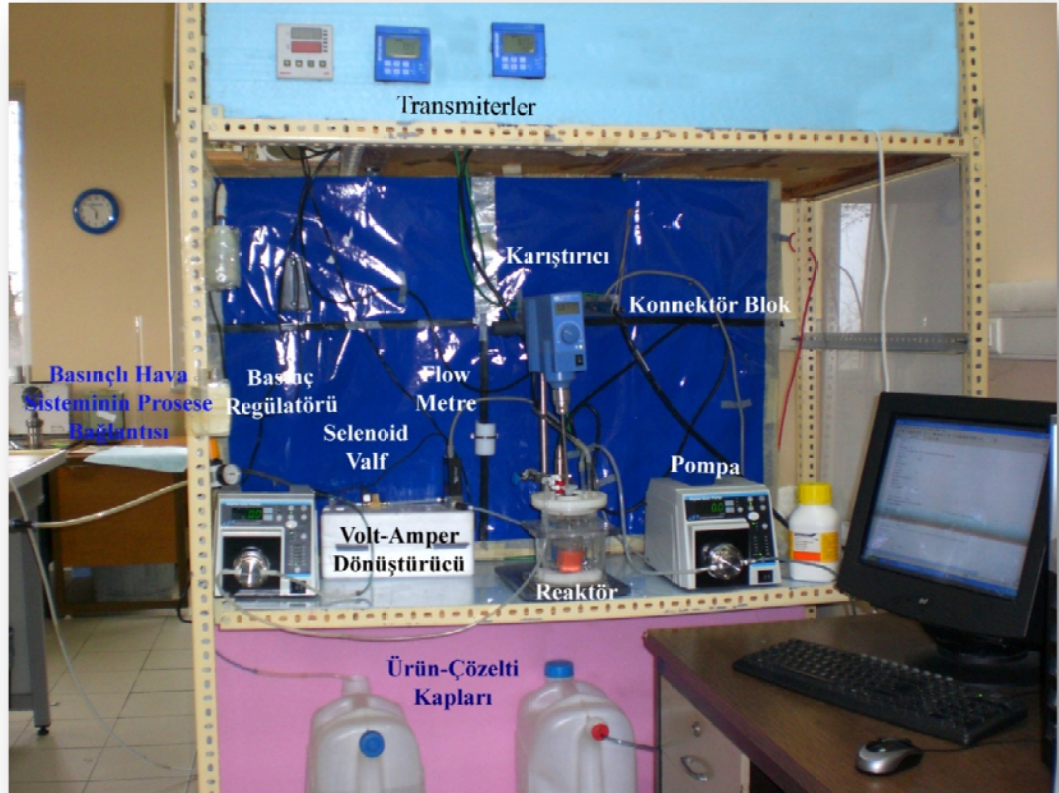


Şekil 5.2 DAQ Kartın Bağlantı Yapısı

Verilerin alınması veya iletilmesinde kullanılan National Instruments® DAQ kartı, MATLAB® yazılımı tarafından desteklemektedir. Bu yüzden, verilerin alınması, gönderilmesi ve amaçlanan kontrol programı matlabda yazılan program vasıtasıyla yapıldı.

Cihazlardan alınan sinyal analog sinyal'dir ve DAQ kartı 0-10V arası veri alış/verişine izin vermektedir. Deney sisteminden üç cihazdan sinyal alındı ve bir cihaza sinyal gönderildi. Alınan sinyaller; çözünmüş oksijen ve pH problemlerinin bağlı olduğu vericiler (transmitter) ile gaz akışölçersinden alınan analog sinyallerdir. Sisteme tek çıkış sinyali ise selenoid valf'e gönderilen yine analog sinyaldir. Fakat burada, selenoid valfin karakteristiğinden dolayı valf değişken olarak amper (mA) sinyalini kullanmaktadır. DAQ kartının gönderdiği volt sinyalini amper sinyaline çeviren bir volt-amper dönüştürücüsü sisteme dahil edildi.

Laboratuarda çalışılan deney sisteminin fotoğrafı aşağıda verilmiştir;



Şekil 5.3 Deney Sisteminin Bir Fotoğrafı

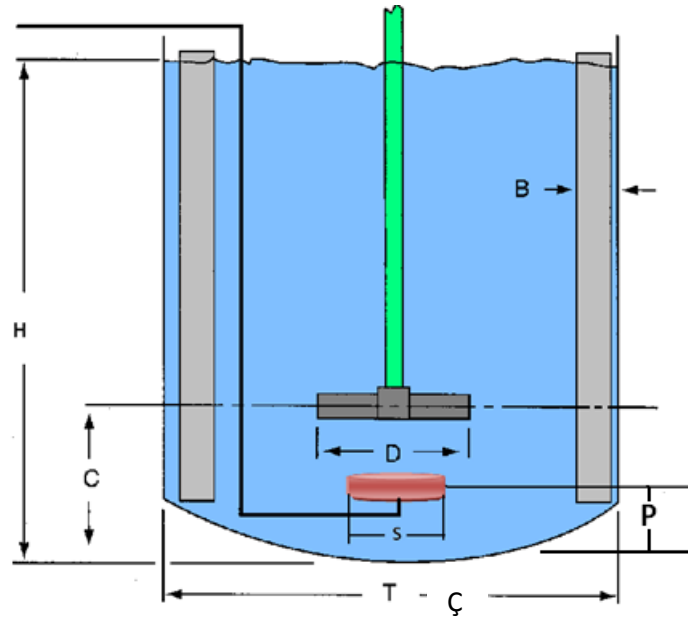
Bu çalışmada, gerekli kabarcık boyutu ve dağılımını sağladığı için, poroz bir taş gaz dağıtıcı olarak kullanıldı. Deney sisteminde (Şekil 5.3) kullanılan gaz dağıtıcının, sıvı içerisine beslenen gazın oluşturduğu kabarcıklar fotoğraflanmıştır;



Şekil 5.4 Sistemdeki gaz dağıtıcıdan çıkan kabarcıkların bir fotoğrafı

Reaktör'ün Boyutlandırılması

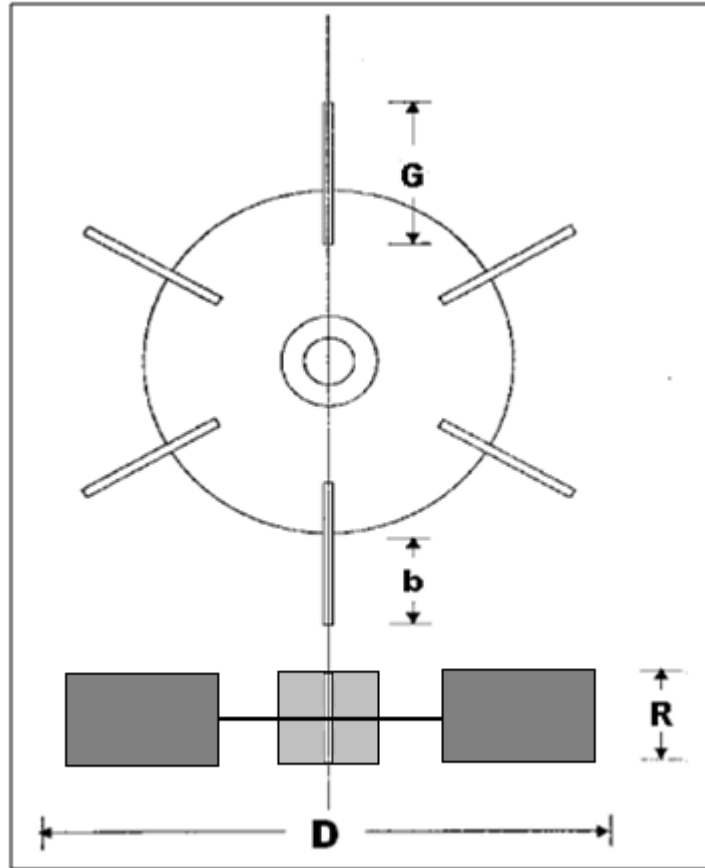
Çalışmada kullanılan rektör; gaz dağıtıcı, Rushton karıştırıcı ve dört adet baffle'dan oluşun 10cm çapında dikey silindirik cam reaktördür. Reaktörde girdap oluşumunu engellemek amacıyla dört adet dikey plakadan meydana gelen dalga dağıtıcı (baffle) yerleştirildi.



Şekil 5.5 Sürekli Karıştırmalı Tank Reaktörün Boyutlandırılması

Laboratuarda kullanılan reaktörün ve içerisindeki dalga dağıtıcı, karıştırıcı ve gaz dağıtıcının boyutu ve yerleşim düzeni şu şekildedir;

$$\begin{aligned}
 H &= \zeta & C &= \zeta/3 & D &= \zeta/3 & B &= \zeta/10 & S &= 3D/4 & P &= \zeta/4 \\
 R &= 0,2D & G &= 0,25D & b &= 3/5G
 \end{aligned}$$



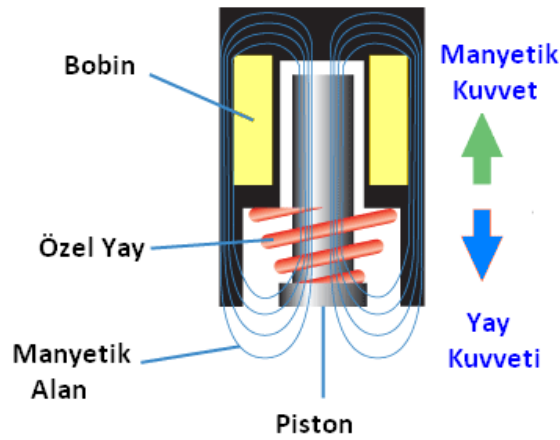
Şekil 5.6 Rushton Karıştırıcısının Boyutlandırılması

5.3. CİHAZLARIN ÖZELLİKLERİ VE KALİBRASYONU

5.3.1. Oransal Selenoid Valf

5.3.1.1. Oransal Selenoid Valfin Çalışma Prensibi

Oransal Selenoid Valf, bir elektrik giriş sinyaline cevaben akış, basınç veya akışkanın yönünü değiştirme gibi çeşitli amaçları sağlamakta kullanılır. Oransal valf; bir bobin, selenoid valf için özel olarak üretilmiş bir yay piston'dan oluşur. Oransal Valf'de piston üzerindeki hareketlerde kuvvetler arasındaki kurulan dengeye göre hareket eder.



Şekil 5.7 Selenoid Valf çalışma prensibi

Bu denge kuvvetleri, bobin boyunca geçen akım sayesinde oluşturulan manyetik kuvvetler ile oransal valf için özel olarak tasarlanmış bir yay tarafından sağlanan mekanik bir kuvveti kapsar. Yay kuvveti manyetik kuvvet tarafından oransal olarak ayarlanır. Oransal Valfler amper veya volt sinyaline göre işletilir.

Bu tez çalışmasında kullanılan Oransal Selenoid Valf, SMC® firması tarafından üretilen (PVQ10 serisi) ve şekli aşağıda verilmiş olan oransal valf'dir.



Şekil 5.8 SMC® Selenoid Valf

5.3.1.2. SMC® Oransal Selenoid Valfinin Özellikleri

Tablo 5.1 SMC Selenid Valfinin özellikleri

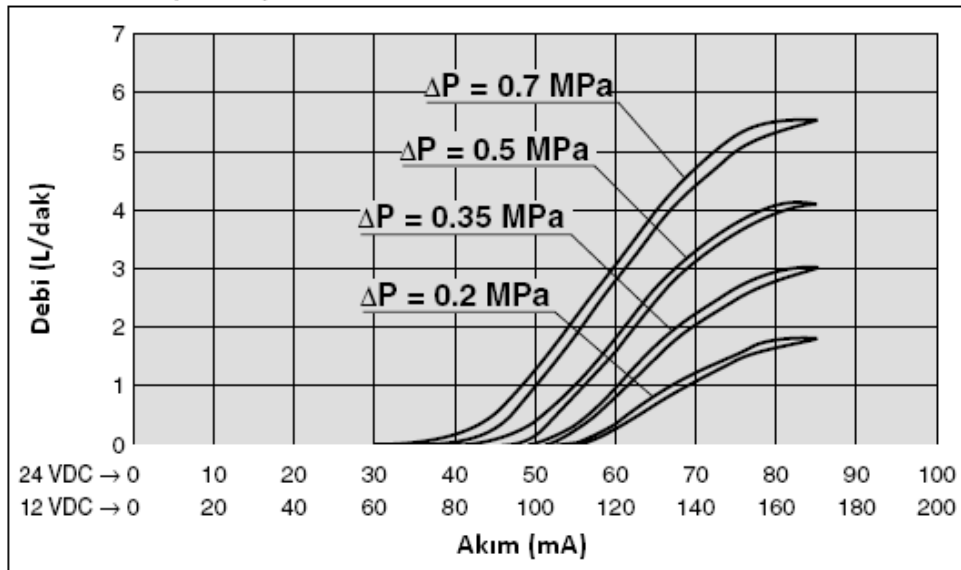
Akış	Hava, İnert Gaz	
Gövde Yapısı	Pirinç (C36)	
Akış Sıcaklığı	0 ile +50°C	
Dış Sıcaklık	0 ile +50°C	
Hareket	Normalde Kapalı	

Enerji Kaynağı	24 VDC	12 VDC
Akım	0 - 85 mA	0 - 170 mA
Enerji Tüketimi	0 - 2 W	

Orifiz Çapı (mm)	0.3	0.4	0.6	0.8
Mak. Çalıştırma Basınç Farkı (MPa)	0.7	0.45	0.2	0.1
Mak. Çalıştırma Basıncı (MPa)	1			
Min. Çalıştırma Basıncı (MPa) (Vakum)	0 (0.1 Pa.abs)			
Akış Hızı (L/dak) (Mak. Çalıştırma Basınç Farkında)	0 – 5	0 – 6		0 – 5
Histeresis (Mak. Çalıştırma Basınç Farkında)	10% veya daha az			
Tekrarlanabilirlik (Mak. Çalıştırma Basınç Farkında)	3% veya daha az			
Bağlantı Akımı (Mak. Çalıştırma Basınç Farkında)	50% veya daha az			

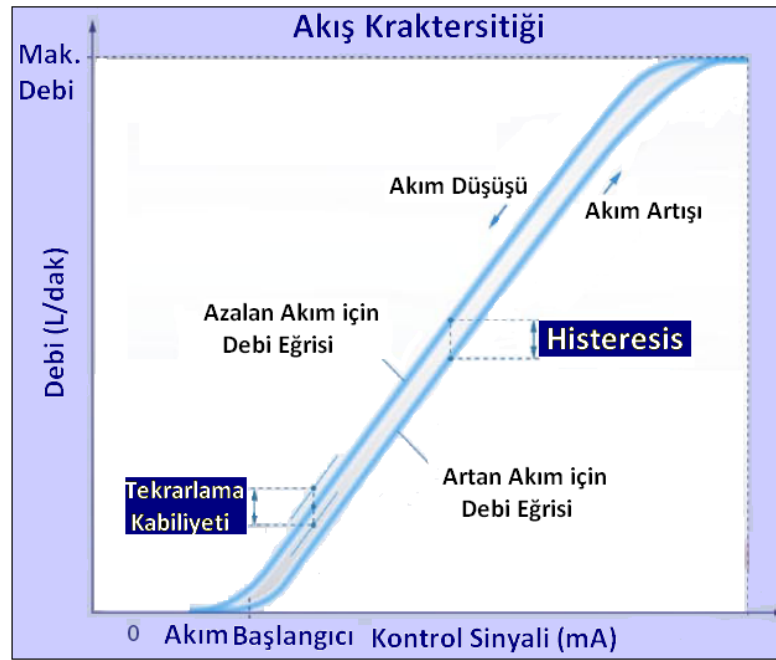
Kullanılan Valf; 12VDC sabit volt, 0-170mA değişken akım, 0,3mm orifiz çapı, 0-0,7MPa maksimum çalışma basıncı ve bu basınca karşılık gelen maksimum debi (L/dak) 0-5L/dak değerlerine sahiptir.

5.3.1.3. SMC® Oransal Selenoid Valfinin Akış Karakteristiği PVQ10 (ø0.3)



Grafik 5.1 Selenoid Valf basınç farkına göre debi-sinyal ilişkisi

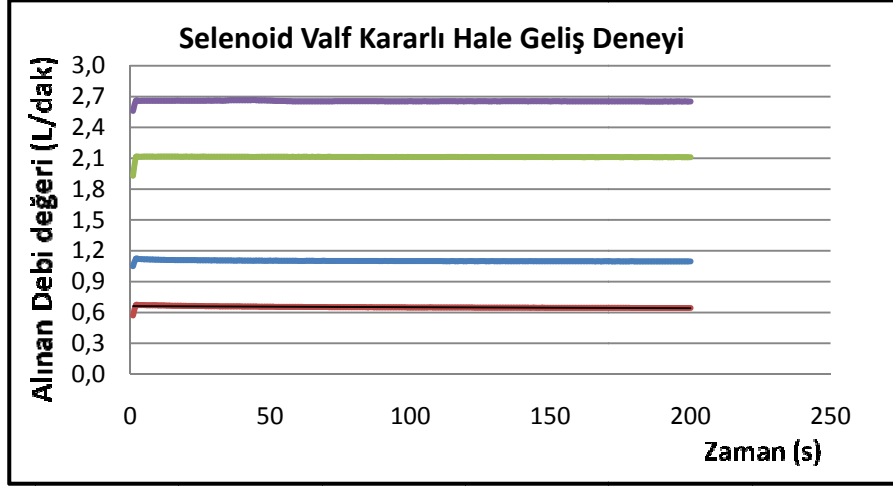
Grafik 5.1’de, basınç farkı değerleri için, akım ile debi arasındaki ilişki verilmiştir. Grafikte (5.1), iki farklı eğri olduğu görülmektedir. Bunun sebebi, kontrol cihazındaki Histeresis farkı olmasındadır. Selenoid Valf’in artan amper değerinde farklı bir debi, azalan amper değerinde ise farklı bir debi sağlaması valfin karakteristik özelliklerindendir. Grafik 5.2’de, üretici firma tarafından sunulan kitapçıkta histeresis farkı gösterilmektedir.



Grafik 5.2 Selenoid valfin akış karakteristiği

5.3.1.4. Selenoid Valfin Dinamiği

Gerçekleştirilen denemede, selenoid valfin kararlı hale gelme süresi belirlenmeye çalışıldı. Selenoid valf’e gönderilen sinyale karşılık gelen debi değerleri akışölçer yardımıyla takip edildi. Her sinyal gönderildikten sonra çok sayıda veri alınarak valfin kararlı halde olduğu değer için beklenmesi gerekli olan süre bulundu. Grafik 5.3’de dört farklı sinyal (Sırasıyla; 2V, 3V, 6V, 9V) için elde edilen değerler gösterilmektedir;

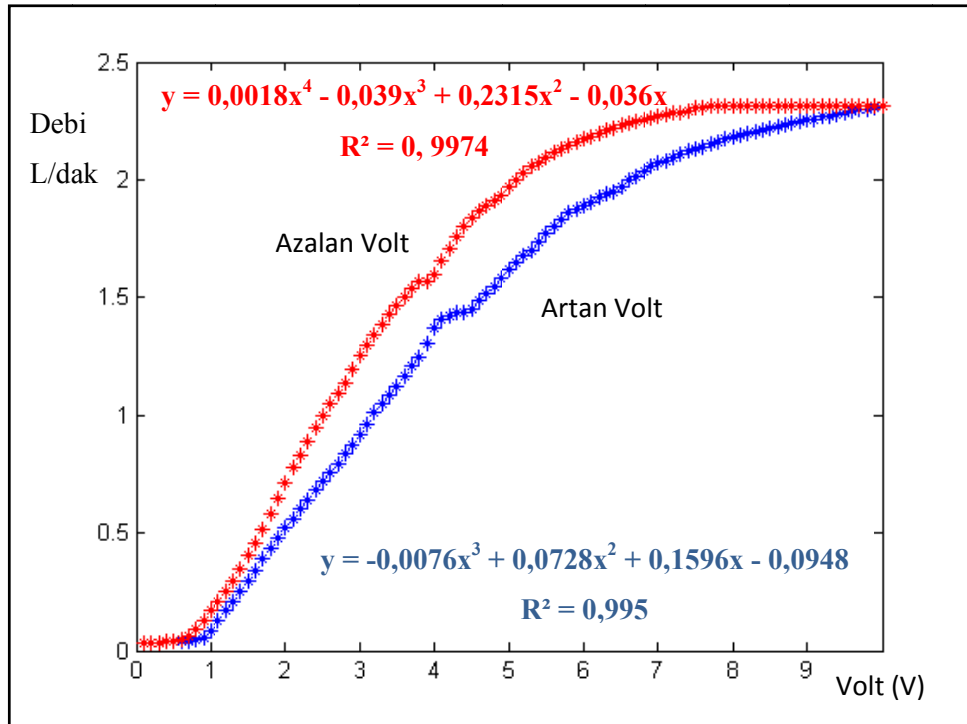


Grafik 5.3 Deneyisel olarak Solenoid Valfin Kararlı Hale Geliş Süresi

Düşük debi değerlerinde (<0,5 L/dak) %3'lik rölatif hata ile 25 saniye, (0,5 L/dak<) büyük değerler için ise %0,3'lük (%3) hata için 10 saniye olduğu deneysel veriler sonucunda tespit edildi.

5.3.1.5. Solenoid Valf Kalibrasyonu

MATLAB programından bir döngü içerisinde 0,05V değişim aralıklarıyla 0V'dan 10V'a, daha sonra 10V'dan 0V'a sinyalin solenoid valfe gönderilmesi sonucunda artan ve azalan volt değerlerine göre sinyal-debi ilişkisini veren grafik (5.4) elde edildi;



Grafik 5.4 Solenoid Valfin Dinamik Modeli

5.3.2 Gaz Akış Ölçer

Gaz akış ölçer, bir sistem boyunca gazların debisini (Kütleli veya Hacimsel) ölçen cihazlardır. Deney sırasında reaktöre giren gazın debisi (L/dak) akışölçer yardımıyla tespit edildi. Kullanılan Gaz Akışölçer Alicat™ Scientific firması tarafından üretilmiş hem analog hemde dijital sinyal gönderebilen gelişmiş bir cihazdır. Akışölçerin bazı özellikleri tablo 5.2’de verilmiştir.

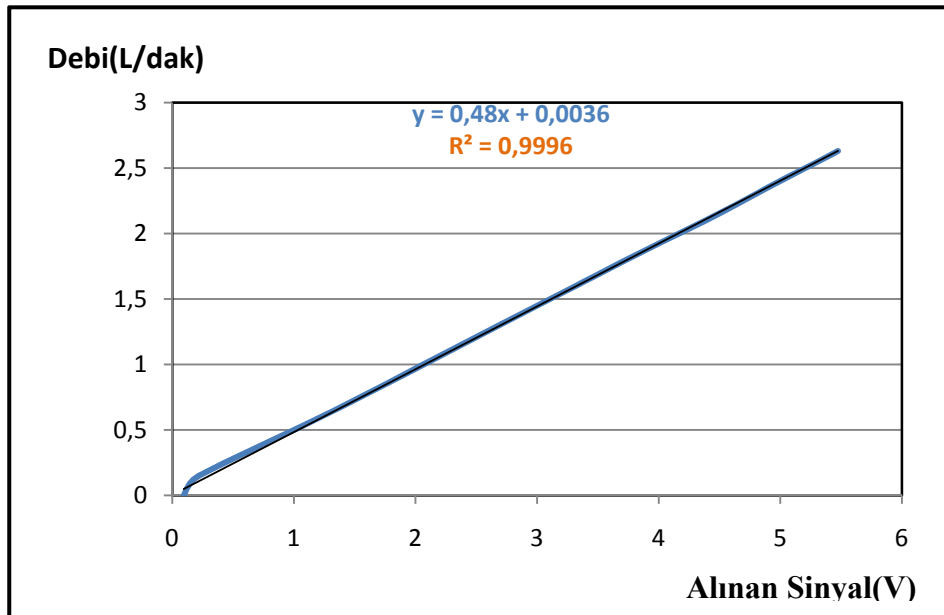
Tablo 5.2 Akışölçer’in (Flow Metre) Özellikleri

Ölçüm Parametreleri	Kütleli Debi, Hacimsel Debi, Basınç, Sıcaklık
Doğruluk Oranı	%0,8 Okuma + %0,2 Tam değer
Çok Yönlülük	Analog Output, Dijital Output
Hız	10 milisaniye
Tekrarlanabilirlik	±%0,2



Şekil 5.9 Akışölçer

Akışölçerden alınan sinyalin hangi debi değerine karşılık geldiğini belirlemek amacıyla deneme yapılmıştır. Elde edilen sonuç (grafik 5.5) ise şu şekildedir;



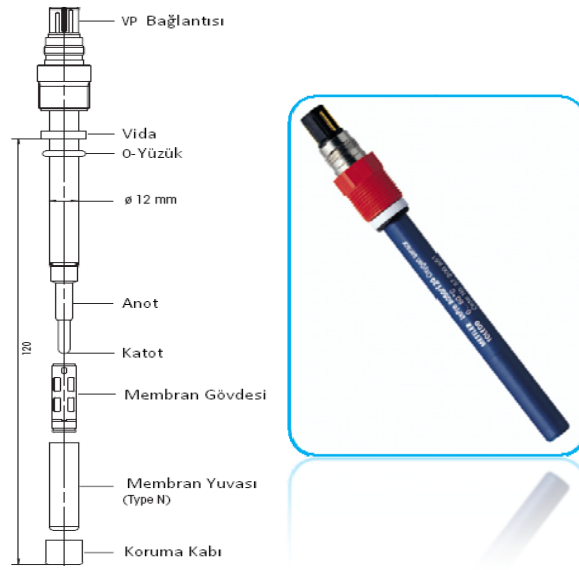
Grafik 5.5 Akış ölçer için Sinyal-Debi İlişkisi

5.3.3. Sensörler

5.3.3.1 Oksijen Probu

5.3.3.1.1. Oksijen Probunun Yapısı ve Özellikleri

Reaktör ortamındaki çözünmüş oksijen konsantrasyon değerlerinde meydana gelen değişimlerin sürekli takip edilmesinde çözünmüş oksijen sensörü kullanıldı. Laboratuardaki çalışmalarda, kullanılan çözünmüş oksijen sensörü, şekil 5.10'da verilen Mettler Toledo® (InPro6050) tarafından üretilen sensörüdür. Bu sensör, reaktör ortamındaki sıcaklık ve çözünmüş oksijenin değerlerini aynı anda bilgi olarak transmiere iletebilmektedir.



Şekil 5.10 Çözünmüş Oksijen Sensörü

Oksijen probu yine Mettler Toledo firmasının ürettiği 4050e transmiere bağlanarak birlikte kullanılmaktadır.

Tablo 5.3 Oksijen Sensörünün Özellikleri

Çalışma Basıncı Aralığı	0,5-2 Bar
Sensör Performansı (Bulma Sınırı)	30µg/l(ppb) (sulu ortamda)
Ölçüm Sıcaklık Aralığı	0-60°C
25°C'de Response Time	t₉₈<90 saniye
25°C'de Dış Ortamda(Hava) Sensör Sinyali	40-110 nA

5.3.3.1.2. Oksijen Probunun Çalışma Prensibi

Membran tip oksijen probunun genel özellikleri şu şekildedir;

- ✓ Çözeltinin pH'ı probun performansını etkilemez,
- ✓ Atmosferik basınç oksijen için doygunluk değerini etkiler,
- ✓ Prob mg/L(ppm) okunduğunda barometrik basınç için kalibre edilmelidir.
- ✓ Çözeltide bulunan Klor ve Hidrojen Sülfürün aşırısı çözünmüş oksijen değerinin prob tarafından hatalı okumasına sebep olur.

Su veya çözeltideki çözünmüş oksijen konsantrasyonu Galvanik ve Polarograf (Clark tipi) hücre olmak üzere iki farklı tip hücre kullanılarak ölçülebilir.

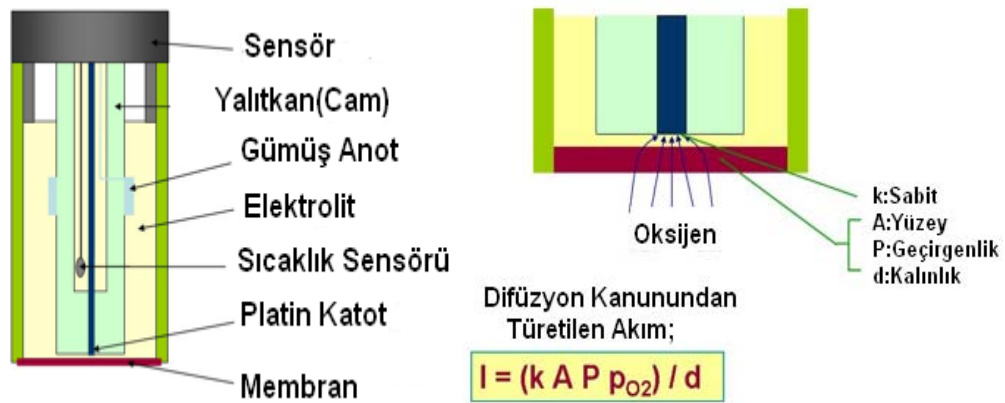
Galvanik hücre kullanan membranlı çözünmüş oksijen elektrotlarında, katot olarak soy bir metal (Ag), anot olarak adi bir metal (Zn veya Pb) ve elektrolit olarak ise alkali çözücü kullanır. Kullandığı membran, oksijen geçirgenli teflon membran'dır. Galvanik tip hücrede, katot da oksijen konsantrasyonuna göre oransal olarak değişen akımın ölçülmesiyle çözünmüş oksijen konsantrasyonu tespit edilir.

Diğer bir hücre tipi Polarograf Hücredir. Bu hücre tipi 1956 yılında Clark tarafından keşfedildi ve Clark hücre olarak da bilinir. Katot olarak soy bir metal (Pt,Au,Pd), anot olarak Ag ve elektrolit çözeltisi olarak Potasyum Klorür(KCl) veya Potasyum Bromür(KBr) kullanılır. Membran olarak oksijene duyarlı bir teflon kullanılır. Membran gaz geçirgenliğinin yanı sıra sensörün dış çevreden gelecek zararlı etkilere korunmasını sağlar. Bu koruma sayesinde reaksiyon ortamında olabilecek bir takım safsızlıklardan kaynaklanması muhtemel etkileri asgari düzeye çekilir. Polarograf hücrede voltaj, oksijen için difüzyon akımı üretilsin diye iki elektrot arasına uygulanır. Seçili geçirgen membran boyunca geçen oksijen katot da azalır. Oksijen azalması 400-1200mV arasında gerçekleştirilir. Bundan dolayı belli bir polarizasyon voltajına (Örn: 800mV) ihtiyaç vardır. Çözünmüş oksijen konsantrasyonuna göre oransal azalan akım üretilir ve üretilen bu akım ölçülür.

Laboratuarda kurulan deney sisteminde çözünmüş oksijen konsantrasyonunu belirlemek için kullanılan sensör (*Mettler Toledo® (InPro6050)*), Polarograf Oksijen Ölçüm temellidir. Bu sensör yukarıda da yapısı tarif edildiği üzere, ortam ve elektrotu birbirinden ayıran oksijen geçirgenli bir membran ile katot ve anottan oluşur. Sensörün bağlı olduğu transmitter tarafından katoda

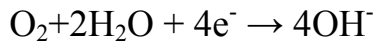
(Polarizasyon Voltajı) sabit bir voltaj gönderilir. Cihazda sulu uygulamalarda için -675mV polarizasyon voltajı ayarlanmıştır. Oksijen membran boyunca elektroda ortamdan geç eder ve katot da azalır. Aynı anda oksidasyon olayı anotta meydana gelir. Elektrolit, anot ile katot arasındaki elektrik devresini tamamlar.

Polarograf hücre tipinde anot/katot çifti, sisteme giriş yapan oksijenin miktarına göre direkt orantılı akıma neden olur. Bu yüzden, akımın büyüklüğü proba giren oksijenin miktarını bize verir. Çünkü proba giren oksijen kimyasal olarak tüketilir, elektrolitteki oksijenini kısmi basıncı sıfıra doğru azalır. Kısmi basınç gradienti membran boyunca bulunur ve probadaki oksijen oranı ölçüm yapılan su veya hava içerisindeki kısmi basıncının bir fonksiyonudur. Gradient sürekli olarak elektrolitte ve membran boyunca yeni oksijen moleküllerini belirlemeye yardımcı olur. Soy metal elektrotuna uygulanan negatif voltaj artırılırken, akım başlangıçta artar fakat sonunda doygunluğa ulaşır. Katot da oksijen reaksiyonu oldukça hızlıdır.

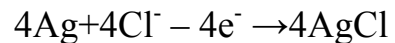


Şekil 5.11 Polarograf Hücre (Clark) için Oksijen Ölçümü

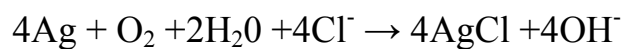
Katot Reaksiyonu(Redüksiyon)



Anot Reaksiyonu(Oksidasyon)



Tüm Reaksiyon



5.3.3.1.3. *Probun Cevap veya Gecikme Süresi*

Reaktördeki çözünmüş Oksijen değişimi, hem prob ile kaydedicinin gecikme süresi, hem de probun ani bir yanıt veremeyeceğinden dolayı bu süre dikkate alınmadan elde edilen data gerçek değeri yansıtmaz. Bu yüzden, bu değerin belirlenmesi gereklidir.

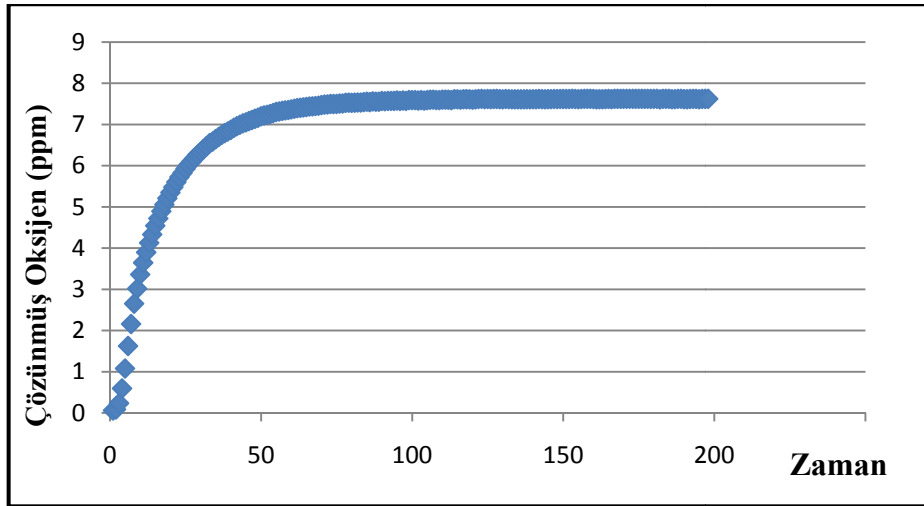
Gecikme zamanı analizi, oksijen konsantrasyonu lineer değişen sistemler için çok kolaydır ve lineer olmasından kaydedicinin okuduğu değer çözünmüş oksijen konsantrasyonuna göre oransaldır. Prob-Kaydedici sistemi lineer olup olmadığına karar verebilmek için, çözünmüş oksijendeki konsantrasyon değişimine göre, cevap test edilir. Bu işlem, oksijen konsantrasyonu sıfır olan bir çözelti (Ör:Na₂SO₃) içerisinde bulunan prob, hava ile doygun hale getirilmiş suya/çözeltiye yerleştirilir. Daha sonra probun sıfır değerinden doygunlu değerine ulaşınca kadar, kaydedici tarafından datalar alınarak grafik edilir ve 5.1 denklemine göre response time (τ_s) hesaplanır.[13]

$$\ln \frac{(C_{AD} - C_{A0})}{(C_{AD} - C)} = \frac{1}{\tau_s} t \quad (5.1)$$

Yukarıdaki Denklemden; t:zaman, τ_s : Cevap veya gecikme süresi (Response time), C:Herhangi bir andaki konsantrasyon, C_{AD} : Çözeltinin doygunluk konsantrasyonu, C_{A0} :Başlangıç konsantrasyonu.

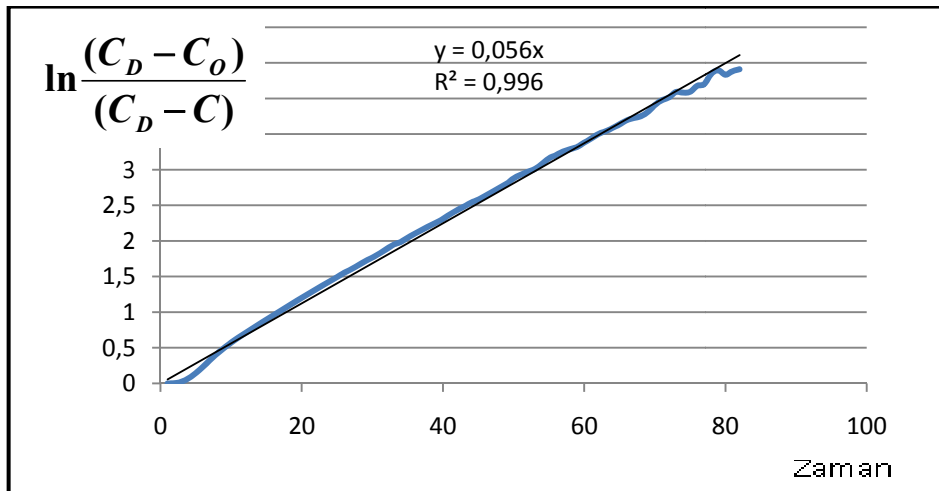
5.3.3.1.4. *Prob Gecikme Süresinin Deneysel Ölçümü*

Deney için içerisinde çözünmüş oksijen değerini sıfır yapan Sodyum Sülfat (Na₂SO₃) çözeltisi hazırlandı ve prob içerisine daldırıldı. Transmitter'den sıfır değeri görüldüğünde, prob daha önceden doygun hale getirilmiş su içerisine yerleştirildi ve kararlı hale gelmesi beklendi. Elde edilen dataların grafiği (5.6) şu şekildedir;



Grafik 5.6 Oksijen Probenun Gecikme Zamanı Deneyi

Elde edilen bu değerler kullanılarak yukarıda verilen denklem, zamana karşı çizdirilmesi sonucu grafik 5.7 elde edildi;



Grafik 5.7 Probun Gecikme Süresinin Belirlemesi

Grafikteki doğrunu eğiminin matematiksel olarak tersi probun response time (τ_s) değeridir. $\tau_s = 17$ saniye olarak bulunmuştur. Bu değer, probun dinamik denkleminin içerisinde bulunur ve bu şekilde modele dâhil edilmiş olundu.

5.3.3.2 pH Probu

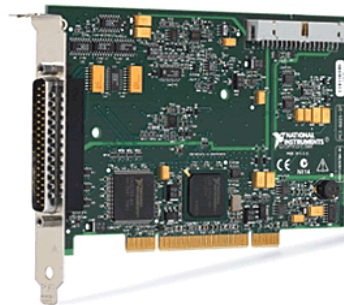
pH probu, WTW (WTW SenTix® pH elektrodu) firması tarafından üretilmiş mikro laboratuvar boyutlarında bir pH metredir. Kalibrasyonu üç farklı standart çözelti (pH = 2,4 ve 6) kullanarak yapıldı.

Sodyum Sülfid ile Oksijen arasında meydana gelen reaksiyonunda (Katalizörlü ve Katalizörsüz) pH'ın etkisi birçok makalede incelenmiştir. Bu çalışmada Katalizörsüz Sodyum Sülfid+Oksijen reaksiyonu gerçekleştirildi. Katalizörsüz Sülfid Reaksiyon Kinetiği üzerine yapılan bir çalışmada [22], reaksiyon sırasında çözeltinin pH'ı düştüğü ve pH değeri 5,9-5,7 arasında bir değerin altına inene kadar reaksiyonun ilk bölümü bu pH değişimi tarafından etkilenmediği, fakat daha düşük pH değerlerinde ise birden bire reaksiyonu hızını düşürdüğü deneysel olarak saptanmıştır.

Bu çalışmada pH elektrodu, kimyasal reaksiyon esnasında meydana gelen pH değişimlerini gözlemlemek ve ilgili çalışmalarda belirlenen pH sınırlarının içerisinde kalarak kinetik ifadenin olumsuz etkilenmesini engellemek amacıyla deney sisteminde kullanıldı.

5.3.4. Veri Toplama/Gönderme Kartı (NI® PCI-6221 DAQ Kartı)

Deney sisteminde kullanılan cihazlardan bilginin alınması, değerlendirilmesi ve bu bilgilere göre prosese müdahale edilmesi MATLAB programında yazılan kodlar ile yapıldı. Yazılan bu kodlara göre program ile sistem arasındaki iletişimi MATLAB tarafından desteklenen bir DAQ kart vasıtasıyla gerçekleştirildi. Bu kart, bilgisayarın kasasındaki bir PCI yuvasına yerleştirildi ve MATLAB programı ile iletişimi sağlandı. Kartın özellikleri ve bir fotoğrafı şekil 5.13'de verilmiştir.



Şekil 5.12 PCI DAQ Kart

Tablo 5.4 PCI DAQ Kartının Özellikleri

Ürün Adı	NI® PCI-6221
Ürün Ailesi	Multi Fonksiyonlu Data
Model Biçimi	Kazanma
Ölçüm Tipi	PCI
Fiziksel Özellikler	Dijital, Voltaj, Frekans
Boy	15,5 cm
En	9,7 cm
Analog Input	
Kanallar	16, 8
Tek Girişli (Single-Ended) Kanalları	16
Diferansiyel Kanalları	8
Örnek Hızı	259 kS/s
Maksimum Voltaj	10V
Maksimum Voltaj Ayarı	3100 μ V
Maksimum Voltaj Oranı	-10V, 10V
Maksimum Voltaj Oran Hassasiyeti	97,6 μ V
Minimum Voltaj Oranı	-200mV, 200mV
Minimum Voltaj Oran Hassasiyeti	5,2 μ V
Minimum Voltaj Ayarı	112 μ V
Analog Output	
Kanallar	2
Maksimum Voltaj	10V
Maksimum Voltaj Oranı	-10V, 10V
Maksimum Voltaj Ayarı	3230 μ V
Minimum Voltaj Oranı	-10V, 10V
Minimum Voltaj Oran Ayarı	3230 μ V
Update Hızı	833 kS/s
Dijital I/O	
Çift Yönlü Kanallar	24
Sadece Input Kanalları	0
Sadece Output Kanalları	0
Kanalların Sayısı	24, 0, 0
Maksimum Ölçüm Hızı	1 Mhz
Maksimum Input Hızı	0 V, 5 V
Maksimum Output Hızı	0 V, 5 V

Bölüm 6

DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

6.1 FİZİKSEL ABSORBSİYON'DA OKSİJEN KONSANTRASYONU KONTROLÜ

6.1.1 Hacımsal Kütle Transfer Katsayısının Belirlenmesi

Hacımsal Kütle Transfer Katsayısı ($k_L a$) gaz-sıvı sistemlerinin modellenmesinde kullanılan en önemli fiziksel parametredir. Laboratuarda çalıştığımız sisteme uygun Hacımsal Kütle Transfer Katsayısının ($k_L a$) belirlenmesi, deney sistemini tanımlayan model içerisindeki en önemli belirlenmesi gerekli değişkendir. Bölüm 1'de değinildiği üzere, Yagi ve Yoshida[24] tarafından elde edilen korelasyon (Tablo 1.3), mekanik karıştırıcılı tank reaktörde su/hava sistemi için çıkarılmıştır ve bu denklem deneysel verilerle yapılacak regresyona göre düzenlenmiş hali(1.2) Bu denklemin deney sistemini en iyi şekilde yansıtması için farklı deney şartlarında alınan veriler ile MATLAB programı ile Nonlinear Regresyon yapıldı. Deney şartlarında karıştırıcı hızının (n) sabit bir değerde (500 rpm) kullanılmasına, Hacımsal Kütle Transfer Katsayısının ($k_L a$)'ın sadece gazın debisi ile değiştiği şartlar için Nonlinear Regresyon yapıldı.

$$k_L a = \alpha * Q^\beta \quad (6.1)$$

Yapılan deneylerde sabit ve değişken gaz debileri kullanıldı. Sabit gaz debili deneylerde reaktöre denge konsantrasyonuna kadar program tarafından sabit bir gaz debisi verildi. Değişken gaz debisinde ise, birer saniyelik aralıklarla Selenoid Valfe ilk aşamada 0V'dan 10V'a, daha sonra 10V'dan 0V'a sinyaller gönderildi.

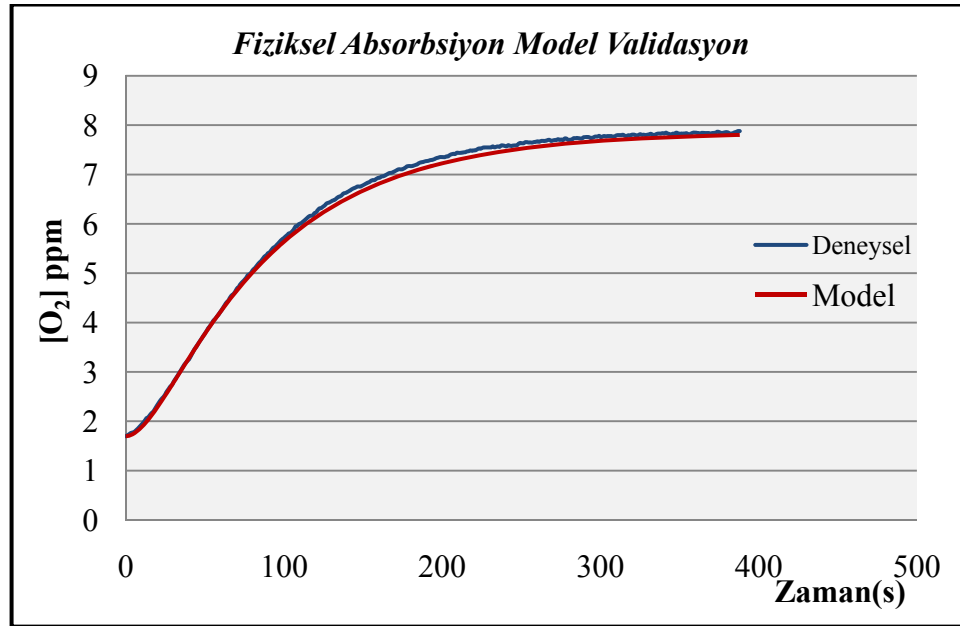
Sabit ve Değişken Gaz Debilerinde, Oksijenin Denge Konsantrasyonuna kadar alınan veriler sonucunda yapılan Nonlinear Regresyon sonuçlarının Tablo 6.1'de verilmiştir;

Tablo 6.1 Nonlinner Regresyon Sonuç Tablosu

Değişken Gaz Debili Deneyler	Sabit Gaz Debili Deneyler	<i>Kalış Süresi τ_H (saniye)</i>	α	β	<i>Gaz Debisi Q (cm^3/s)</i>
		420	2,450	0,63	9,41
		420	2,147	0,685	11,42
		420	2,321	0,685	13,3
		560	2,179	0,687	15
		420	1,104	0,74	38
		420	1,195	0,70	41
		420	1,878	0,67	24,3
		Ortalama	1,9	0,687	-
		600	1.969	0,602	
	Değişken Gaz Debili Deneyler	840	2.027	0,6	
		420	1.617	0,671	
		280	1.509	0,67	
		336	1.543	0,682	
		Ortalama	1,733	0,645	

Bu verilere göre Volümetrik Kütle Transfer Katsayısı model ile deneysel verilerin en iyi olduğu sabitlere karar verilmiştir ve model’de (2.7) yerine yazılarak deneysel dotalar ile uyumu karşılaştırıldı.

$$k_L a = 1,9 * 10^{-3} * Q^{0,69} \quad (6.2)$$



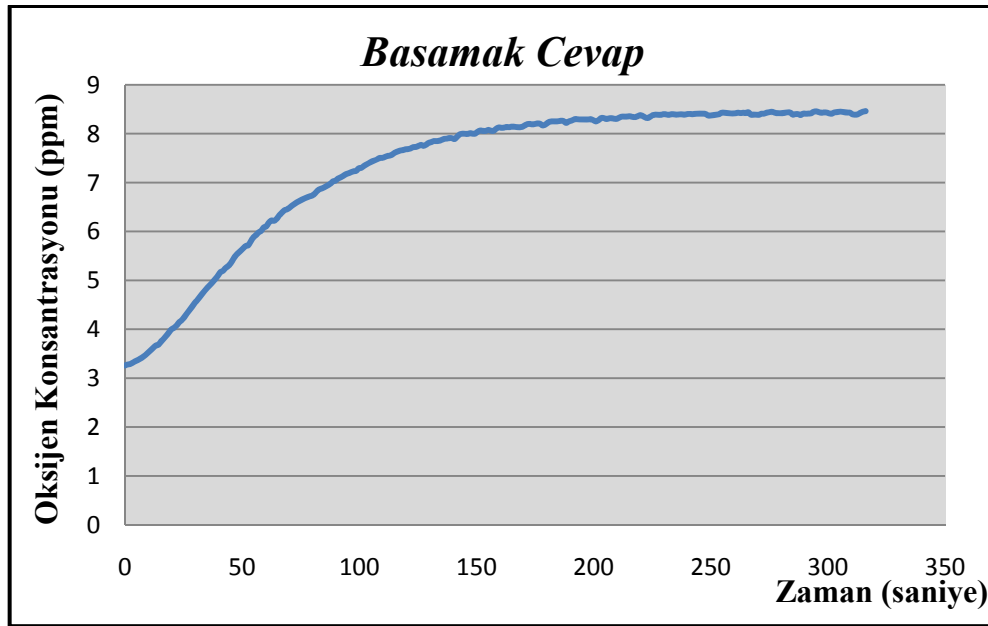
Grafik 6.1 Model Validasyon

6.1.2 DMC’de Basamak Cevap Modelinin Belirlenmesi

Dinamik Matris Kontrol, model olarak Basamak Cevap Modelini kullanmaktadır. Kontrol sisteminin davranışı bu model ile kontrol algoritması tarafından önceden bilir ve öngörülebilir. Modeldeki herhangi bir olumsuzluk direkt kontrole yansır. Bu yüzden modelin DMC iyi tanıtılması gerekmektedir.

Basamak Cevap Modeli direk prostesten elde edilen veriler kullanılarak oluşturulur. Bunun için sisteme bir basamak etkisi verilir ve sistemin kararlı hale gelmesi beklenir. Kararlı hale geldiğinde deney sonlandırılır.

Yapılan Deneyde, başlangıç konsantrasyonu 3,21 ppm olarak ayarlanmış suya, sabit sıcaklık ve basınçta, 500 rpm karıştırıcı hızında ve sabit sıvı debisinde (100 cm³/dak) belirli bir gaz debisi ($Q=2,30 \text{ L/dak}=38.33 \text{ cm}^3/\text{s}$) gönderildi. Grafikten de görülebileceği gibi kararlı hale ulaşmıca kadar proses sürdürüldü.



Grafik 6.2 Basamak Cevap

Performans İndeksleri

Bir performans indeksi, sistemin performansının nicel ölçümüdür. Amaç, ya kontrol sistemini tasarımılamak, ya da sistem dizaynını iyileştirmek. Performans indeksi, daima pozitif veya sıfırdır. Performans İndeksi, Kontrol sistemlerinin dizayn ve analizi için önemlidir. En iyi sistem, bu indeksi minimum yapan sistemdir.

Integral of Squared Error (ISE)
Error (ITSE)

$$I_1 = \int_0^{\infty} e^2(t) dt \quad (6.3)$$

Integral of Time Mutiply Squared

$$I_3 = \int_0^{\infty} t e^2(t) dt \quad (6.5)$$

Integral of Absolute Error (IAE)
Error (ITAE)

Integral of Time Mutiply Absolute

$$I_2 = \int_0^{\infty} |e(t)| dt \quad (6.4)$$

$$I_4 = \int_0^{\infty} t |e(t)| dt \quad (6.6)$$

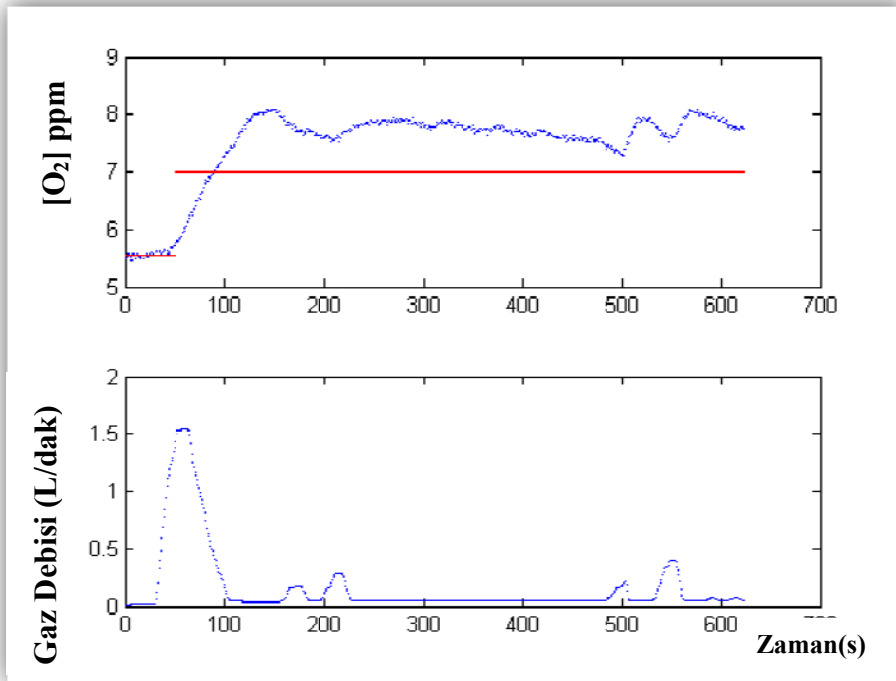
Çalışmada Performans İndeksi olarak *ISE* ve *ITSE* indeksleri kullanıldı. DMC parametrelerinin Optimum değerleri *ISE* ve *ITSE*'yi minimum yapan değerler olarak belirlenip, bu değerlere göre kontrol deneyleri gerçekleştirildi.

6.1.3 Optimum Dinamik Matris Kontrol Parametrelerin Belirlenmesi

DMC'de kullanılan parametrelerin proses sistemi için uygun değerlerin belirlenmesi, kontrol'ün verimliği ve performansı için büyük önem taşımaktadır. DMC'de belirlenmesi gereken parametreler; Öngörü Ufku (N_p), Kontrol Ufku (N_c), Düzeltme Faktörü (C_f) ve Ağırlıklandırma Faktörü (C_w) olmak üzere dört tanedir. Ağırlıklandırma Faktörü (C_w) ve Düzeltme Faktörü (C_f), kontrol algoritması içerisinde modelin yansıtmadığı hataları ortadan kaldırmak ve referans değere uyumu arttırmak amacıyla kontrol algoritma içerisinde bulunmaktadır ve sıfır ile bir arasında bir değişkendir. Bu dört parametre ya simülasyon deneyleri ile deneme-yanılma yoluyla bulunur, ya da simülasyon deneyi bir optimizasyon yöntemi içerisine yerleştirilip en uygun değerler hesaplatılır.

Kontrol değişkeni ayarlayan gazın debisinin, maksimum ve minimum olduğu değerler yine proses sistemi için önemlidir. Bunun için, değişik sinyal aralıkları kullanılıp kontrol performansı gözlemlendi ve çalışılması uygun sinyal aralık belirlendi;

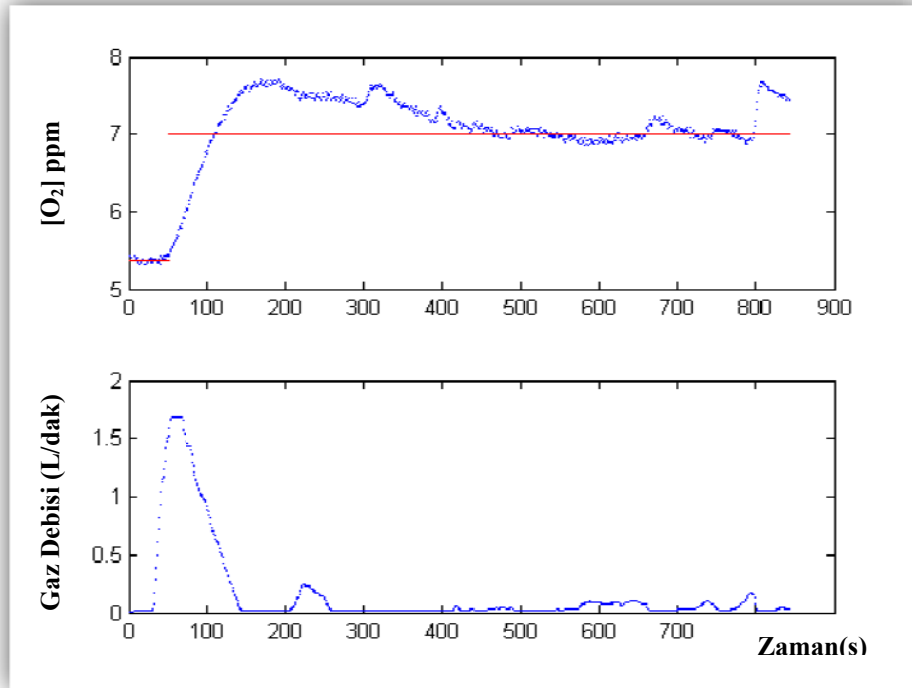
$$N_p=25 \quad N_c=3 \quad u_{\max}=9 \quad u_{\min}=1 \quad C_f=0,5 \quad C_w=0,5$$



Grafik 6.3 Sistemde minimum sinyalin belirlenmesi ($u_{\min}=1$ için)

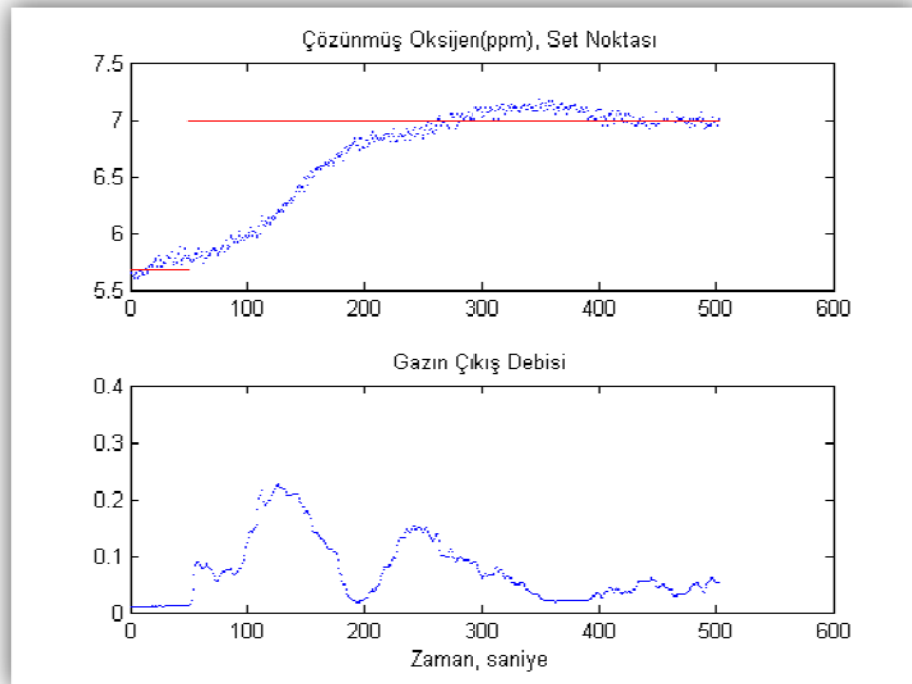
Kontrol Algoritması Maksimum 9V, minimum 1V olarak seçildiğinde offset hatasının varlığı gözlemlendi. Minimum Sinyal değeri azaltıldığında ise offset hatasının düzeltildiği gözlemlendi;

$N_p=25$ $N_c=3$ $u_{\max}=9$ $u_{\min}=0.5$ $C_f=0.5$ $C_w=0.5$



Grafik 6.4 Sistemde minimum sinyalin belirlenmesi ($u_{\min}=0.5$ için)

$N_p=25$ $N_c=3$ $u_{\max}=9$ $u_{\min}=0$ $C_f=0.5$ $C_w=0.5$



Grafik 6.5 Sistemde minimum sinyalin belirlenmesi ($u_{\min}=0$ için)

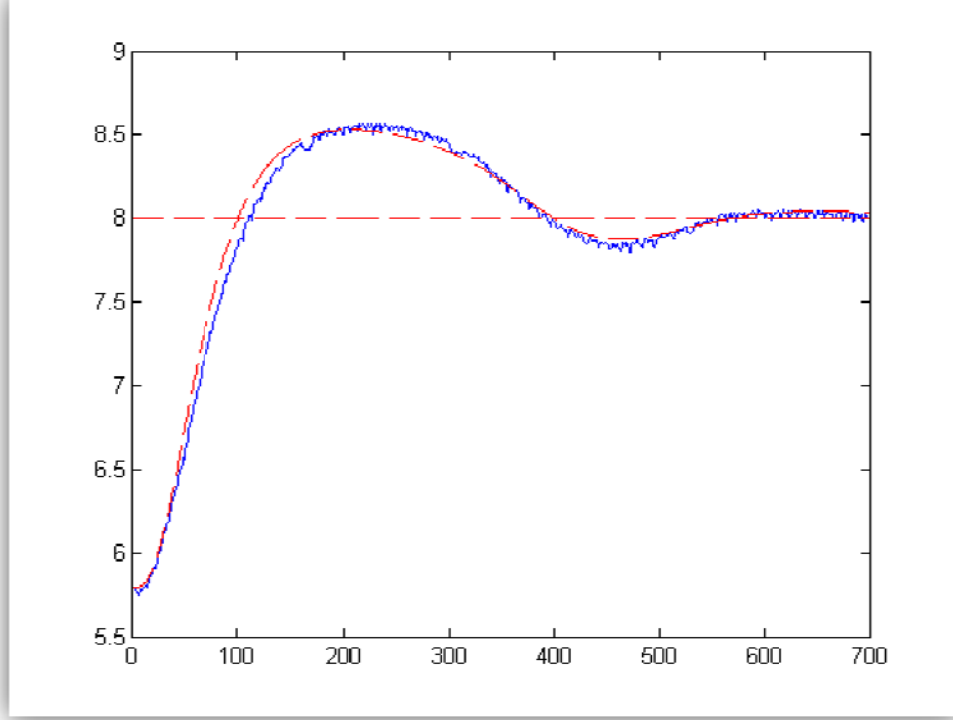
Sistemde çalışmaya uygun minimum sinyal 0V olarak belirlemiştir. Maksimum Volt ise 7,5V olarak işletilmesinde herhangi bir sakınca görülmemiştir.

Yukarıdaki deneysel kontrol grafiklerden görüleceği üzere, sadece sinyalin sınırlarının belirlenmesi yüksek performanslı bir kontrol sağlamaz. Diğer parametrelerin (N_p, N_c, C_f ve C_w) ayarlanması ile arzu edilen en iyi performans sağlanabilir. Geçmişde yapılan çalışmalardan yola çıkarak N_p ve N_c için belli aralıklar model öngörülü kontrol üzerine yazılan kitaplarda [15][17] sunulmuştur. Bu öngörülen sınırlar, optimizasyon hesabında maksimum ve minimum değerler olarak belirtildi (Örn: $10 < N_p < 60$, $1 < N_c < 10$ gibi) ve hesaplama O sınırlar içerisinde programa yaptırıldı.

Optimum DMC parametrelerinin belirlenmesi için, prosesin herhangi bir anındaki konsantrasyon ile set noktası arasındaki hatanın büyüklüğü *ISE* ve *ITSE* indekslerine göre MATLAB ortamında “dal-budak” (branch and bound) algoritmasına dayanan ‘**fminconset**’ ve ‘**bnb**’ programlarıyla optimize edildi ve iki metodun da aynı sonuç verdiği görüldü. *ISE* (6.3) indeksi olarak $K_1([Oksijen(j)-Set Noktası(j)]^2)$, *ITSE* (6.5) indeksi olarak $K_2([Oksijen(j)-Set Noktası(j)]^2 * zaman(j))$ ayrı ayrı iki programla Optimize edildi.

Laboratuarda gerçekleştirilen farklı deney setlerinde, real-time denemeler ile simülasyon deneyleri MATLAB’da aynı grafikte beraber çizdirilmiş, simülasyon performansının deneysel şartlarını yakaladığı ve deney şartlarını iyi bir şekilde yansıttığı görüldü. Örneğin;

N_p	N_c	C_f ve C_w	Set Point
25	3	0,5	8



Grafik 6.6 Deneysel-simülasyon Çalışması

Yukarıdaki grafikten görüleceği gibi, simülasyon deneyleri real-time deney şartlarını iyi bir şekilde yansıtmaktadır. Fakat deneme-yanılma yolu ile seçtiğimiz DMC parametrelerinin optimum parametreler mi? yoksa değil mi? bunun tespiti gerekmektedir. Gerek zaman, gerekse maddi açıdan laboratuarda deneme yaparak bu soruya cevap bulmak çok zordur.

Farklı başlangıç konsantrasyonları için set noktası 6ppm olan simülasyon deneylerinin MATLAB’da tamsayı ve tamsayı olmayan optimizasyon yöntemi kullanılarak optimum DMC parametreleri hesaplatıldı. K_1 Minimum yapacak DMC parametreleri, başlangıç konsantrasyonu 2ppm,3ppm,4ppm ve 5ppm olan farklı değerlerine göre ayrı ayrı hesaplama yaptırıldı. Bu hesaplama sonuçları tablo 6.2’de verilmiştir;

Tablo 6.2 Minimum K_1 'e göre optimum N_p ve N_c parametreleri

C_{A0} (ppm)	N_p	N_c	C_f	C_w	Minimum K_1	K_2
2	45	2	0,1	0,354	441,081	7951
3	34	2	0,101	0,155	228,109	3833
4	31	2	0,01	0,055	90,111	1564
5	30	2	0,976	0,014	39,922	2606

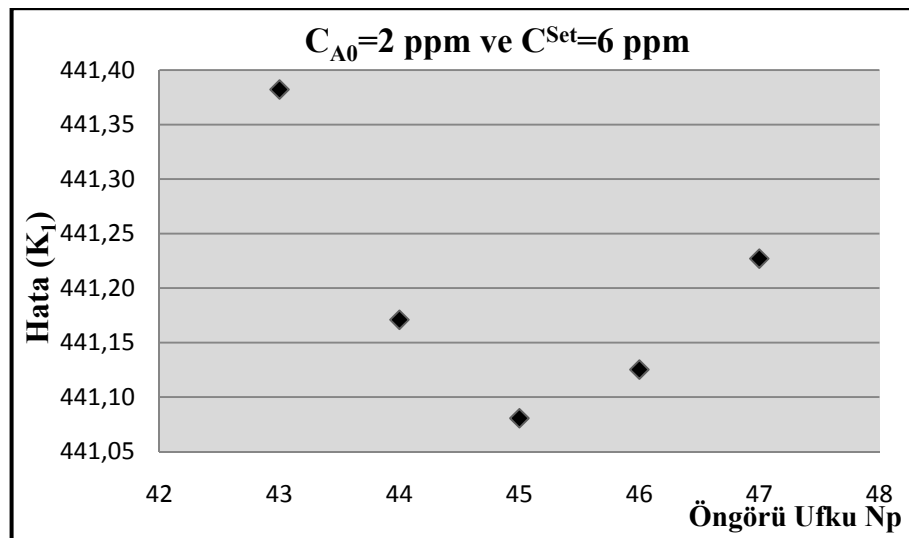
Optimizasyon ile belirlediğimiz sınırlar içerisinde dört parametre için en uygun değerler hesaplatıldı. Bu değerlerin gerçekten optimum olup olmadığını '**Duyarlılık Testi**' kullanılarak simülasyon deneyleriyle doğruluğu araştırıldı.

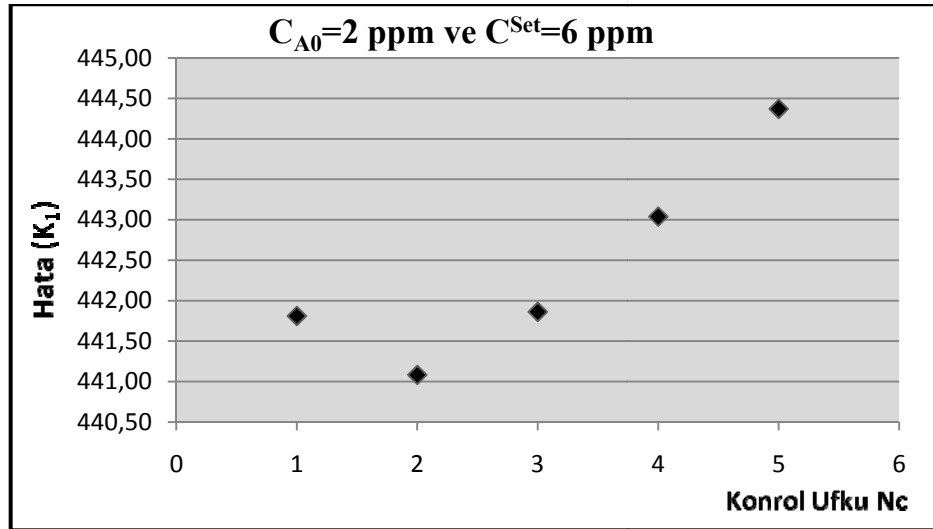
Duyarlılık Testleri

I. Minimum K_1 için Duyarlılık Deneyleri

Tablo 6.3 $C_{A0}=2$, $C^{Set}=6$ için minimum K_1 'e göre N_p ve N_c duyarlılık testi

N_p	N_c	C_f	C_w	Minimum K_1	K_2
45	2	0,1	0,354	441,081	7951
46	2	0,1	0,354	441,125	7964
47	2	0,1	0,354	441,227	7980
44	2	0,1	0,354	441,171	7940
43	2	0,1	0,354	441,382	7934
45	2	0,1	0,354	441,081	7951
45	1	0,1	0,354	441,810	8019
45	3	0,1	0,354	441,860	7982
45	4	0,1	0,354	443,038	8056
45	5	0,1	0,354	444,371	8115

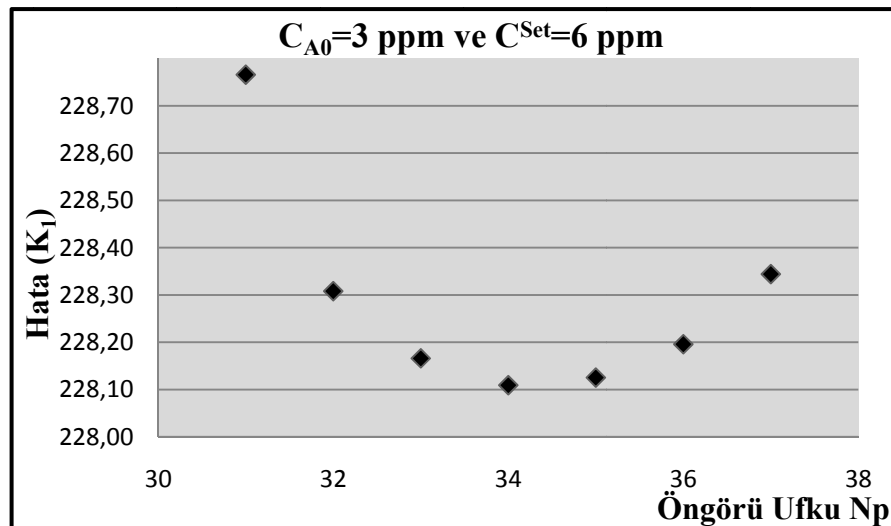
**Grafik 6.7** N_p için duyarlılık testi ($C_{A0}=2$ ve $C^{Set}=6$)



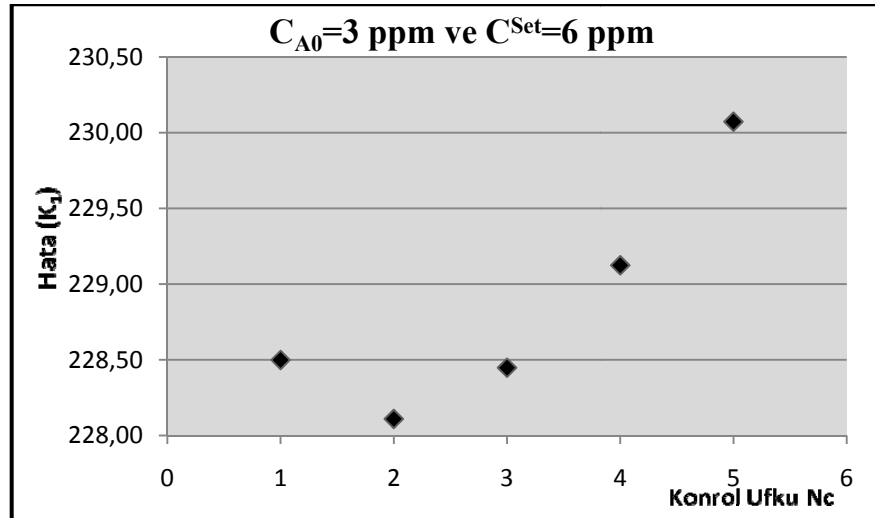
Grafik 6.8 N_c için duyarlılık testi ($C_{A0}=2$ ve $C^{Set}=6$)

Tablo 6.4 $C_{A0}=3$, $C^{Set}=6$ için minimum K_1 'e göre N_p ve N_c duyarlılık testi

N_p	N_c	C_f	C_w	Minimum K_1	K_2
34	2	0,101	0,155	228,109	3833
35	2	0,101	0,155	228,125	3835
36	2	0,101	0,155	228,196	3840
37	2	0,101	0,155	228,344	3850
33	2	0,101	0,155	228,166	3836
32	2	0,101	0,155	228,308	3848
31	2	0,101	0,155	228,766	3891
34	2	0,101	0,155	228,109	3833
34	1	0,101	0,155	228,499	3870
34	3	0,101	0,155	228,447	3856
34	4	0,101	0,155	229,124	3912
34	5	0,101	0,155	230,072	3998



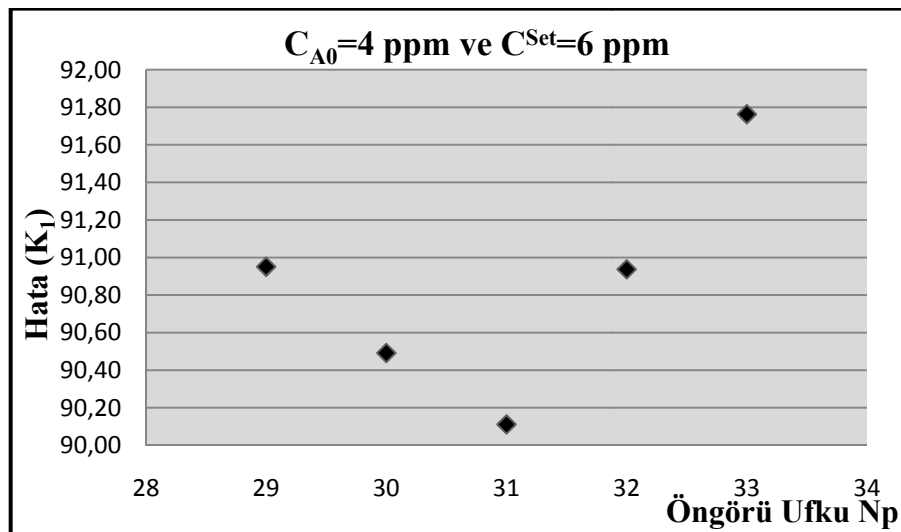
Grafik 6.9 N_p için duyarlılık testi ($C_{A0}=3$ ve $C^{Set}=6$)



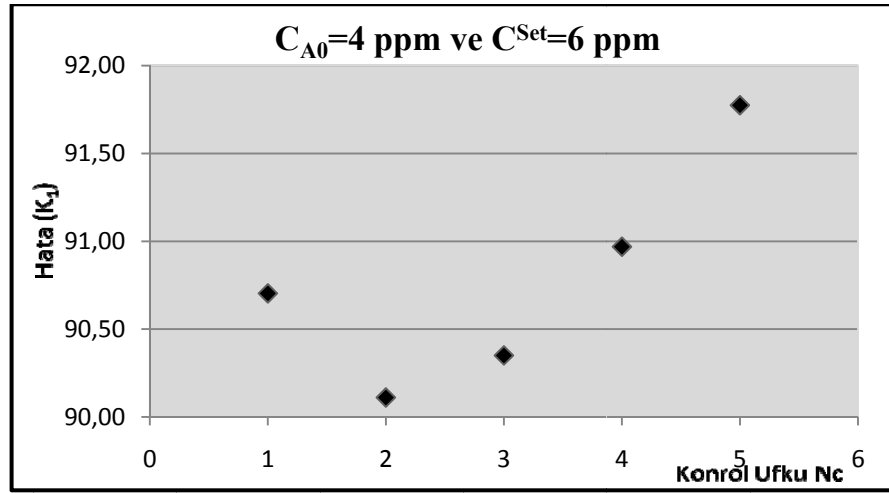
Grafik 6.10 N_c için duyarlılık testi ($C_{A0}=3$ ve $C^{Set}=6$)

Tablo 6.5 $C_{A0}=4$, $C^{Set}=6$ için minimum K_1 'e göre N_p ve N_c duyarlılık testi

N_p	N_c	C_f	C_w	Minimum K_1	K_2
31	2	0,01	0,055	90,111	1564
32	2	0,01	0,055	90,937	1674
33	2	0,01	0,055	91,763	1770
30	2	0,01	0,055	90,491	1626
29	2	0,01	0,055	90,951	1698
31	2	0,01	0,055	90,111	1564
31	1	0,01	0,055	90,7036	1611
31	3	0,01	0,055	90,3503	1599
31	4	0,01	0,055	90,9691	1650
31	5	0,01	0,055	91,7747	1725



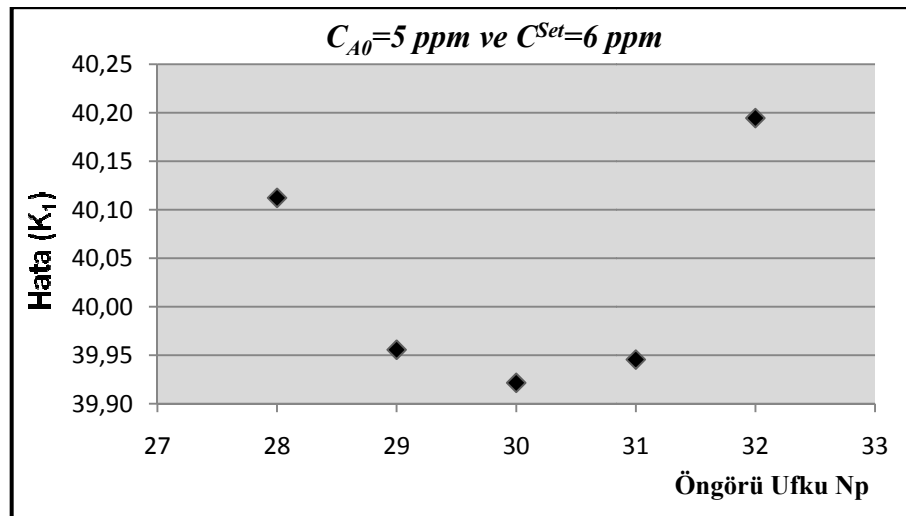
Grafik 6.11 N_p için duyarlılık testi ($C_{A0}=4$ ve $C^{Set}=6$)



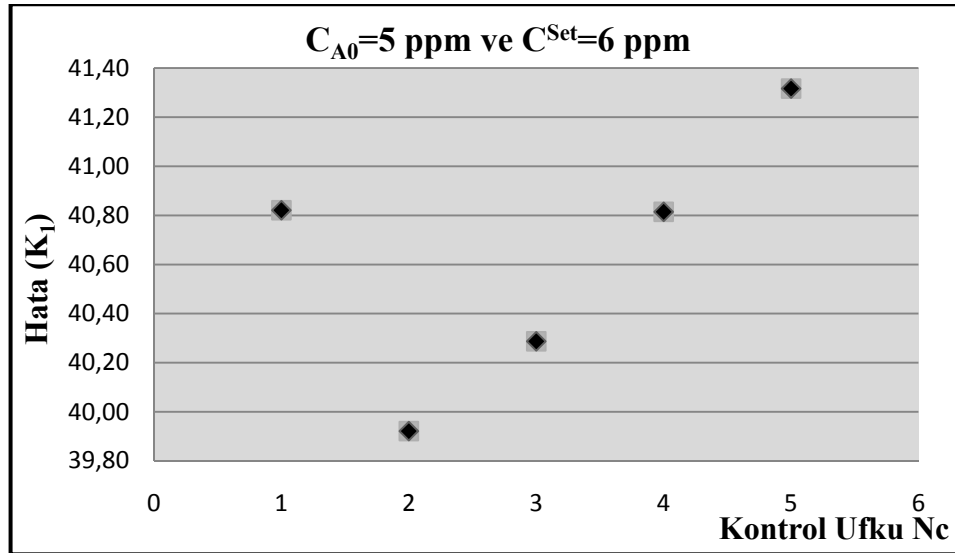
Grafik 6.12 N_c için duyarlılık testi ($C_{A0}=4$ ve $C^{Set}=6$)

Tablo 6.6 $C_{A0}=5$, $C^{Set}=6$ için minimum K_1 'e göre N_p ve N_c duyarlılık testi

N_p	N_c	C_f	C_w	Minimum K_1	K_2
30	2	0,976	0,014	39,922	2606
31	2	0,976	0,014	39,946	2608
32	2	0,976	0,014	40,195	2645
29	2	0,976	0,014	39,9556	2614
28	2	0,976	0,014	40,1122	2644
30	2	0,976	0,014	39,922	2606
30	1	0,976	0,014	40,8208	2923
30	3	0,976	0,014	40,2871	2593
30	4	0,976	0,014	40,8144	2629
30	5	0,976	0,014	41,3162	2675



Grafik 6.13 N_p için duyarlılık testi ($C_{A0}=5$ ve $C^{Set}=6$)



Grafik 6.14 N_c için duyarlılık testi ($C_{A0}=5$ ve $C^{Set}=6$)

Yukarıda verilen tablo ve grafikler K_1 'in minimum yapıldığı değerlere karşılık gelen optimum DMC parametreleridir. Benzer şekilde K_2 için de aynı uygulama yapılarak, K_1 ve K_2 'nin performanslarına göre deneylerde kullanılacak DMC parametreleri tespit edilir. Tablo 6.7'de K_2 için optimum DMC parametrelerinin sonuçları verilmiştir;

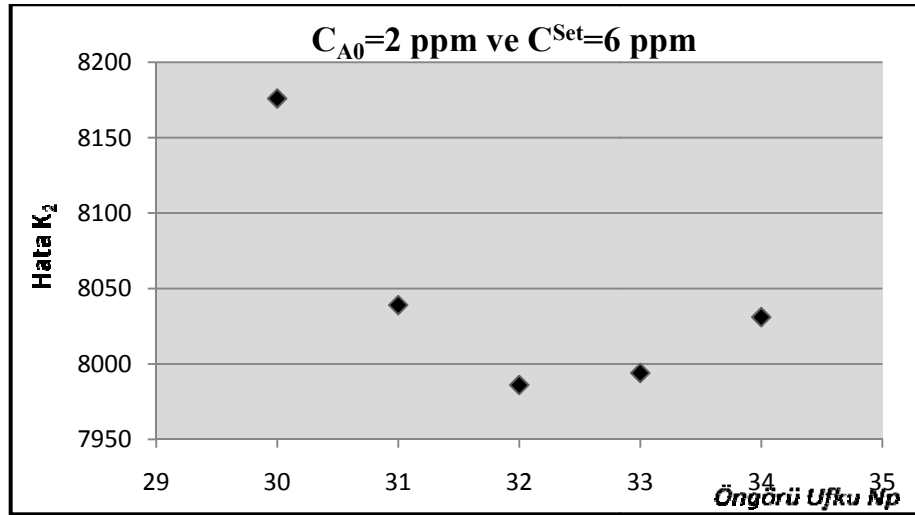
Tablo 6.7 Minimum K_2 'e göre optimum N_p ve N_c parametreleri

C_{A0} (ppm)	N_p	N_c	C_f	C_w	K_1	Minimum K_2
2	32	2	0,885	0,216	443,478	7986
3	20	2	0,897	0,043	229,458	3912
4	17	2	0,001	0,029	101,135	2943
5	14	2	0,949	0,01	50,333	3980

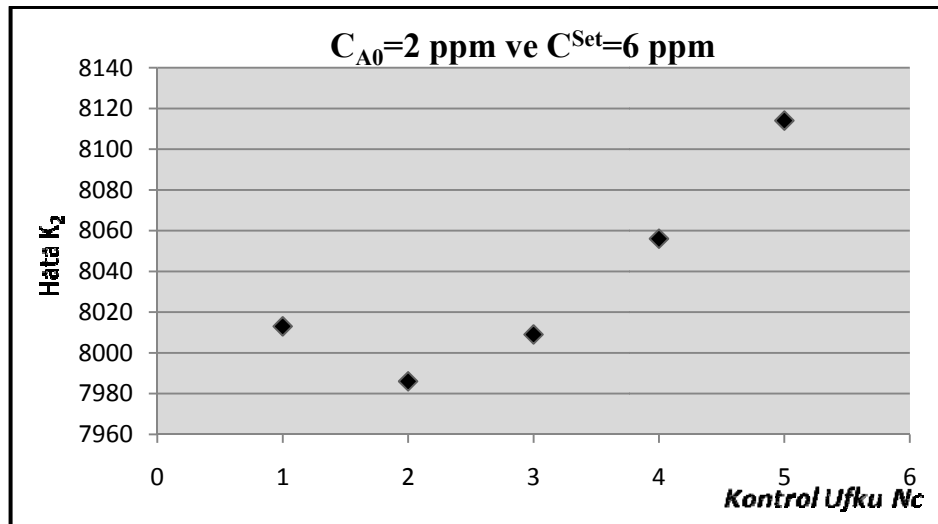
II. Minimum K_2 için Duyarlılık Deneyleri

Tablo 6.8 $C_{A0}=2$, $C^{Set}=6$ için minimum K_2 'e göre N_p ve N_c duyarlılık testi

N_p	N_c	C_f	C_w	K_1	Minimum K_2
32	2	0,885	0,216	443,478	7986
33	2	0,885	0,216	443,016	7994
34	2	0,885	0,216	443,118	8031
31	2	0,885	0,216	444,812	8039
30	2	0,885	0,216	447,108	8176
32	2	0,885	0,216	443,478	7986
32	1	0,885	0,216	443,15	8013
32	3	0,885	0,216	444,295	8009
32	4	0,885	0,216	445,248	8056
32	5	0,885	0,216	446,221	8114



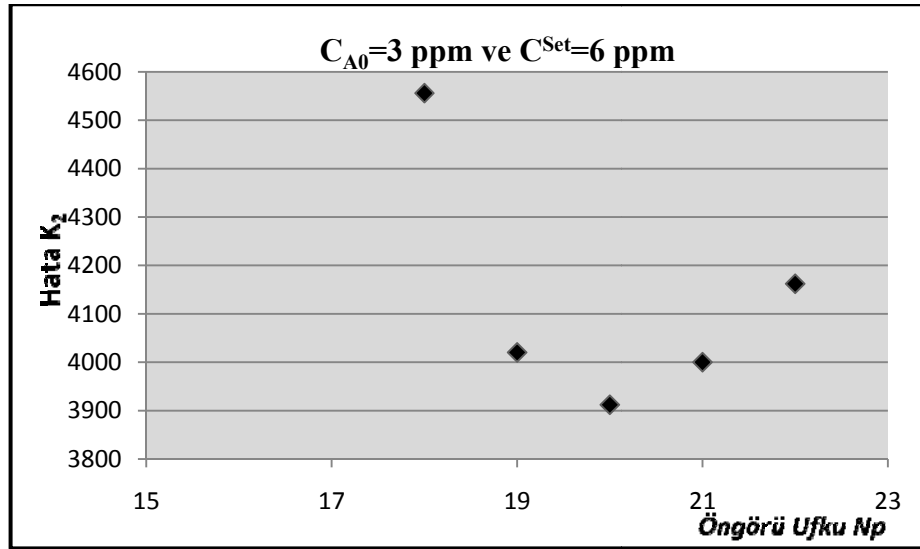
Grafik 6.15 N_p için duyarlılık testi ($C_{A0}=2$ ve $C^{Set}=6$)



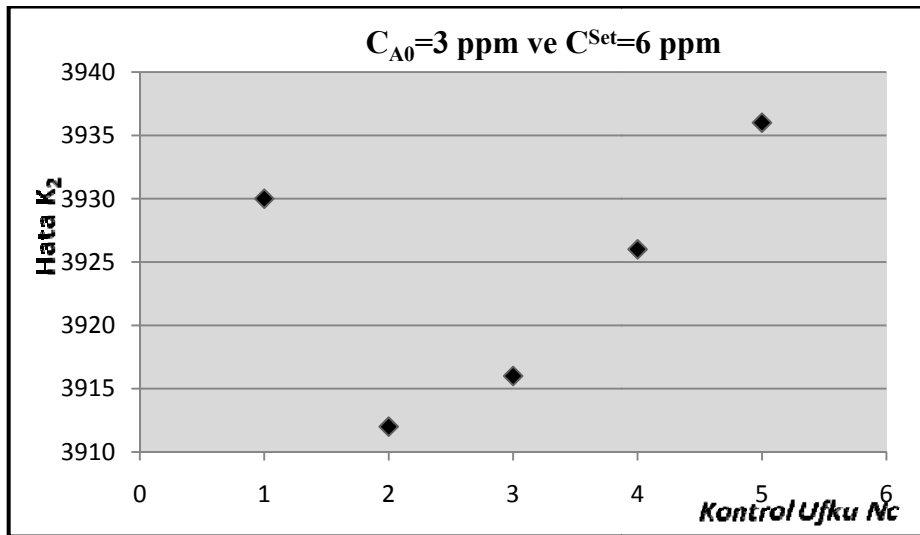
Grafik 6.16 N_c için duyarlılık testi ($C_{A0}=2$ ve $C^{Set}=6$)

Tablo 6.9 $C_{A0}=3$, $C^{Set}=6$ için minimum K_2 'e göre N_p ve N_c duyarlılık testi

N_p	N_c	C_f	C_w	K_1	Minimum K_2
20	2	0,897	0,043	229,458	3912
21	2	0,897	0,043	230,442	4000
22	2	0,897	0,043	232,43	4162
19	2	0,897	0,043	230,782	4020
18	2	0,897	0,043	236,508	4556
20	2	0,897	0,043	229,458	3912
20	1	0,897	0,043	229,634	3930
20	3	0,897	0,043	229,586	3916
20	4	0,897	0,043	229,744	3926
20	5	0,897	0,043	229,887	3936



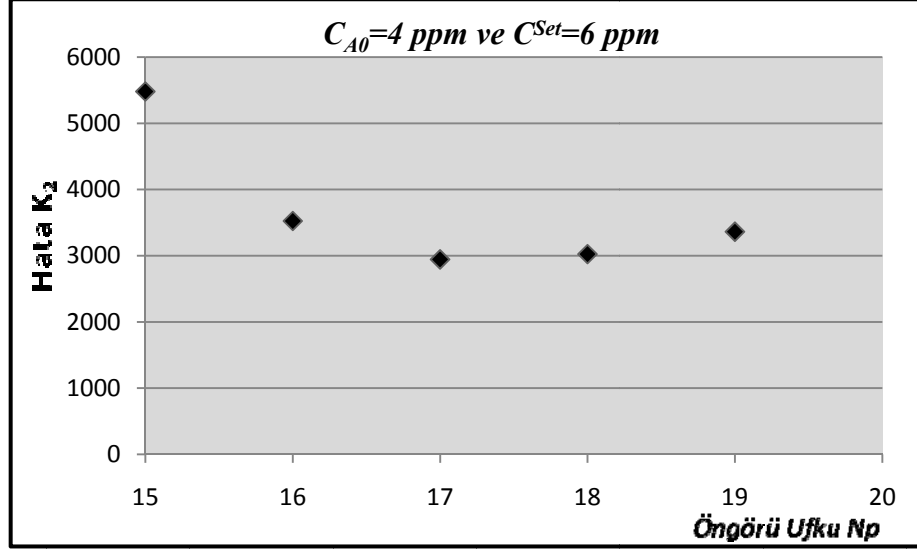
Grafik 6.17 N_p için duyarlılık testi ($C_{A0}=3$ ve $C^{Set}=6$)



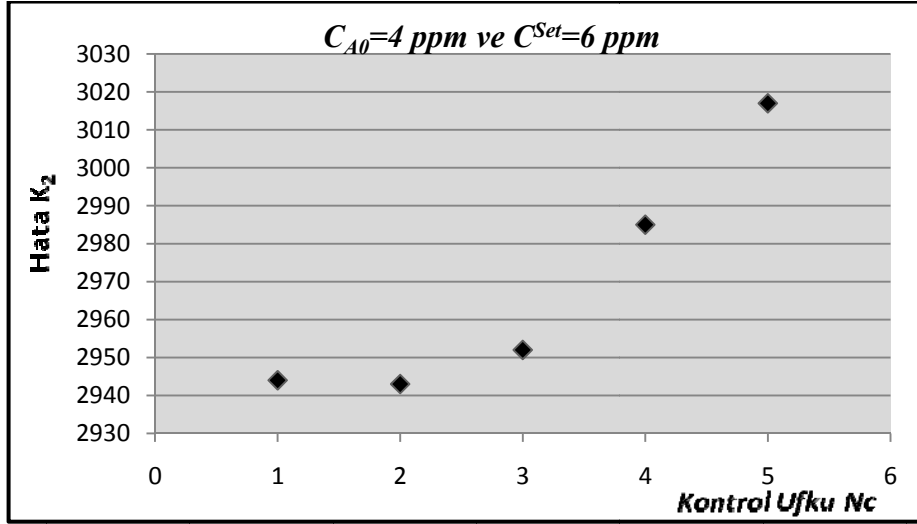
Grafik 6.18 N_c için duyarlılık testi ($C_{A0}=3$ ve $C^{Set}=6$)

Tablo 6.10 $C_{A0}=4$, $C^{Set}=6$ için minimum K_2 'e göre N_p ve N_c duyarlılık testi

N_p	N_c	C_f	C_w	K_1	Minimum K_2
17	2	0,001	0,029	101,135	2943
18	2	0,001	0,029	99,5476	3025
19	2	0,001	0,029	100,433	3361
16	2	0,001	0,029	108,779	3525
15	2	0,001	0,029	125,653	5480
17	2	0,001	0,029	101,135	2943
17	1	0,001	0,029	100,584	2944
17	3	0,001	0,029	101,631	2952
17	4	0,001	0,029	102,225	2985
17	5	0,001	0,029	102,71	3017



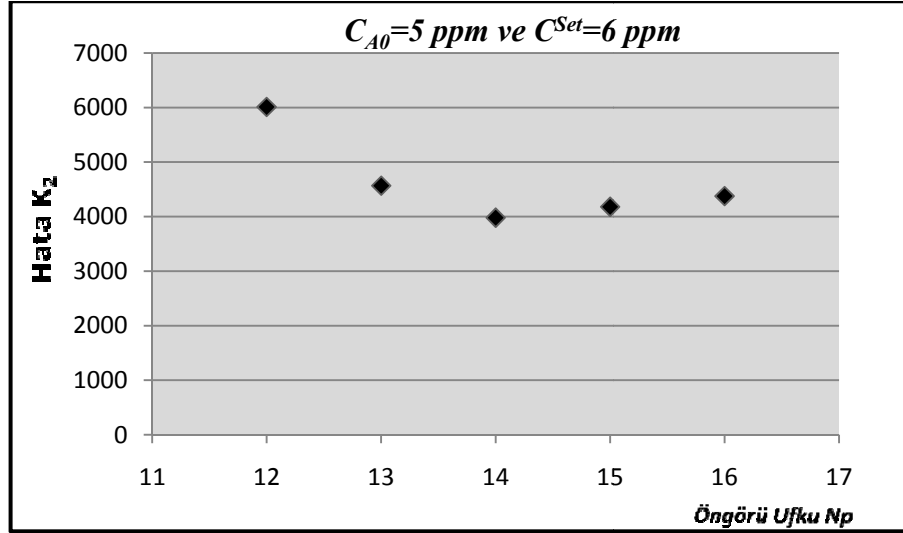
Grafik 6.19 N_p için duyarlılık testi ($C_{A0}=4$ ve $C^{Set}=6$)



Grafik 6.20 N_c için duyarlılık testi ($C_{A0}=4$ ve $C^{Set}=6$)

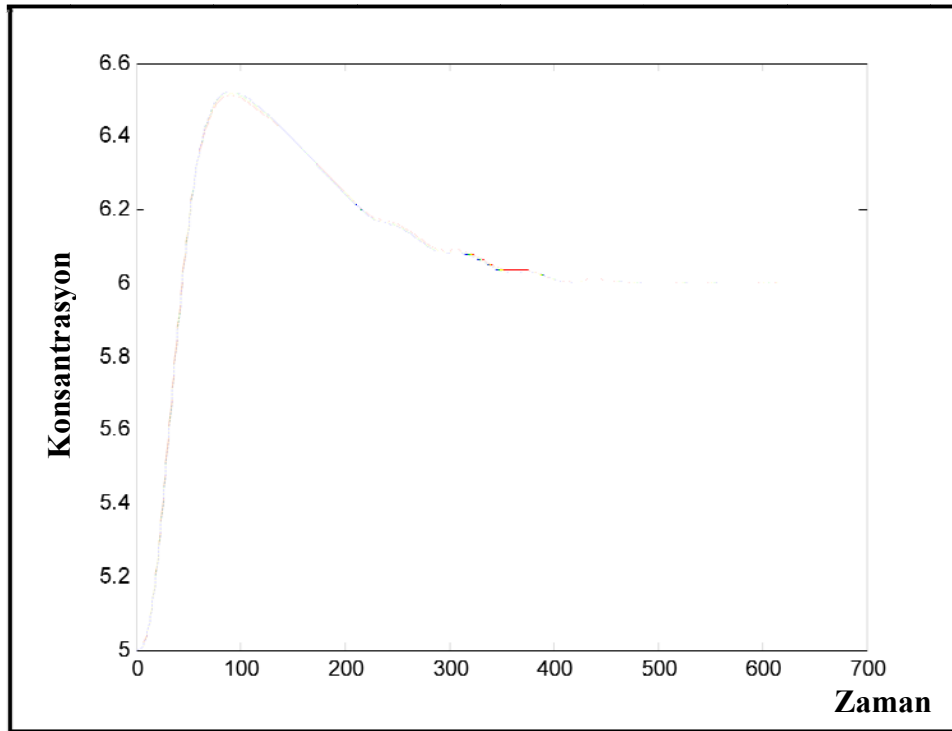
Tablo 6.11 $C_{A0}=5$, $C^{Set}=6$ için minimum K_2 'e göre N_p ve N_c duyarlılık testi

N_p	N_c	C_f	C_w	K_1	Minimum K_2
14	2	0,949	0,01	50,333	3980
15	2	0,949	0,01	49,3964	4178
16	2	0,949	0,01	49,1177	4377
13	2	0,949	0,01	56,075	4568
12	2	0,949	0,01	66,7419	6011
14	2	0,949	0,01	50,333	3980
14	1	0,949	0,01	50,2052	4030
14	3	0,949	0,01	50,4961	3961
14	4	0,949	0,01	50,7248	3967
14	5	0,949	0,01	50,8958	3979



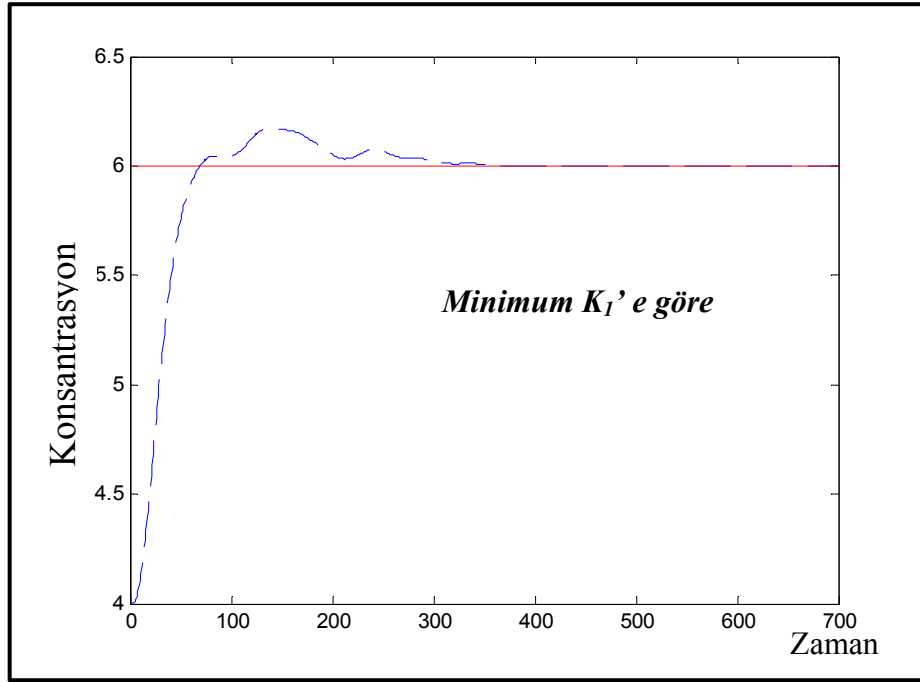
Grafik 6.21 N_p için duyarlılık testi ($C_{A0}=5$ ve $C^{Set}=6$)

Belli kısıtlamalar içerisinde hesaplanan değerin optimum olup olmadığını test etmek için uygulanan duyarlılık testine göre, son denemede elde edilen optimum kontrol ufku 'nun üst değerlerinde, minimum K_2 az bir farklılıkla küçük çıkmaktadır. Bunun kontrol performansına etkisi görmek için her bir kontrol ufku değerleri ile birlikte çizdirilirse; bütün deneylerin üst üste örtüştüğü ve optimum kontrol ufkunun 2 olarak seçilmesinde bir sakıncanın olmadığı görüldü. Aşağıdaki grafikte, optimum öngörü ufku ile farklı kontrol ufku (2,3,4 ve 5) değerleri başlangıç konsantrasyonu 5ppm ve set noktası 6ppm için çizdirildi;

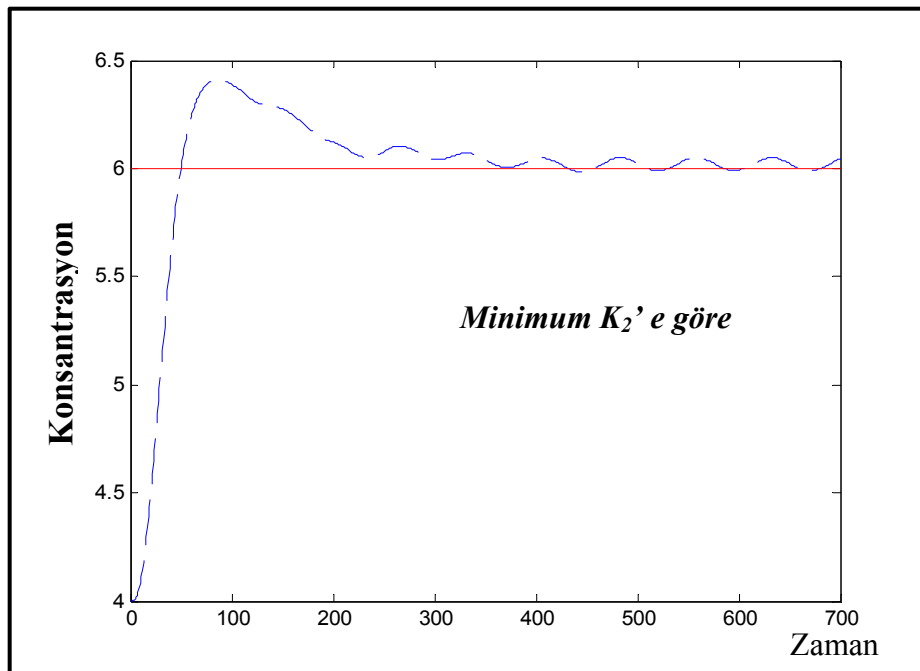


Grafik 6.22 N_c : 2,3,4 ve 5 için Simülasyon Deneyleri

Bu aşamada, hesaplanan K_1 ve K_2 'nin optimum değerleri ile yapılan simülasyon deneylerinde en iyi performansı gösteren değerler DMC parametresi olarak seçilir. Yapılan Simülasyon deneylerinde minimum K_1 ile sağlanan DMC parametreleri minimum K_2 ile sağlanan DMC parametrelerine göre performansının daha iyi olduğu görüldü. $C_{A0}=4$ ppm ve $C^{set}=6$ ppm simülasyon deneyleri grafik 6.23 ve 6.24'de verilmiştir;



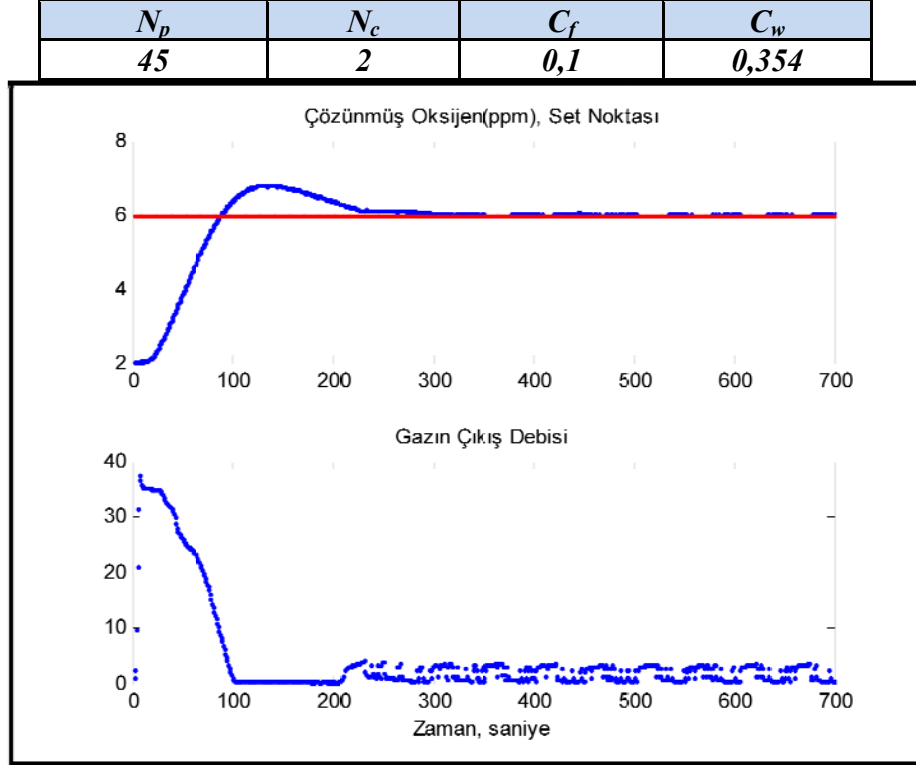
Grafik 6.23 Minimum K_1 'e göre Simülasyon Deneyi ($C_{A0}=4$, $C^{Set}=6$)



Grafik 6.24 Minimum K_2 'e göre Simülasyon Deneyi ($C_{A0}=4$, $C^{Set}=6$)

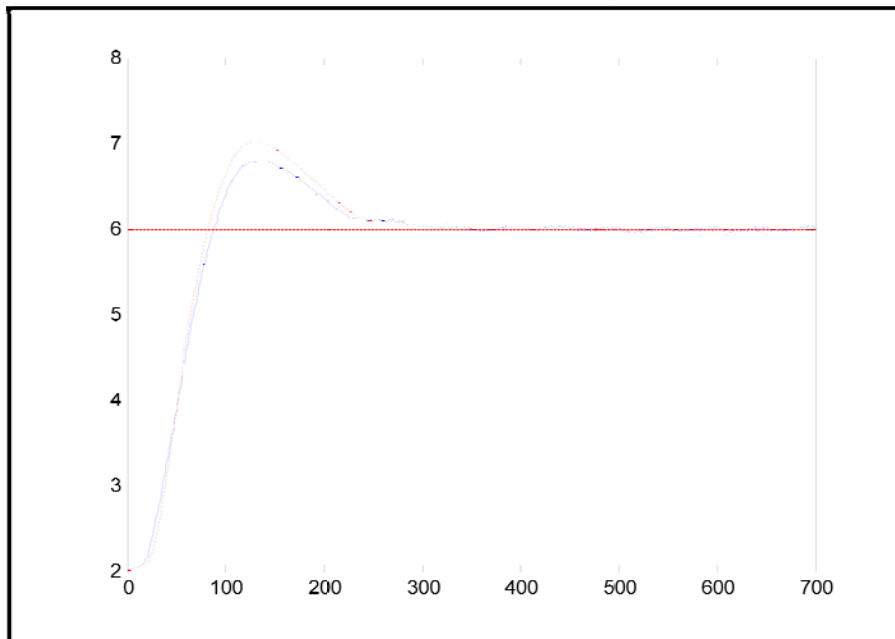
6.1.4 Optimum DMC Parametreleriyle Kontrol Deneyi

Son olarak başlangıç konsantrasyonu 2 ppm olan optimum DMC parametreleri kullanılarak, Laboratuarda deney yapıldı ve Simülasyon deneyi ile karşılaştırıldı. Deney-Simülasyon uyumunun iyi olduğu görüldü. Deneyel kontrol çalışması için grafik 6.25;



Grafik 6.25 Optimum DMC parametreleriyle Deneyel Çalışma ($C_{A0}=2$, $C^{Set}=6$)

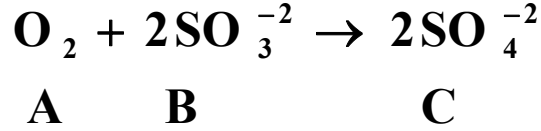
Deneyel-Simülasyon Grafiği



Grafik 6.26 Optimum DMC parametreleriyle Deneyel-Simülasyon Çalışması ($C_{A0}=2$, $C^{Set}=6$)

6.2 SODYUM SÜLFİT-OKSİJEN REAKSİYONUNDA ÇÖZÜNMÜŞ OKSİJEN KONSANTRASYONU KONTROLÜ

6.2.1 Reaksiyon Kinetiğinin Belirlenmesi



Fiziksel Absorbsiyona benzer şekilde sadece reaksiyon kinetiğinin ilave edilmesiyle Na₂SO₃-O₂ reaksiyona için model (2.10) elde edildi. Literatürde Na₂SO₃-O₂ reaksiyonu için kesin genel bir ifade bulunmamaktadır. Belli konsantrasyon aralıklarına göre çeşitli ifadeler sunulmuştur. Bu çalışmada hacımsal kütle transferinin katsayısının (k_La) belirlendiği gibi kinetik ifade için aynı yol izlendi. Na₂SO₃-O₂ reaksiyonunun genel ifadesi;

$$-r_A = k C_A^\gamma C_B^\Theta \quad (6.7)$$

Farklı sabit Gaz debilerinde seyreltik Sodyum Sülfid Konsantrasyonlarında deneysel veriler toplandı. Kontrol çalışacağımızda kullanacağımız Sodyum Sülfid Konsantrasyonu (0,005M) için uygun değerler bulunmaya çalışıldı. Toplanan bu veriler MATLAB ortamında sistemi tanımlayan uygun k, α, β değerleri bulundu. Bununla ilgili tablo 6.12 şu şekildedir;

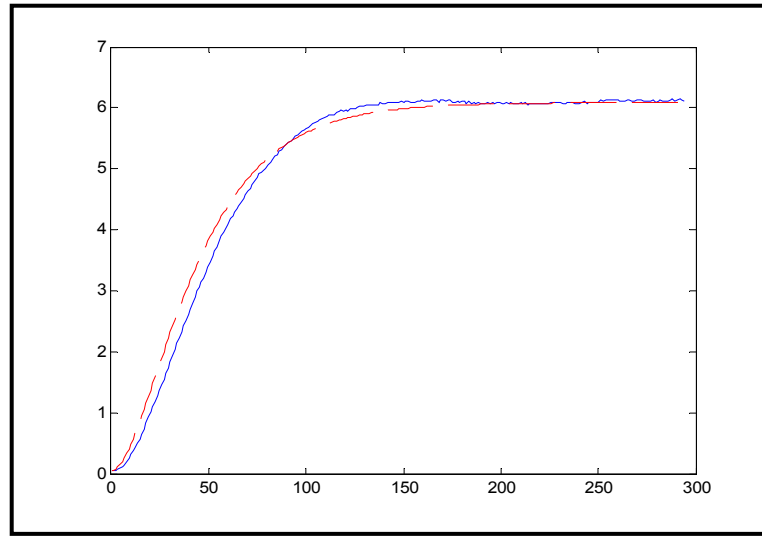
Tablo 6.12 Kinetik ifadenin tespitindeki regresyon sonuç tablosu

<i>Na₂SO₃ (M)</i>	<i>k(1/s)</i>	<i>γ</i>	<i>Θ</i>	<i>Sabit Gaz Debisi cm³/s</i>
0,0044	0,0055	1	0	16,605
0,0044	0,0057	1	0	28,429
0,005	0,0080	1	0	8,770
0,0044	0,0085	1	0	22,595
0,005	0,0089	1	0	34,656

Yapılan Regresyona göre deney sistemimizde, reaksiyon Sodyum Sülfite konsantrasyonuna göre sıfırıncı derece, Oksijen konsantrasyonuna göre birinci derece ve hız sabiti ise $0,0085 \text{ s}^{-1}$ belirlenmiştir.

Belirlenen bu değerler, deneysel veriler ile karşılaştırıldı. Sıcaklık olarak 19°C , $100 \text{ cm}^3/\text{s}$ çözelti debisi ve $34,656 \text{ cm}^3/\text{s}$ gaz debisinde yapılan deney sonucunda elde edilen veriler ile model tek bir grafikte çizdirildi ve uyum gözlemlendi. Model validasyon grafiği;

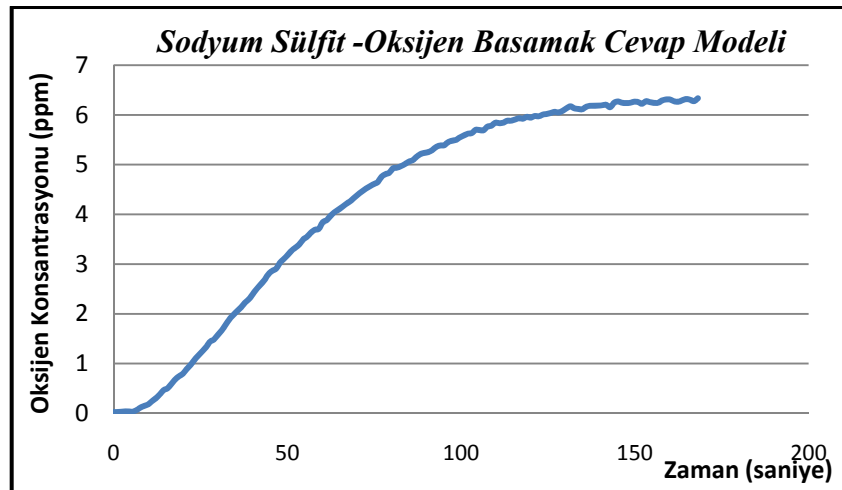
$$r_A = 0,0085 C_A \quad (6.8)$$



Grafik 6.27 Model Validasyon

6.2.2 Sodyum Sülfite-Oksijen Reaksiyonu için Basamak Cevap Modelinin Belirlenmesi

Sodyum Sülfite çözeltisi için basamak cevap modeli, $0,0044\text{M}$ çözeltiye kararlı hale gelinceye kadar $28,43 \text{ cm}^3/\text{s}$ hava sürekli olarak sürekli karıştırılmalı tank reaktöre verildi. Sıcaklık 19°C , çözelti debisi $100 \text{ cm}^3/\text{dak}$ olarak ayarlandı.



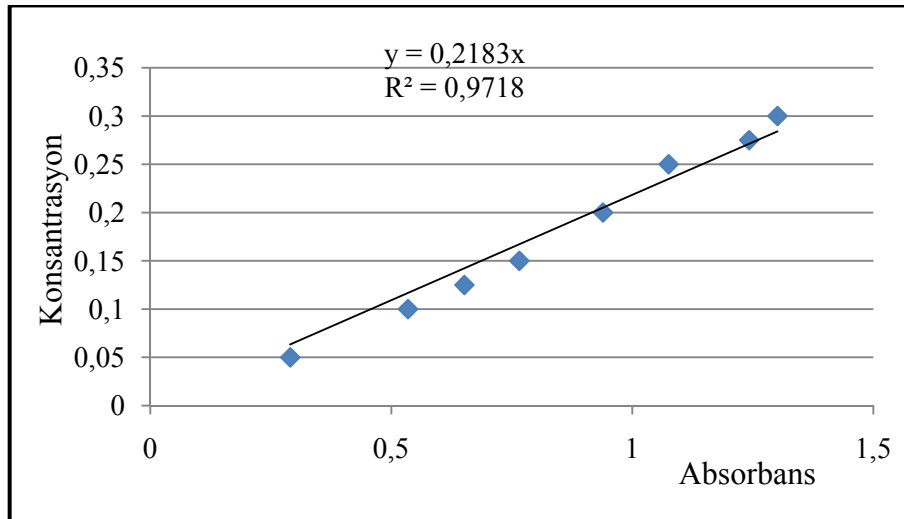
Grafik 6.28 Basamak Cevap Modeli

Sülfite Konsantrasyonunun Analizi

Sülfite Çözeltisi 0,005M olarak hazırlanıp kontrol deneylerinde kullanıldı. Ancak, Sodyum Sülfite hazırlanan su içerisindeki çözünmüş oksijen ile reaksiyona girerek istenilen çözelti konsantrasyonundan daha az bir konsantrasyonda hazırlanmasına sebep olmaktadır. Bu durumun önüne geçmek amacıyla, çözünmüş oksijen probu kullanılarak hazırlanacak saf su içerisindeki oksijen konsantrasyonu belirlenip bunu sıfırlayacak şekilde Sodyum Sülfite fazlası ilave edildi.

Yapılan çalışmada, yukarıda bahsedilen işlemler gerçekleştirildikten sonra UV spektrofotometre cihazı kullanılarak hazırlanan çözeltinin konsantrasyonu belirlendi.

UV cihazı kullanılarak Sülfite konsantrasyonunun tespiti, literatürde [28] 260 nm dalga boyunda iyi sonuçlar alındığı belirtilmektedir. Farklı Sülfite konsantrasyonları, laboratuarda bulunan UV cihaz analiz edildi ve aşağıda verilen absorbans-konsantrasyon ilişkisi bulundu.



Grafik 6.29 UV cihazında Sülfite konsantrasyonu için Regresyon Sonucu

Sülfite Deney Şartları

Sodyum Sülfite için kontrol çalışmaları 20 °C’de, 500 rpm karıştırıcı hızında ve 100 cm³/dak çözelti debisinde gerçekleştirildi. Sodyum Sülfite konsantrasyonu 0,005M olarak hazırlandı ve UV cihazı çalışmanın başlangıcında kontrol edildi.

6.2.3 Optimum DMC Parametrelerin Belirlenmesi

Sodyum Sülfid reaksiyonunda çözünmüş Oksijenin kontrolü için, fiziksel absorpsiyon çalışmalarında gerçekleştirilen safhaların benzeri burada da uygulandı. Fiziksel Absorpsiyon çalışmalarında, minimum K_1 için yapılan optimizasyon, minimum K_2 için yapılan optimizasyon değerlerinin performansına göre iyi olduğu sonucuna varılmıştır. Bu yüzden Sülfid reaksiyonu için Oksijen kontrol deneyleri, minimum K_1 'e göre DMC parametreleri hesaplatıldı ve deneylerde kullanıldı.

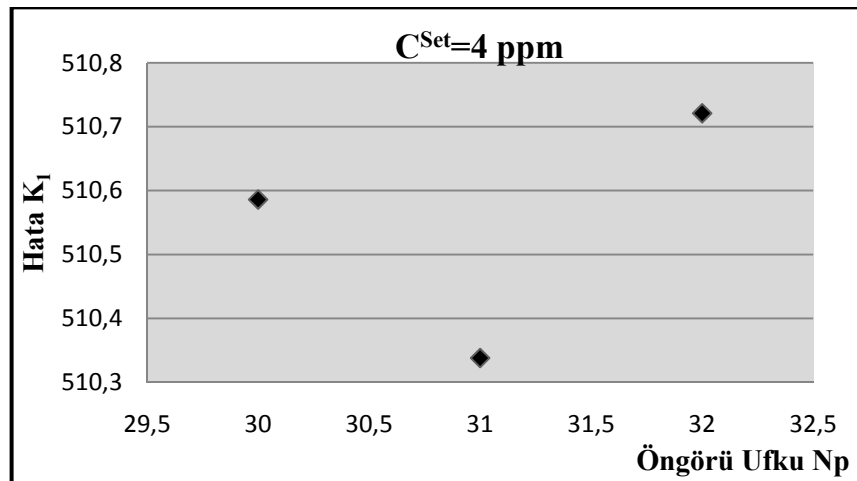
Tablo 6.13 Minimum K_1 'e göre optimum N_p ve N_c parametreleri

<i>Set Noktası</i>	N_p	N_c	C_f	C_w	<i>Minimum K_1</i>
4	31	2	0,001	0,096	510,338
5	40	2	0,55	0,55	908,861

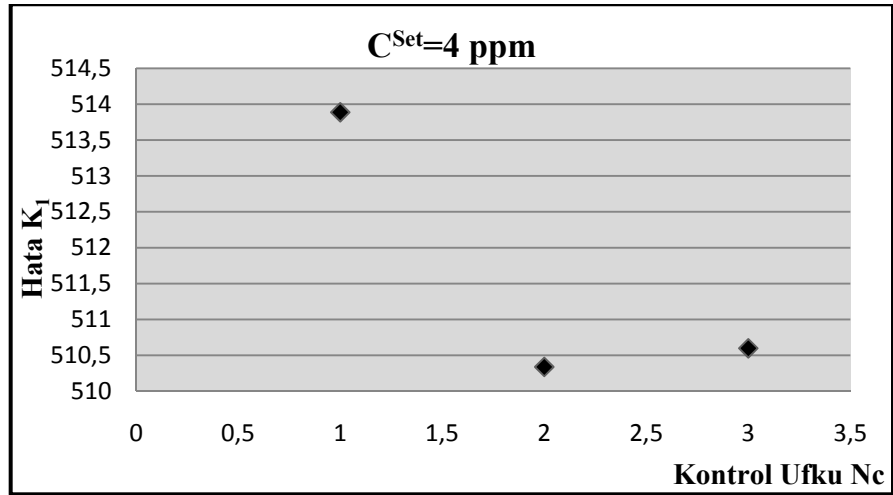
Duyarlılık Testleri

Tablo 6.14 $C^{Set}=4$ için minimum K_1 'e göre N_p ve N_c duyarlılık testi

N_p	N_c	C_f	C_w	<i>Minimum K_1</i>
31	2	0,001	0,096	510,338
30	2	0,001	0,096	510,586
32	2	0,001	0,096	510,721
31	2	0,001	0,096	510,338
31	1	0,001	0,096	513,889
31	3	0,001	0,096	510,598



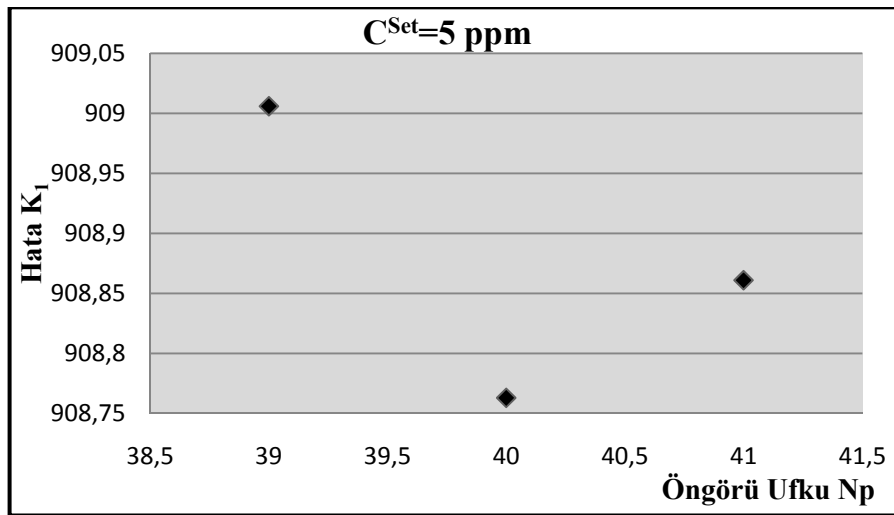
Grafik 6.30 N_p için duyarlılık testi ($C^{Set}=4$)



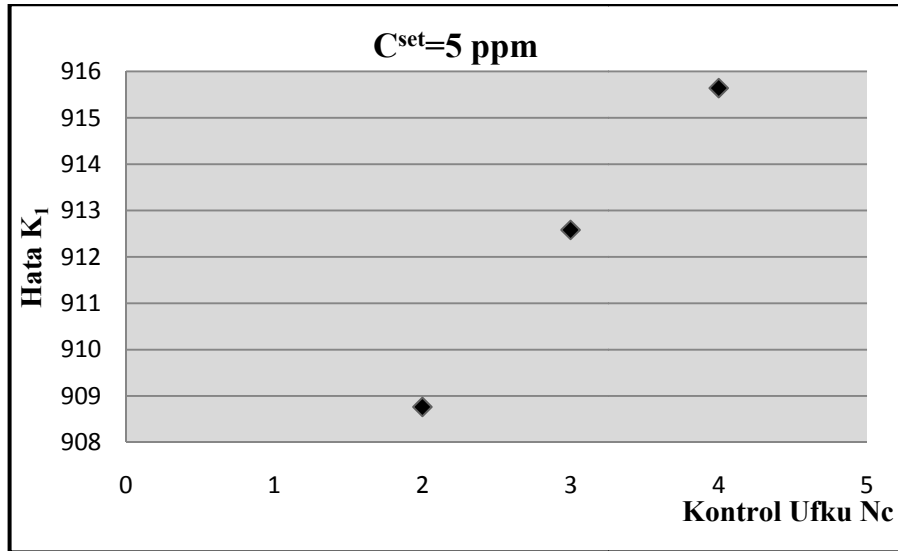
Grafik 6.31 Nc için duyarlılık testi ($C^{Set}=4$)

Tablo 6.15 $C^{Set}=5$ için minimum K₁'e göre Np ve Nc duyarlılık testi

N _p	N _c	C _f	C _w	Minimum K ₁
40	2	0,55	0,55	908,763
39	2	0,55	0,55	909,006
41	2	0,55	0,55	908,861
40	2	0,55	0,55	908,763
40	3	0,55	0,55	912,58
40	4	0,55	0,55	915,639



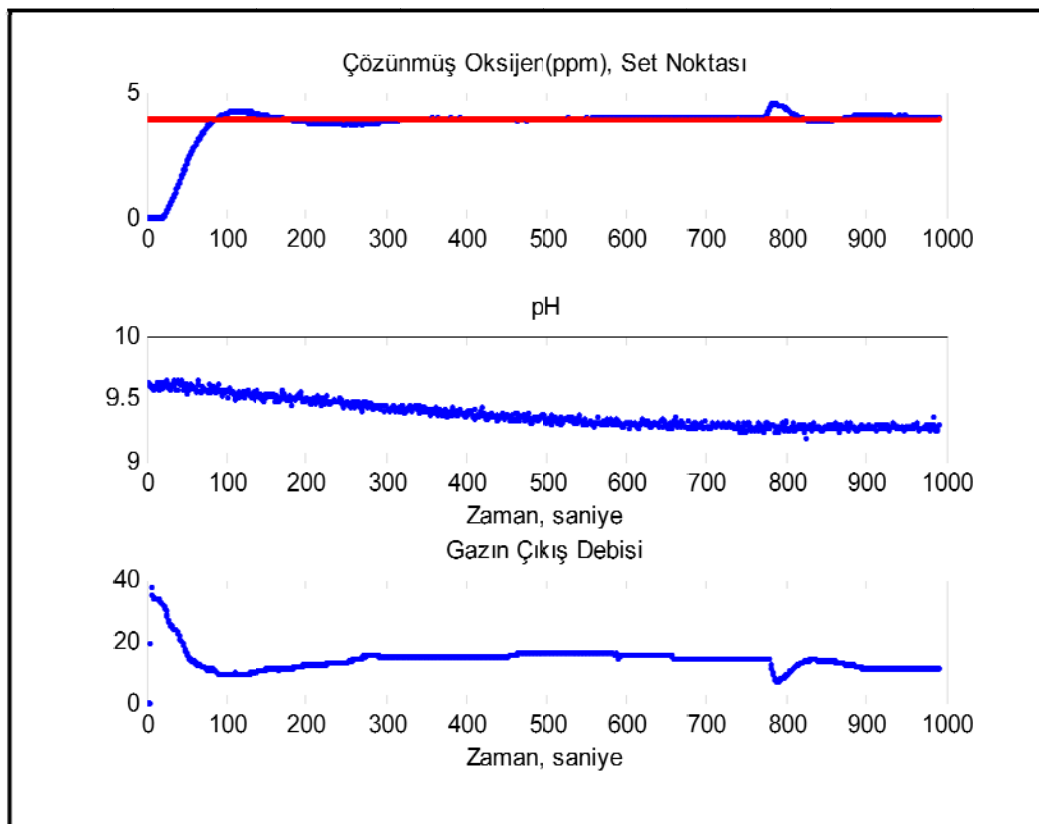
Grafik 6.32 Np için duyarlılık testi ($C^{Set}=5$)



Grafik 6.33 N_c için duyarlılık testi ($C^{Set}=5$)

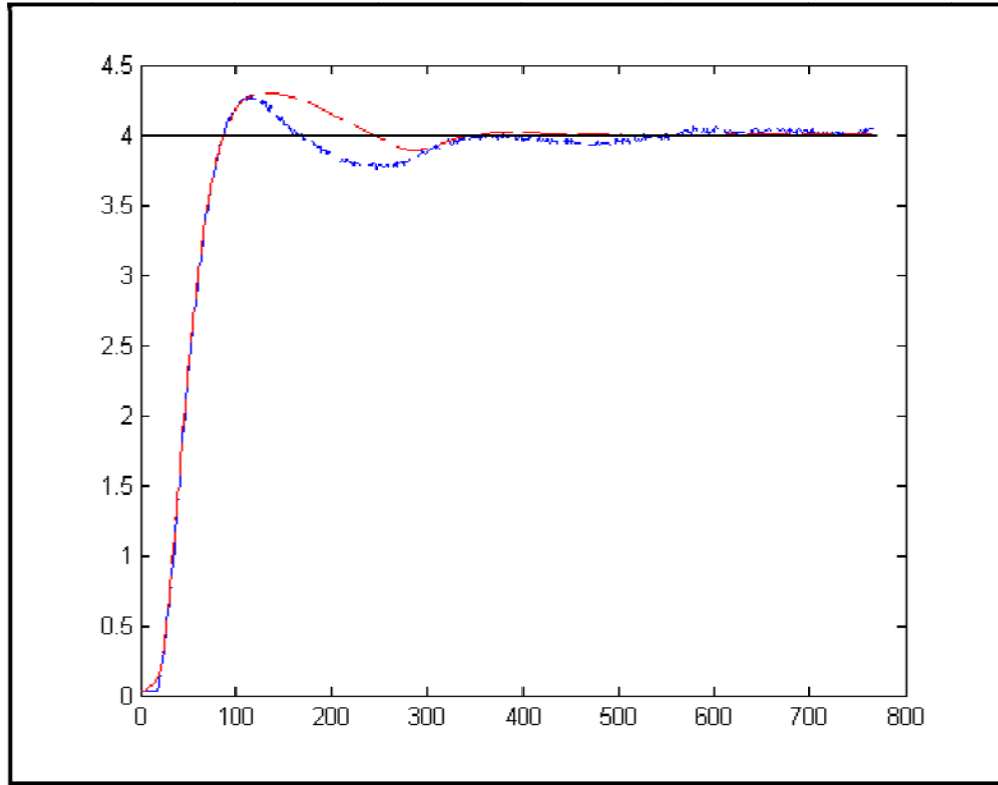
6.2.4 Optimum DMC Parametreleriyle Kontrol Deneyi

N_p	N_c	C_f	C_w
31	2	0,001	0,096

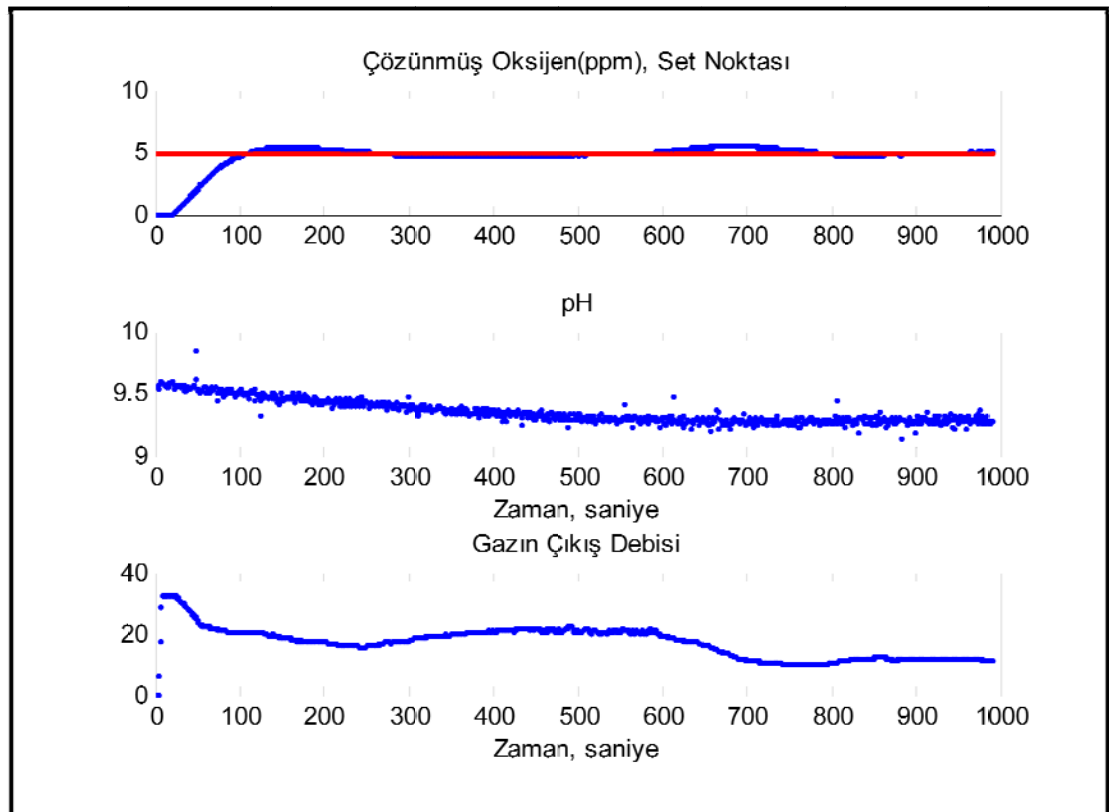


Grafik 6.34 Optimum DMC parametreleriyle Deneysel Çalışma ($C^{Set}=4$)

Laboratuarda $C_{set}=4$ 'e göre deney-simülasyon uyumu;



Grafik 6.35 Optimum DMC parametreleriyle Deneysel-Simülasyon Çalışması ($C^{Set}=4$)



Grafik 6.36 Optimum DMC parametreleriyle Deneysel Çalışma ($C^{Set}=5$)

6.3 SONUÇLAR

Bir Sürekli Karıştırılmalı Tank Reaktörde, sadece fiziksel absorpsiyonun olduğu durum ve kimyasal reaksiyonlu ($\text{Na}_2\text{SO}_3\text{-O}_2$) olduğu durum için reaktördeki çözünmüş Oksijenin gazının konsantrasyonu Model Öngörülü Kontrol Algoritmasına dayanan Dinamik Matris Kontrol ile başarılı bir şekilde kontrol edildi.

Kontrol yapılacak deney sisteminde Reaktörün boyutlandırılması; Çap:10 cm, Sıvı Yüksekliği:10cm olduğu durumlar göz önüne alınarak gerçekleştirildi. Gaz dağıtıcı reaktörün tabanına (Çap:2,5 cm ve Reaktörün tabanından yüksekliği 2,5 cm), karıştırıcı (Çap:3,5 cm ve Reaktörün tabanında yüksekliği 3,4 cm) ise gaz dağıtıcının üstüne yerleştirildi.

Reaktöre verilen gazın çalışma debisinin belli sınırlar içerisinde olması gerektiğine ve bu sınırların kontrol performansını etkilediği gözlemlenerek, kontrol deneylerinde minimum ve maksimum gaz debisinin önemli olduğu tespit edildi. Sisteme minimum olarak sürekli gaz verilmesi belli bir offset hatasına neden olduğu görüldü ve en düşük çalışma debisinin sıfır olması gerektiği sonucuna varıldı. Maksimum gaz debisi ise sisteme verilen maksimum sinyal (DAQ kart maksimum 10V gönderebilmektedir) ile sağlandı. Maksimum gaz debisi selenoid valfin çalışma karakteristiği ile değişmektedir. Artan basınç farkı (Bu çalışmada 2 bar ayarlandı) maksimum debiyi arttırmaktadır. Maksimum debinin büyümesi bozucuların etkinini arttırdığı gözlemlendi. Buna göre 7V'a karşılık gelen debide çalışıldığında iyi sonuçlar alındığı görüldü.

Yapılan Deneyler ile simülasyon çalışmalarında, başlangıçta modele çözünmüş oksijen probunun gecikme süresi dahil edilmediğinde, deneysel olarak elde edilen eğri ile simülasyon ortamında elde edilen eğri arasında belli farklılık görüldü. Probonun gecikme süresi ,yapılan deney sonucunda 17 saniye olarak bulundu. Ayrıca, kontrol çalışması sırasında prosesin ölü zamanı da (sinyalin alınması, değerlendirilmesi ve gönderilmesi süreci) önemlidir. Bu yüzden prosesin ölü zamanı tespit edildi ve 1 saniye olarak bulundu. Prosesin ölü zamanı, kontrol ufkunun seçiminde önemlidir. Kontrol ufku daima prosesin ölü zamanından büyük olarak seçilmelidir. Bir diğer karar verilmesi gereken etki ise örneklem zamanıdır. Örneklem zamanı (İki sinyal arasında geçen süre) yine prosesin ölü zamanından büyük olmalıdır. Yaptığımız deneylerde örneklem zamanı 1.1 s olarak belirlendi.

Simülasyon deneylerinde kullanılmak üzere model için gerekli parametreler hesaplandı ve model ile deneysel uyumun başarıyla gerçekleştiği görüldü. MATLAB ortamında deneysel olarak elde edilen veriler ile regresyon yapıldı ve sabit karıştırıcı hızında, Oksijenin Hacımsal Kütle Transfer Katsayısı ($k_L a$) Oksijen kaynağı olarak kullanılan havanın debisine bağlılığı ($k_L a = 1,9 \cdot 10^{-3} \cdot Q^{0,69}$) reaktör sistemi için bulundu ve deneysel veri ile doğrulandı. Ayrıca Sodyum Sülfite-Oksijen reaksiyonu için kinetik ifade benzer şekilde bulunarak, hız sabitinin $k = 0,0085 \text{ s}^{-1}$ olarak alınmasına karar verildi ve reaksiyonun Oksijene göre yalancı birinci derece, Sodyum Sülfite göre ise sıfırıncı dereceden yürüdüğü ($-r_A = 0,0085 \cdot C_A$) bulundu.

Dinamik Matris Kontrol için dizayn parametreleri fiziksel absorpsiyon ve kimyasal reaksiyon durumları için doğrulanan model uyarınca, MATLAB programında simülasyon deneylerinin bir optimizasyon programı içerisine alınarak dal-budak algoritmasına dayalı iki farklı program uygulanarak **ISE** ve **ITSE** indekslerine göre minimum hatayı veren değerler belirlendi. İki programla da aynı **ISE** ve **ITSE** değerleri elde edildi. Belirlenen bu değerlere göre laboratuarda kontrol deneyi yapılarak Deneysel-Simülasyon uygunluğu test edildi ve uyumun iyi olduğu görüldü.

KAYNAKLAR

- [1] Perry's Chemical Engineers' Handbook, Robert H. Perry, Don W. Green
McGraw-Hill Copyright © 2004 The McGraw-Hill Companies
- [2] Lewis, W. K. and Whitman W. G. (1924). Principles of gas absorption, Ind. Eng. Chem., 16, 1215–1220
- [3] Introduction to Chemical Reaction Engineering and Kinetics, by Ronald W. Missen Charles A. Mims, Bradley A. Saville, Toronto, Ontario. May, 1998 *John Wiley & Sons, Inc.*
- [4] Doraiswamy, L.K. and M.M.Sharma. Heterogeneous Reactions: Analysis, Examples and Reactor Design (Wiley Interscience, New York, 1981).
- [5] Smith j.m., Van't Riet . Middleton j. C. Scale-up of Agitated Gas-Liquid Reactors for Mass Transfer, 2nd European Conf. on Mixing, Paper F4-51/66, Cambridge (1977).
- [6] Judat H., Mass transfer gas / liquid - a critical appraisal, Chem.-Ing.-Tech. 54 (1982) 5, p: 520-521
- [7] Panja, Phaneswara Rao D. Measurement of gas-liquid parameters in a mechanically agitated *contactor*, Chem. Engng. J. 52 (1993), p. 121-129
- [8] Zlokarnimk M., Sorption Characteristics for Gas-Liquid Contacting in Mixing Vessels, Adv. Biochem. Eng. 8 (1978), p.133-151
- [9] Westererp K.R., Van Dierendonck L.L., De Kraa J.A., Interfacial areas *in* agitated gas-liquid contactors, Chem. Eng. Sci. 18 (1963), p. 157-176
- [10] Imai Y ., Takei H., Matsumura M., A simple Na₂SO₃ Feeding Method for k_La Measurement in Large-Scale Fermentors, Biotechn. and Bioengng. 29 (1987) 6, p. 982-993
- [11] Martin T. Gas Dispersion with Radial and Hydrofoil Impellers in Fluids with Different Coalescence Characteristics; 240 Seiten, (ISBN 3-89675-104-2) Herbert Utz Verlag, München (1996)

- [12] Coulson&Richardson's Chemical Engineering Volume 3 (Third Edition)
Chemical&Biochemical Reactors&Process Control 1994 Elsevier
- [13] K. H. Mancy, D. A. Okun, and C. N. Reilly, J. Electroanal. Chem. 4:65, 1962
- [14] Essential of Process Control , Michael L. Luyben, William L. Luyben , Printed
by The McGraw-Hill Company, 1997.
- [15] Model Predictive Control, Eduardo F. Camacho and Carlos Bordons , 1999
Springer Company.
- [16] Albright's Chemical Engineering Handbook , Edited by Lyle F. Albright , CRC
Press
- [17] Model Based Control, Paul Şerban Agachi, Zoltan K. Nagy, Mircea Vasile
Cristea, and Arpad Imre-Lucaci 2006 Wiley-VCH Verlag GmbH & Co.SBN: 3-527-
31545-4
- [18] Handbook of Industrial Mixing Science And Practice, Edward L. Paul, Victor
A. Atiemo-Obeng, Suzanne M. Kresta, 2004, A John Wiley & Sons, Inc.publication.
- [19] Gas–Liquid Mass Transfer Influence of Sparger Location, R. Sardeing, J.
Aubin, M. Poux and C. Xuereb, Trans IChemE, Part A, Chemical Engineering
Research and Design, 2004, 82(A9): 1161–1168.
- [20] Role of Sparger Design on Gas Dispersion in Mechanically Agitated Gas-Liquid
Contactors ,V. B. Rewatkar and J. B. Joshp, The Canadian Journal Of Chemical
Engineering, Volume 71, April 1993
- [21] The Influence of Sparger Design And Location On Gas Dispersion In Stirred
Vessels, D. Birch and N. Ahmed, Institution of Chemical Engineers, Vol 75, July
1997
- [22] The Kinetics of Uncatalyzed Sodium Sulfite Oxidation, Peter M. Wilkinson,
Bert Dolderdum, Peter H.M.R Cramers, and Laurent Van Dierendonck, Chemical
Engineering Science, Vol:48, No: 5, pp. 933-941, 1993 Pergamon Press. Ltd

- [23] Advances In Chemical Engineering, Volume 17, *Editor-in- Chief: James WEI*, 1992, Academic Press, Inc.
- [24] Yagi H. , Yoshida F. , Gas Absorption by Newtonian and Non-Newtonian Fluids in Sparged Agitated Vessels, *Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev.* 14 (1975) 4, p. 488-493
- [25] Nishikawa M, Nakamura M, Yagi H, Hashimoto K. Gas absorption in aerated mixing vessels. *J Chem Eng Jpn* 1981;14:219–26.
- [26] Höcker H, Langer G, Werner U. Mass transfer in aerated Newtonian and non-Newtonian liquids in stirred reactors. *Ger Chem Eng* 1981;4:51–62.
- [27] Garcia-Ochoa F, Gomez E. Mass transfer coefficient in stirrer tank reactors for xanthan solutions. *Biochem Eng J* 1998;1:1-10.
- [28] New Techniques for Following the Oxidation of Sodium Sulfite in Mass-Transfer Studies, Andrew C. Lewis and David J. Roberts, *Ind. Eng. Chem. Res.* 2005, 44, 183-185
- [29] Model-Based Predictive Control, A Practical Approach, *J.A. Rossiter*, 2004 by CRC Press
- [30] Introduction to process control by José Alberto Romagnoli, Ahmet Palazoglu
- [31] Cutler, C. R. and Ramaker, B. L., 1980, Dynamic matrix control—a computer control algorithm, *Proc Joint Automatic Control Conf, San Francisco*, paper WP5.
- [32] Dynamic Matrix Control: An optimal multivariable control algorithm with constraints, Cutler, 1983. C.R. Cutler, In: PhD thesis, University of Houston (1983)
- [33] Model Algorithmic Control (MAC): Basic Theoretical Properties, Rouhani, R., Mehra, R.K., 1982, *Automatica*, Vol. 18, No. 4, pp. 401-414

[34] Temperature Control of a Batch Polymerization Reactor, S. Yüce, A. Hasaltun, S. Erdogan and M. Alpbaz, Institution of Chemical Engineers Trans IChemE, Vol 77, Part A, July 1999

[35] Nonlinear Predictive Control of Periodically Forced Chemical Reactors
Özgülşen, F., Kendra, S.J., Çınar, A., 1993, AIChE Journal, Vol. 39, No. 4, pp. 589-598

[36] Lee, J., Park, S., (1994), “Adaptive Model Predictive Control for Unstable Nonlinear Processes”, Journal of Chemical Engineering of Japan, Vol.27, No.6, pp.760-767

[37] Generalized Predictive Control-I. The Basic Algorithm, Clarke D.W., Mohtadi, C., Tuffs, P.S., (1987), Automatica, Vol. 23, No. 2, pp. 137-148

[38] Afonso, A.F.N.A P., Oliveira, M.C. N., A. M. Castro J.A, (1996), “Model Predictive Control of a Pilot Plant Reactor with a Simulated Exothermic Reaction”, Computers and Chemical Engineering, Vol. 20, pp. S769-S774

[39] Quadratic Programming Solution of Dynamic Matrix Control (QDMC), Garcia, G.E., Morhedi, A.M., 1986, Chemical Engineering Communications, Vol. 46, pp. 73-87

[40] On-line Implementation of Nonlinear MPC: an Experimental Case Study, Control Engineering Practice Santos, O. L., Afonso, A.F.N.A. P., Castro, A.A.M J., Oliveira, M.C. N., Biegler, T.L., 2001 , Vol. 9, pp. 847-857.

[41] Robust Model Predictive Control Design using a Generalized Objective Function, Wang D., Romagnoli, J.A., Computers and Chemical Engineering, 2003, Vol. 27, pp. 965-982

[42] Control of a Solution Copolymerization Reactor Using Multi-Model Predictive Control Özkan, L., Kothare, M.V., Georgakis, C.,2003,Chemical Engineering Science, Vol. 58, pp. 1207-1221

[43] Once-through Boiler Steam Temperature Control Using Dynamic Matrix Control Technique Woohun Kim, Un-Chul Moon, Kwang Y. Lee, Won-Hee Jung, and Sung-Ho Kim, 978-1-4244-6551-4/10/\$26.00 ©2010 IEEE

[44] L.A Zadeh and B.H Whalen. On Optimal Control and Linear Programming. IRE Trans. Aut. Control, 7(4), 1962

[45] A.I.Propoi. Use of LP methods for synthesizing sampled-data automatic systems. Automn Remote Control, 24, 1963

[46] Dissolved Oxygen Control of The Activated Sludge Wastewater Treatment Process Using Model Predictive Control, B. Holenda, E. Domokos, A' . Re'dey, J. Fazakas, Computers and Chemical Engineering 32 (2008) 1270–1278

[47] www.mathworks.com.

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad : Gökhan CİVELEK
Doğum Yeri : Ünye/ORDU
Doğum Tarihi : 15.08.1983
Yaşadığı Yer : Kartal/İSTANBUL
E-mail : g_civelek@yahoo.com

Eğitim Bilgileri

2011 Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Gebze Kocaeli
Yüksek Lisans, Kimya Mühendisliği ABD,

2007 Atatürk Üniversitesi, Erzurum
Lisans, Kimya Mühendisliği Bölümü

2004 İstanbul Üniversitesi, Avcılar, İstanbul
Kimya Teknolojisi, MYO

2000 Yakacık Endüstri Meslek Lisesi, Kartal, İstanbul
Kimya Bölümü.