

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ * FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ENDÜSTRİYEL YARIKESİKLİ EKMEK MAYASI
FERMENTASYON PROSESİNİN
MODEL ESASLI KONTROLÜ**

DOKTORA TEZİ

Elektronik Y. Müh. Akif HOCALAR

Anabilim Dalı : Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği

Danışman : Yrd. Doç. Dr. Sıtkı ÖZTÜRK

KOCAELİ, 2007

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ * FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ENDÜSTRİYEL YARIKESİKLİ EKMEK MAYASI
FERMENTASYONU PROSESİNİN
MODEL ESASLI KONTROLÜ**

DOKTORA TEZİ

Elektronik Y. Müh. Akif HOCALAR

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 24.05.2007

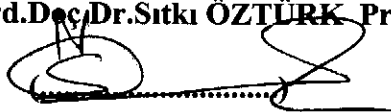
Tezin Savunulduğu Tarih : 29.06.2007

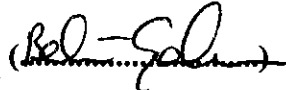
Tez Danışmanı

Üye

Üye

Yrd.Doç.Dr.Sıtkı ÖZTÜRK Prof.Dr.Bekir ÇAKIR Prof.Dr.Galip CANSEYER





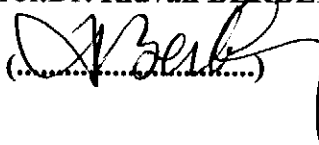


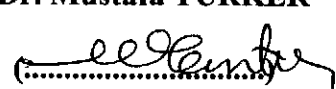
Üye

Üye

Prof.Dr. Rıdvan BERBER

Doç.Dr. Mustafa TÜRKER





KOCAELİ, 2007

ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR

Bu doktora tezi, bireysel bir çalışma olarak hazırlanmış olsa da arka planında çok sayıda ve farklı alanlardan değerli insanların yardımı, desteği ve gayreti ile bu duruma gelmiştir.

Bu çerçevede deney fermentasyonlarının gerçekleştirildiği Pak Gıda Üretim A.Ş, İzmit fabrikası, fabrika müdürümüz sayın Tuncay Yurdesin, fermentasyon bölümünde deneylerin gerçekleştirilmesinde tüm titizlik ve özenleriyle çalışmalarına destek olan bölüm şefi Erdinç Tüller olmak üzere burada yer darlığı nedeni ile isimlerini yazamayacağım tüm formen, vardiya operatörü, yıkama operatörü, seperasyon operatörü arkadaşlarıma ve özellikle analiz numunelerini takip eden arkadaşlarıma en içten teşekkürlerimi sunarım. Onların gayretleri olmasaydı bu çalışma buralara gelemezdi. En yoğun anlarında dahi fermentasyon numune analizlerini titizlikle yapan kalite kontrol laboratuvarının çok değerli çalışanları da burada hertürlü övgüyü hak ediyor. Ayrıca deneyler sırasında her hertürlü enstrümantasyon arıza, bakım ve kalibrasyonunda büyük emeği geçen elektronik teknisyeni Okan Öztürk'e de teşekkürlerimi borç bilirim.

Tez çalışmam süresince manevi desteğini ve sabrını benden esirgemeyen hayat arkadaşım Melike Hocalar, kendilerine ayırmam gereken zamanı doktora ve tez çalışmalarına ayırdığım oğlum Altuğ ve kızım İdil, sizin güleryüzünüz ve çocuksu neşeniz tüm yorgunluğumu unutmamı sağlıyordu. Siz her türlü teşekkürü hak ediyorsunuz, dilerim bu çalışma hepimize yeni ve güzel ufuklar açar.

Her zaman bilimin öncülüğünde ilerlememizi salık veren, desteğini ve dualarını eksik etmeyen aile büyüklerimede teşekkürlerimi sunuyorum.

Bu tez çalışmasının başından bugüne kadar beni sabırla destekleyen ve her zaman desteğini yanımda hissettiğim tez hocam Sayın Yrd.Doç.Dr. Sıtkı Öztürk, sabrınız, anlayışınız ve desteğinizi ömür boyu unutmayacağım.

Önce yüksek lisans ve şimdide doktora çalışmamı sayın Doç.Dr. Mustafa Türker'in öncülüğünde ve desteği ile tamamliyorum. Tüm bunlar sizin çok değerli yardımlarınız, motivasyonunuz ve sabrınızla gerçekleşti. Desteğiniz ve yardımlarınızı asla unutmayacağım.

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR.....	i
İÇİNDEKİLER.....	ii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	v
TABLOLAR DİZİNİ.....	iv
SİMGELER DİZİNİ VE KISATLIMLAR.....	viii
ÖZET.....	x
İNGİLİZCE ÖZET.....	xi
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Tez Organizasyonu.....	3
2. MAYA HÜCRESİ VE BİYOPROSES MODELLEME.....	5
2.1. Maya Biyolojisi.....	6
2.2. Glikoliz.....	6
2.3. Darboğaz Prensibi.....	8
2.4. Mayanın Üreme Kinetiği.....	10
2.5. Proses Modelleme.....	12
2.6. Matematiksel Modelleme.....	12
2.6.1. Mekanistik modelleme.....	13
2.6.2. Kara kutu (black-box) modelleme.....	15
2.7. Niteliksel Modelleme.....	20
2.8. İstatistiksel Modelleme.....	20
2.9. Biyoproses Modelleme.....	15
2.9.1. Balans denklemleri.....	20
2.9.1.1. Birikim hızı.....	20
2.9.1.2. Yığın akış.....	15
2.9.1.3. Yayınma (diffusion) yoluyla aktarım.....	20
2.9.1.4. Üretim veya tüketim terimleri.....	20
2.9.1.5. Toplam kütle ve bileşen balansı.....	15
2.9.1.6. Elementel denklimler ve reaksiyon hızları.....	20
2.9.2. Hız denklemleri.....	20
2.9.3. Termodinamik denklemler.....	15
2.10. Biyoproses İşletim Türleri.....	20
2.10.1. Kesikli işletim.....	20
2.10.2. Yarıkesikli işletim.....	15
2.10.3. Sürekli işletim.....	20
2.11. Biyoproses Modellemede Yapay Zeka Metodları.....	20
2.11.1. Bulanık modeller (fuzzy models).....	15
2.11.2. Yapay sinir ağları (YSA).....	20
2.11.3. Genetik algoritmalar (GA).....	20
3. BİYOPROSESLERİN KONTROLÜ ve LİTERATÜR İNCELEMESİ.....	32

3.1. Literatür İncelemesi	34
3.1.1. Optimal kontrol uygulamaları	34
3.1.2. Geribeslemeli kontrol uygulamaları	37
3.1.3. Hibrit kontrol uygulamaları	39
4. BİYOPROSESLERDE KÜTLE DENKLİĞİ, ÖLÇÜMLERİN TUTARLILIĞI ve KARAKUTU YAKLAŞIMI İLE METABOLİK MODELLEME	42
4.1. Hücresel Kara Kutu Modeli	43
4.2. Ekmek Mayası Fermentasyonu İçin Karakutu Modeli	48
4.2.1. Karakutu modelinde ölçülen hız sayısı ile serbestlik derecesinin eşit olması durumu	50
4.2.2. Karakutu modelinde ölçülen hız sayısının serbestlik derecesinden büyük olması durumu	52
4.3. Karakutu Modelinin Endüstriyel Yarikesikli Fermentasyona Uygulanması	55
4.3.1. Endüstriyel fermentasyonlarda uygunlaştırılmış hızların elde edilmesi	60
4.3.2. Endüstriyel fermentasyonlar için tutarlılık analizleri	64
4.3.3. Pilot fermentasyonlar için uygunlaştırılmış (reconciliated) hız değerlerinin elde edilmesi ve seri eleme yöntemi	65
4.3.4. Alternatif tutarlılık testlerinin pilot ve endüstriyel fermentasyonlara uygulanması	67
4.4. Modelin Literatürden Alınan Deneysel Çalışmaya Uygulanması	69
4.5. Biyokütle Derişimlerinin Öngörülmesi	72
5. ÖLÇÜLEMİYEN DURUM DEĞİŞKENLERİNİN ASİMTOTİK GÖZLEMCİLER İLE BELİRLENMESİ	76
5.1. Biyoproseslerde Durum Gözlemeleme	79
5.1.1. Klasik (üssel) gözlemciler	80
5.1.1.1. Genişletilmiş luenberger gözlemleyicisi (extended luenberger observer) ...	82
5.1.1.2. Genişletilmiş kalman gözlemleyicisi (extended kalman observer)	82
5.1.2. Asimtotik gözlemciler	83
5.1.2.1. Luenberger tip asimtotik gözlemci	84
5.2. Yarikesikli Ekmek Mayası Fermentasyonu Prosesinde Durum Gözlemeleme ...	85
5.2.1. Deneysel çalışmalar	88
6. GERİBESLEMELİ KONTROL	92
6.1. Durum Değişkenleri Analizi	93
6.2. Kontrol Sistemlerinin Kontrol edilebilirliği ve Gözlemlenebilirliği	96
6.2.1. Durum uzayı denklemlerinin kanonik biçimde gösterimi	97
6.3. Durum Uzayı Yöntemleriyle Kontrol Sistemlerinin Tasarımı	98
6.3.1. Durum geribeslemeli kutup yerleştirme yöntemi ve gözlemci tasarımı	99
6.4. Liapunov Kararlılık Analizi	100
6.4.1. Liapunov kararlılığın grafiksel gösterimi	102
6.4.2. Doğrusal zamanla değişmeyen sistemlerde liapunov kararlılığı	103
6.5. Doğrusal Olmayan Sistemlerin Kontrolü	104
6.5.1. Doğrusallaştırma ile geribeslemeli kontrol	105
6.5.2. İntegral kontrol	107
6.5.2.1. Doğrusallaştırmalı integral kontrol	108

6.5.3. Kazanç çizelgeleme kontrolü	109
6.6. Sistemlerin Doğrusal Olmayan Yöntemlerle Kontrolü.....	109
6.6.1. Ayar parametrelerinin hatanın fonksiyonu olarak belirlenmesi.....	109
6.6.2. Doğrusal olmayan dönüşümler (nonlinear transformations).....	110
6.7. Doğrusal Olmayan Sistemlerin Geometrik Yöntemlerle Kontrolü.....	111
6.7.1. Geribesleme doğrusallaştırılmalı kontrol.....	111
7. ENDÜSTRİYEL YARIKESİKLİ EKMEK MAYASI FERMENTASYONUNDA ÖZGÜL ÜREME HIZI KONTROLÜ	116
7.1. Açık Döngü Özgül Üreme Hızı Kontrolü	119
7.2. Etanol Geribeslemeli Özgül Üreme Hızı Kontrolü.....	125
7.3. Doğrusal Olmayan Özgül Üreme Hızı Kontrolcüsü	129
7.3.1. Üssel üreme evresinde sabit özgül üreme hızı kontrolü.....	132
7.3.2. İki farklı üreme hızı değerinin fermentasyon boyunca kontrolü.....	134
7.3.3. Zamanla değişen özgül üreme hızı kontrolü	137
8. ENDÜSTRİYEL YARIKESİKLİ EKMEK MAYASI FERMENTASYONUNDA ETANOL DERİŞİMİ KONTROLÜ	147
8.1. Singular Perturbation Tasarımı ile Doğrusal Olmayan Kontrolcü Tasarımı	149
8.2. Etanol Derişimi Kontrolü Deneysel Çalışmaları.....	153
8.3. Endüstriyel Çözüm Önerisi	166
9. SONUÇLAR ve ÖNERİLER.....	172
KAYNAKLAR	176
EKLER.....	182
KİŞİSEL YAYINLAR ve ESERLER.....	195
ÖZGEÇMİŞ	196

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Maya hücresinin basitleştirilmiş iç yapısı	6
Şekil 2.2. Glikoliz'in metabolik haritası	8
Şekil 2.3. Darboğaz prensibinin şematik gösterimi	9
Şekil 2.4. Model tiplerinin sınıflandırılması	13
Şekil 2.5. Fermentasyon sisteminde makroskopik akışlar	20
Şekil 2.6. Sürekli biyoreaktörde enerji değişkenlerinin genel gösterimi	22
Şekil 2.7. Kesikli reaktör ve derişimlerin zamanla değişimi	23
Şekil 2.8. Yarıkesikli reaktör gösterimi	24
Şekil 2.9. Üç katmanlı ileri yönlü sinir ağı	28
Şekil 4.1. Dönüşüm hızlarının sınıflandırılması	43
Şekil 4.2. Hücrenin kara kutu model yaklaşımı	44
Şekil 4.3. Endüstriyel boyutlu fermentör ve alınan temel ölçümler	55
Şekil 4.4. A tip bir fermentasyondan elde edilen dönüşüm hız eğrileri	61
Şekil 4.5. B tip bir fermentasyondan elde edilen dönüşüm hız eğrileri	61
Şekil 4.6. C tip bir fermentasyondan elde edilen dönüşüm hız eğrileri	63
Şekil 4.7. Pilot fermentasyonlardan elde edilen çevrimiçi ve uygunlaştırılmış hız eğrileri	65
Şekil 4.8. A, B ve C fermentasyon verilenlerinden elde edilen CR, ELR, ER balans eğrileri	68
Şekil 4.9. Tipik bir pilot fermentasyon verilenlerinden elde edilen CR, ELR, ER balans eğrileri	69
Şekil 4.10. Hacimsel hızlar ve etanol ölçümü	70
Şekil 4.11. Biyokütle eğrisi	70
Şekil 4.12. Modelin öngördüğü biyokütle derişimi ve laboratuvar ölçümleri	71
Şekil 4.13. Üssel üreme safhasında özgül üreme hızları	71
Şekil 4.14. Biyokütle kestirim algoritması akış şeması	73
Şekil 4.15. Deney fermentasyonlarından elde edilen çevrimiçi, uygunlaştırılmış ve laboratuvar biyokütle eğrileri	73
Şekil 5.1. Doğrusal bir sistem ve durum gözlemcisine ait blok yapı	78
Şekil 5.2. Deney fermentasyonlardan elde edilen biyokütle eğrileri ve laboratuvar ölçümleri	89
Şekil 5.3. B tipi fermentasyonlar için ölçülen ve gözlenen etanol derişimi eğrileri ..	91
Şekil 6.1. Durum geribeslemeli kapalı döngü kontrol sistemi	99
Şekil 6.2. Girişe uygulanan basamak işaretime cevap olabilecek çıkışlar ve kararlılık durumları	101
Şekil 6.3. a- kararlı denge durumu ve yörüngesi, b- asimptotik kararlı denge durumu ve yörüngesi, c- kararsız denge durumu ve yörüngesi	102
Şekil 6.4. L/A kontrol blok gösterimi	110
Şekil 7.1. Kontrol mimarisinin blok gösterimi	118
Şekil 7.2. A1 fermentasyonu özgül üreme hızı, biyokütle derişimi ve substrat besleme eğrileri	121
Şekil 7.3. A2 fermentasyonu özgül üreme hızı, biyokütle derişimi ve substrat besleme eğrileri	122

Şekil 7.4. A3 fermentasyonu özgül üreme hızı, biyokütle derişimi ve substrat besleme eğrileri	124
Şekil 7.5. B1 fermentasyonu özgül üreme hızı, biyokütle derişimi ve substrat besleme eğrileri	127
Şekil 7.6. B2 fermentasyonu özgül üreme hızı, biyokütle derişimi ve substrat besleme eğrileri	128
Şekil 7.7. C1 fermentasyonundan elde edilen özgül üreme hızı, biyokütle derişimi ve substrat besleme eğrileri	133
Şekil 7.8. C2 fermentasyonu özgül üreme hızı, biyokütle derişimi ve substrat besleme eğrileri	135
Şekil 7.9. C3 fermentasyonu özgül üreme hızı, biyokütle derişimi ve substrat besleme eğrileri	136
Şekil 7.10. C4 fermentasyonu özgül üreme hızı, biyokütle derişimi ve substrat besleme eğrileri	139
Şekil 7.11. C5 fermentasyonu özgül üreme hızı, biyokütle derişimi ve substrat besleme eğrileri	140
Şekil 7.12. C6 fermentasyonu özgül üreme hızı, biyokütle derişimi ve substrat besleme eğrileri	141
Şekil 7.13. C6 fermentasyonu çevrimiçi, uygunlaştırılmış hızlar ve çevrimiçi biyokütle/substrat verimi	142
Şekil 7.14. C7 fermentasyonu etanol derişimi, özgül üreme hızı ve substrat besleme eğrileri	144
Şekil 8.1. Etanol derişimi kontrol mimarisi şematik gösterimi	153
Şekil 8.2. Kestirim ve kontrol işlemlerinin gerçekleştirildiği bilgisayar program mimarisi	155
Şekil 8.3. D1 fermentasyonu etanol derişimi, substrat besleme ve biyokütle derişimi eğrileri	156
Şekil 8.4. D2 fermentasyonu etanol derişimi, substrat besleme, biyokütle derişimi eğrileri	158
Şekil 8.5. D3 fermentasyonu etanol derişimi ve substrat besleme eğrileri	161
Şekil 8.6. D3 fermentasyonu çevrimiçi ve laboratuvar biyokütle derişimi ölçümleri	161
Şekil 8.7. D4 fermentasyonu etanol derişimi ve substrat besleme eğrileri	162
Şekil 8.8. D5 fermentasyonu etanol derişimi, substrat ve biyokütle derişimi sonuçları	163
Şekil 8.9. D5 deney fermentasyonunda ölçülen ve hesaplanan çevrimiçi ve uygunlaştırılmış hacimsel hızlar	164
Şekil 8.10. D5 deney fermentasyonunda ölçülen ve hesaplanan verim katsayısının zamanla değişimi	165
Şekil 8.11. D6 fermentasyonu biyokütle derişimi, özgül üreme hızı, etanol derişimi, substrat besleme grafikleri	169
Şekil 8.12. D7 fermentasyonu biyokütle derişimi, özgül üreme hızı, etanol derişimi, substrat besleme grafikleri	170

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 4.1. Hesaplamalarda kullanılan birincil ölçümler ve türetilen hızlar	56
Tablo 4.2. Elementel matriste yeralan bileşenlerin kompozisyonları, kütle ağırlıkları ve yanma ısıları (Türker, 2003, 2004).....	59
Tablo 4.3. A, B ve C tip fermentasyon ölçüm verilerine h test (<i>chi-square</i>) uygulandığında elde edilen değerler	65
Tablo 4.4. Pilot fermentör için h test sonuçları ve seri eleme yöntemi hata kaynağının belirlenmesi	66
Tablo 4.5. Deneme fermentasyonları için h değerleri	75
Tablo 7.1. C6 fermentasyonu için ki-kare (<i>chi-square</i>) test değerleri	143
Tablo 8.1. Maya fermentasyonlarında uygulanan kontrol yöntemleri	148
Tablo 8.2. Maya fermentasyonlarında uygulanan kontrol yöntemleri	152
Tablo 8.3. D-5 fermentasyonu için ki-kare test değerleri	166

SİMGELER DİZİNİ ve KISALTMALAR

Semboller

A	: alan [m^2]
C_i	: i'nin derişimi [kg/m^3]
c_p	: Isı kapasitesi [kJ/kgK]
D	: seyrelme hızı [h^{-1}]
D_i	: i'nin yayınırlığı [m^2/sn]
e	: hata
E_c	: hesaplanabilen hızlar matrisi
E_m	: ölçülebilen hızlar matrisi
F	: karesel ortalama hata (varyans kovaryans) matrisi
F_i	: i'nin besleme hızı [m^3/h]
h	: zaman (saat)
h	: ki kare testi
h_i	: ısı transfer katsayısı [W/m^2C]
M_i	: i'nin kütlese hızı [kg/h]
N_i	: i'nin akısı [kg/m^3h]
P	: ürün derişimi [kg/m^3]
P_i	: i'nin kısmi basıncı (atm)
Q	: Gaz debisi [m^3/h]
Q	: Isı [kJ/m^3]
q_i	: i'nin özgül dönüşüm hızı [$kg/kg, Cmol/ Cmol h$]
q_i	: i'nin toplam ısı üretim veya tüketim hızı [kJ/h]
R	: Artıklık (redundancy) matrisi
r	: referans giriş değeri
r_c	: hesaplanabilen hızlar vektörü
r_i	: i'nin hacimsel dönüşüm hızı [$kg/m^3h, Cmol/Lh$]
r_m	: ölçülebilen hızlar vektörü
r_Q	: hacimsel ısı üretim hızı [kJ/m^3h]
S	: Substrat derişimi [kg/m^3]
S_i	: i'nin substrat derişimi [kg/m^3]
T	: Sıcaklık [C]
t	: Zaman [sn, saat]
U	: Isı aktarım katsayısı [W/m^2C]
V	: Hacim [L, m^3]
X	: Biyokütle derişimi [$g/L, Cmol/L$]
x_i	: yapay sinir ağı girişi
$Y_{i/j}$: verim [g/g, Cmol/Cmol]

Alt indisler

μ	: Özgöl üreme hızı [h^{-1}]
ρ	: Yoğunluk [kg/m^3]
α	: Stokiyometrik katsayı [$kg \text{ ürün}/kg \text{ hücre}$]

- ρ : ölçme hatası
 ρ : özdeğerler vektörü
 ρ : ayar katsayısı
 σ : katsayı [$\text{W/m}^2\text{K}^4$]
 ε : rezidü vektörü
 ΔH_i : i'nin yanma ısısı [kJ/kg]
 γ_i : i'nin indirgenme derecesi
 ξ : durum değişkeni

Kısaltmalar

- CR : Karbon denkliği
ELR : Elektron denkliği
ER : Enerji denkliği
TCA : Trikarboksilik asit çevrimi

ENDÜSTRİYEL YARIKESİKLİ EKMEK MAYASI FERMENTASYON PROSESİNİN MODEL ESASLI KONTROLÜ

Akif HOCALAR

Anahtar kelimeler: dönüşüm hızları, özgül üreme hızı, biyokütle, etanol derişimi, enerji denkliği, asimtotik gözlemci, mekanistik model.

Özet: Bu doktora tezinde ekmek mayası fermentasyonunun endüstriyel koşullarda model esaslı kontrolü çalışılmıştır. Bu amaçla önce endüstriyel ortamda proses değişkenlerinin güvenilir ölçümü ve bu ölçümlerden biyolojik dönüşüm hızlarının elde edilmesi gerçekleştirilmiştir. Dönüşüm hızlarının elde edilmesinde, endüstriyel ortamda proses değişkenlerinin ölçümü ile birlikte enerji denkliği de kullanılmıştır.

Dönüşüm hızları kullanılarak iki farklı yöntemle, ölçülemeyen durum değişkenleri olan biyokütle derişimi ve özgül üreme hızının kestirimi yapılmıştır. Durum değişkenlerinin kestiriminde asimtotik gözlemci ve mekanistik model tabanlı kestirimci yöntemleri kullanılmıştır. Her iki yöntem endüstriyel fermentasyonlara uygulanmış ve elde edilen sonuçlar laboratuvar analizleri ile karşılaştırılmıştır.

Fermentasyon prosesinde ölçülemeyen durum değişkenlerinin belirlenmesinden sonra model esaslı kontrol yöntemleri incelenmiştir. Bu amaçla iki kontrolcü tasarımı yapılmıştır: (1) özgül üreme hızı kontrolcüsü, (2) etanol derişimi kontrolcüsü.

Doğrusal olmayan kontrolcülerin tasarımında geribesleme doğrusallaştırması kullanılmıştır. Özgül üreme hızının sabit ve zamanla değişen yörünge boyunca kontrol edilebilirliği gösterilmiştir.

Etanol derişimi kontrolünde ise iki farklı doğrusal olmayan kontrolcü ifadesi ile etanol derişimi kontrol edilmeye çalışılmıştır. Proses boyunca sabit ve zamanla değişen etanol derişimi set değerlerinde kontrol edilebilirlik sağlanmıştır.

Her iki kontrol yönteminin bir araya getirilmesi ile endüstriyel ortamda iyi performans gösteren bir kontrol yapısı tasarlanmış ve başarıyla uygulanmıştır. Bu şekilde endüstriyel ortamda hiç bir operatör müdahalesi olmaksızın işleyen model esaslı kontrol yapısı geliştirilmiştir.

MODEL BASED CONTROL OF INDUSTRIAL FED-BATCH BAKER'S YEAST FERMENTATION PROCESS

Akif HOCALAR

Keywords: conversion rates, specific growth rate, biomass, ethanol concentration, heat balance, asymptotic observer, and mechanistic model.

Abstract: In this thesis, the model based control of baker's yeast fermentation is investigated under industrial conditions. In order to do this, first conversion rates are derived from primary measurements. These conversion rates have been used in two different state estimation algorithm: (1) asymptotic observer (2) mechanistic model based estimator.

Biomass concentration and specific growth rates are estimated by means of two different estimation techniques. The asymptotic observers and mechanistic model based estimators are applied to the data obtained from the industrial fermentations.

After the determination of unmeasured process states, different model based control methods are investigated. For this purpose, nonlinear specific growth rate controller and ethanol concentration controllers are developed and applied to industrial fermentations.

Feedback linearization has been used to design two nonlinear controllers: (1) specific growth rate controller (2) ethanol concentration controller. Specific growth rate is controlled in a fixed set point and time varying set point profile during fermentations.

Two different linearizing equation are used in ethanol concentration controller. Both controllers are successfully implemented to control of ethanol concentration at set point and time varying profile.

Finally, industrial solution has been proposed by merging two controllers namely specific growth rates and ethanol concentration.

1. GİRİŞ

Biyoteknolojik prosesler ilaçtan, gıdaya, atıksu gideriminden ziraate kadar çok geniş alanda prosesleri ve uygulamaları kapsamaktadır. Günümüzde modern biyoteknoloji 50 milyar dolarlık ciro ile global ekonominin en önemli kollarından birini teşkil etmektedir. Biyoteknoloji endüstrisinde üretilen tüm ürünler (antibiyotik, aşı, alkollü içecekler, gıdalar, alkol, bakım ürünleri vb.), fermentasyon, biyoçevrim ve enzimatik prosesleriyle elde edilmektedir (Roubos, 2002). Bu proseslerde yapılan bir iyileştirme veya geliştirme, proseslerde yeralan girdi maliyetlerinde ve ürün değerinde önemli ekonomik kazançlar sağlamaktadır. Geliştirme ve iyileştirmelerde ürün kalitesinde, saflığında ve ürün/substrat veriminde iyileştirme sağlamak en önemli boyutu teşkil etmektedir.

Endüstriyel boyutta yarıkesikli ekmek mayası fermentasyonu prosesinde biyokütle verimliliğinin ve biyokütle/substrat veriminin maksimize edilmesi zorunluluğu vardır. Bu amaçla fermentasyon prosesi maksimum verimliliği sağlayacak proses koşullarında götürülmeye çalışılmaktadır. Bunun için fermentörlerde bilinen sıcaklık, pH, çözülmüş oksijen gibi bilinen değişkenlerin kontrolü yanında son yıllarda bilgisayar teknolojisinin gelişmesi ile birlikte kontrol tekniğindeki ileri yöntemler de uygulanmaya başlanmıştır.

Buraya kadar verilen giriş bilgilerinden günümüzde biyoteknolojinin farklı disiplinlerin ortak çalışmaları yürüttüğü bir dal olduğu görülmektedir. Fermentasyon proseslerinde kontrol mühendisinin en temel görevi, proses için en uygun koşulların sürekliliğinin sağlanmasıdır. Bunun yanında proses davranışının daha iyi anlaşılabilmesi ve kontrol edilebilmesi için uygun ölçüm cihazlarının ve/veya modellerinin geliştirilmesidir (Keuler, 1993).

Model tabanlı eniyileştirme (optimizasyon) ve kontrol yöntemlerinin biyoteknolojik proseslere uygulanması diğer mühendislik disiplinlerine (mekanik, elektrik ve kimya mühendisliği dalları) göre daha yavaş olduğu gözlenmektedir. Bunun nedeni olarak,

bir biyoprosesin modellenmesinde karşılaşılan karmaşıklık, proses durum değişkenlerinin ölçümünü sağlayan, doğru ölçüm yapan ve ekonomik fiyatlı endüstriyel ölçüm cihazlarının yokluğu sayılabilir (Roubos, 2002).

Biyoprosesler, zamanla değişen ve doğrusal olmayan, dinamikleri ve reaksiyon kinetikleri çok iyi bilinmeyen canlı ve yaşayan organizmalar içermektedirler. Bir biyoprosesi tanımlamak için çok karmaşık ve pekçok faktörü kapsayan bir modelleme yapılabilir fakat bu modellerin analitik çözümü genellikle zordur. Diğer taraftan, geliştirilen bir matematiksel modelin pratik deneylerle doğrulanmasında gerekmektedir.

Bu çalışmada, en temel bir biyoteknolojik proses olan yarı kesikli ekmek mayası fermentasyonunun modellenmesi, ölçülemeyen durum değişkenlerinin hesaplanması ve kontrolü gerçekleştirilmiştir. Model esaslı kontrol çalışmalarından önce, çalışmalarda kullanılacak ölçümlerin doğruluğu ve tutarlılığı incelenmiştir. Daha sonra kontrol tasarımlarında yeralan proses durumlarının yüksek doğrulukla belirlenebilmesi için çok geniş bir şekilde durum kestirimcileri üzerine çalışılmıştır. Bu amaçla iki farklı durum kestirimcisi üzerinde çalışılmış ve elde edilen sonuçlardan yola çıkılarak kara kutu yaklaşımı ile mekanistik modellemeyle elde edilen kestirimci tasarımı model esaslı kontrol çalışmalarında kullanılmıştır.

Model esaslı kontrol çalışmalarında birbirinden farklı ve basitten karmaşığa dört farklı yöntem endüstriyel fermentörlerde çalışılmıştır. Kontrol çalışmalarında fermentasyon prosesinin doğrusal olmayan davranışı nedeni ile doğrusal olmayan kontrolcü tasarımına gidilmiştir. Bu tasarımda Bastin ve Dochain'in (1990) durum uzayında genel dinamik model yaklaşımı esas alınarak geribesleme doğrusallaştırılmalı kontrol yöntemi kullanılmıştır. Deneysel çalışmalarda özgül üreme hızının ve etanol derişiminin fermentasyon süresince set ve profil boyunca kontrolü detaylı olarak çalışılmış ve endüstriyel ortamda güvenilir sonuçlar verecek tasarıma ulaşılmıştır.

1.1 Tez Organizasyonu

Bu tez çalışmasında gerçekleştirilen faaliyetler bölümler halinde aşağıdaki gibi sunulmuştur.

Bölüm 2’de maya hücresinin fizyolojisi ve gerçekleştirdiği hücrel faaliyetler anlatılmıştır. Aynı zamanda modelleme üzerine bir sınıflandırma yapılmış, biyoproses modellemede kullanılan yöntemler ve işletim türleri verilmiştir.

Bölüm 3’te ise literatürde biyoteknolojik proseslerde modelleme, eniyileştirme ve kontrol amaçlı yapılan çalışmalarının bir özeti sunulmuştur.

Bölüm 4’te ekmek mayası fermentasyonu için kütle denkleğinden yola çıkılarak proses için ölçülen kimyasal dönüşüm hızları kullanılarak ölçülemeyen hızlar hesaplanmıştır. Fazla ölçümlerin yardımı ile ölçümlerin tutarlılığı incelenmiş ve tüm hızlar için uygunlaştırılmış (reconciliated) hızlar elde edilmiştir. Bu hızlardan yola çıkılarak ölçülemeyen proses durum değişkenlerinin kestirimi yapılmıştır.

Bölüm 5’te ele alınan proses gözlemci esaslı durum kestirimcisi (state estimator) geliştirilmiştir. Bölüm 4 ve bölüm 5’te geliştirilen kestirimci algoritmaları endüstriyel boyutlu fermentasyon verilerine uygulanmış ve elde edilen sonuçlar incelenmiştir.

Bölüm 6’da ise biyoproseslerde uygulanan kontrol yöntemleri ve bununla ilgili olarak bu çalışmada kullanılmış olan doğrusal olmayan kontrol yöntemi teorik olarak incelenmiştir.

Bölüm 7’de yarıkesikli fermentasyonlarda uygulanan temel iki yöntem incelenmiş ve deney fermentöründe uygulanmıştır. Ayrıca bu bölümde özgül üreme hızının doğrusal olmayan kontrolcü ile kontrolü detaylı olarak çalışılmış ve gerekli ön koşullar çerçevesinde tatmin edici sonuçlara ulaşılmıştır.

Bölüm 8’de ise yine ele alınan yarıkesikli maya fermentasyonu için doğrusal olmayan etanol derişimi kontrolcüsü tasarımı yapılmış ve endüstriyel fermentasyonlara uygulanmıştır. Daha sonra geliştirilen kontrolcü tasarımlarından yola çıkılarak endüstriyel çözüm önerisi geliştirilmiş ve bu yöntem uygulanmıştır.

Sonuçlar bölümünde ise tüm modelleme ve kontrol çalışmalarında elde edilen sonuçlar sunulmuş ve bundan sonra yapılabilecek çalışmalar tartışılmıştır.

2. MAYA HÜCRESİ ve BİYOPROSES MODELLEME

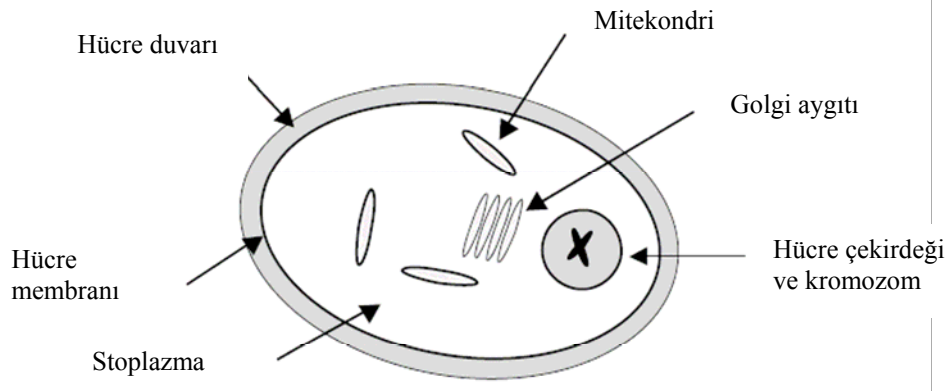
Mikroorganizmaların besin olarak kullanımı binlerce yıl eskilere dayanmaktadır. Çeşitli meyvelerin fermente edilerek şarapçılıkta, biracılıkta kullanımı, sütün yoğurt ve peynir yapımında kullanımı ilk akla gelen mikroorganizma uygulamalarıdır. Maya da insanlık tarihi boyunca üzerinde en çok çalışmanın yapıldığı, alkollü içecek üretimi ve ekmek hamuru kabartmada kullanılan eski bir mikroorganizmadır. Toprakta, bitkilerde ve hatta havada dahi bulunabilen canlı bir hücredir. Tabiatta pek çok farklı maya türü/ırkı bulunmasına rağmen bu çalışmada ekmek yapımında kullanılan maya, *Saccharomyces cerevisiae* hücreleri anılacaktır (Türker, 2005).

Bilimsel anlamda mikrobiyolojinin Pastör'ün 1867'de maya fermentasyonunu konu alan çalışmasıyla başladığı kabul edilmektedir. Daha sonra Robert Koch ve Emil Christian Hansen'in çalışmaları bu alanda yapılmış ilk endüstriyel biyoteknolojik çalışmalardır. Modern anlamda, 1940'larda penisilin üretimi ve büyük fermentörlerin geliştirilmesi, sürekli fermentasyonlar (continuous fermentations), immobilize enzim ve hücre proseslerinin gelişimi ile biyoteknolojik gelişmeler devam etmiştir (Türker, 2005).

Rekombinant DNA teknolojisinin gelişimi ile birlikte maya hücresinin iç yapısında saklı olan biyolojik bilgiler ve organizmanın genetik özelliklerinin değiştirilmesi çalışılmaktadır. 1980'li yıllardan itibaren bilgisayar teknolojisinin biyoteknolojide yoğun olarak kullanılmasına başlanmıştır. Bilgi işlem teknolojisi kullanımı ile birlikte modelleme ve kontrol alanında gerçekleştirilmiş pekçok çalışma biyoteknolojik proseslere uygulanmaya başlanmıştır. Bu sayede biyoproseslerin tanımlanmasında ve kontrolünde yeni teknikler uygulanmaya başlanmıştır (Keuler, 1993).

2.1. Maya Biyolojisi

Maya hücresi fungus ailesinden kompleks bir mikroorganizmadır. Bakterilere göre çok daha büyük bir hacmi vardır. Mayanın çoğalması uç verme veya hücre bölünmesi şeklinde gerçekleşir. Tipik bir maya hücresi Şekil 2.1’de gösterilmiştir.



Şekil 2.1. Maya hücresinin basitleştirilmiş iç yapısı (Fredriksson, 2001).

Maya hücresi çok gelişmiş bir organizmadır. Hücre duvarı, hücre ağırlığının %25’ini oluşturur. Hücre duvarı mayayı, dış etkenlerden korumakla birlikte pekçok enzime de sahiptir. Şekil 2.1’de maya hücresinin sahip olduğu çeşitli organeller gösterilmektedir. Hücre çekirdeği, DNA’ları içerir. Hücre içinde yaklaşık 50 adet mitekondri yer almaktadır ve bu mitekondriler hücre içi enerji sağlayıcı metabolik faaliyetlerde önemli role sahiptir. Hücre içi diğer metabolik faaliyetler sitoplazmada gerçekleşir. Depo parçacıklarında ise glikoz ve yağlar stoklanmaktadır. Vacuole parçacıklarının görevi kesin olarak bilinmemekle birlikte bazı enzimlerin saklanması görev aldığı tahmin edilmektedir. Bazı görüşlere göre de hücre içi zararlı artıklar bu parçacıklarda saklanmaktadır. Bir maya hücresinin çapı yaklaşık 5-8 μm ’dir ve hacmi de 10^{-12} L’dir. (Axellson, 1989).

2.2. Glikoliz

Fermentasyon ortamında biyokütle oluşumu, hücre içi enerji gerektiren anabolik reaksiyonlara ihtiyaç duyar. Hücre içi anabolik reaksiyonlar için gerekli enerji,

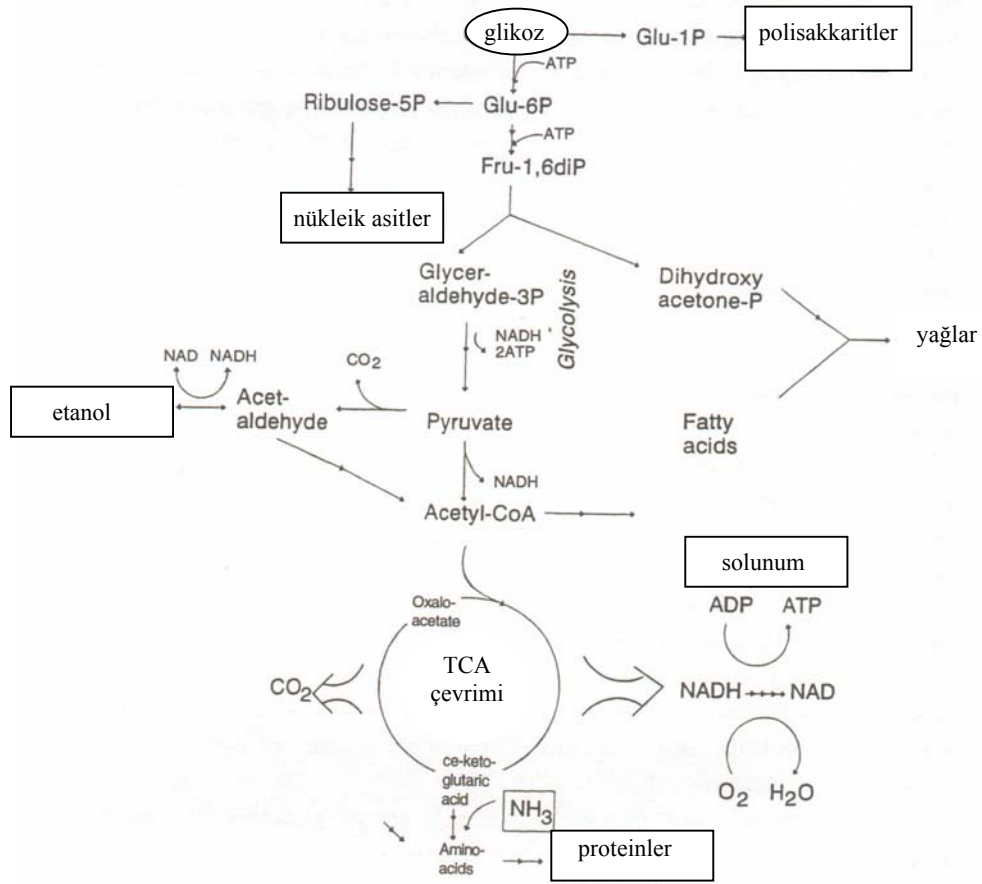
ortamda bulunan bazı maddelerin yükseltgenmesi ile sağlanır. Maya hücresinin karbon ve enerji kaynağı olarak kullandığı en önemli madde şekerdir. Hücreyi oluşturan yağlar, polisakkaritler ve proteinler şekerin parçalanması ile oluşurlar. Maya hücresi tarafından tüketilen şekerin yarısı enerji üretimi için kullanılırken diğer yarısı da hücre içi yapıtaşlarının oluşturulmasında kullanılır (Türker, 2005).

Şekil 2.2’de maya hücresinin gerçekleştirdiği şeker metabolizması (glikoliz) grafiksel olarak gösterilmiştir. Endüstriyel ekmek mayası fermentasyonlarında şeker kaynağı olarak melas kullanılmaktadır. Melas içerisinde şeker, sukroz olarak bulunmaktadır. Bu sukroz’da fermentasyon ortamında, hücre duvarındaki invertaz tarafından hidrolize edilerek fruktoz ve glikoz’a dönüştürülür. Glikoz ve fruktoz hücre içinde glikoliz sonunda oksijenle yakılarak pyruvat’a dönüştürülür.

Hücrenin solunum kapasitesine ve ortamdaki oksijen miktarına bağlı olarak pyruvat, oksijensiz (anaerobik) olarak alkol oluşumuna veya oksijeni (aerobik) kullanarak TCA çevrimi ve solunum yaparak enerji ve biyokütle dönüşür. Alkol oluşumunu açıklayan metabolik faaliyet başka bir reaksiyon ile üremeye katkıda bulunabilir.

Eğer solunum kapasitesi, ortamda bulunan şekeri tamamen yakmaya yeterli ve fazla ise fazla olan solunum kapasitesi alkolü oksidatif olarak yakma yönünde ilerleyecektir. Glikoliz işlemleri sitoplazmada gerçekleşirken, TCA çevrimi ve solunum mitekondrilerde gerçekleşir (Kristiansen, 1994).

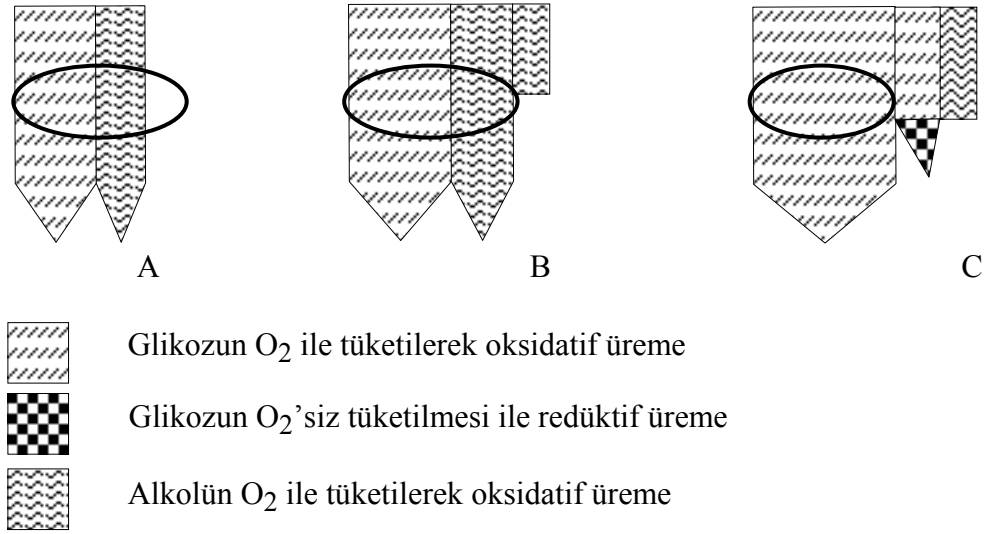
Şimdiye kadar glikozun oksijenle yakılması ile enerji elde edilmesi anlatılmıştır. Glikozun oksijenle yakılması ile gerçekleşen maya üremesi ve biyokütle oluşumu yüksek verimle gerçekleşir. Buraya kadar anlattıklarımızda, enerji üretici ve mikrobiyal üremeyi sağlayan reaksiyonlar için ortam koşullarının önemi kadar, hücrenin oksidasyon kapasitesinin de önemli bir sınırlama olduğu görülmektedir.



Şekil 2.2. Glikoliz'in metabolik haritası (Axellson, 1989).

2.3. Darboğaz Prensibi

Alkol oluşumu taşma (overflow) reaksiyonu olarak görülebilir. Eğer sitoplazmada glikoliz işlemi ile üretilen pyruvate, TCA çevrimi ve solunum ile metabolize edilebilecek miktardan fazla ise fazla olan pyruvate alkol'e dönüşür. Diğer yandan, ortamda alkol varsa ve glikoz miktarı az ise alkol mitekondriler tarafından kullanılır. Eğer ortamda yeterli miktarda glikoz ve etanol varsa glikoz öncelikle tüketilir. Glikoliz sonucu alkol oluşumunu açıklayan pekçok teori mevcuttur. Bu konuda Sonnleitner and Kappeli (1986) "Solunum Kapasitesi Sınırlaması ve Darboğaz prensibini" geliştirmişlerdir.



Şekil 2.3. Darboğaz prensibinin şematik gösterimi

Şekil 2.3'te şematik olarak gösterilen A çiziminde solunum kapasitesi, glikoz ve alkolü oksidatif olarak tüketebilecek değerdedir. Bu durumda glikoz ve alkol oksidatif olarak tüketilir. B çiziminde, glikoz konsantrasyonu tek başına solunum kapasitesinden küçük olmasına rağmen glikoz ve alkol konsantrasyonu solunum kapasitesinden büyüktür. Bu durumda glikoz oksidatif olarak tüketilmesine rağmen, alkolün bir kısmı oksidatif olarak tüketilmez. C çiziminde, glikoz konsantrasyonu solunum kapasitesinden büyük olduğu için fazlalık glikoz redüktif olarak alkole dönüşür. Bu durumda alkol tüketilmesi sözkonusu değildir (Keuler, 1993).

Üreme süresi içinde, her bir maya hücresi metabolik değişim gösterir. Metabolik değişim, tek hücre fazı ve bölünme fazı olmak üzere iki fazda gelişir. Tek hücre fazı, substrat (glikoz ve etanol) konsantrasyonuna bağlı olarak solunum ve hacimsel büyüme hızı ile tanımlanabilir. Bölünme fazı, sabit bir zaman sabitine ve yüksek metabolizma hızına sahiptir.

Oksijensiz ortam koşullarında (anaerobik) maya hücresi bir kısım glikozu metabolize ederek alkole dönüştürür. Bu durumda elde edilen enerji çok düşüktür

(%5 – 10 oranında verimle). Bu tür oksijeni kullanmadan enerji elde edilen reaksiyonlara fermentasyon denir.

Oksijenin olduğu ortam koşullarında (aerobik) maya hücresi, ortamda varolan glikozu solunum kapasitesini dolduracak şekilde tüketir (solunum). Ortamda varolan ve solunum kapasitesini aşan glikoz alkole dönüşür. Bu olaya Crabtree etkisi denir (Crabtree effect).

2.4. Mayanın Üreme Kinetiği

Ekmek mayasının ihtiyaç duyduğu besin maddeleri, kendi elementel yapısından öngörülebilir. Literatürde yer alan pek çok çalışmada ekmek mayasının (kuru madde bazında) elementel yapısı % 46 karbon, % 32 oksijen, %8.5 azot, %6 hidrojen ve % 7.5 kül olarak kabul edilmektedir. Diğer bir kabule göre, uygun koşullarda 100 gr maya elde etmek için 200 gr sukroza gereksinim vardır. Oksidatif koşullarda maya üretiminde elementel balans denkliği aşağıdaki gibidir (Kristiansen, 1994).



Ekmek mayası üretiminde maya hücresi, karbon kaynağı olarak glukoz, fruktoz, sukroz, mannoz, galaktoz, hidrolize laktoz gibi indirgenbilir şeker türlerini ve etanolü kullanmaktadır. Bu bileşenler maya hücre duvarındaki enzimler tarafından parçalanarak hücre içine alınır. Endüstriyel maya üretiminde şeker kaynağı olarak şeker pancarı melası veya şeker kamışı melası kullanılmaktadır. Bunlar fermentasyonda ayrı ayrı kullanılabilirdiği gibi birbirleri ile karıştırılarak kullanılabilir. Bu konuda üreticiler kolay ulaşılabilen ve ekonomik olan melas türünü seçmektedirler.

Şeker fabrikalarından gelen ve maya fermentasyonu için uygun olmayan melas, ön işlemlerden geçirilir. Bu işlemleri aşağıdaki gibi sıralayabiliriz,

- seyreltme (dilution)
- arıtma (clarification)
- sterilizasyon

Seyreltme ile yoğun olan melas, daha sonraki işlemler için rahatlıkla taşınabilecek yoğunluğa getirilir. Daha sonra melas içindeki safsızlıkların giderilmesi (çamur ve katı parçacıklar) için arıtma (clarification) işlemi uygulanır. Melasın fermentasyonda kullanımından önce sterilize edilmesi gereklidir.

Denklem 2.1 incelendiğinde mayanın üremesi için melas ile beraber azot (N), fosfor (P), potasyum (K), magnezyum (Mg), çinko (Zn) besin maddelerine gereksinim duymaktadır. Endüstriyel ekmek mayası üretiminde azot kaynağı olarak sıvılaştırılmış amonyak, amonyum tuzları (fosfat, sülfat) ve üre kullanılır. Fermentöre verilen azot miktarı nihai üründen istenen aktive ve stabilite değerlerine göre belirlenir.

Maya hücresi % 5 -10 arası kül (inorganik elementler) içermektedir. Bu inorganik elementlere örnek olarak fosfat, potasyum, magnezyum, sülfür ve çeşitli iz elementleri verilebilir.

Uygun koşullarda gerçekleştirilen bir kesikli fermentasyonda üssel maya üremesi aşağıdaki denklem ile ifade edilir :

$$dX / dt = \mu X \quad (2.2)$$

X : maya konsantrasyonu (g/L)

μ : özgül üreme hızı (h^{-1})

Yarı kesikli (fedbatch) fermentasyonlarda maksimum verim elde etmek için maya üremesi substrat sınırlamalı koşullarda gerçekleştirilir ve denklem 2.2 yarıkesikli fermentasyonlarda maya üremesini tanımlamaktadır. Yarıkesikli (fedbatch) fermentasyonlarda özgül üreme hızı sabit değildir ve fermentasyon sonuna doğru azalmaktadır. Yarıkesikli fermentasyonda özgül üreme hızı, fermentör oksijen transfer kapasitesi, biyokütle derişimi ve glikoz derişiminin bir fonksiyonudur. Özgül üreme hızı başta sıcaklık olmak üzere, substrat konsantrasyonu, pH ve oksijen miktarı gibi proses değişkenlerine bağlıdır.

Denklem 2.1'de verilen üreme stokiyometrisinde 1 gr maya için 1 gr oksijen gerektiği görülmektedir. Maya üretimi için oksijen beslemesi diğer besin maddeleri kadar gereklidir. Maya üretiminde oksijen beslemesi, fermentasyon sıvısı içine hava akımı verilerek sağlanır. Maya üremesindeki önemli sınırlamalardan biri de atmosferik oksijenin fermentasyon sıvısına aktarımıdır. Fermentör tasarımında en önemli kriterlerden biri, fermentörün oksijen transfer kapasitesinin maksimum yapılmasıdır. Uygulamada ekmek mayası üretimi için çok çeşitli tipte oksijen transferini gerçekleyen fermentörler mevcut olmasına karşın yaygın kullanılanı kabarcık kolon fermentörlerdir. Fermentörler çok çeşitli fiziksel boyutlarda imal edilmektedir. Gerçekleştirilecek fermentasyon türüne göre 50 m³'ten 350 m³'e hacime kadar fermentör imal edilmektedirler.

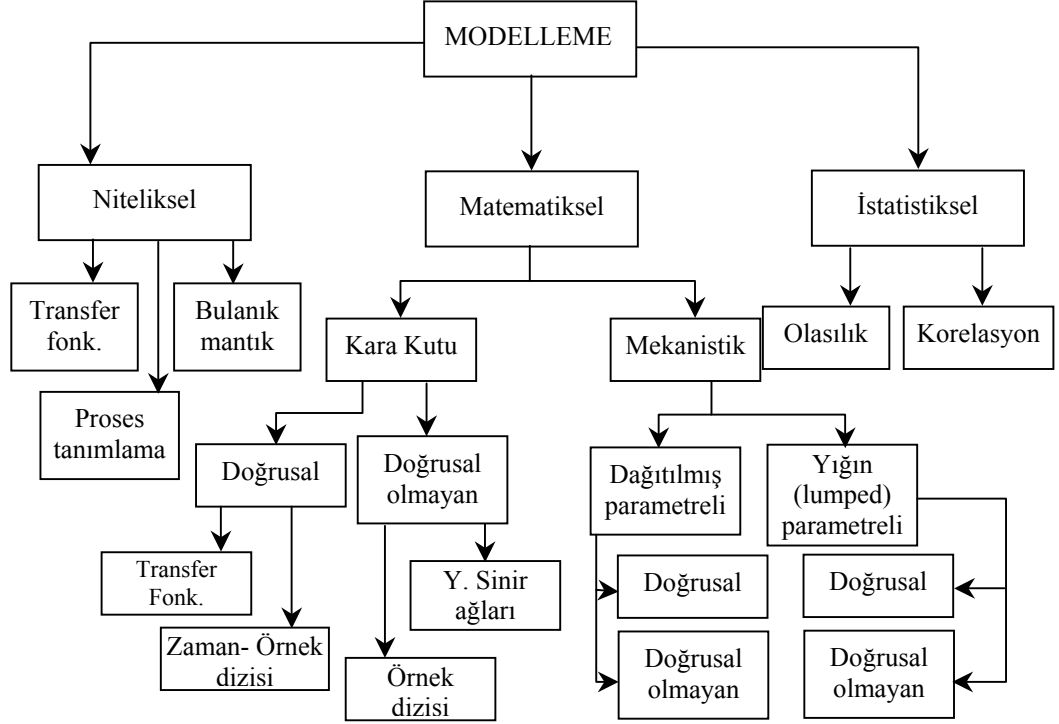
Fermentör seçiminde önemli bir diğer kriterde soğutma sistemi kapasitesi ve ısı uzaklaştırma metodudur. Fermentörlerde soğutma amacı ile serpantinler veya plakalı ısı değiştiriciler kullanılmaktadır. Bir fermentörde olması gereken soğutma yüzey alanı, hedeflenen maya miktarına, substrat sıcaklıklarına (melas, amonyak), havalandırmadan gelen ısıya (karıştırıcıdan, hava beslemesinden) ve soğutma suyu sıcaklığına bağlıdır. Fermentör seçiminde ve tasarımında havalandırma tipi ve ısı uzaklaştırma en önemli kriterlerdir.

2.5. Proses Modelleme

Bir sisteme ait herhangi bir tanımlama o sisteme ait bir model olarak kabul edilebilir. Kontrol bilimi açısından baktığımızda bir model; sistem çalışma koşullarının değişiminde olabilecek değişimleri tanımlamalıdır. Sistem modelleri hedeflenen amaca göre farklı şekilde tasnif edilmektedir. En genel haliyle

- İstatistiksel (statistical)
- Matematiksel (mathematical)
- Niteliksel (qualitative)

olarak sınıflandırılabilir (Willis ve Tham, 1994). Proses izleme ve kontrol için model sınıflandırması aşağıda Şekil 2.4'teki gibi gösterilebilir.



Şekil 2.4. Model tiplerinin sınıflandırılması (Willis ve Tham, 1994).

2.6. Matematiksel Modelleme

2.6.1. Mekanistik modelleme

Bir proses davranışı açık bir şekilde tanımlı ise ve dinamik davranışı diferansiyel denklemlerle ifade edilebiliyorsa bu tanımlama mekanistik proses modelleme olarak adlandırılmaktadır. Mekanistik model denklemleri genellikle fiziksel veya kimyasal yasalardan türetilerek elde edilir. Sisteme bağlı olarak dağıtılmış (distributed) ve yığın (lumped) parametrelili olarak iki şekilde sınıflandırılırlar. Yığın parametrelili modellemede adi diferansiyel denklemler (ordinary differential equations) kullanılırken, dağıtılmış parametrelili modellemede kısmi diferansiyel denklemler (partial differential equations) kullanılır. Adi diferansiyel denklemlerle prosesin davranışı tek boyutlu olarak tanımlanırken, kısmi diferansiyel denklemlerle çok boyutlu tanımlama (zaman, uzay) yapılır. Dağıtılmış parametrelili model geliştirme tekil parametrelili model geliştirmeye göre çok daha karmaşık ve zor bir işlemdir.

Diğer taraftan pekçok durumda zaman ve finansal kısıtlamalardan dolayı özellikle karmaşık ve iyi tanımlanamayan prosesler için mekanistik modelleme yapmak pratik olarak mümkün olmamaktadır. Bu tür durumlarda kara kutu yaklaşımı ile modelleme yapılması daha uygundur.

2.6.2. Kara kutu (black-box) modelleme

Bu modellemede sistem giriş çıkışları arasında fonksiyonel bir tanımlama yapılır. Elde edilen model tek parametrelidir. Bu tür bir modelin parametreleri fiziksel bir anlam içermeyebilir. Karakutu modeller, doğrusal ve doğrusal olmayan olarak iki ana kısımda incelenmektedir. Doğrusal modellerde transfer fonksiyonu ve zaman-örnek serisi modelleme öne çıkar. Doğrusal karakutu modellemede parametre tanımlamasında pekçok farklı metod kullanılırken, en çok tercih edilen teknik minimum kareler (least square) yaklaşımıdır. Doğrusal olmayan sınıfta, yapay sinir ağları ile modelleme ve zaman-örnek dizisi modelleme özellikleri benzerlik göstermektedir. Doğrusal olmayan zaman dizisinde, prosesin davranışı, gösterimde kullanılan değişkenlerin ağırlaştırılmış çarpımları ve kuvvetlerinin birleşimi ile modellenir. Diğer taraftan yapay sinir ağları ile doğrusal olmayan modelleme yaklaşımı artan hızla uygulama imkanı bulmakta ve bilgisayar teknolojisi ile çok daha geniş uygulama imkanı bulmaktadır (Willis ve Tham, 1994).

2.7. Niteliksel modelleme

Prosesin doğası gereği matematiksel modellemenin zor olduğu durumlarda niteliksel modelleme (qualitative) öne çıkar. Bu tür modellemenin en temel formu kural tabanlı (If- Then) modellemedir. Bu kurallar insan tecrübelerinden elde edilir. Bundan başka prosesten alınan ölçümlerden faydalanılarak genetik algoritmalarla da niteliksel modelleme yapılabilir. Bulanık küme teorisi kullanılarak elde edilen modeller de niteliksel model sınıfına dahil edilmektedir (Willis ve Tham, 1994).

2.8. İstatistiksel Modelleme

Prosesleri istatistiksel terimlerle tanımlamakta başka bir modelleme türüdür. Proseslerin içerdiği belirsizlikler istatistiksel yaklaşımı zorunlu kılmaktadır. Bu teknikte istatistiksel veri analizi, enformasyon teorisi, oyun teorisi ve karar verme teorisi temel oluşturmaktadır. Olasılık tipi modellemede olasılık yoğunluk fonksiyonları kullanılır. Normal dağılımlı olasılık yoğunluk fonksiyonları yaygın olarak kullanılır. Korelasyon tipi modellemede, benzer değerler etrafında salınım gösteren değişkenlerin benzerlikleri derecelendirilerek tanımlama yapılır. İstatistiksel modellemede proses dinamikleri elde edilemesede yüksek seviyeli karar verme, proses izleme, veri analizi gibi konularda yaygın uygulama imkanı bulmaktadır (Willis ve Tham, 1994).

2.9. Biyoproses Modelleme

Biyoprosesler, biyoreaktörler içinde çeşitli mikroorganizma (bakteri, maya, küf) ve hücre kültürlerinin uygun koşullarda üreme ve oluşumu olarak tanımlanabilir. İçinde reaksiyonların gerçekleştiği biyoreaktörlerde uygun ortam koşullarını sağlamak amacıyla çeşitli besin maddelerinin (substrat) beslenmesi, sıcaklık, pH ve oksijen konsantrasyonu kontrollerinin yapılması gereklidir. Biyoproseslerin modellemesinde amaç, biyoreaktörün gerçek performansını iyi kurulmuş teoriye dayanarak öngörmeğe çalışmaktır. Modelleme sırasında modeli kuran, en önemli proses parametrelerinin proses üzerine etkisini ve herbir parametrenin nicel olarak nasıl belirleneceğini gözönüne almak zorundadır. Biyoproses uygulamalarında model öngörüsü ile deneysel veriler arasında uyumluluk olmalıdır.

Biyoproses hücre modelleri aşağıdaki gibi sınıflandırılmaktadır (Tsuchiya ve diğ., 1966):

- Ayrılmaz modeller (nonsegregated) : Hücreler arasında ayırım yapılmayan modellerdir. Bu tür modellerde prosesin ortalama hücrelerden oluştuğu kabul edilir.

- Ayrılabilir modeller (segregated): Bu modellerde ise kültür, her hücresi bağımsız varlık olan topluluk olarak kabul edilir.
- Yapısal olmayan model (unstructured): Bu yaklaşımda biyokütle tek bir makroskobik hücre olarak ele alınır. Biyokütle oluşumu, substrat tüketim, ürün oluşum hızları kinetik bağıntılarla tanımlanır. Stokiyometrik ilişkiler kullanılarak dönüşüm hızları hesaplanır ve materyal balansı kullanılarak proste yeralan tüm bileşenlere ait derişimler hesaplanır. Literatürde yeralan pek çok fermentasyon modeli bu şekilde tanımlıdır.
- Yapısal modeller (structured) : Biyokütleyi ve dışı ile olan ilişkileri hücre içi farklılıkları dikkate alarak tanımlanan çok daha detaylı modellerdir.

Modelleme tüm optimizasyon ve kontrol uygulamalarında olmazsa olmaz bir bileşendir. Yarıkesikli biyoprosesler üç farklı seviyede ve farklı proses evrelerinde optimize edilmeye çalışılır.

- Mikroorganizmanın geliştirilmesi
- Proses geliştirme
- Endüstriyel proses optimizasyonu

Bu aşamalar birbiri ile ilişkili olsalarda herbir aşamada farklı analitik metodlar, modelleme yaklaşımları ve optimizasyon teknikleri kullanılır. Modelleme yapılarak potansiyel proses geliştirme masrafları azaltılmakta, gereksiz deneyler engellenmektedir. Model simülasyonları ile prosesin anlaşılması kolaylaşmakta, nümerik proses optimizasyonu ve model tabanlı kontrol işlemleri bilgisayar ortamında gerçekleştirilmektedir.

2.9.1. Balans denklemleri

Biyoreaktörde oluşturulan sistemin herbir kapasite özelliği için yazılır (kütle, enerji veya herbir kimyasal element için). Balans denklemleri korunum denklemlerine göre farklı şekillerde yazılabilir. İlerleyen bölümlerde bunların temelleri sunulmuştur (Türker, 2005) .

2.9.1.1. Birikim hızı

Kontrol bölgesi içinde kapasite özelliğinin zamanla değişimini gösterir. Tam karıştırmalı bir reaktörde substrat derişimi S (kg/m^3), hacimde V (m^3) ile gösterildiğinde raktördeki substratın toplam kütlesi VS ve substratın birikme hızı $d(VS)/dt$ 'dir. Birikim hızlarını birim hacim başına ifade etmek gerekirse, birikim hızı toplam hacime bölmek gerekir (Türker, 2005):

$$\text{birikim hızı} = \frac{1}{V} \frac{d(VS)}{dt} \quad (\text{kg}/\text{m}^3\text{h}) \quad (2.3)$$

2.9.1.2. Yığın akış

Reaktöre giren ve çıkan akışkanın yığın akışıyla taşınan madde ve enerji için yazılır. Toplam kütleli akış, hacimsel akış ve yoğunluğunun çarpımıyla verilmektedir. Herhangi bir i bileşenin kütleli hızı akış hızı, hızının (m^3/h) derişimi (kg/m^3) ile çarpımına eşittir. i bileşenin kütleli hızı, besleme debisi, F (m^3/h) ile beslemedeki derişiminin çarpımına eşittir (Türker, 2005). Yani

$$M_i = F_i S_i \quad (\text{kg}/\text{h}) \quad (2.4)$$

veya kontrol bölgesinin birim hacmine dayalı olarak:

$$\frac{M_i}{V} = \frac{F_i S_i}{V} \quad (\text{kg}/\text{m}^3\text{h}) \quad (2.5)$$

olur.

2.9.1.3. Yayınma (diffusion) yoluyla aktarım

Yayınma yoluyla aktarım Fick yasası ile ifade edilebilir:

$$N_i = -D_i \frac{dS_i}{dz} \quad (2.6)$$

burada N_i arayüzeyden aktarılan i bileşenin akısı ($\text{kg/m}^2\text{h}$), dS_i/dz derişim gradyentidir. Fick yasasına göre yayınma her zaman azalan derişim yönünde gerçekleşir. Moleküler yayınma koşulları altında orantı katsayısı, D_i , moleküler yayınlıdır (moleculer diffusivity) (Türker, 2005).

2.9.1.4. Üretim veya tüketim terimleri

Kontrol bölgesinde bileşenlerden biri (substrat, biyokütle veya ürünler) için balans denklemini şöyle yazılabilir:

$$\begin{array}{ccccccc} i \text{ bileşenin} & & i \text{'nin} & & i \text{'nin kontrol} & & i \text{'nin kontrol} \\ \text{kontrol} & = & \text{kontrol} & - & \text{bölgesinden} & +/- & \text{bölgesinde} \\ \text{bölgesinde} & & \text{bölgesine} & & \text{çıkış hızı} & & \text{üretim veya} \\ \text{birikme hızı} & & \text{giriş hızı} & & & & \text{tüketim hızı} \end{array}$$

Yukarıdaki ifadede en son terimin önündeki işaret eğer i üretiliyorsa pozitif, tüketiliyorsa negatiftir. i 'nin toplam kütlese üretim/tüketim hızı ise:

$$\text{üretim/tüketim hızı} = r_i V \quad (2.7)$$

$$\text{birimleri ise } \frac{\text{kg (mol)}}{\text{h}} = \frac{\text{kg (mol)}}{\text{m}^3\text{h}} \text{m}^3$$

Burada r_i i bileşenin hacimsel üretim/tüketim hızıdır. Kontrol bölgesindeki toplam hızı elde etmek için her terim hacim, V ile çarpılır (Türker, 2005).

2.9.1.5. Toplam kütle ve bileşen balansı

Sistemdeki kütle birikme hızı, dM/dt , kontrol bölgesine giren ve terkeden akımların büyüklüklerine bağlıdır. Toplam kütle denkleği şöyle yazılabilir:

$$\begin{array}{ccccccc} \text{Kontrol} & & \text{Kontrol} & & \text{Kontrol} \\ \text{bölgesinde} & = & \text{bölgesine} & - & \text{bölgesinden} \\ \text{kütlenin} & & \text{kütlenin giriş} & & \text{kütlenin çıkış} \\ \text{birikme hızı} & & \text{hızı} & & \text{hızı} \end{array}$$

yukarıdaki denklik matematiksel olarak şöyle ifade edilebilir:

$$\frac{dM}{dt} = F_i \rho_i - F \rho \quad (2.8)$$

$$\frac{d(\rho V)_{sistem}}{dt} = F_i \rho_i - F \rho \quad (2.9)$$

eğer yoğunluklar eşitse

$$\frac{dV}{dt} = F_i - F \quad (2.10)$$

Yatışkın durum hacmin sabit olmasıyla, $dV/dt=0$, yani giren akışın çıkan akışa eşit olmasıyla mümkündür. Toplam kütle denkliği hacmin zamanla değiştiği biyoreaktör uygulamaları için önemlidir.

Reaksiyona giren bir bileşen için kütle balansı benzer şekilde yazılabilir:

$$\begin{array}{ccccccc} \text{i bileşeninin} & & \text{i'nin} & & \text{i'nin kontrol} & & \text{i'nin kontrol} \\ \text{kontrol} & = & \text{kontrol} & - & \text{bölgesinden} & + & \text{bölgesinde} \\ \text{bölgesinde} & & \text{bölgesine} & & \text{çıkış hızı} & & \text{üretim hızı} \\ \text{birikme hızı} & & \text{giriş hızı} & & & & \end{array}$$

Yada matematiksel olarak denklem 2.11 gibi ifade edilebilir (Türker, 2005).

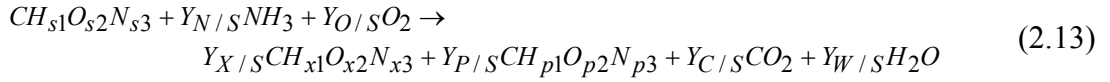
$$\frac{d(VS_i)}{dt} = F_i S_i - FS + r_i V \quad (2.11)$$

2.9.1.6. Elementel denklikler ve reaksiyon hızları

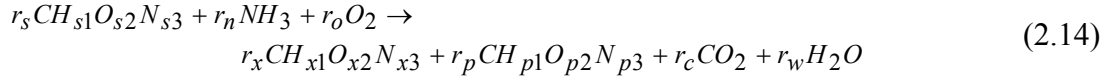
Sisteme giren element, sistemi terkeden element ile sistemde biriken elementin toplamına eşittir. Balans denkleminde üretim veya tüketim terimi yoktur. Çünkü elementler ne üretilir nede tüketilir. Denklem (2.10)'dan i elementi için

$$F_i - F = \frac{dVC_i}{dt} \quad (2.12)$$

yazılabilir. Genel olarak biyolojik reaksiyonların stokiyometrisi şu denklemle gösterilebilir:



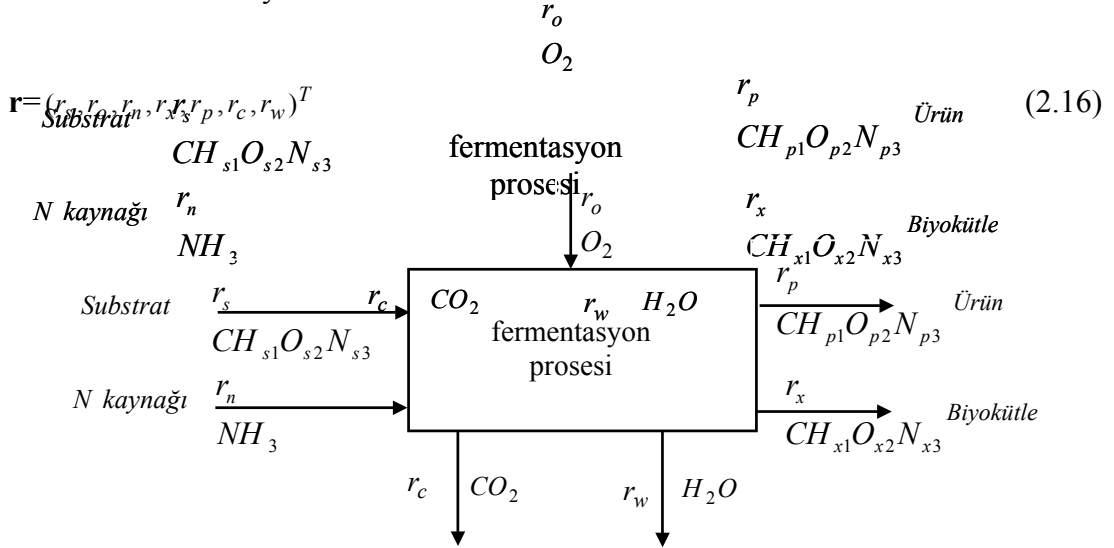
Burada $Y_{i/j}$ substrat üzerinde molar verimlerdir. Hızlar cinsinden yazılırsa



şeklinde ifade edilebilir. Denklem 2.14'te yedi hız ifadesi vardır. C, H, O ve N elementleri için elementel denklikler yazılırsa aşağıdaki denklemler elde edilir:

$$\begin{aligned} C: r_s &= r_x + r_p + r_c \\ H: r_s s_1 + 3r_n &= x_1 r_x + p_1 r_p + 2r_w \\ O: r_s s_2 + 2r_o &= x_2 r_x + p_2 r_p + 2r_c + r_w \\ N: r_s s_3 + r_n &= x_3 r_x + p_3 r_p \end{aligned} \quad (2.15)$$

Burada hız vektörü yazılırsa denklem 2.16 elde edilir.



Şekil 2.5. Fermentasyon sisteminde makroskopik akışlar (Türker, 2005).

Bir biyoproses ve temel bileşenleri grafiksel olarak Şekil 2.5'teki gibi gösterilebilir. Şekil 2.5'te girdi ve çıktılar en genel formlarıyla gösterilmiştir. Yukarıda stokiyometrisi verilen ve grafiksel gösterimi yapılan biyoproses için elementel

kompozisyon matrisi, toplam dört element olduğu dikkate alınarak, denklem 2.17'deki gibi yazılabilir:

$$E = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ s1 & 0 & 3 & 0 & p1 & 2 & x1 \\ s2 & 2 & 0 & 2 & p2 & 1 & x2 \\ s3 & 0 & 1 & 0 & p3 & 0 & x3 \end{bmatrix} \begin{matrix} C \\ H \\ O \\ N \end{matrix} \quad (2.17)$$

Toplam kütle denkleği esas alınarak aşağıdaki bağıntı yazılabilir.

$$r * E = 0 \quad (2.18)$$

2.9.2. Hız denklemleri

Kontrol bölgesinin sınırlarındaki madde veya enerji aktarım hızları şeklinde veya kontrol bölgesi içinde herbir bileşenin üretim veya tüketim hızları şeklinde yazılabilir. Balans denklemlerinde kullanılan kinetik hız ifadeleri ya özgül (specific) üreme hızı ile hücre derişiminin çarpımı yada hız ifadesi ile stokiyometrik katsayının çarpımı veya her ikisinin kombinasyonu şeklinde yazılır (Türker, 2005). Birinciye örnek olarak hücre üremesi için çok kullanılan

$$r_x = \mu X \quad (2.19)$$

ifadesidir. Burada μ özgül (specific) üreme hızı (birim biyokütle başına), X hücre derişimidir. İkinciye örnek ise üremeye bağlı ürün oluşumu ifadesidir:

$$r_p = \alpha r_x \quad (2.20)$$

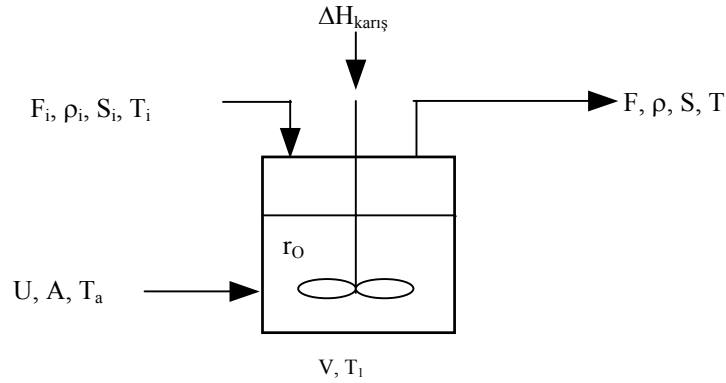
Burada α stokiyometrik katsayıdır (kg ürün/kg hücre).

2.9.3. Termodinamik denklemler

Bu denklemler kontrol bölgesi içinde veya faz sınırının iki tarafında termodinamik özellikler (basınç, sıcaklık, derişim, yoğunluk) arasındaki ilişkiler esas alınarak yazılırlar. Enerji balansı, biyoreaktör içinde reaksiyon ısıtma veya soğutma etkilerinden dolayı sıcaklık değişiminin olduğu durumlarda gereklidir (Türker, 2005). Örneğin reaksiyon ısısı biyoreaktör sıcaklığında yükselmeye sebep oluyorsa enerji balansı gereklidir. Enerji balansı, kütle balansı için uygulanan kuralları izlenerek denklem 2.21'deki şekilde yazılabilir:

Enerjinin birikim hızı	=	Enerjinin giren akış ile giriş hızı	-	Enerjinin çıkan akış ile çıkış hızı	-	Transfer ile enerjinin çıkış hızı	+	Reaksiyon ile enerjinin üretim hızı	+	Karıştırma ile enerjinin giriş hızı
------------------------------	---	--	---	--	---	--	---	--	---	--

$$V\rho c_p \frac{dT}{dt} = F_i \rho c_p (T_i - T) + UA(T_c - T) + r_Q V_L + \Delta H_{karış} \quad (2.21)$$



Şekil 2.6. Sürekli biyoreaktörde enerji değişkenlerinin genel gösterimi

2.10. Biyoproses İşletim Türleri

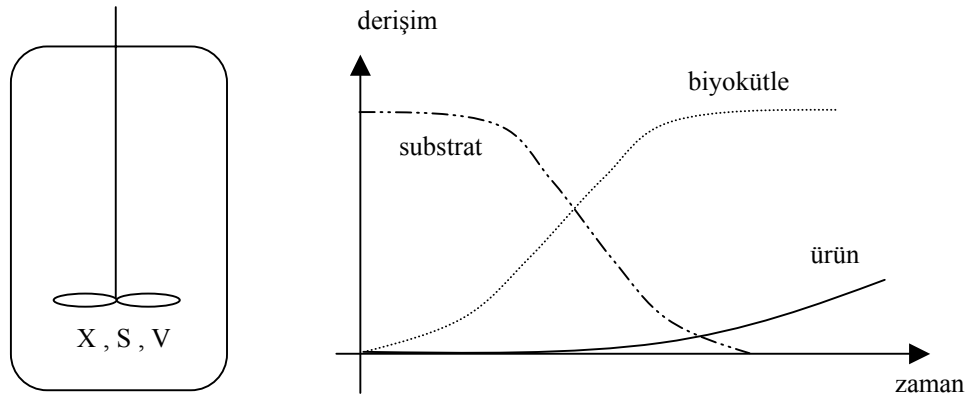
Biyokütlenin özelliklerine göre farklı tipte reaktörler olmasına rağmen en yaygın reaktör tipleri karıştırmalı (stirred vessel), hava kaldırmalı (airlift) ve kabarcık kolon (bubble column) reaktörlerdir. Biyoreaktörler kesikli (batch), yarıkesikli (fedbatch),

sürekli (continuous) işletim olmak üzere üç farklı türde işletilirler. Her türde reaktörün iyi karışması esastır. İşletim türlerini üç ana başlık altında incelenebilir.

2.10.1. Kesikli işletim

Bu tür işletimde reaktör başlangıçta fermentasyon sıvısı ile doldurulur, aşılama yapılmaktadır. Belli bir süre sonunda hücre yoğunluğunun veya ürün konsantrasyonunun belli bir değere ulaşması beklenir. Bundan başka herhangi bir girdi beslemesi ve çıktı alınması yapılmamakta sadece sıcaklık ve/veya gerekiyorsa oksijen beslemesi yapılmaktadır. Bu süre sonunda reaktör boşaltılır ve yeni bir operasyon için hazırlanır.

Reaksiyon süresince substrat, ürün ve biyokütle konsantrasyonunda değişim olur. Reaksiyon boyunca substrat konsantrasyonu azalırken, biyokütle ve ürün konsantrasyonu artar, reaktöre herhangi giriş çıkış olmaz (Şekil 2.7).



Şekil 2.7. Kesikli reaktör ve derişimlerin zamanla değişimi.

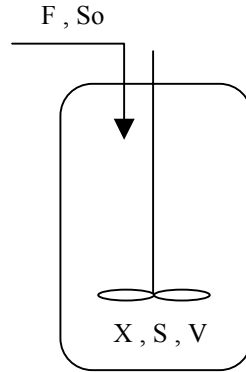
2.10.2. Yarıkesikli işletim

Reaktöre başlangıçta mikroorganizma ve besin maddeleri konur, Yarıkesikli işletim modunda, biyoreaktöre fermentasyon boyunca substrat beslemesi yapılır. İşletim boyunca reaktörden alınan örnekler dışında ürün uzaklaştırması yapılmaz. Bunun sonucu olarak, işletim süresince reaktördeki toplam reaksiyon hacmi artar. Bu işletim

tipinde yüksek biyokütle/ürün verimi hedeflenmektedir. Biyokütle/ürün derişimi yüksek değerlere ulaştığında dozajlama durdurulur ve operasyon tamamlanır.

Bu işletim modunda substrat besleme hızı ve konsantrasyonunu değiştirerek reaksiyon hızı istenen değerde kontrol edilebilir. Şekil 2.9’da gösterilen yarıkesikli reaktörde F besleme hızı ve S_0 substrat konsantrasyonları sabit olabileceği gibi zamanla değişen doğrusal veya logaritmik değerler alabilir. Değişik besleme Őekilleri ile farklı hızlarda değişen biyokütle üremesi elde edilebilir. Yarıkesikli işletim modunun önemli karakteristikleri ;

- girdi beslemesi yapılarak kesikli işletim modunun devamı olarak çalıştırılabilir.
- hücre büyüme ve çoğalma evreleri ayrı fazlar olarak kontrol edilebilir.
- farklı besleme Őekilleri ile farklı kontrol metodları uygulanabilir.
- yüksek konsantrasyonda biyokütle ve ürün elde edilebilir olmasıdır.



Şekil 2.8. Yarıkesikli reaktör gösterimi

Reaktördeki girdi ve biyokütle için kütle denklilikleri aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\begin{aligned}
 \frac{dC_x}{dt} &= \mu C_x - k_{d,x} C_x - \frac{F}{V} C_x \\
 \frac{dC_s}{dt} &= \frac{(F S_{in})}{V} - q_s C_x - \frac{(F C_s)}{V} \\
 \frac{dC_p}{dt} &= (q_{p,pr} - q_{e,cs}) C_x - \frac{(F C_p)}{V}
 \end{aligned} \tag{2.22}$$

Verilen denklemlerde C_s, C_x, C_p ile substrat, biyokütle, ürün derişimleri, F_k substrat besleme hızı, V hacim ve $q_s, q_{e,pr}, q_{e,cs}$ ise üretim/tüketim hızlarıdır.

2.10.3. Sürekli işletim

Reaktöre besleme girdisi ve ürün alımı sürekli olarak yapılır. Sürekli işletimde çalışan reaktörlerde, reaksiyon başladıktan kısa bir zaman sonra sistem yatışkın hale ulaşır. Sürekli işletim modu endüstride yaygın olarak kullanılmamakta daha çok laboratuvar çalışmalarında, organizmaların üreme kinetiklerinin ve enzim reaksiyon kinetiklerinin belirlenmesinde ve atık su prosesleri kullanılır. Bu işletim modunda kesikli/yarıkesikli işleme göre daha az kontrol işlemi gerekmektedir. Bu yöntemde reaktörün kalıcı duruma ulaşması zaman alıcı ve zor olmasında dezavantajdır.

2.11. Biyoproses Modellemede Yapay Zeka Metodları

Son yıl yıl içinde yapay zeka uygulamaları (bulanık mantık, yapay sinir ağları, uzman sistemler ve genetik algoritmalar) farklı proseslerde olduğu gibi biyoproses modellemede de başarılı bir şekilde uygulama imkanı bulan metodlardır. Bu tekniklerin biyoproseslerde kullanımı ile ilgili olarak yapılmış geniş bir değerlendirme Konstantinov ve Yoshida (1992) ve Stephanopoulos ve Han (1996)'ın çalışmalarında bulunabilir.

2.11.1 Bulanık modeller (fuzzy models)

Bulanık küme ve bulanık mantık teorisi Zadeh tarafından geliştirilmiştir (Haykin, 1994). Bulanık modelleme sistem tanımlama ve control, hata teşhisinde kullanım alanı bulmaktadır. Bulanık modellemede if-then kuralları ile tanımlama yapılarak proses hakkında varolan bilgi modellenir. Proses hakkında bilgi tecrübeli çalışanlardan veya deneyimli operatörlerden elde edilmektedir. Bunun yeterli bilgiyi sunmadığı durumlarda veri tabanlı bulanık mantık modelleme yapılmaktadır. Bulanık mantık bir yapay zeka uygulaması oluşturma prensibidir. Bulanık mantıkta temel olan bir sonuca varmaktır.

Normal bir programın yapısı:

Temel girdiler >>> Program >>> Sabit bir sonuç.
şeklindedir.

Oysa bir bulanık mantık uygulaması:

Veri yığını >>> Program >>> Girdilere ve varsayıma göre değişken
bir veya birden fazla sonuç
şeklindedir.

Bir bulanık mantık uygulamasındaki sonuç, aynı girdiler olsa bile değişik bir sonuç döndürebilir ve bir öbek halinde veriyi alabilir. Bulanık mantıktaki özellik bunun haricinde verilen verilerin örnekleme mantığı ile alınması ve tümü simgelediği varsayımı yapılması ve buna göre bir olasılık değerinin elde edilmesidir.

Bulanık mantığın önemli bir özelliği, klasik küme teorisinden farklı olarak sistem hakkındaki bilgiyi pek çok yerel bulanık bölgeye ayırması ve derecelendirerek küme üyelik değerleri belirlemesidir. Derecelendirmeli yapı sayesinde bölgeler arası yumuşak geçiş mümkün olmaktadır. Bulanık küme, küme'ye aitlik derecesi üyelik değeri ile tanımlanmış olan kümeyi ifade eder. Klasik küme kavramında bir eleman bir kümenin üyesidir veya değildir. Bulanık mantıkta küme aitlik derecesi, 0 ile 1 arasında değişir. 0 kümeye ait olmamayı, 1 ise kesin olarak o kümenin üyesi olmayı gösterir. Küme aitlik derecesi üçgen, yamuk, gauss eğrisi gibi standart fonksiyonlarla tanımlanabildiği gibi çok farklı fonksiyonlarda oluşturulabilir.

Bulanık modellemeler çok değişik biyoproses uygulamalarında kullanılmaktadır : tam proses modelleme, enzim kinetik modelleme, kinetik modelleme, metabolik durum kestirimi, ortam optimizasyonu, biyoproseslerde ölçme hatalarının teşhisi.

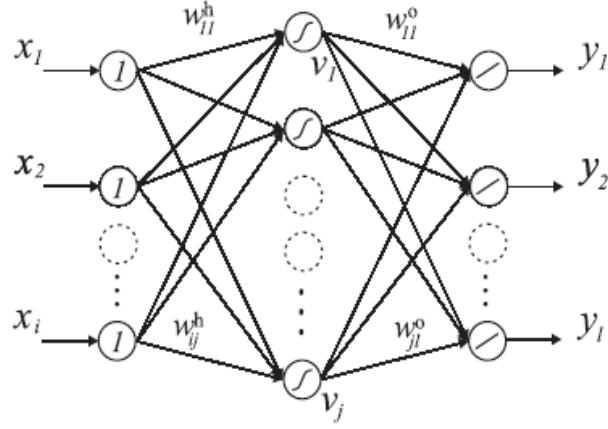
2.11.2 Yapay sinir ağıları (YSA)

İnsan beyninin fonksiyonlarına benzer, doğrusal olmayan esnek matematiksel yapılardan oluşur. Doğrusal olmayan sistemleri modellemede YSA'larını kullanmanın başlıca nedenleri olarak;

- öğrenme kabiliyeti
- genelleme yapma
- adaptasyon kabiliyeti
- gürültüye karşı tolerans

verilebilir.

Bir sinir ağındaki en temel bileşen nöron'dur. Bir nöron tüm girişlerin ağırlıklı toplamlarını hesaplar. Bunun için çarpan terimi eklenir ve sonuç doğrusal olmayan bir aktivasyon fonksiyonuna uygulanır. Nöronlar birbirlerine bağlanarak guruplandırılırlar. İleri yönlü bir yapay sinir ağı, katmanlar arası geribeslemesi olmayan pekçok katmandan oluşur. Bu tür bir yapıda aynı katmanda yeralan nöronlar arasında bağlantı bulunmaz. YSA'larında en yaygın metodlardan biri üç katmanlı ileri yönlü sinir ağıdır (Şekil 2.9). Burada ilk katman giriş katmanıdır ve bu katmanda girişler alınmakta ve ikinci katmanda yeralan her bir nörona yönlendirilmektedir. Bu ikinci katmana saklı katman denmektedir. Bu katmanda doğrusal olmayan aktivasyon fonksiyonları ve nöronlar bulunmaktadır. Bir sonraki katman çıkış katmanıdır. Bu katmanda da doğrusal olmayan aktivasyon fonksiyonları bulunur. Sinir ağına girişler X_i 'lerle verilmiştir. Saklı katmana uygulanan her bir giriş ω_{ij}^h aktivasyon ağırlık değeri ile çarpılır ve b_j^h ile toplanır.



Şekil 2.9. Üç katmanlı ileri yönlü sinir ağı (Roubos, 2002).

$$z_j = \sum_{i=1}^{N_i} \omega_{ij}^h x_i + b_j^h \quad (2.23)$$

Saklı katmanda yer alan doğrusal aktivasyon fonksiyonları (σ) sigmoidal veya gauss tipinde olabilir. Saklı katmandaki bir nöronun çıkışı

$$v_j = \sigma(z_j) \quad (2.24)$$

ile ifade edilir. Çıkış katmanında ise çıkış ifadesi aşağıdaki gibidir.

$$y_l = \sum_{j=1}^{N_h} \omega_{jl}^o v_j + b_l^o \quad (2.25)$$

burada j , saklı katmandaki j . nöronu, i ise i . ağ girişini, l ise l . ağ çıkışını temsil etmektedir. N_i , N_h ve N_o ise sırasıyla ağ giriş, nöron ve çıkış sayısını göstermektedir. Yapay sinir ağları çeşitli biyoproseslerin modellenmesinde de biyokütle ve ürün derişimlerinin belirlenmesinde, ölçümlerin filtrelenmesinde, durum kestiriminde ve besleme profillerinin optimizasyonunda uygulama imkanı bulmaktadır (Roubos, 2002).

2.11.3 Genetik algoritmalar (GA)

Genetik algoritma, doğadaki evrim mekanizmasını örnek alan bir arama metodudur. Yani bir veri grubundan özel bir veriyi bulmak için kullanılır. Doğada geçerli olan en iyinin yaşaması kuralına dayanarak sürekli iyileşen çözümler üretir. Bunun için "iyi"nin ne olduğunu belirleyen bir uygunluk (fitness) fonksiyonu ve yeni çözümler üretmek için yeniden kopyalama (recombination), değiştirme (mutation) gibi operatörleri kullanırlar. Genetik algoritmaların bir diğer önemli özelliği de bir grup çözümle uğraşmasıdır. Bu sayede çok sayıda çözümün içinden iyileri seçilip kötülerini elenebilir. Genetik algoritmaları diğer algoritmalarından ayıran en önemli özelliklerden biri de seçmedir. Genetik algoritmalarda çözümün uygunluğu onun seçilme şansını artırır ancak bunu garanti etmez. Seçim de ilk grubun oluşturulması gibi rastgeledir ancak bu rastgele seçimde seçilme olasılıklarını çözümlerin uygunluğu belirler (Roubos, 2002).

Genetik algoritmanın çalışmasını aşağıdaki gibi özetleyebiliriz ;

1. Olası çözümlerin kodlandığı bir çözüm grubu oluşturulur (çözüm grubunu, biyolojideki benzerliği nedeniyle, toplum (population), çözümlerin kodları da kromozom olarak adlandırılır).
2. Her kromozomun ne kadar iyi olduğu bulunur.
3. Bu kromozomları eşleyerek yeniden kopyalama ve değiştirme operatörleri uygulanır. Bu sayede yeni bir toplum oluşturulur.
4. Yeni kromozomlara yer açmak için eski kromozomlar ortadan kaldırılır.
5. Tüm kromozomların uygunlukları tekrar hesaplanır.
6. Eğer zaman dolmamışsa 3. adıma gidilir.
7. O ana kadar bulunmuş en iyi kromozom sonuçtur.

Genetik Algoritmaların kullanılma nedenleri ; denklem optimizasyonunda üç tip çözümden bahsedilir.

- Türev-İntegral hesabına (calculus) dayananlar
- Sıralamaya (enumeration) dayananlar
- Rastgele aramalar (random searches).

Türev-İntegral hesaplamalarına dayanan hesaplama yöntemleri çok derinlemesine çalışılmıştır. Bu yöntemler fonksiyonun türevinin köklerinin fonksiyonun en küçük ve en büyük değer veren noktaları olmasından yararlanır. Gerçek problemler için sıfır veren noktaları bulmak da ayrı bir problemdir.

Diğer bir yöntem ise alınan bir noktadan sadece yukarı ilerleyerek en iyi sonucu bulmayı hedefler. Tepe tırmanma (hill climbing) denen bu yöntem fonksiyon grafiğinin tepelerini tırmanır. Ancak çok sayıda dönme noktası içeren bir fonksiyonda çok sayıda tepe oluşur. Hangi tepenin en iyi çözüm olduğu bilinemez. Numaralama yöntemleri ise oldukça alışlagelmiştir. Sürekli olan reel sayı aralıkları belli sayıda parçaya ayrılarak parçalar denenir. Ancak problemler böyle çözmek için büyük olabilir. Bu yöntemin biraz daha geliştirilmiş şekli Dinamik programlamayla (dynamic programming) oluşturulur. Parçalar arasından iyi görünenler seçilir. Bu parçalar, tekrar parçalara ayrılarak işlem tekrarlanır. Bu yöntem de tepe tırmanma yöntemi gibi yanlış tepeleri araştırabilir. Dinamik Programlama tepelerin olmadığı aralıklarda başarılı ve hızlıdır.

Optimizasyonun iki amacı vardır,

- bir işi daha iyi yapmak.
- en iyi şekilde yapmak.

Günümüzde rastgele aramaların kullanımı artmaktadır. Bu tip aramalar en iyilemenin daha iyi yapma amacını sağlamakta daha başarılıdırlar. İnsanların bilgisayarlardan genel beklentisi mükemmellik olduğu için bu tip aramalar başarısız görünebilir. Genetik algoritmalar klasik yöntemlerin çok uzun zamanda yapacakları işlemleri kısa bir zamanda çok net olmasa da yeterli bir doğrulukla yapabilir.

Genetik Algoritmaların Farkları ;

- Genetik algortima parametrelerin kodlarıyla uğraşır. Parametreler kodlanabildiği sürece farketmez.
- Genetik algoritma bir tek yerden değil, bir grup çözüm içinden arama yapar.
- Genetik algoritma ne yaptığı konusunda bilgi içermez, nasıl yaptığını bilir. Bu nedenle bir kör arama (blind search) metodudur.
- Genetik algoritmalar olasılık kurallarına göre çalışır. Programın ne kadar iyi çalışacağı önceden kesin olarak belirlenemez. Ama olasılıkla hesaplanabilir.

Genetik algoritmalar biyoteknolojide, parametre kestiriminde, üreme ortamının optimizasyonunda, proses parametrelerinin optimizasyonunda, kontrol profillerinin optimizasyonunda ve model yapısının tanımlanmasında uygulama imkanı bulmaktadır. Biyoteknolojide yapay zeka uygulamaları ile ilgili çok geniş bir literatür taraması Roubos'un (2002) "Bioprocess Modelling and Optimization" çalışmasında bulunabilir.

3. BİYOPROSESLERİN KONTROLÜ ve LİTERATÜR İNCELEMESİ

Endüstriyel boyutlu biyoteknolojik proseslerde seksenli yıllarda bilgisayar teknolojisininde kullanımıyla birlikte önemli gelişmeler gözlemlenmektedir. Teknolojik gelişim doğal olarak biyoteknolojik alanlarda faaliyet gösteren firmaları çok daha fazla rekabet içine sokmaktadır. Rekabette üstünlük sağlamak içinde üretim proseslerinde kaynakların verimli kullanımı öne çıkmaktadır. Biyoteknolojik açıdan bakıldığında kaynakların verimli kullanımı üzerinde çalışılan biyoteknolojik proseslerin optimizasyonu ve kontrolü ile mümkün olmaktadır. Biyoteknolojik proseslerin optimizasyonu ve ileri düzey kontrolü ile verimlilik, ürün kalitesi arttırılır iken istenmeyen bozucu girişlerin etkisi ve kalite dalgalanmaları en aza indirilmektedir.

Diğer taraftan biyoproseslerin modellenmesi ve kontrolünde karşılaşılan proses dinamiğinin zamanla değişimi ve doğrusal olmaması, önemli proses değişkenlerinin (substrat, biyokütle, üreme hızı) ölçülmesi problemi, söz konusu proseslerin optimizasyon ve kontrolünü zorlaştırmakta ve endüstriyel boyutlarda kullanımını sınırlamaktadır. Biyoteknolojik proseslerde optimizasyon ve kontrolün amacı, proses durum değişkenlerini (proseste yer alan bileşenlerin derişimleri) proses kinetiklerindeki değişim ve gürültülere rağmen öngörülen değerlerde kontrol edebilmektir. Bu doğrusal olmayan yapı ve modelleme zorlukları optimizasyon ve kontrol alanındaki gelişmelerin endüstriyel boyutlu biyoproseslere uygulanmasını zorlaştırmakta ve geciktirmektedir.

Biyoproseslerin işletim moduna göre (kesikli, yarıkesikli, sürekli mod), kesikli ve yarıkesikli işletim türünde durum değişkenlerinin öngörülen üssel derişim yörüngelerini takip etmesi amaçlanırken (tracking control), sürekli işletim modunda ise durum değişkenlerinin sabit bir referans değerinde kontrolü (set point control) amaçlanmaktadır. Yakın zamana kadar tüm Dünya’da endüstriyel biyoreaktörlerde gerçekleştirilen kontrol uygulamaları pH, sıcaklık ve bazı dozajların (substrat)

öngörülen değerlerde tutularak gerçekleştirilmiştir. Bu şekilde ekonomik verimlilik maksimize edilmeye çalışılmakta idi. Doksanlı yıllarda yarıiletken sensör ve bilgisayar teknolojilerinin biyoteknolojide kullanımı ile birlikte daha karmaşık ölçüm ve kontrol cihazları, dolayısıyla model esaslı kontrol uygulamaları kullanılmaya başlanmıştır. Biyoteknolojik proseslerin performansını arttıran biyolojik durum değişkenlerinin kontrol edildiği uygulamalar aşağıdaki gibi sınıflandırılabilir.

- Substrat derişiminin kontrolü, biyokütle üretmesinin önemli bir parametresidir. Derişimin kritik bir değerden fazla olması, proses ekonomisi açısından verimi düşüreceği gibi, altında olmasında üreme için gerekli besin kaynağının olmaması anlamına gelmektedir.
- Çözünmüş oksijen derişiminin kontrolü, aerobik biyoproseslerde çözünmüş oksijen derişimi belli bir kritik değerin üzerinde tutularak mikrobiyal aktivitelerin devamlılığı sağlanmaktadır. Biyoproses ortamında çözünmüş oksijenin gereken değerden fazla olması, prosesin ekonomikliğini düşürücü etki yapar.
- Ürün derişiminin kontrolü, özellikle yarıkesikli fermentasyonlarda biyokütle/substrat verimi ile verimlilik arasında varolan ters orantıyı optimize etmede ürün derişiminin kontrolü önemli bir yöntemdir.
- Çıkış gaz debilerinin kontrolü, biyoproseslerin verimli işletiminde uygulanabilecek bir yöntemdir.

Yukarıda verilen kontrol uygulamalarını endüstriyel ortamlarda gerçekleştirmek için pekçok farklı yöntemler araştırılmış ve farklı boyutlarda uygulanmıştır. Tüm yöntemlerin amacı; biyokütle miktarı maksimize edilirken girdi maliyetlerinin minimumda tutulmasıdır. Buda yan ürün oluşumunun önlenmesi ve enerji maliyetlerinin minimize edilmesiyle sağlanmaktadır.

3.1. Literatür İncelemesi

Fermentasyon proseslerini konu alan bilimsel çalışmalar incelendiğinde, özellikle kontrolü amaçlanan yarıkesikli ekmek mayası fermentasyonlarında kontrol değişkeni olarak farklı kontrol değişkenlerinin kullanıldığı görülmektedir. Yukarıda belirtildiği gibi ekmek mayası fermentasyonu proseslerinde glikoz derişimi metabolizmanın gidişatını belirleyen en önemli değişkendir fakat glikoz derişiminin endüstriyel boyutlarda ölçümü zor ve pahalıdır. Bunun yerine literatürde, farklı değişkenlerle yapılan çalışmalar mevcuttur. Bu değişkenlere örnek olarak oksijen kullanım hızı (oxygen uptake rate), RQ (respiratory quotient) solunum katsayısı, etanol derişimi, toplam etanol miktarı verilebilir. Son yıllarda yapılan çalışmalarda RQ, etanol derişimi ve özgül üreme hızı (specific growth rate) kontrol değişkeni olarak daha fazla kullanıldığı gözlemlenmiştir.

Maya fermentasyonu modellemesinde geniş kabul gören Sonnleitner ve Kappeli'nin (1986) *Saccharomyces cerevisia* maya hücresi için geliştirmiş olduğu ve darboğaz prensibi (bottle-neck) ile açıkladığı kinetik model bu alanda pek çok çalışmada referans olarak kullanılmıştır.

Yarıkesikli fermentasyon substrat beslemesi kontrolünde kullanılan kontrol metodları genel üç başlık altında toplanabilir;

- a. Optimal kontrol uygulamaları
- b. Geribesleme kontrol uygulamaları
- c. Hibrit kontrol uygulamaları

3.1.1. Optimal kontrol uygulamaları

Optimal kontrol metodlarında substrat beslemesi, proseste yer alan bileşenlerin kütleli korunum yasalarından elde edilen denkliklerden yola çıkılarak elde edilen optimum besleme yörüngesine uyularak yapılmaktadır. Proseste ait kinetik katsayıların bilinmesi durumunda nümerik veya analitik olarak optimal kontrol problemi çözülmektedir. Bunun yanında son yıllarda genetik algoritmalar ve yapay

sinir ağları ile optimum besleme profilinin belirlenmesi yoğun çalışmanın yapıldığı alan olmuştur. Bu tür çalışmaların endüstride kullanımı yok denecek kadar azdır. Literatürde fermentasyon prosesleri üzerine yapılmış bulunan Optimal kontrol uygulamaları/çalışmaları aşağıdaki gibi özetlenebilir.

Roubos ve diğ. (1997), *hybridoma* hücrelerinin yarıkesikli fermentasyonunda substrat beslemesinin optimizasyonunu konu alan çalışmalarında, gradyant tabanlı Pontrayagin'in minimum prensibine dayalı optimizasyonun, iki kontrol değişkenin kontrolünde dinamik programlamaya göre daha başarılı sonuçlar verdiğini göstermişlerdir.

Rocha ve Ferreira (2002), *Escherichia coli* kültürünün yarı-kesikli fermentasyonda biyokütle miktarını maksimize etmek amacıyla iki farklı optimizasyon tekniği uygulamışlardır. Uygulanan metodlardan biri gradyent metodu (matlab programında varolan `fmincon` komutu ile), diğerisi ise (Sheffield üniversitesinde Matlab için geliştirilen genetik algoritma toolbox'ı kullanılarak) genetik algoritma metodudur. Çalışmada genetik algoritma ile elde edilen sonuçların daha başarılı olduğu belirtilmiştir.

Ronen ve diğ. (2002), *Aureobasidium pullulans* kültürü için genetik algoritma kullanarak optimal besleme eğrisini belirlemişlerdir. Çalışmada gerçek değerli parametreler ve iki farklı seçim fonksiyonu (rulet, geometrik sıralı) kullanmışlardır. Çevrimiçi optimizasyon ile ele alınan proses ve model arasındaki farklılıklar giderilmiş ve daha iyi performans elde edildiği gözlenmiştir.

Andres ve diğ. (1997), endüstriyel bira fermentasyonunda sıcaklık profilinin elde edilmesini öncelikle dinamik programlama metodunu kullanmışlardır. Karşılaştıkları sorunlar genetik algoritmalarla çözüm aramaya yöneltmiştir. Genetik algoritma ile elde edilen sonuçların çevrimdışı ölçümlerle, dinamik programlamaya göre çok daha iyi örtüştüğü ve daha kısa sürede daha fazla ürün elde edilmesini sağladığını bildirmişlerdir.

Valentinotti ve diğ. (2003), *Saccharomyces cerevisiae* kültürünün yarıkesikli fermentasyonda adaptif optimal işletimini çalışmışlardır. Çalışmada biyokütlenin üssel üreme evresinde kontrol değişkeni olarak ürün miktarını kontrol etmenin zorluğu karşısında, ürün (etanol) derişimini almışlardır. Adaptif kontrolcü olarak Tsytkin (1997) ve Holmberg ve diğ. (1997) geliştirmiş olduğu RST kontrolcüsünü kullanmışlardır. Üssel üreme evresinde özgül üreme hızı olarak (μ) 0.27 değeri elde edilmiş ve laboratuvar analizleriyle doğrulanmıştır.

Na ve diğ. (2002), yarı-kesikli maya fermentasyonunda adaptif optimizasyon gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışmada üç farklı optimizasyon stratejisine dayalı genetik algoritmalar kullanılmıştır. Adaptif optimizasyonda çevrimiçi model güncellemenin (parametre kestirimi) temel gereksinim olduğu belirtilmiştir.

Berber ve diğ. (1999), endüstriyel boyutlu yarıkesikli maya fermentasyonu prosesinde iterative dinamik programlama ile, biyokütle miktarını maksimize edecek (etanol derişimi minimize edilerek) sustrat yörüngesini belirlemişlerdir.

Potocnik ve Grabec (1999), yarı kesikli antibiyotik fermentasyonuna (*clavulanic acid*) ampirik yaklaşımla modelleme ve farklı optimizasyon tekniklerini uygulamışlardır. Çalışmalarında radyal tabanlı sinir ağları, hibrit sinir ağları ve genetik algoritmalar ile biyokütle miktarının maksimize edilmesi hedeflenmiştir. Hibrit doğrusal-sinir ağları modeli ile fermentasyon veriminin diğer yöntemlere göre daha iyi olduğu belirtilmiştir.

Claes (1999), yarı-kesikli ekmek mayası fermentasyonunda *Saccharomyces cerevisiae* kültürünün geribesleme doğrusallaştırılmalı optimal işletimini çalışmışlardır. Bu çalışmada özgül üreme hızının kestirimi ve kontrolü yapılarak, birinci ve ikinci dereceden doğrusallaştırma ile kontrolü çalışılmıştır. Fermentasyon ortamında oksijen limitasyonu olmadan (etanol yan ürün oluşmadan) öngörülen kontrol yaklaşımının uygulanması mümkün olmuştur.

Pham ve diğ. (1998) *Saccharomyces cerevisiae* kültürü için metabolik kinetik modele başlangıç için ölü bir zaman gecikmesi ekleyerek geliştirdikleri model ile laboratuvar analizlerini karşılaştırmışlardır.

3.1.2. Geribeslemeli kontrol uygulamaları

Klasik geribeslemeli kontrolde yukarıda girişte verilen değişkenlerden biri kontrol değişkeni olarak seçilir ve PI / PID kontrol ile substrat beslemesi kontrol edilmeye çalışılmaktadır. Bu kontrol türlerinde, farklı durumlarda yeni parametre değerlerinin belirlenmesi ayrı bir öneme sahiptir. Dairaku ve diğ. (1983), Suzuki ve diğ. (1986), Axellson ve diğ. (1989), tarafından yapılan çalışmalarda (bilinen temel PID metodunu baz alarak gerçekleştirdikleri kontrollerde) fermentasyon boyunca değişen dinamiklerden dolayı, tüm fermentasyon süresince iyi bir kontrol sağlanamadığı sonuçları ile görülmektedir.

Mou ve Cooney (1983), yarıkesikli penisilin fermentasyonunda biyokütlenin maksimize edilmesini karbon balans denklemlerini kullanarak fermentasyon ortamındaki glikoz derişimini kontrol eden geri – ileri beslemeli (feedback / feed-forward) kontrolcüyle bilgisayar ortamında gerçekleştirmişlerdir.

Axellson ve diğ. (1989), ekmek mayası prosesinde öngördükleri üreme hızı ve verim profillerine uygun olarak belirledikleri substrat dozaj eğrisini temel alarak prostesten elde ettikleri etanol ölçümlerini geribesleme amacıyla kullanarak öngörülen substrat dozajını reaktöre uygulamışlardır. Etanol derişimi kontrolünün bacagazı ölçümlerine dayanan yöntemlere göre çok daha iyi sonuç verdiği bildirilmiştir.

O'Connor ve diğ. (1992), *Saccharomyces cerevisiae* yarıkesikli fermentasyonunda mevcut ölçümleri kullanarak altı farklı geribeslemeli substrat besleme stratejisini incelemiştir. Çalışmalarında çeşitli doğrusallaştırmalar ve bacagazı oksijen ve karbondioksit ölçümleri temel alınmış, oksijen tüketim hızı ölçümünden elde ettikleri kontrol stratejisinin, etanol kontrol stratejisine göre daha iyi sonuç verdiğini bildirmişlerdir. Seçilecek kontrol stratejisinin başlangıç koşulları ve proses evrelerine

göre seçilmesinin proses performansının iyileştirilmesinde önemli olduğu farklı strateji uygulamalarıyla gösterilmiştir.

Pomerleau ve Viel (1992), endüstriyel boyutlu ekmek mayası fermentöründe oksijen transfer hızı ve etanol geribeslemesini kullanarak substrat beslemesini kontrol etmişlerdir. Geribesleme döngüsünü doğrusallaştırıp doğrusal olmayan kontrolcü tasarımıyla proses kontrolünü gerçekleştirmişlerdir. Model esaslı yaklaşımda kontrolcü ifadesi, kinetik modeller kullanmak yerine kütle denklğini kullanarak, substrat, etanol, oksijen, karbondioksit ölçümleri ile elde edilmiştir. Kontrolcü ifadesinin elde edilmesinde proses modelini etanol oluşumuna göre ikiye ayırmışlardır (solunum, fermentatif). Bu yaklaşım daha sonra pekçok çalışmada referans olarak alınmıştır.

Chen (1992), ekmek mayası fermentasyonu için kinetik modelleme yapmadan bilinen verim katsayılarını kullanarak durum gözlemcileri ile ölçülemeyen durumların kestirimini gerçekleştirmiştir. Kestirimi yapılan durum değişkenleri kullanılarak ikinci dereceden geribesleme doğrusallaştırmalı etanol derişimi kontrolcüsünü laboratuvar ölçeklerinde gerçekleştirmiştir.

Keuler (1993), tarafından yapılan çalışmada yarı-kesikli ekmek mayası fermentasyonunda, etanol ve özgül üreme hızı kontrol değişkeni olarak alınmış ve substrat profilinin kontrolü PI kontrol ile sağlanmıştır. Bu çalışmada verilen sonuçlarda kontrol yapısı farklı üreme hızlarında istenen şartları başarı ile sağlamaktadır.

Ringbom ve diğ. (1996), yarıkesikli *Saccharomyces cereviciae* kültüründe durum değişkenlerini model esaslı algoritma ile belirledikten sonra oksidatif ortamda etanol oluşturmadan biyokütle miktarını maksimize edecek üç farklı kontrol uygulamasını çalışmışlardır. Yöntemlerden ilkinde kontrol değişkeni olarak etanol oluşum hızı seçilmiş fakat bu parametrenin belli değere ulaşmasından sonra kontrolün yetersiz kaldığı gözlemlenmiştir. Bu problemi aşmak ve prosesin gidişatını gösteren değişken olarak etanol oluşum hızı yerine Asetik asit oluşumunu seçmişlerdir. Kontrol değişkeni olarak Asetik asit oluşum hızının seçildiği deneylerde, kritik değere ulaşıldığında melas beslemesi belli oranda azaltılmış ve etanol oluşumu

engellenmiştir. Bir başka kontrol değişkeni olarak hücre içi karbohidrat derişimi seçilmiş ve yine belli bir değerin altına düştüğünde substrat beslemesi azaltılmıştır. Yapılan deney sonuçları değerlendirildiğinde son olarak seçilen değişkenin biyokütlenin maksimize edilmesinde diğer yöntemlere göre daha iyi sonuç verdiği gözlemlenmiştir.

Hisbullah ve diğ. (2002), ekmek mayası fermentasyonu üzerine yaptıkları çalışmada birbirinden farklı 4 ayrı türde kontrolcüyü incelemişlerdir. Çalışmalarında kontrol değişkeni olarak RQ (solunum katsayısı) yerine özgül CO₂ üretim hızı ile O₂ tüketim hızı arasındaki farkı kullanmışlar ve daha iyi sonuç elde ettiklerini belirtmişlerdir. Bu çalışmada da set değeri değişimleri ve gürültünün bastırılmasında hibrit model yaklaşımının sabit kazançlı PI veya değişken kazançlı PI'a göre çok daha iyi sonuç verdiğini göstermişlerdir.

Li (2004), tarafından yapılan çalışmada yarıkesikli rekombinant protein fermentasyon prosesi ele alınmıştır. Bu çalışmada kontrol değişkeni olarak çözünmüş oksijen ele alınmış ve kontrolcü olarak değişken kazançlı PI (scheduling gain PI) kullanılmıştır.

Cannizzaro ve diğ. (2004), yarıkesikli fermentasyon prosesinde *Saccharomyces cerevisiae* ve *E. Coli* kültürlerini çalışmışlar ve biyokütlenin maksimize edilmesini gaz fazında ürün derişimi (etanol) ölçümünü, darboğaz prensibini kullanarak kontrol etmeye çalışmışlardır. Bu çalışmada makroskopik kütle denkleğinden yola çıkılarak prosesin farklı üreme evrelerindeki (üssel üreme, etanol oluşumu) dinamik denklemleri kullanılarak kontrolcü ifadesi elde edilmiş ve substrat beslemesi etanol derişiminin set edilen değerde kontrol edilmesi gerçekleştirilmiştir.

3.1.3. Hibrit kontrol uygulamaları

Literatürde hibrit kontrol uygulamaları ile mekanistik model tabanlı ve yapay sinir ağlarını içeren kontrol yapıları ifade edilmektedir. Hibrit kontrol tasarımında yapay sinir ağları veya genetik algoritmalarla bilinmeyen proses durumları hesaplanırken,

kontrolcü tasarımımda ise bulanık mantık veya diferansiyel denklemlerden geliştirilen kontrolcüler yer almaktadır.

Roubos ve diğ. (1999), *Streptomyces clavuligerus* kültürü kesikli fermentasyonu için geliştirdikleri hibrit modelde proses kinetiklerini belirlemede bulanık mantık ve sinir ağı tabanlı kararlı modelleri kullanmışlardır. Geliştirdikleri modellerin başlangıç koşullarına fazla bağımlı olduğu görülmüştür.

Beşli ve diğ. (1995), yarıkesikli işletilen bir fermentör için bulanık kontrolör tasarlamışlardır. Bu çalışmada kontrol değişkeni olarak RQ solunum katsayısı kullanılmış ve giriş glikoz beslemesi öngörülmüştür. alışmalarının sonucunda minimum miktarda etanol ile birlikte biyokütle miktarını maksimize etmek için özgül üreme hızı ve ortamdaki glikoz derişiminin belli bir kritik değerine çıkmaması gerektiği sonucuna ulaşmışlardır

Oliveira (1998), yarıkesikli ekmek mayası fermentasyonu için hibrit model yaklaşımı (neuro-fuzzy) ile on-line fermentasyon verilerini kullanarak proses kinetiklerini belirlemiş ve bunları kütle denkliği denklemlerinde kullanarak durum değişkenlerini ve reaksiyon hızlarını belirlemiştir.

Tham ve diğ. (2003), iki farklı biyoproses için sürekli modda, kayan mod kontrolcü (sliding mode controller) geliştirmiş ve bu kontrolcünün performansını söz konusu prosesler için simule ederek sonuçları klasik PI kontrolcü ile karşılaştırmıştır.

Karakuzu ve diğ. (2003), yarıkesikli ekmek mayası fermentasyonu için kinetik ve dinamik model denklemlerini kullanarak substrat besleme hızını bulanık model ile öngören hibrit model geliştirmişlerdir. Bulanık modelde etanol derişimi, özgül üreme hızı hatası ve fermentasyon süresi giriş olarak kullanılmış ve substrat besleme hızı çıkış olarak elde edilmiştir.

Karakuzu ve diğ. (2006), yarıkesikli ekmek mayası fermentasyonu için biyokütle ve özgül üreme hızını yapay sinir ağları ile öngördükleri çalışmada bulanık kontrolcü

kullanmışlardır. Bu yöntemle değişik başlangıç koşullarında daha iyi sonuçlar aldıkları görülmüştür.

Toro-Andres ve diğ. (1997), endüstriyel bira fermentasyonunda sıcaklık profilinin elde edilmesini öncelikle dinamik programlama ile elde etmek istemişler, karşılaştıkları sorunlar karşısında genetik algoritmalar kullanarak çözümü gerçeklemişlerdir.

James ve diğ. (2002), yarıkesikli bir sistemde *Alcaligenes eutrophus* mikroorganizmasıyla çalışmışlar ve biyokütle derişimini belirlenmesini 6 farklı metolla irdelemişlerdir. alışmalarında sinir ağı ile geręekleřtirilen hibrit modelin (sinir ağı ve mekanistik model) en iyi sonucu verdiğini belirtmişlerdir.

Nejjari ve diğ. (1999), biyolojik atıksu işleme prosesinde adaptif geribeslemeli doğrusallaştırılmış kontrolcü ile çözünmüş oksijen ve substrat derişimini kontrol etmişlerdir. Bu çalışmada hava besleme hızı ve seyrelme hızını kontrol edilen değişkenler olarak kullanılmıştır.

Madar ve diğ. (2005), sürekli karıştırmalı bir tank reaktörde sıcaklık kontrolü için hibrit, global doğrusallaştırmalı kontrol algoritması geliştirmişlerdir.

4. BİYOPROSESLERDE KÜTLE DENKLİĞİ, ÖLÇÜMLERİN TUTARLILIĞI VE KARAKUTU YAKLAŞIMI İLE METABOLİK MODELLEME

Proses izleme (monitoring) ve kontrolü, prosesle ilgili değişkenlerin ölçümü ve izlenmesine dayanmaktadır. Bu ölçümler proses modelinin geliştirilmesi ve doğrulamasında kullanılmaktadır. Elde edilen ölçümlerin proses izleme ve kontrolde kullanılabilmesi, ancak ölçümlerin güvenilirliğinin belirlenmesinden sonra mümkün olabilir. Güvenilirliğin sağlanmasında bilinen en temel yol, ölçümlerdeki rastgele (random) hataların küçültülmeye (random error minimization) tabi tutulmasıdır. Bu yöntem, deneylerin pekçok kez yapılmasını, birden fazla sensör kullanılmasını ve dikkatli kalibrasyon yapılmasını içeren zaman alıcı, masraflı ve kişisel deneyime dayanan işlemleri içermektedir (Stephanopoulos ve diğ. 1998).

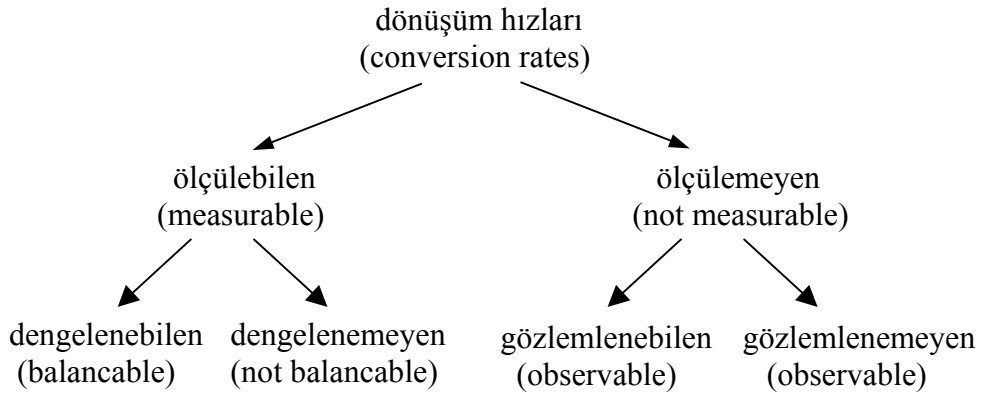
Biyoproseslerde yer alan bileşenlerin birbirleri ile olan korunum ilişkileri (enerji, kütle, elektron), ölçümlerin doğruluğu ve güvenilirliğinin sistematik bir şekilde belirlenmesini sağlar. Fermentasyon proseslerinde yapılan çevrimiçi (on-line) ve çevrimdışı (off-line) ölçümler, prosesin durumunu gösteren en temel bilgileri sağlamaktadır. Bu ölçümlerin/verilerin tutarlılığının incelenmesi, yapılan temel ölçümlerin dönüşüm hızına çevrilmesi ve doğrusal korunum ilişkileri kullanılarak gerçekleştirilir (Heijden ve diğ., 1991). Biyokimyasal dönüşümlerde, doğrusal dönüşüm ilişkileri (elementel denge, entalpi dengesi, yük dengesi) kullanılarak hızlar arasında bağlantı kurulabilir. Uygulamada bu dönüşüm hızlarının (conversion rates) bir kısmı ölçülebilmekte, ölçülemeyen hızlar ölçülenler kullanılarak hesaplanabilmektedir.

Deneysel ölçümlerin tutarlılığının incelenmesinde kullanılan başka bir yöntem de hücrel karakutu yaklaşımıdır. Bu yaklaşımda, proseste reaksiyona katılan tüm canlı hücrelerin homojen ve benzer yapıda oldukları kabul edilir (unstructured, nonsegregated). Ele alınan hücrel yapı için, hücreye giren ve çıkan metabolik

akılar (metabolic flux) özgül hızlar cinsinde ölçülür ve/veya hesaplanır. Bu gerçekleştirilirken reaksiyona giren ve çıkan tüm bileşenlere ait hız denklemleri kütle korunumuna göre yazılır. Karakutu modeli yaklaşımında elemental denge, gözlemlenebilirlik (observability), veri artıklığı (data redundancy), variance-covariance matrisleri gibi işlemler kullanılmaktadır (Stephanopoulos ve diğ., 1998).

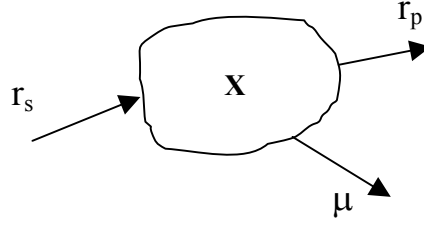
4.1. Hücresel Kara Kutu Modeli

Hücresel kara kutu yaklaşımı ile proseslerin metabolik modellemesinde, kütle korunum yasaları ve reaksiyon dönüşüm hızları kullanılarak, biyokimyasal reaksiyonlar arasında doğrusal bağıntılar elde edilmektedir. Dönüşüm hızları doğrudan ölçülemesede, ölçülebilen temel değişkenlerden (primary variables) hesaplanabilmektedir. Yapılan ölçümlerin sayısına ve tipine bağlı olarak elde edilen dönüşüm hızları dört kategoride değerlendirilebilir (Şekil 4.1). Bu sınıflama ölçülebilen dönüşüm hızları dengelenebilen (balancable) ve dengelenemeyen (not balancable) olarak, ölçülemeyen dönüşüm hızlarında gözlemlenebilir (observable), gözlemlenemeyen (not observable) olarak yapılır (Heijden ve diğ., 1994a).



Şekil 4.1. Dönüşüm hızlarının sınıflandırılması (Heijden ve diğ. 1994.a)

Hücresel kara kutu modelinde, biyokütle hücreleri dış ortamla hertürlü madde alışverişini yapan ve bunları işleyen, homojen tek bir hücre olarak kabul edilmektedir. Burada kutuya giren ve çıkan tüm bileşenler özgül hızlar cinsinden ifade edilmektedir (r_s , r_p , μ), (Şekil 4.2).

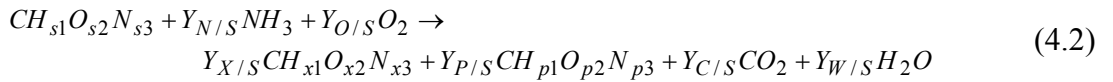


Şekil 4.2. Hücrenin kara kutu model yaklaşımı (Stephanopoulos ve diğ. 1998) .

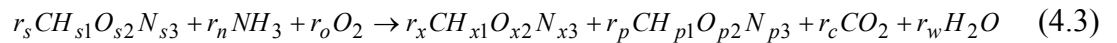
Kara kutu model yaklaşımını baz alarak balans denklemleri yazılmaya çalışılırsa, (tüm hücrel reaksiyonlar tek bir genel reaksiyona indirgenerek) denklem 4.1'deki gibi

$$X + \sum_{i=1}^M Y_{X/P_i} P_i - \sum_{i=1}^N Y_{X/S_i} S_i = 0 \quad (4.1)$$

yazılabilir. Burada X; biyokütleyi, P_i; ürünü ve S_i; substratı ifade etmektedir. Denklem 4.1'le ifade edilen modelde, M + N + 1 değişken mevcuttur (biyokütle, M adet metabolik ürün ve N adet substrat mevcuttur). Genel olarak biyolojik reaksiyonların stokiyometrisi denklem 4.2'deki gibi gösterilmektedir:



Burada Y_{i/j} substrat üzerinde molar verimlerdir. Reaksiyon stokiyometrisini hızlar cinsinden yazarsak ;



Denklem 4.3'te yedi hız ifadesi vardır. Karbon (C), hidrojen (H), oksijen (O) ve azot (N) için elementel dengeler yazılırsa denklem 4.4 elde edilir:

$$\begin{aligned}
C &\Rightarrow r_s = r_x + r_p + r_c \\
H &\Rightarrow r_s s_1 + 3r_n = x_1 r_x + p_1 r_p + 2r_w \\
O &\Rightarrow r_s s_2 + 2r_o = x_2 r_x + p_2 r_p + 2r_c + r_w \\
N &\Rightarrow r_s s_3 + r_n = x_3 r_x + p_3 r_p
\end{aligned} \tag{4.4}$$

Burada hız vektörü ;

$$r = (r_s, r_o, r_n, r_x, r_p, r_c, r_w)^T \tag{4.5}$$

Yukarıdaki stokiyometri için elementel kompozisyon matrisi, toplam dört element olduğundan, 4.6 matrisi ile yazılır:

$$E = \begin{array}{c} \begin{array}{ccccccc} \text{substrat} & & & & & & \\ \text{oksijen} & & & & & & \\ \text{amonyak} & & & & & & \\ \text{karbondioksit} & & & & & & \\ \text{etanol} & & & & & & \\ \text{su} & & & & & & \\ \text{biyokütle} & & & & & & \end{array} \\ \left[\begin{array}{ccccccc|l} 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & C \\ s_1 & 0 & 3 & 0 & p_1 & 2 & x_1 & H \\ s_2 & 2 & 0 & 2 & p_2 & 1 & x_2 & O \\ s_3 & 0 & 1 & 0 & p_3 & 0 & x_3 & N \end{array} \right] \end{array} \tag{4.6}$$

Karakutu model yaklaşımında ($F = M + N + 1 - I$) ile tanımlanan serbestlik derecesi (reaksiyona giren bileşen sayısı M, reaksiyondan çıkan ürün sayısı N, biyokütle ve denge sayısı I) ölçülemeyen hızların hesaplanıp hesaplanamayacağı hakkında bilgi verir :

- Ölçülemeyen hızların ölçülenler kullanılarak hesaplanabilmesi için, ölçülen hız sayısının serbestlik derecesine eşit olması gerek şarttır.
- Ölçülen hız sayısı (K), serbestlik derecesinden (F), büyükse sistem kararlı (over determined) bir sistemdir. Bu tür bir sistem için ölçümlerin tutarlılığı (data consistency) analizleri yapılabilir.
- Ölçülen hız sayısı serbestlik derecesinden 2 fazla ise hesaplamalarda kullanılan çevrim içi ölçümler için uygunlaştırma (data reconciliation) yapılabilir.

Elementel kompozisyon matrisi (denklem 4.5) ve hız vektörü (denklem 4.6) kullanılarak kütle korunumu yazılırsa

$$E \cdot r = 0 \quad (4.7)$$

elde edilir. Hız vektörü ölçülebilen hızlar (r_m) ve hesaplanabilen hızlar (r_c) olarak ikiye bölünebilir. Benzer şekilde elementel kompozisyon matriside, ölçülebilenler matrisi (E_m) ve hesaplananlar matrisi (E_c) olarak ikiye bölünebilir. Yeni durumda denklem 4.7 düzenlenirse,

$$E_m r_m + E_c r_c = 0 \quad (4.8)$$

elde edilir. Sistemdeki ölçülebilen hız sayısı, serbestlik derecesine eşitse (gözlemlenebilir ise) E_c matrisi kare matristir ve tersi alınabilir. Böylece hesaplanabilen hızlar denklem 4.9'daki gibi yazılabilir.

$$r_c = -E_c^{-1} E_m r_m \quad (4.9)$$

Ölçülen hız sayısı serbestlik derecesinden büyükse, ölçülemeyen hızları hesaplamak için gerekli sayıdan fazla denklem mevcuttur. Bu durumda en küçük kareler (least square) yaklaşımı kullanılır ve bunun sayesinde mevcut balanslar ile daha doğru hesaplamaların yapılması mümkün olur. E_c matrisinin kare matris olmaması durumunda ölçülemeyen hızlar denklem 4.10 ile hesaplanabilir (pseudo inverse).

$$r_c = -(E_c^T E_c)^{-1} E_c^T E_m r_m \quad (4.10)$$

Kararlı sistemlerde (ölçülen hız sayısının, serbestlik derecesinden büyük olduğu) ölçülemeyen hızlar hesaplandıktan sonra kullanılmayan balanslardan biri, ölçülen ve hesaplanan hızların tutarlılığını (consistency) analiz etmede kullanılabilir. Bunun için denklem 4.10 denklem 4.8'de yerine konulursa

$$R r_m = 0 \quad (4.11)$$

elde edilir. Burada R artıklık (redundancy) matrisi olarak adlandırılır (Heijden ve diğ., 1994).

$$R = E_m - E_c (E_c^T E_c)^{-1} E_c^T E_m \quad (4.12)$$

Bu matrisin rankı, elementel kompozisyon matrisinde yeralan bağımsız denklemlerin sayısını bildirir. $\{I - \text{rank}(R)\}$ sayısı kadar da birbiri ile bağımlı denklem vardır. Birbiri ile bağımlı satırlar R matrisinden çıkartılırsa indirgenmiş artıklık matrisi (R_r , reduced redundancy matrix) elde edilir:

$$R_r r_m = 0 \quad (4.13)$$

Gerçekte proseten elde edilen ham ölçümlerde ve dolayısıyla dönüşüm hızlarında gelişigüzel (random) ölçüm hataları bulunmaktadır. Bu durumda ölçümü yapılan gerçek hız (r_m), ölçülen hız (\bar{r}_m) ve hata değerinin (δ) toplamı olarak kabul edilebilir ve denklem 4.14'teki gibi formüle edilir.

$$\bar{r}_m = r_m + \delta \quad (4.14)$$

Hata vektörünün normal dağılımlı ve ortalaması sıfır kabul edilirse karesel ortalama hata (varyans-kovaryans) matrisi F denklem 4.16'daki gibi yazılabilir.

$$E[\delta] = 0 \quad (4.15)$$

$$F = E[(\bar{r}_m - r_m)(\bar{r}_m - r_m)^T] = E[\delta\delta^T] \quad (4.16)$$

Eğer modelin doğru ve ölçümlerde de hiç hata olmadığı kabul edilirse denklem 4.13 ile verilen şart sağlanmış olur. Gerçek zamanlı yapılan ölçümlerde daima bir hata mevcuttur ($\delta \neq 0$), ve denklem 4.13'ün her bir bileşeninde mutlaka az bir farklılık (residue) olacaktır. Rezidu vektörünü ε ile gösterirsek,

$$\varepsilon = R_r \delta = R_r (\bar{r}_m - r_m) = R_r \bar{r}_m \quad (4.17)$$

$$E(\varepsilon) = R_r E(\delta) = 0 \quad (4.18)$$

yazılabilir. Bu rezidü vektörünün varyans-kovaryans matrisi denklem 4.19 ile tanımlanır.

$$P = R_r F R_r^T \quad (4.19)$$

Ölçüm hata vektörü için kestirim değeri ise

$$\hat{\delta} = F R_r^T P^{-1} \varepsilon = F R_r^T P^{-1} R_r \bar{r}_m \quad (4.20)$$

ile tanımlanmaktadır. Bu denklemler kullanılarak yapılan ölçümlere ait kestirim ise

$$\hat{r}_m = \bar{r}_m - \hat{\delta} \quad (4.21)$$

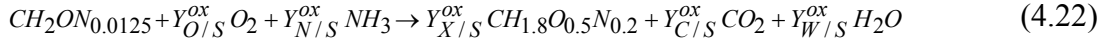
ile hesaplanabilir (Nielsen ve Villadsen, 1994; Heijden ve diğ., 1994.b).

Burada teorisi verilen, ölçülen hızlardan ölçülemeyen hızların hesaplanması ve ölçülen hızlar için kestirim değerlerinin elde edilmesi endüstriyel ekmeğin mayası prosesi için çeşitli örneklerle incelenmiştir. Daha sonra detayları verilen bu teori, endüstriyel boyutlu farklı tipte ekmeğin mayası fermentasyonlarına uygulanarak elde edilen sonuçlar analiz edilmiştir.

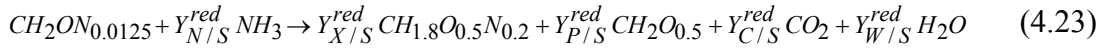
4.2. Ekmeğin Mayası Fermentasyonu İçin Karakutu Modeli

Fermentasyon proseslerinde genel olarak mikroorganizmaların üremeleri için gerekli hammaddeler, enerji kaynağı olarak glikoz ($\text{CH}_2\text{ON}_{0.0125}$), azot kaynağı olarak amonyak (NH_3), oksijen (O_2) ve çeşitli tuzlardır. Reaksiyonlar sonucunda biyokütle (maya için, $\text{CH}_{1.8}\text{O}_{0.5}\text{N}_{0.2}$), ürün (etanol, $\text{CH}_3\text{O}_{0.5}$), karbondioksit (CO_2) ve su (H_2O) oluşumu gerçekleşir.

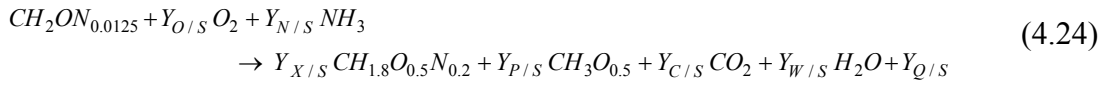
Yarıkesikli (fed-batch) ekmek mayası üretiminde, maya hücrelerinin metabolik davranışları aşağıdaki stokiyometrik denklemlerle ifade edilmektedir (Türker, 2003). Fermentasyon ortamında yeterli oksijenin bulunduğu oksidatif metabolizma denklem 4.22'deki gibi yazılır;



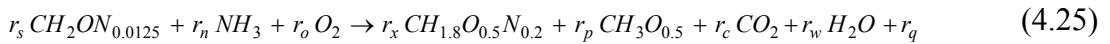
Fermentasyon ortamında fazla miktarda şeker veya yetersiz oksijen olması durumunda fermentatif metabolizma denklem 4.23'e göre gerçekleşir;



Her iki durumu da temsil eden metabolizma denklem 4.24'teki gibi ifade edilir;



Denklem 4.24'te etanol teriminin önündeki işaret oluşum veya tüketime göre +/- olacaktır. Genel metabolik denklemleri hızlar cinsinden yazarsak



denklem 4.25 elde edilir. Aerobik yarıkesikli fermentasyonda hız vektörü denklem 4.25 ifadesinden türetilerek denklem 4.25.a elde edilir.

$$r = (-r_s, -r_n, -r_o, r_x, r_p, r_c, r_w, r_q)^T \quad (4.25.a)$$

Verilen stokiyometrik denklemler (denklem 4.22, 4.23, 4.24) kullanılarak elementel kompozisyon matrisi oluşturulabilir. Reaksiyonlara katılan tüm bileşenlerin elementel içerikleri incelendiğinde sistemde dört element olduğu gözükmekte ve herbir element için balans denklemi yazmak mümkündür. Reaksiyona giren herbir bileşen için bu dengeler yazılırsa

$$E = \begin{bmatrix} \text{biyokütle} & \text{etanol} & \text{CO}_2 & \text{H}_2\text{O} & \text{glikoz} & \text{oksijen} & \text{amonyak} & \text{ısı} \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1.83 & 3 & 0 & 2 & 2 & 0 & 3 & 0 \\ 0.56 & 0.5 & 2 & 1 & 1 & 2 & 0 & 0 \\ 0.17 & 0 & 0 & 0 & 0.0125 & 0 & 1 & 0 \\ 560 & 683 & 0 & 0 & 467 & 0 & 383 & -1 \end{bmatrix} \begin{array}{l} \text{karbon balansı} \\ \text{hidrojen balansı} \\ \text{oksijen balansı} \\ \text{azot balansı} \\ \text{ısı balansı} \end{array} \quad (4.25.b)$$

elde edilir. Denklem 4.7, denklem 4.25.a ve 4.25.b denklemleri ile yeniden düzenlenirse

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1.83 & 3 & 0 & 2 & 2 & 0 & 3 & 0 \\ 0.56 & 0.5 & 2 & 1 & 1 & 2 & 0 & 0 \\ 0.17 & 0 & 0 & 0 & 0.0125 & 0 & 1 & 0 \\ 560 & 683 & 0 & 0 & 467 & 0 & 383 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_x \\ r_e \\ r_c \\ r_w \\ -r_s \\ -r_o \\ -r_n \\ r_q \end{bmatrix}^T = 0 \quad (4.26)$$

denklem 4.26 elde edilir.

4.2.1. Karakutu modelinde ölçülen hız sayısı ile serbestlik derecesinin eşit olması durumu

Denklem 4.26 ile verilen ifade, ölçülen hızlar (CO_2 , O_2 ve etanol) ve ölçülemeyen hızlar (biyokütle, glikoz, su ve amonyak) olarak iki kısma ayrılırsa,

$$E_m r_m + E_c r_c = 0 \quad (4.27)$$

elde edilir. Denklem 4.26 ile verilen sistemin serbestlik derecesi ($M=3$, $N=4$, $I=5$ için $F = M + N + 1 - I$) üç'tür. Serbestlik derecesinin üç olması, en az üç dönüşüm hızının ölçülmesi ile ölçülemeyen hızların hesaplanabileceğini belirtmektedir. Hesaplanabilir hızlar matrisinin (E_c) rankı 4'e eşittir ve tersi alınabilir. Buradan hesaplanacak hızlar bulunabilir. Denklem 4.27 matris formunda tekrar yazılırsa

$$\begin{array}{c}
\begin{array}{ccc}
\text{oksijen} & & \\
\text{CO}_2 & & \\
\text{etanol} & &
\end{array} \\
\begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 3 \\ 2 & 2 & 0.5 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}
\end{array}
\begin{array}{c}
\begin{bmatrix} r_o \\ r_c \\ r_e \end{bmatrix} \\
r_m
\end{array}
+
\begin{array}{c}
\begin{array}{cccc}
\text{amonyak} & & & \\
\text{glukoz} & & & \\
\text{H}_2\text{O} & & & \\
\text{biyokütle} & & &
\end{array} \\
\begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 1 \\ 3 & 2 & 2 & 1.83 \\ 0 & 1 & 1 & 0.56 \\ 1 & 0 & 0 & 0.19 \end{bmatrix}
\end{array}
\begin{array}{c}
\begin{bmatrix} r_n \\ r_s \\ r_w \\ r_x \end{bmatrix} \\
r_c
\end{array}
= 0 \quad (4.28)$$

Denklem 4.28 elde edilir. Denklem 4.9'un uygulanmasıyla

$$\begin{bmatrix} r_n \\ r_s \\ r_w \\ r_x \end{bmatrix} = -1 * \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 1 \\ 3 & 2 & 2 & 1.83 \\ 0 & 1 & 1 & 0.56 \\ 1 & 0 & 0 & 0.19 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 3 \\ 2 & 2 & 0.5 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_o \\ r_c \\ r_e \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} r_n \\ r_s \\ r_w \\ r_x \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -5.4286 & -5.4286 & 2.7143 \\ -28.5714 & -29.5714 & 13.2857 \\ 10.5714 & 11.5714 & -5.7857 \\ 28.5714 & 28.5714 & -14.2857 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_o \\ r_c \\ r_e \end{bmatrix} \quad (4.29)$$

elde edilir. Hesaplanabilen biyokütle, substrat ve amonyak hızlarının ifadeleri sırasıyla yazılırsa;

$$r_x = 28.5714 r_o + 28.5714 r_c - 14.2857 r_e$$

$$r_s = -28.5714 r_o - 29.5714 r_c + 13.2857 r_e$$

$$r_n = -5.4286 r_o - 5.4286 r_c + 2.7143 r_e$$

elde edilir.

4.2.2. Karakutu modelinde ölçülen hız sayısının serbestlik derecesinden büyük olması durumu

Burada dört dönüşüm hızının ölçülebildiği kabul edilmektedir. Ölçülen hızlar glikoz tüketimi, oksijen tüketimi, karbondioksit üretimi ve biyokütle oluşum hızı olarak verilmektedir (Heijden ve diğ., 1991). Ölçülen dönüşüm hızı sayısı, F serbestlik derecesinden büyük olduğu için (over determined) tutarlılık analizi mümkün olmaktadır. Hesaplanmak istenen hızlar ise azot tüketimi ve su oluşum hızı olarak alınmaktadır.

$$E_m = \begin{array}{c} \text{glikoz} \\ \text{O}_2 \\ \text{CO}_2 \\ \text{biyokütle} \end{array} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 1 \\ 2 & 0 & 0 & 1.83 \\ 1 & 2 & 2 & 0.56 \\ 0 & 0 & 0 & 0.17 \end{bmatrix} \quad E_c = \begin{array}{c} \text{amonyak} \\ \text{H}_2\text{O} \end{array} \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 3 & 2 \\ 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$$

Verilen sistem için serbestlik derecesi $F=2$ ve ölçülen hız sayısı $K=4$ 'tür, sistem kararlı (over determined) yapıdadır. Hesaplanmak istenen hızlar denklem 4.10 ile hesaplanabilir.

$$\begin{bmatrix} r_n \\ r_w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.0000 & 0.8571 & 0.8571 & -0.2129 \\ -1.0000 & -1.4286 & -1.4286 & -0.5886 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_s \\ r_o \\ r_c \\ r_x \end{bmatrix}$$

Sisteme ait artıklık (redundancy) matrisi denklem (4.12) ile hesaplanırsa

$$R = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & -0.2857 & -0.2857 & 0.0143 \\ 0 & 0.5714 & 0.5714 & -0.0286 \\ 0 & 0.8571 & 0.8571 & -0.0429 \end{bmatrix}$$

elde edilir. R matrisinin rankı 2'dir, R matrisi incelendiğinde üç ve dördüncü satırların ikinci satırla orantılı olduğu görülmektedir. R matrisindeki üç ve dördüncü satırlar çıkartılırsa indirgenmiş artıklık (reduced redundancy, R_r) matrisi elde edilir.

Ölçülen hız vektörü

$$\bar{r}_m = [-0.14 \ -0.063 \ 0.063 \ 0.079]^T$$

ile verilmiş olsun. Denklem 4.13'e göre R_r r_m = 0'dır ve denklem 4.17 ile ε artıklık vektörü hesaplanırsa;

$$\varepsilon = R_r \bar{r}_m = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & -0.2857 & -0.2857 & 0.0143 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -0.140 \\ -0.063 \\ 0.063 \\ 0.079 \end{bmatrix} = 10^{-3} \begin{pmatrix} 2.0 \\ 1.1 \end{pmatrix}$$

elde edilir. Elde edilen sonuçlarda, artıklık vektörünün çok düşük değerlerden oluşması ölçümlerin tutarlılığının (data consistency) iyi olduğunu göstermektedir. Ölçülen hızlar için kestirim yapabilmek için ölçümlere ait varyans-kovaryans matrisini elde etmek ve ölçüm hatalarının boyutlarını bilmek gerekir. Bunun için gaz ölçümlerinde %10 ve glikoz, biyokütle ölçümlerinde %5 olmak üzere yüzde bağlı hata olduğunu kabul edersek ölçüm varyans-kovaryans matrisi F, aşağıdaki gibidir.

$$F = 10^{-4} \begin{bmatrix} (0.05 * 0.14)^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & (0.1 * 0.063)^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & (0.05 * 0.063)^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & (0.05 * 0.063)^2 \end{bmatrix}$$

ε residü vektörünün varyans-kovaryans matrisi denklem 4.19 ile hesaplanırsa

$$P = 10^{-4} \begin{bmatrix} 1.044 & -0.111 \\ -0.111 & 0.065 \end{bmatrix}$$

elde edilir. Buradan da ölçme hatalarına ait kestirim vektörü $\hat{\delta}$, denklem 4.20 ile hesaplanır.

$$\hat{\delta} = 10^{-3} \begin{bmatrix} 2.2 \\ -2.8 \\ -1 \\ 0.8 \end{bmatrix}$$

ölçülen hızlar için yapılacak kestirim denklem 4.21 ile hesaplanır.

$$\hat{r}_m = \bar{r}_m - \hat{\delta} = \begin{bmatrix} -0.142 \\ -0.06 \\ 0.064 \\ 0.078 \end{bmatrix}$$

Elde edilen kestirim sonuçları, ölçümlerin doğruluğunu göstermektedir. Ölçümler ile kestirim sonuçları arasında çok küçük bir fark olması bunu teyid etmektedir. Hesaplanan hızlara ait varyans-kovaryans matrisi denklem 4.30'la hesaplanırsa

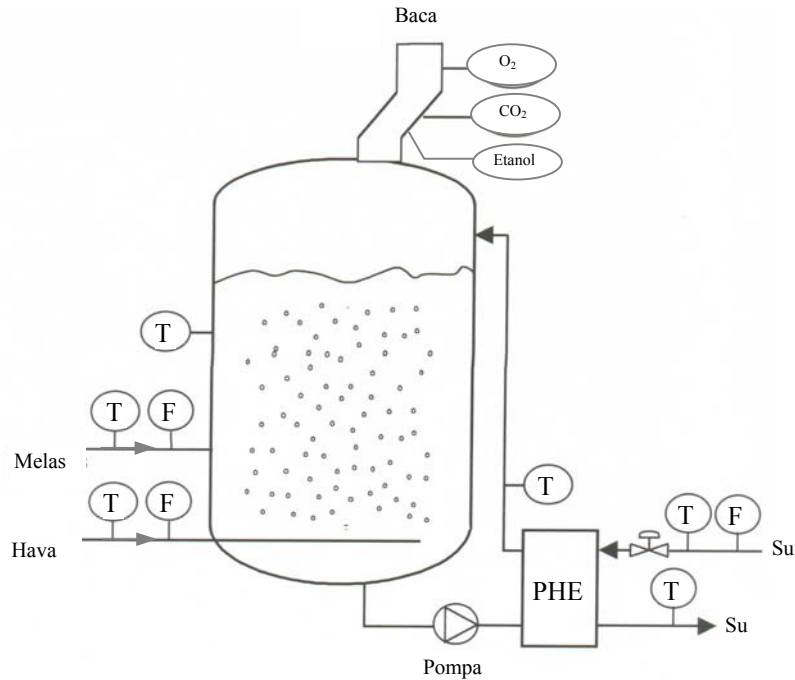
$$\hat{F} = F - F * R_r^T * P^{-1} * R_r * F \quad (4.30)$$

$$\hat{F} = 10^{-4} \begin{bmatrix} 0.209 & 0.112 & 0.116 & -0.092 \\ 0.112 & 0.154 & -0.152 & -0.041 \\ -0.116 & -0.152 & 0.151 & -0.034 \\ -0.092 & 0.041 & -0.034 & 0.127 \end{bmatrix}$$

elde edilir. Bu matristeki diagonal elemanların değeri, F matrisindeki değerlerden daha küçük olduğu görülmektedir. Bu da ölçümlere ait hesaplanan değerlerin (\hat{r}_m), ölçülen hız değerlerine (\bar{r}_m) göre daha doğru ve güvenilir olduğunu göstermektedir.

4.3. Karakutu Modelinin Endüstriyel Yarıkesikli Fermentasyona Uygulanması

Daha önce verilen algoritmalar burada endüstriyel maya fermentasyonuna uygulanmıştır. Uygulamada fermentasyon boyunca direkt olarak alınan ölçümler olarak; gaz fazında bacagazi oksijen, karbondioksit; sıvı fazda etanol, glikoz ve ısı (entalpi) denklidir. Bu şekilde ele alınan fermentasyon prosesi için ölçülen hız değişkeni sayısını (K), serbestlik derecesinden (F) iki fazla yaparak hem ölçülemeyen hızların ve hemde ölçülen hızlar için kestirim değerlerinin belirlenmesi hedeflenmiştir. Oksijen ve karbondioksit ölçümleri Servomex gaz analiz cihazı (1400 B4 SPX), etanol Vogelbuch (GS 2/3) alkol ölçüm cihazı, glikoz besleme ölçümü Krohne (IFM 090) magnetik debimetresiyle ve metabolik ısı ölçümleride kalorimetrik yöntemle gerçekleştirilmiştir. Fermentörde soğutma amaçlı olarak plakalı ısı değiştirici kullanılmıştır. Karbon kaynağı olarak melas çözeltilisi ve azot kaynağı olarak sulu amonyak çözeltilerinin beslemeleri öngörülen profillere bağlı olarak yapılmıştır. Hava beslemesi vorteks tipi flowmetre (Emco, V-Bar, 700 serisi) ile ölçülmüştür. Diğer taraftan sıcaklık ve pH kontrolleri öngörülen profillere bağlı kalınarak kapalı döngü kontrol edilmiştir.



şekil 4.3. Endüstriyel boyutlu fermentör ve alınan temel ölçümler

Gerçekleştirilen tüm kontrol işlemleri PLC kontrollü (Modicon 612 03) olarak yapılmış ve ölçüm sonuçları SCADA sistemi (Nematron, Paragon V5.3) tarafından 1 dakikalık periyotla örneklenerek toplanmıştır.

Modelin uygulandığı endüstriyel boyutlu kabarcık kolonlu fermentör Şekil 4.3'te gösterilmiştir. Prosesten alınan tüm birincil ölçümler, türetilen dönüşüm hızları ve birimleri Tablo 4.1'de verilmiştir.

Tablo 4.1. Hesaplamalarda kullanılan birincil ölçümler ve türetilen hızlar

Birincil Ölçümler	Birimler	Türetilen Hızlar	Birimler
Hava debisi	Nm ³ /h	Oksijen tüketim hızı	mol/L h
Substrat besleme debisi	L/h	Karbondioksit tüketim hızı	mol/L h
Bacagazı O ₂ derişimi	%	Etanol üretim/tüketim hızı	Cmol/L h
Bacagazı CO ₂ derişimi	%	Substrat tüketim hızı	Cmol/L h
Etanol	%	Metabolik ısı üretim hızı	kJ/L h
Sıvı hacmi	L		
Soğutma su debisi	m ³ /h		
Soğutma suyu giriş sic.	°C		
Soğutma suyu çıkış sic.	°C		
Fermentör sıcaklığı	°C		

Oksijen tüketim hızı (oxygen uptake rate, r_o) ve karbondioksit üretim hızı (carbondioxide production rate, r_c) aşağıda denklem 4.31 ve 4.32 bağıntılarıyla hesaplanmıştır.

$$r_o = \frac{F_n}{V} \left[\frac{P_{O_2}^{in}}{1 - P_{O_2}^{in} - P_{CO_2}^{in} - P_W^{in}} - \frac{P_{O_2}^{out}}{1 - P_{O_2}^{out} - P_{CO_2}^{out} - P_W^{out}} \right] \quad (4.31)$$

$$r_c = \frac{F_n}{V} \left[\frac{P_{CO_2}^{in}}{1 - P_{O_2}^{in} - P_{CO_2}^{in} - P_W^{in}} - \frac{P_{CO_2}^{out}}{1 - P_{O_2}^{out} - P_{CO_2}^{out} - P_W^{out}} \right] \quad (4.32)$$

Endüstriyel yarıkesikli fermentör için genel dinamik ısı dengesi denklem 4.33 ile yazılmıştır (Türker, 2004);

$$\rho C_{pb} \frac{d(VT)}{dt} = q_{besleme} + q_{metabolik} + q_{eşanjör} + q_{yüzey} + q_{evap} + q_{radyasyon} + q_{CO_2} \quad (4.33)$$

Genel ısı dengesinde yeralan $q_{besleme}$, fermentasyon ortamına besleme kaynaklarından gelen ısıyı göstermektedir. Glikoz kaynağı olarak kullanılan melas ile oksijen kaynağı ve karıştırma amaçlı kullanılan hava beslemesi, fermentasyon ortamına önemli miktarda ısı aktarımı gerçekleştirmektedir. Bu kaynaklardan aktarılan ısı miktarlarını aşağıdaki detaylı tanımlanabilir.

$$q_{besleme} = F_m \rho_m C_{p,m} (T_m - T_f) + F_{air} \rho_{air} C_{p,air} (T_{air} - T_f) \quad (4.34)$$

Denklem 4.34'te yeralan F ile substrat ve hava besleme debisini, ρ_i substrat / hava yoğunluğunu, $C_{p,i}$ substrat / hava özgül ısısını, T_f fermentasyon sıcaklığını ve T_m, T_{air} substrat / hava sıcaklığını göstermektedir.

$q_{metabolik}$ ise maya üremesi sırasında ortaya çıkan ısı miktarını göstermektedir. Kararlı durumda sıcaklık kontrolü ile sisteme verilen, üretilen ısı miktarı ile sistemden uzaklaştırılan ısı miktarları birbirine eşittir. Buradan yola çıkılarak $q_{metabolik}$ hesaplanmaktadır ;

$$q_{metabolik} = r_q V \quad (4.35)$$

r_q hacimsel metabolik ısı üretim hızı ve V ise fermentasyon sıvı hacmidir. Fermentörde fermentasyon süresince yapılan sıcaklık kontrolünde plakalı eşanjörler kullanılmaktadır. Plakalı eşanjörler ile giderilen ısı miktarı

$$q_{eşanjör} = F_w \rho_w C_w (T_{in} - T_{out}) \quad (4.36)$$

ile hesaplanır. Burada F_w soğutma suyu debisi, ρ_w suyun yoğunluğu, C_w suyun özgül ısı ve $(T_{in} - T_{out})$ ile de eşanjör giriş ve çıkışında soğutma su sıcaklığıdır.

Yukarıda anılan ısı giderim metodlarından başka fermentörden yüzey, evaporasyon ve radyasyon ile de ısı giderimi olmaktadır. Bunları sırası ile aşağıdaki gibi yazılabilir (Türker, 2003, 2004).

$$q_{yüzey} = h_{air} A_{yüzey} (T_f - T_{ortam}) \quad (4.37)$$

$$q_{evaporasyon} = F_{hava} \Delta H_w^0 (P_w^{out} - P_w^{in}) \quad (4.38)$$

$$q_{radyasyon} = A_{yüzey} \epsilon \sigma (T_f^4 - T_{ortam}^4) \quad (4.39)$$

Burada F_{hava} hava debisini, $A_{yüzey}$ sıvı yüzey alanını, ΔH_w^0 suyun buharlaşma ısını ve T_f , T_{ortam} 'da fermentör sıcaklığı ve ortam sıcaklığıdır (Türker, 2003).

Uygulamada sirkülasyon pompasının sisteme kattığı ısı miktarının, yüzeyden ve radyasyon yolu ile uzaklaştırılan ısı miktarına eşit olduğu ölçülmüştür. Bundan dolayı denklem 4.33 'te yer alan $q_{yüzey}$ ve $q_{radyasyon}$ terimleri hesaplamalara dahil edilmemiştir.

Isı balansının da yer aldığı elementel kompozisyon matrisi aşağıdaki gibi yazılır.

$$E = \begin{bmatrix} \text{biyokütle} & \text{etanol} & \text{CO}_2 & \text{H}_2\text{O} & \text{glukoz} & \text{oksijen} & \text{amonyak} & \text{entalpi} \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1.83 & 3 & 0 & 2 & 2 & 0 & 3 & 0 \\ 0.56 & 0.5 & 2 & 1 & 1 & 2 & 0 & 0 \\ 0.17 & 0 & 0 & 0 & 0.0125 & 0 & 1 & 0 \\ -\Delta H_{cx}^0 & -\Delta H_{cp}^0 & 0 & 0 & -\Delta H_{cs}^0 & 0 & -\Delta H_{cn}^0 & -1 \end{bmatrix} \begin{matrix} \text{karbon} \\ \text{hidrojen} \\ \text{oksijen} \\ \text{azot} \\ \text{ısı} \end{matrix}$$

Tablo 4.2. Elementel matriste yer alan bileşenlerin kompozisyonları, kütle ağırlıkları ve yanma ısıları (Türker, 2003, 2004).

Bileşen	Formül (C-mol / mol)	Kütle (g/C-mol)	Yanma Isısı (kJ / Cmol)
Biyokütle	CH _{1.8} O _{0.5} N _{0.2}	24.6	560
Karbon kaynağı	CH ₂ ON _{0.0125}	30.175	467
Amonyak	NH ₃	17	383
Etanol	CH ₃ O _{0.5}	23	683

Isı balansının da dahil edildiği ölçülen ve ölçülemeyen (hesaplanan) bileşenler matrisi ve hızlar vektörü yazılıp buradan ölçülemeyen hızlar vektörü çözülebilir.

$$\begin{array}{c}
 \begin{array}{ccccc}
 \text{oksijen} & & & & \\
 \text{CO}_2 & & & & \\
 \text{etanol} & & & & \\
 \text{glukoz} & & & & \\
 \text{entalpi} & & & &
 \end{array}
 &
 &
 \begin{array}{ccc}
 \text{amonyak} & & \\
 \text{H}_2\text{O} & & \\
 \text{biyokütle} & &
 \end{array}
 \\
 \begin{bmatrix}
 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\
 0 & 0 & 3 & 2 & 0 \\
 2 & 2 & 0.5 & 1 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0.0125 & 0 \\
 0 & 0 & 683 & 467 & -1
 \end{bmatrix}
 &
 + &
 \begin{bmatrix}
 0 & 0 & 1 \\
 3 & 2 & 1.83 \\
 0 & 1 & 0.56 \\
 1 & 0 & 0.19 \\
 383 & 0 & 560
 \end{bmatrix}
 &
 \begin{bmatrix}
 r_n \\
 r_w \\
 r_x
 \end{bmatrix}
 &
 = 0 \\
 E_m & & r_m & & E_c & & r_c
 \end{array}$$

$$\begin{bmatrix}
 r_n \\
 r_w \\
 r_x
 \end{bmatrix}
 =
 \begin{bmatrix}
 0.8081 & 1.0829 & -0.2085 & 0.2163 & -0.0001 \\
 -0.9033 & -1.0744 & -0.1408 & -0.4308 & 0.0016 \\
 -0.5527 & -0.7406 & -1.0771 & -0.9818 & -0.0017
 \end{bmatrix}
 \begin{bmatrix}
 r_o \\
 r_c \\
 r_e \\
 r_s \\
 r_q
 \end{bmatrix}$$

elde edilir. r_n , r_w ve r_x hızlarını daha açık şekilde aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$r_n = 0.8081 r_o + 1.0829 r_c - 0.2085 r_e + 0.2163 r_s - 0.0001 r_q$$

$$r_w = -0.9033 r_o - 1.0744 r_c - 0.1408 r_e - 0.4308 r_s + 0.0016 r_q$$

$$r_x = -0.5527 r_o - 0.7406 r_c - 1.0771 r_e - 0.9818 r_s - 0.0017 r_q$$

Sistemin artıklık matrisi R (redundancy), ve indirgenmiş artıklık matrisi R_r (reduced redundancy) sırasıyla;

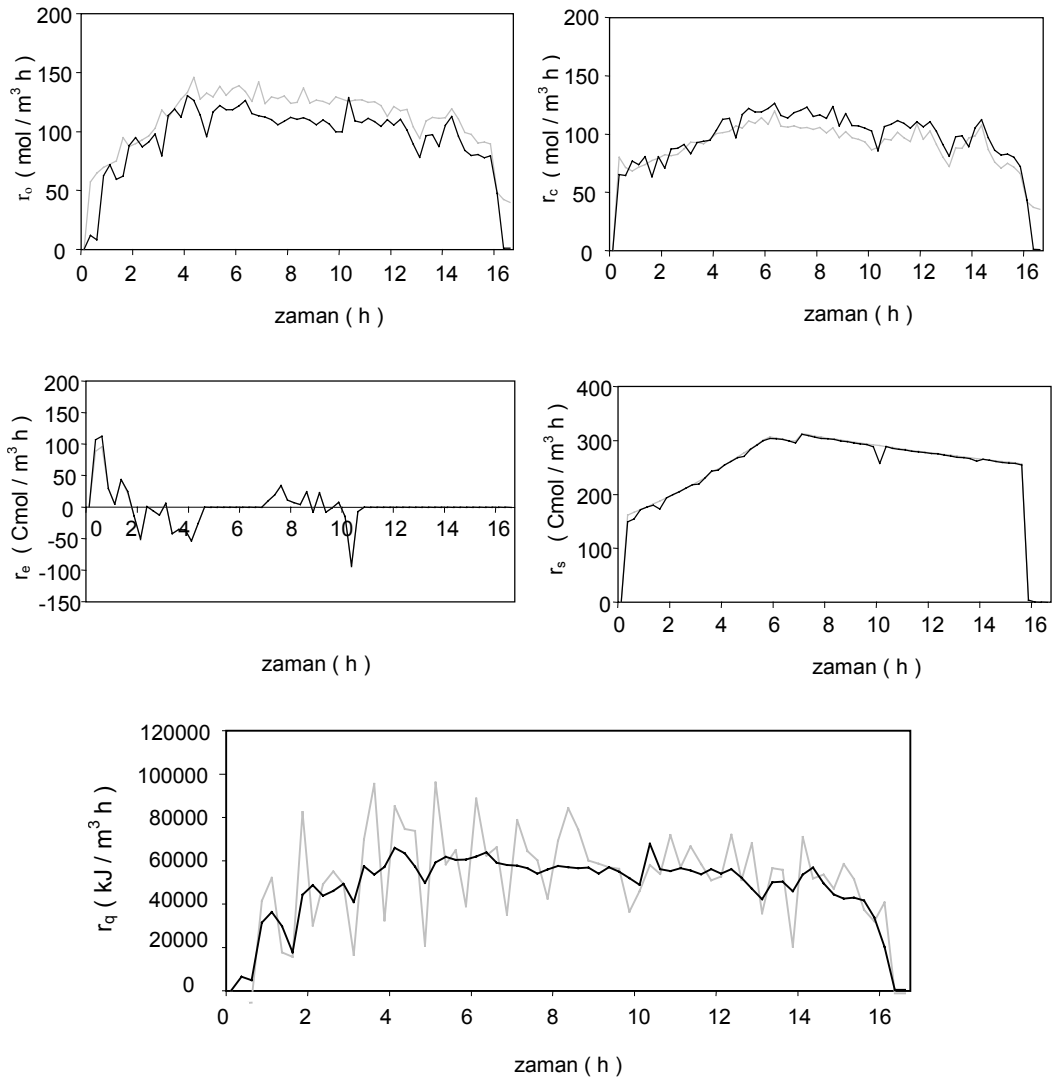
$$R = \begin{bmatrix} -0.5527 & 0.2594 & -0.0771 & 0.0182 & -0.0017 \\ -0.3936 & -0.2554 & 0.1220 & -0.0097 & -0.0003 \\ 0.7872 & 0.5109 & -0.2440 & 0.0193 & 0.0006 \\ 0.7031 & 0.9421 & -0.4131 & 0.0422 & -0.0004 \\ 0.0012 & -0.0005 & 0.0001 & -0.0001 & 0.0000 \end{bmatrix}$$

$$R_r = \begin{bmatrix} -0.5527 & 0.2594 & -0.0771 & 0.0182 & -0.0017 \\ -0.3936 & -0.2554 & 0.1220 & -0.0097 & -0.0003 \end{bmatrix}$$

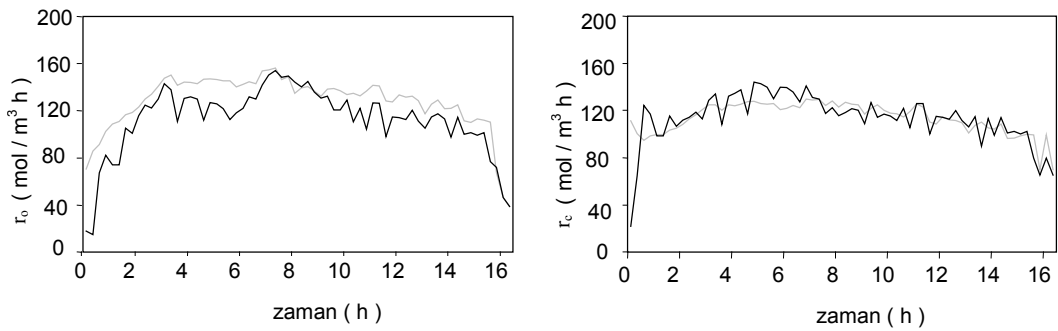
olarak yazılabilir. Prosesten alınan ham ölçümler daima rastgele (random) ve sistematik hatalar içermektedir. Diğer yandan fiziksel sistemle model arasında da mutlaka bir takım farklılıklar mevcuttur. Bu farklılıklar sistem parametrelerinin zamanla değişim göstermesi, salınım içermesi olabileceği gibi fiziksel sistemde yeralan ölçü ve kontrol ekipmanlarının davranışlarının da zamanla değişim göstermesinden kaynaklanabilir. Tüm bunların neden olacağı hataları en aza indirmek için, sistemden elde edilen ham ölçümleri model ile uyumlu hale getirmek gerekmektedir.

4.3.1. Endüstriyel fermentasyonlarda uygunlaştırılmış hızların elde edilmesi

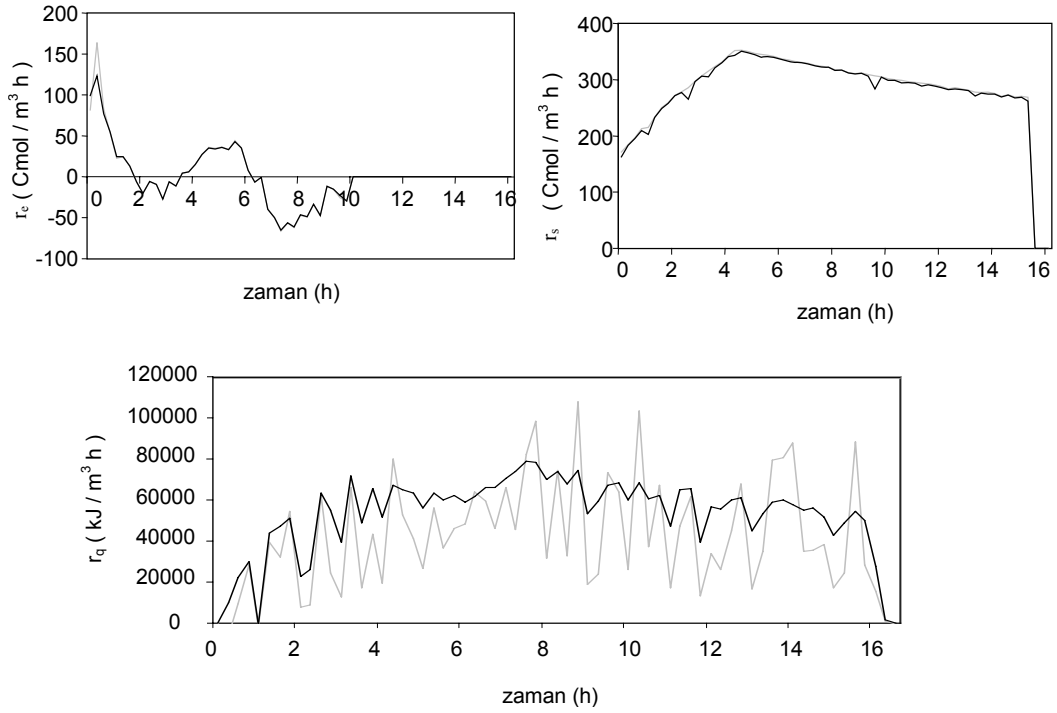
Endüstriyel ticari fermentörlerde (100 m³) gerçekleştirilen deneylere ait çevrim içi (online) ve uygunlaştırılmış (reconciliated) hız eğrileri Şekil 4.4 (A tip fermentasyon), Şekil 4.5 (B tip fermentasyon) ve Şekil 4.6'de (C tip fermentasyon) verilmiştir. A ve B tip fermentasyonlarda, prosesin ilk saatlerinde bir miktar alkol oluşumuna izin veren bir melas besleme profili izlenirken, C tip fermentasyonda proses başlangıcında fazla miktarda alkol oluşumunu öngören melas besleme profili izlenmiştir. Birincil değişkenlerden elde edilen çevrimiçi hız değerleri uygunlaştırılmış hız değerleri ile birlikte verilmiştir.



Şekil 4.4. A tip bir fermentasyondan elde edilen dönüşüm hız eğrileri (koyu renkle uygunlaştırılmış, açık renkle çevrimiçi hızlar gösterilmiştir).



Şekil 4.5. B tip bir fermentasyondan elde edilen dönüşüm hız eğrileri (koyu renkle uygunlaştırılmış, açık renkle çevrimiçi hızlar gösterilmiştir).

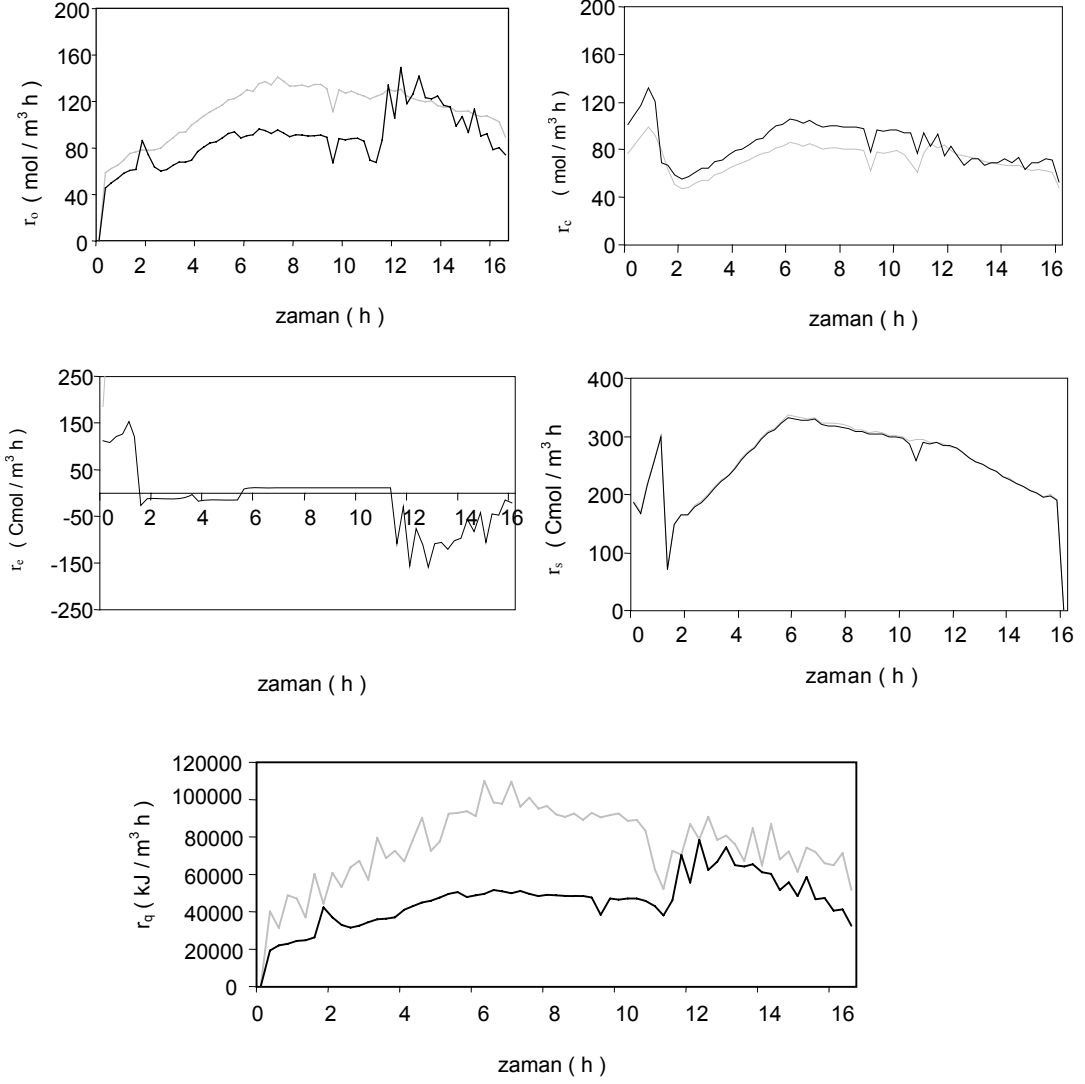


Şekil 4.5.(devamı) B tip bir fermentasyondan elde edilen dönüşüm hız eğrileri (koyu renkle uygunlaştırılmış, açık renkle çevrimiçi hızlar gösterilmiştir).

Çevrimiçi hızlardan ve uygunlaştırılmış hızlardan elde edilen dönüşüm hızlarının birbiriyle uyumlu olması, çevrimiçi hızların doğruluğunu göstermektedir. Grafiklerde gri renkli çizgilerle belirtilmiş olan hızlar, prostesten 15 dakikalık peryotla alınan birincil hızları ve bu hızlar kullanılarak hesaplanan dönüşüm hızlarını göstermektedir. Elde edilen uygunlaştırılmış değerler koyu renkli çizimle verilmiştir. Uygulamada ölçümlerdeki yüzde bağıl hatalar; oksijen, karbondioksit, etanol ve substrat ölçümleri için % 7, ısı balansı ölçümü için % 20 olarak belirlenmiş ve kullanılmıştır.

Elde edilen çevrimiçi hız değerlerinde, ısı balansı ölçümlerinden elde edilen metabolik ısı ölçümlerinde önemli miktarda salınım olduğu gözükmektedir. Bunun nedeni olarak, metabolik ısı hesabında yeralan pekçok birincil ölçümün anlık değerlerinin kullanılması (eşanjör giriş/çıkış sıcaklık ölçümleri, su debisi, hava debisi ölçümlerindeki anlık hesaplamalar) ve bu ölçümlerin değişken hesaplarında yer alması, ölçüm sensörlerinin içerdiği sistematik ölçme hataları ve burada detaylı

olarak incelenmeyen ve literatürden alınan elementel kompozisyon değerlerinin yanma ısıları değerlerinin gerçek durumla içerdği farklılıkları gösterebilir.



Şekil 4.6. C tip bir fermentasyondan elde edilen dönüşüm hız eğrileri (koyu renkle uygunlaştırılmış, açık renkle çevrimiçi hızlar gösterilmiştir).

Yukarıdaki grafikler (Şekil 4.4, Şekil 4.5 ve Şekil 4.6) incelendiğinde oksijen tüketim ve karbondioksit üretim hızı ölçümlerinde hem bir miktar salınım ve hem de uygunlaştırılmış hız değerlerine göre az da olsa bir farklılık olduğu görülmektedir. Diğer taraftan metabolik ısı ölçümlerinde yukarıda sayılan nedenlerden dolayı önemli salınımlar mevcuttur.

4.3.2. Endüstriyel fermentasyonlar için tutarlılık analizleri

Prosesten elde edilen ve türetilen dönüşüm hızlarında varolan veya proses model tanımındaki belirsizliklerden kaynaklanan hatalar denklem 4.17 ile verilen rezidü vektörünün sıfırdan farklı değerler almasıyla istatistiksel olarak hatanın varlığını göstermektedir.

İstatistiksel analizde ölçümlerle, beklenen değerler arasındaki uygunluğun belirlenmesinde istatistiksel bir metod olan ki-kare (chi-square) metodu yaygın olarak kullanılmaktadır (Bircan ve diğ., 2003). Ki-kare testi, iki veya daha fazla veri seti arasında, önemli bir farkın olup olmadığının belirlenmesinde kullanılan istatistiksel bir analiz metodudur. Ki-kare testi belli bir hipoteze (enerji, kütle korunumu gibi) ve ihtimal dağılımlarına uygunluk testi olarak iki kısımda incelenmektedir.

Eğer denklem 4.17 ile elde edilen rezidü vektöründeki herhangi bir değer, sıfırdan önemli bir farklılık gösteriyorsa ölçümde veya modelde bir hata olduğu varsayılmaktadır. Rezidü vektöründeki sıfırdan farklı değerlerin anlamını belirlemede test fonksiyonu (denklem 4.40) kullanılmaktadır (Nielsen ve Villadsen, 1994). Test fonksiyonu rezidü vektöründeki bileşenleri doğruluklarına göre ağırlıklandırmaktadır. Elde edilen h değerleri, serbestlik derecesine bağlı olarak ki-kare dağılım tablosu ile karşılaştırılarak ölçümlerin uygunluğuna karar verilir (Heijden ve diğ., 1994-b).

$$h = \varepsilon^T P^{-1} \varepsilon \quad (4.40)$$

Denklem 4.40 yukarıda verilen deney verilerine uygulandığında Tablo 4.3 ile verilen sonuçlar elde edilmiştir. Tablo 4.3 incelendiğinde A ve B deneylerine ait ölçümlerde uygunluk seviyesi %50 ile %95 arasında değişirken, C deney ölçümlerinde fermentasyonun ilk 10-12 saati için bu değerler çok büyük olduğu için sistematik hata içerdiği kabul edilmektedir.

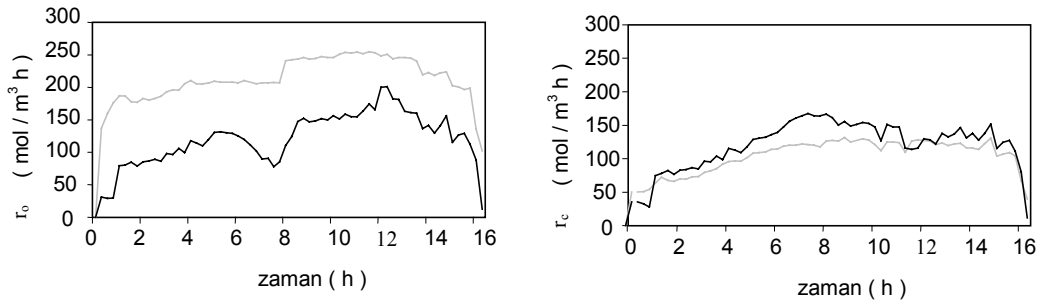
Tablo 4.3. A, B ve C tip fermentasyon ölçüm verilerine h test (chi-square) uygulandığında elde edilen değerler.

zaman (h)	A	B	C
1	1.6	0.0	0.0
2	10.0	9.3	68.4
3	4.2	12.6	31.9
4	1.0	20.3	34.5
5	5.7	4.8	32.1
6	6.3	7.8	28.7
7	4.2	4.4	25.7
8	4.5	0.2	28.7
9	8.0	0.5	29.3
10	0.8	6.4	28.3
11	4.4	12.2	28.2
12	4.6	34.5	14.0
13	7.6	4.2	4.0
14	2.3	8.6	1.7
15	10.7	2.1	4.1

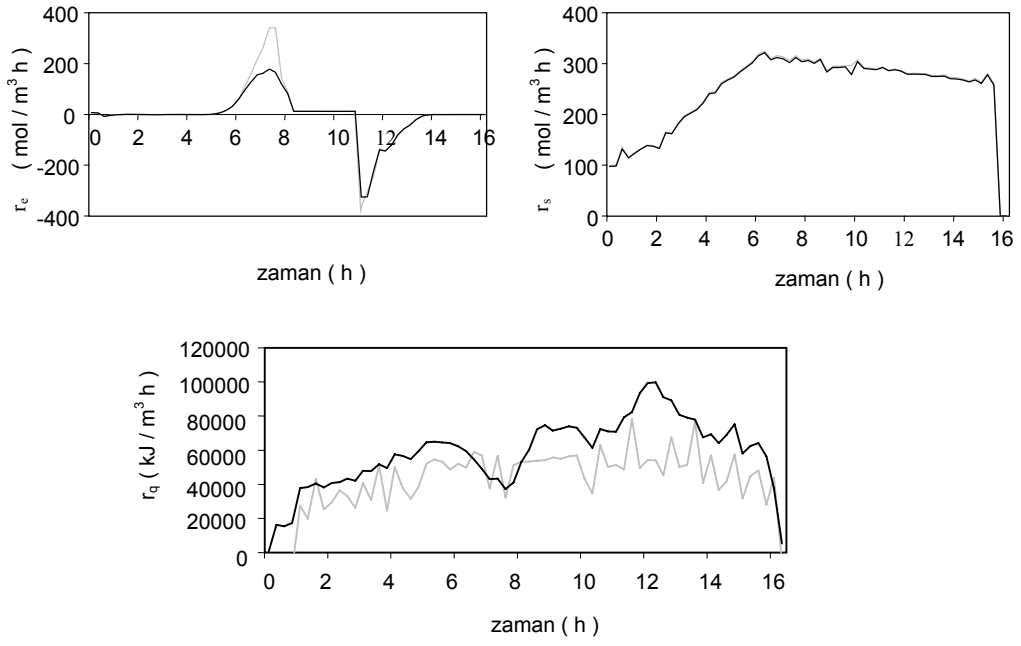
4.3.3. Pilot fermentasyonlar için uygunlaştırılmış (reconciliated) hız değerlerinin elde edilmesi ve seri eleme yöntemi

Pilot boyutlu fermentörde (25 m^3) gerçekleştirilen deneylere ait çevrimiçi ve uygunlaştırılmış hız eğrileri Şekil 4.7’de verilmiştir. Pilot fermentörde kullanılan modelde ısı denkleği kurulurken denklem 4.37 ile verilen yüzey soğuma ile giderilen ısı dahil edilmemiştir.

Dönüşüm hızları incelendiğinde oksijen tüketim hızı ölçümlerinde önemli farklılıklar gözlemlenirken diğer hacimsel hızlarda çevrimiçi hızlarla uygunlaştırılmış hızların birbiriyle uyumlu olduğu görülmektedir.



Şekil 4.7. Pilot fermentasyonlardan elde edilen çevrimiçi ve uygunlaştırılmış hız eğrileri (koyu renkle uygunlaştırılmış, açık renkle çevrimiçi hızlar gösterilmiştir).



Şekil 4.7. (devamı) Pilot fermentasyonlardan elde edilen çevrimiçi ve uygunlaştırılmış hız eğrileri (koyu renkle uygunlaştırılmış, açık renkle çevrimiçi hızlar gösterilmiştir).

Tablo 4.4 : Pilot fermentör için h test sonuçları ve seri eleme yöntemi hata kaynağının belirlenmesi.

h test sonuçları						
hızların seri eliminasyonu						
zaman (saat)		r_c	r_o	r_e	r_s	r_q
1	325.3	214.5	131.9	225.5	204.4	88.6
2	72.5	45.0	0.1	37.8	59.7	75.3
3	69.5	47.0	0.5	40.1	61.2	69.9
4	71.1	61.4	4.1	55.2	74.0	57.2
5	46.8	24.5	0.1	19.8	35.1	49.0
6	38.7	12.3	0.2	9.1	19.7	44.3
7	84.5	7.5	6.3	4.4	15.9	92.0
8	157.2	14.0	24.1	7.6	32.3	164.9
9	38.7	15.1	0.0	11.6	24.3	44.3
10	40.2	14.0	0.1	9.7	20.6	46.0
11	46.9	20.8	0.0	16.3	30.9	51.3
12	32.7	18.1	14.5	17.2	19.5	0.7
13	18.8	6.1	0.0	4.4	9.5	24.0
14	39.7	24.8	0.7	20.5	34.3	38.6
15	25.7	8.8	0.0	6.5	14.9	30.4
16	55.7	45.6	4.6	40.2	56.2	42.2

Bu sonuç, deney çevrimiçi ölçümlerine h testi uygulandığında da ortaya çıkmaktadır. h testi ile uygunluk testi sonuçlarında elde edilen değerlerin ki-kare tablo değerlerinden büyük olması durumunda ölçümlerde ve/veya modelde sistematik bir

hata olduğu (random ölçüm hataları dikkate alınmadan) kabul edilmektedir (Heijden ve diğ., 1994-b).

Hata kaynağının belirlenmesinde seri eleme yöntemi (serial elimination method) kullanılmıştır. Bu yöntemde sistemde yer alan ölçülebilen hızlar sırasıyla ölçülemeyen hızlar tarafına geçirilmekte ve oluşan yeni yapı için tekrar tekrar h testleri uygulanmaktadır. Yeni elde edilen h test sonuçlarında hangi bileşen ölçülemeyen tarafa geçirildiğinde test sonuçları çok düşük değerlerde elde ediliyorsa adı geçen ölçümde sistematik bir hata olduğu sonucuna varılmaktadır. Buna göre Tablo 4.4 incelendiğinde r_o oksijen tüketim hızının sistematik hatalar içerdiği gözükmektedir. Bu durum Şekil 4.7’de verilen grafiklerle örtüşmektedir.

4.3.4. Alternatif tutarlılık testlerinin pilot ve endüstriyel fermentasyonlara uygulanması

Deney ölçümlerinin tutarlılıkları, h testi dışında elementel, elektron ve ısı balansları da dikkate alınarak incelenmiştir. Balanslar denklem 4.41, 4.42 ve 4.43 ifadeleriyle verilmiştir (Türker, 2004);

Elementel denklikler;

$$\begin{aligned}
 C &: r_s = r_x + r_p + r_c \\
 H &: r_s s_1 + 3r_n = x_1 r_x + p_1 r_p + 2r_w \\
 O &: r_s s_2 + 2r_o = x_2 r_x + p_2 r_p + 2r_c + r_w \\
 N &: r_s s_3 + r_n = x_3 r_x + p_3 r_p
 \end{aligned} \tag{4.41}$$

Elektron denkliği;

$$\gamma_s r_s - 4r_o = \gamma_x r_x + \gamma_p r_p \tag{4.42}$$

Enerji denkliği;

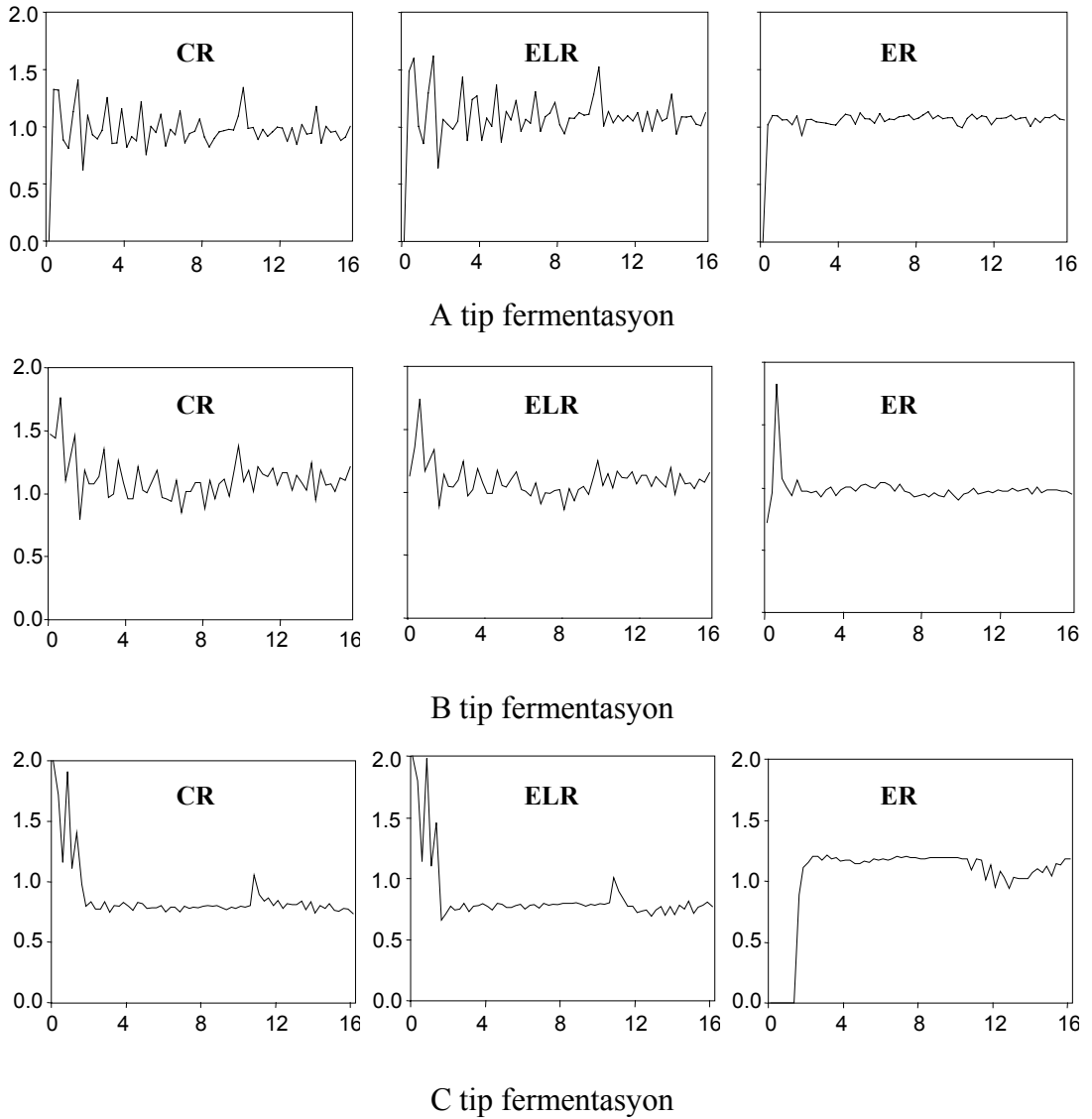
$$r_s \Delta H_S + r_n \Delta H_N = r_x \Delta H_x + r_p \Delta H_p + r_Q \tag{4.43}$$

yukarıda verilen denklikler birimsiz duruma getirilirse ;

$$\begin{aligned}
 CR: 1 &= \frac{r_x}{r_s} + \frac{r_p}{r_s} + \frac{r_c}{r_s} \\
 ELR: 1 &= \frac{4r_o}{3.96r_s} + \frac{6r_p}{3.96r_s} + \frac{4.2r_c}{3.96r_s}
 \end{aligned} \tag{4.44}$$

$$ER: 1 = \frac{Y_{X/S} (\Delta H_X - 0.2 \Delta H_N + Y_{Q/X})}{\Delta H_S} + \frac{Y_{P/S} \Delta H_P}{\Delta H_S}$$

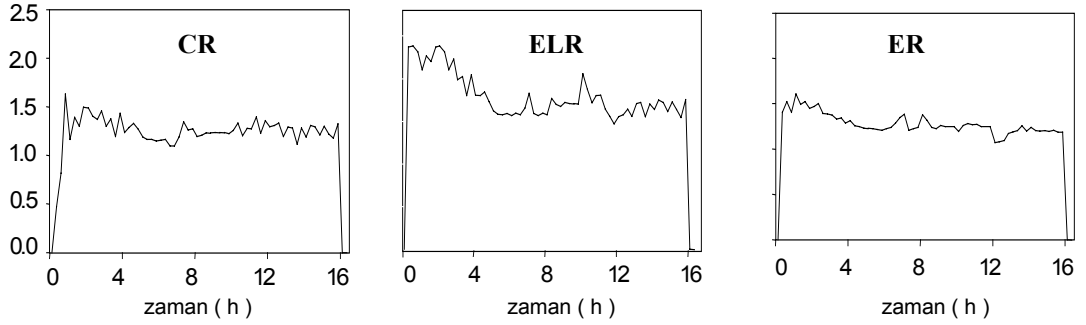
elde edilir. Şekil 4.8’de endüstriyel fermentasyonlarından elde edilen eğrilerde tüm alternatif tutarlılık testlerinde eğriler salınımlı olmakla birlikte, 1 değerinin etrafında salınmaktadır. Bu iki fermentasyon verilerinin tutarlı olduğunu göstergesidir.



Şekil 4.8. A, B ve C fermentasyon verilerinden elde edilen CR, ELR, ER balans eğrileri.

C fermentasyonunda ise çevrimiçi ve uygunlaştırılmış dönüşüm hız ölçümlerinde farklılıklar olduğu buradaki sonuçlarda da görülmektedir. Benzer alternatif tutarlılık

testleri 25 m³'lük fermentörde gerçekleştirilen fermentasyon verilerine de uygulanmıştır (Şekil 4.9). Burada elde edilen değerlerin 100 m³'lük fermentörden elde edilen değerlere göre daha kötü görülmektedir. Balans değerleri 1.5 değeri etrafında salınmaktadır. Bu sonuçlara göre pilot fermentörde yapılması planlanan kontrol deneylerinde uygunlaştırılmış dönüşüm hızlarının kullanılmasının gerekliliği ortaya çıkmaktadır.

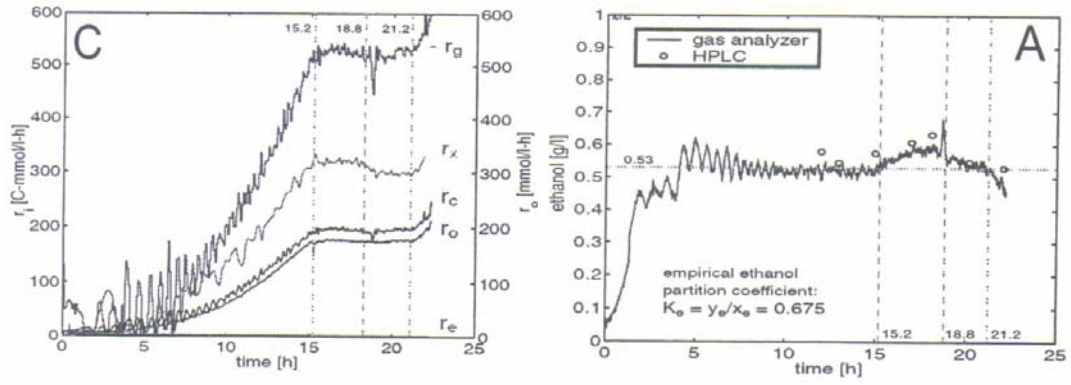


Şekil 4.9. Tipik bir pilot fermentasyon verilerinden elde edilen CR, ELR, ER balans eğrileri.

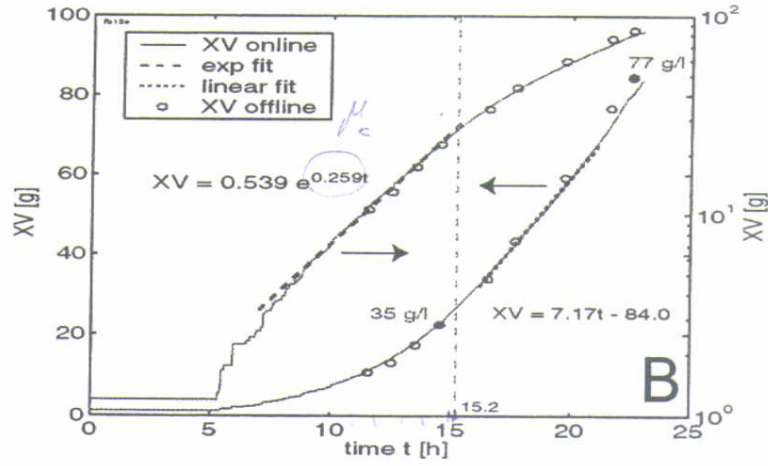
4.4. Modelin Literatürden Alınan Deneysel Çalışmaya Uygulanması

Bir önceki bölümde detaylı anlatılan biyokütle derişimi kestirim modeli, literatürden alınan ve benzer bir mikroorganizmanın çalışıldığı bir ölçüm setine uygulanmıştır. Söz konusu çalışmada 2 litrelik karıştırmalı bir reaktörde, yarı kesikli ekmek mayası fermentasyonu çalışılmıştır (Cannizzaro, 2003). Bu çalışmada etanol derişimi kritik bir değerde kontrol edilmiş, oksijen limitasyonuna ulaşıncaya kadar üssel substrat beslemesi yapılmış, daha sonra doğrusal substrat beslemesi yapılmıştır. Etanol derişimi Mid-IR sensörüyle çevrimiçi ölçülmüştür. Çalışmada verilen ölçümlere ait grafikler Şekil 4.10 ve 4.11’de verilmiştir. Proseste ölçülen hacimsel hızlar; oksijen, karbondioksit, etanol, substrat ve metabolik ısı enerjisidir. Literatürden (Cannizzaro, 2003) alınan çalışmada elde edilen biyokütle derişimine ait çevrimiçi ölçümler Şekil 4.11’de verilmiştir.

Şekil 4.10’de verilen grafiklerden örnekleme ile elde edilen hacimsel hız ölçümleri modele uygulandığında, modelin öngördüğü biyokütle derişimi ve özgül üreme hızları ile literatürden (Cannizzaro, 2003) alınan değerler birbiriyle örtüşmektedir.



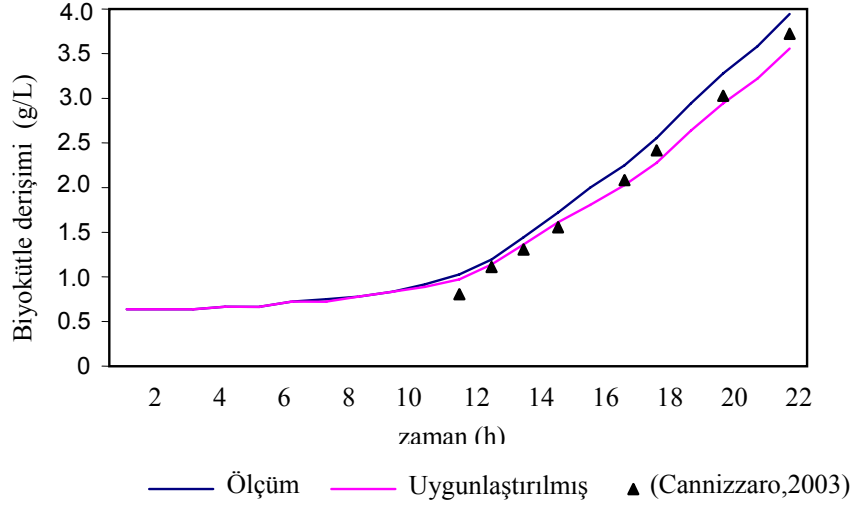
Şekil 4.10. Hacimsel hızlar ve etanol ölçümü.



Şekil 4.11. Biyokütle eğrisi

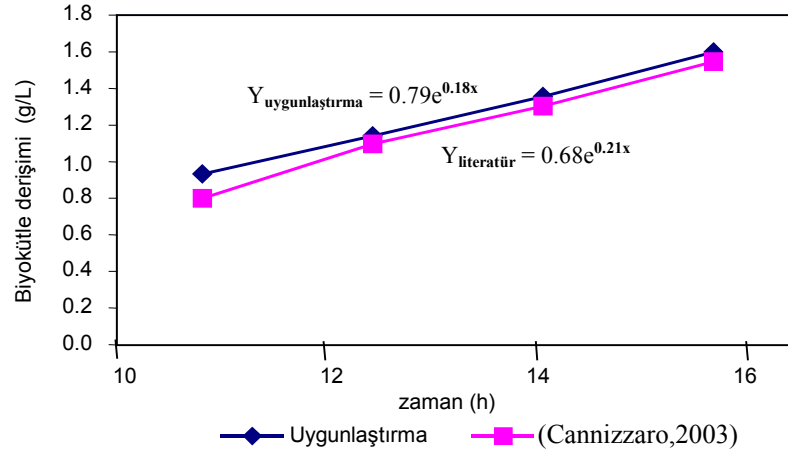
Uygunlaştırma ile elde edilen dönüşüm hızları kullanıldığında ise elde edilen biyokütle derişim değerleri makaleden (Cannizzaro, 2003) alınan çevrimdışı ölçüm değerleri ile çok daha iyi örtüşmektedir (Şekil 4.12).

Fermentasyon ortamında oksijen sınırlamasına (15. saat) kadar üssel substrat beslemesi yapılmıştır. Bu süre için özgül üreme hızı (μ) literatürde (Cannizzaro, 2003) 0.259 h^{-1} olarak verilmiştir.



Şekil 4.12. Modelin öngördüğü biyokütle derişimi ve laboratuvar ölçümleri.

Bizim örneklemelerimizdeki hatalardan dolayı bu değer, laboratuvar örnekleri için 0.21 h^{-1} ve çevrimiçi kestirim değerleri için 0.18 h^{-1} olarak elde edilmiştir. Özgül üreme hızlarına ait grafikler Şekil 4.13'te verilmiştir.



Şekil 4.13. Üssel üreme safhasında özgül üreme hızları.

4.5. Biyokütle Derişimlerinin Öngörülmesi

Bu çalışma, doktora tez konusu olan ‘endüstriyel yarıkesikli ekmek mayası fermentasyon prosesinin model esaslı kontrolü’ (geribesleme doğrusallaştırmalı biyoproses kontrolü) için gerekli doğru, güvenilir ve pahalı olmayan bir biyokütle ölçüm sensörü elde etmek amacıyla gerçekleştirilmiştir. Burada konu edilen biyokütle kestirim algoritması (yazılım sensörü, software sensör) farklı tipteki maya fermentasyonlarına uygulanmıştır. Ele alınan fermentasyon türleri, ticari maya türüne göre farklı başlangıç değerleri ve aşu tiplerine göre sınıflandırılmıştır. Kısaca fermentasyon türlerini de açıklarsak;

A tipi fermentasyonda, proses yan ürünü olan etanol oluşumu öngörülmeıen bir reçeteye göre işlem yapılmaktadır.

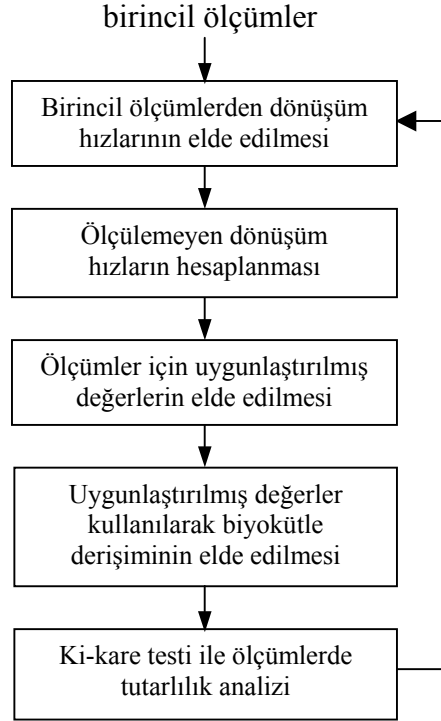
B tipi fermentasyonda, ortama başlangıçta az miktarda Şeker konan ve prosesin ilk saatlerinde düşük bir etanol derişimine izin verilen bir reçeteye göre işlem yapılmaktadır.

C tipi fermentasyonda, fermentasyon başlangıcında fazla miktarda etanol oluşumu öngörülen bir reçeteye göre işlem yapılmaktadır.

Deneme fermentasyonlarından alınan ölçümler kullanılarak elde edilen dönüşüm hızları kullanılarak gerçekleştirilen biyokütle derişimlerinin hesaplanmasında karakutu modeli kullanılmıştır. Model öncelikle çevrimiçi dönüşüm hızlarını kullanarak biyokütle derişimini hesaplamaktadır. Bu işleme paralel olarak, ölçümlerin içerdiği yüzde bağıl hata değerleri kullanılarak dönüşüm hızları için tutarlılık analizleri yapılmakta ve ölçülen hızlar için kestirim değerleri hesaplanmaktadır. Bu yeni hızlara uygunlaştırılmış dönüşüm hızları denmektedir. Bu yeni hız değerleri kullanılarak ölçülemeyen hızlar hesaplanmakta ve hesaplanan özgül biyokütle üreme hızından da biyokütle derişimi elde edilmektedir.

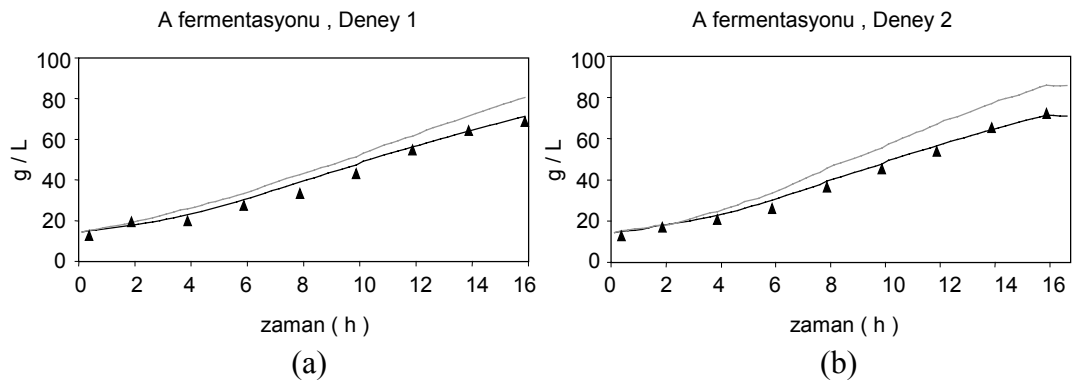
Her iki tipteki hız ölçümleri kullanılarak elde edilen biyokütle derişim eğrileri, laboratuarda yapılan çevrimdışı biyokütle analizleri ile karşılaştırıldığında

uygunlaştırılmış dönüşüm hızları kullanılarak elde edilen biyokütle değerleri ile laboratuarda yapılan analizler çok iyi örtüşmektedir.

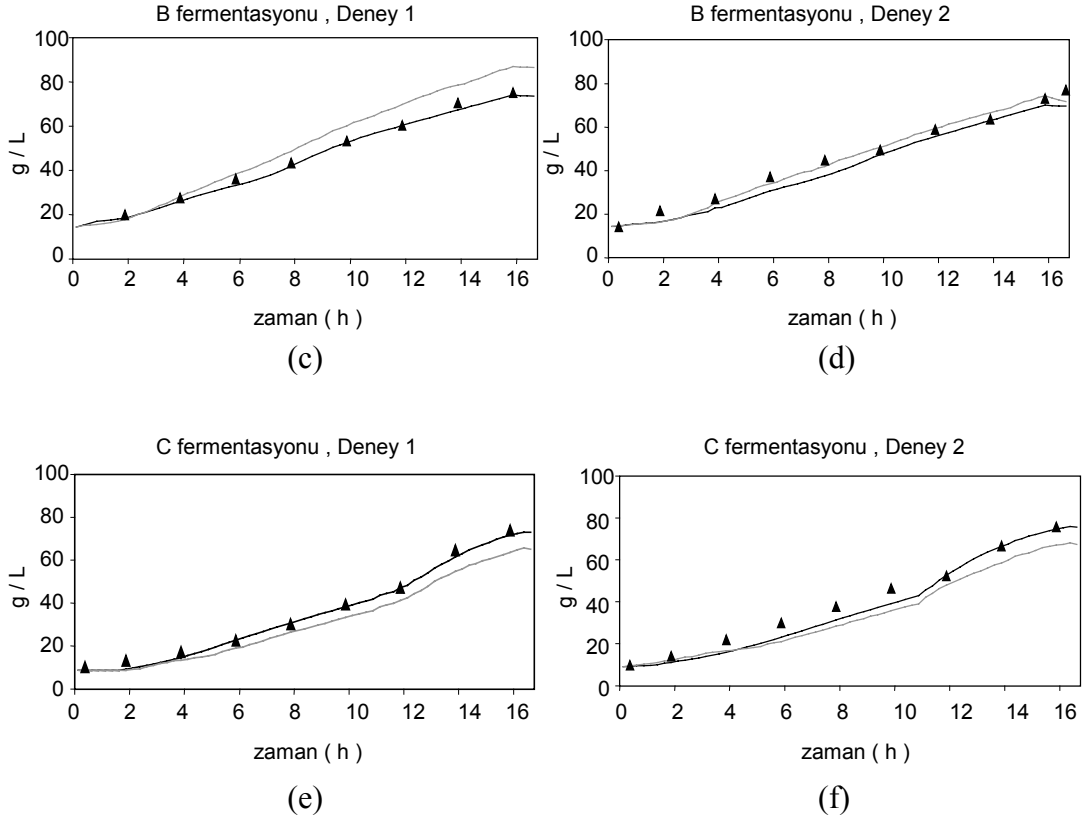


Şekil 4.14. Biyokütle kestirim algoritması akış şeması

Şekil 4.15.a, b, c, d, e, f'de doğrudan hız ölçümleri kullanılarak hesaplanan biyokütle derişimleri (ölçüm) ile uygunlaştırılmış hızların kullanılması ile elde edilen biyokütle derişimleri (uygunlaştırılmış) eğrileri verilmiştir.



Şekil 4.15. Deney fermentasyonlarından elde edilen çevrimiçi, uygunlaştırılmış ve laboratuvar biyokütle eğrileri (— çevrimiçi, - - - uygunlaştırılmış, ▲ laboratuvar).



Şekil 4.15. (devamı) Deney fermentasyonlarından elde edilen çevrimiçi, uygunlaştırılmış ve laboratuvar biyokütle eğrileri (— çevrimiçi, — uygunlaştırılmış, ▲ laboratuvar).

Şekil 4.15’de verilen grafiklerde görüldüğü gibi uygunlaştırılmış hız ölçümlerini kullanarak elde edilen biyokütle derişimleri, ham hız ölçümleri kullanılarak elde edilen biyokütle derişimlerine göre deney yapılan tüm farklı fermentasyon tipleri için çok daha iyi sonuç verdiği görülmektedir.

Diğer taraftan tüm deneylerde kullanılan ölçümler için yapılan diğer bir incelemede ki-kare uygunluk testidir. Bu test için elde edilen h değerleri aşağıda Tablo 4.5’te verilmiştir. Test sonuçları irdelendiğinde B fermentasyonu D1 veri seti dışındaki ölçümlerde sistematik hatalar olduğu görülmektedir. Tablo 4.5’teki değerlerin ki-kare tablosu değerlerinden bir miktar yüksek olması bazı ölçümlerde bir takım hataların varlığını göstermektedir. Yapılan deney fermentasyonlarında bacagazı oksijen ölçümü ile ısı balansı ölçümlerindeki sistematik ölçme hatalarının (hava debisi, soğutma suyu debisi salınımları) metabolik ısı ölçümüne hatalar eklediği ve Tablo 4.5’te verilen h test değerlerinin yüksek olmasına neden olduğu düşünülmektedir.

Tablo 4.5. Deneme fermentasyonları için h değerleri.

Zaman (h)	A ferm. D-1	A ferm. D-2	B ferm. D-1	B ferm. D-2	C ferm. D-1	C ferm. D-2
1	22	43	16	93	43	70
2	22	38	13	39	42	56
3	32	46	8	71	44	66
4	30	51	11	15	43	62
5	28	43	15	24	41	59
6	27	40	13	21	38	54
7	26	45	8	22	41	55
8	21	41	6	17	41	56
9	23	40	5	14	40	47
10	21	38	9	17	40	49
11	27	39	29	18	25	6
12	25	41	11	16	4	9
13	23	46	12	21	2	18
14	18	34	10	14	5	21
15	25	37	9	25	10	29

5. ÖLÇÜLEMİYEN DURUM DEĞİŞKENLERİNİN ASİMTOTİK GÖZLEMCİLER İLE BELİRLENMESİ

Modern kontrol teorisinde sistem tasarımları durum uzayı (state space) yaklaşımı ile yapılmaktadır. Bu metodla kontrol mühendisi, ilk koşulları dikkate alarak, sisteme ait kapalı döngü kutuplarını istenen yere koyabilmekte veya belirlenen performans indeksine göre optimal kontrolcüyü tasarlayabilmektedir. Durum uzayı yaklaşımında sistemin dinamik davranışının doğru bir şekilde tanımlanması gerekmektedir.

Klasik kontrol teorisinde giriş, çıkış ve hata sinyalleri ile transfer fonksiyonları kullanılır. Klasik kontrol sistemlerinin en önemli dezavantajı doğrusal ve zamanla değişmeyen tek giriş/çıkışlı sistemlere uygulanabilir olmasıdır. Tek giriş/çıkışlı (TGTC) kontrol sistemlerin davranışlarının incelenmesinde kök-yer eğrileri (root-locus), frekans cevabı yöntemlerinden yararlanılmaktadır. Kapalı döngü bir sistemin açık döngü frekans cevabı (frequency response) incelenerek dinamik davranışı kestirilebilir. Zamanla değişen, doğrusal olmayan ve çoklu giriş çıkışlı sistemlerin analiz ve kontrolünde klasik kontrol yöntemleri yetersiz kalmaktadır.

Gerçekleme açısından bakıldığında durum uzayı metodu bilgisayar ortamında çok rahatlıkla gerçekleştirilmektedir. Bu metodun diğer bir avantajı da durum değişkeni olarak seçilen değişkenlerin fiziksel değişken olma zorunluluğunun olmamasıdır. Bu da tasarımcıya esneklik sağlamaktadır (Ogata, 1997).

Durum uzayı yaklaşımında kullanılan tüm kontrolcü tasarım metodlarında (kutup yerleştirme, optimal kontrol, durum geribesleme kontrol vektörü metodları gibi), sisteme ait tüm durumların bilinmesi ve gerekiyorsa geribesleme amaçlı kullanılması gerekmektedir. Pratikte sisteme ait tüm durumların ölçülmesi mümkün olmamaktadır. Ölçülemeyen durum değişkenlerinin durum gözlemciler kullanılarak belirlenmesi/hesaplanması gerekmektedir.

Ölçülemeyen durum değişkenlerinin hesaplanmasında, ölçülen durum değişkeninin diferansiyelinin alınması istenmeyen bir yoldur. Bu şekilde, bir ölçümün diferansiyelinin alınması sinyal/gürültü oranını düşürür. Gürültünün salınımının değişimi sinyale göre daha hızlı olduğu için istenmeyen durum oluşur (Ogata, 1997). Ölçülen durum değişkeni ölçümlerinin diferansiyeli alınmadan da durum kestirimi yapan metodlar mevcuttur. Ölçülemeyen durum değişkeninin hesaplanmasına/belirlenmesine genel olarak gözlemci (observer) denmektedir.

Gerçek zamanda ölçülemeyen durum değişkenlerinin veya parametrelerin yazılım ile gerçek zamanlı olarak kestirimini yapan programlara yazılım sensörü (software sensor) denmektedir. Kontrol terminolojisinde durum değişkenlerinin hesaplanmasında kullanılan yazılım sensörlerine durum gözlemleyici (state observer, observer) denmektedir. Model parametrelerinin belirlenmesinde kullanılan yazılım sensörlerine ise parametre hesaplayıcısı (parameter estimator) denmektedir (Bastin ve Dochain, 1990).

Bir durum gözlemcisinin tasarımı gözlemlenebilirlik şartı sağlanabiliyorsa yapılabilir. Durum uzayında bir sistem denklem 5.1 ve 5.2 ile verilmiş olsun (Ogata, 1997),

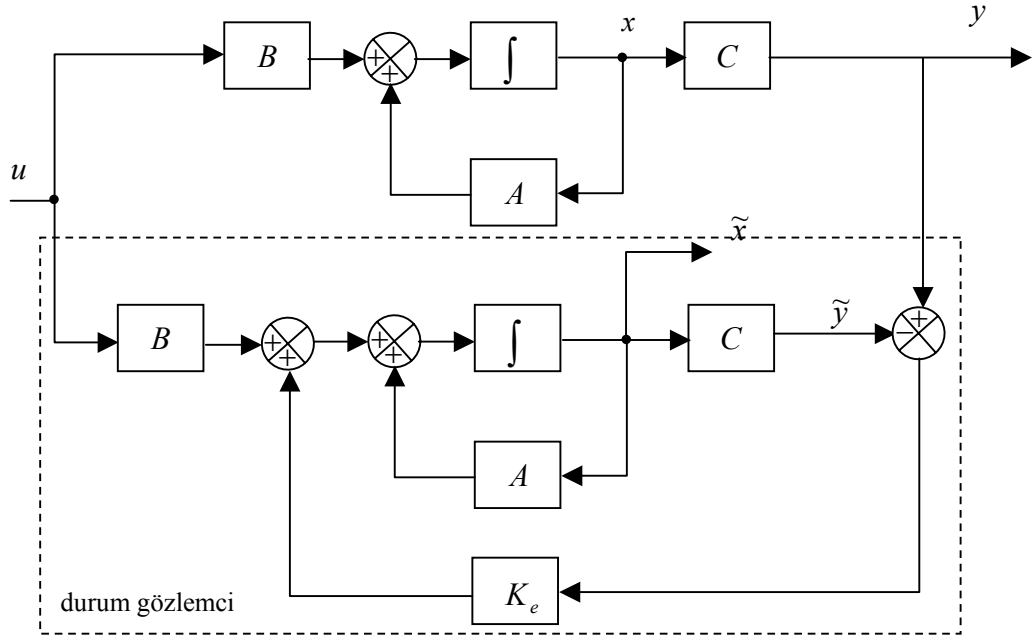
$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (5.1)$$

$$y = Cx \quad (5.2)$$

x durumu, \tilde{x} ile yaklaşık olarak gösteriliyor kabul edilirse, dinamik model

$$\dot{\tilde{x}} = A\tilde{x} + Bu + K_e (y - C\tilde{x}) \quad (5.3)$$

şeklinde durum gözlemcisi olarak yazılabilir. Durum gözlemcisinde y, u giriş olarak ve \tilde{x} çıkış olarak alınmaktadır. Denklem 5.3 ile ifade edilen durum gözlemcisinde ölçülen durum y ile, hesaplanan $C\tilde{x}$ 'in, farkı bir düzeltme terimi olarak yer almaktadır. Ele alınan sistemin ve durum gözlemcisinin blok yapısı Şekil 5.1'de verilmiştir.



Şekil 5.1. Doğrusal bir sistem ve durum gözlemcisine ait blok yapı (Ogata, 1997).

Şekil 5.1'deki K_e 'ye ağırlık matrisi denmektedir ve gerçek sistemle, yukarıdaki modelde kullanılan A ve B matrisleri arasında fark var ise aradaki farkın yaratacağı hatayı azaltacak yönde etkide bulunur.

Gözlemci hata denklemini elde etmek için denklem 5.1'den 5.3 çıkarılırsa

$$e = x - \tilde{x} = Ax - A\tilde{x} - K_e(Cx - C\tilde{x}) = (A - K_e C)(x - \tilde{x}) \quad (5.4)$$

$$\dot{e} = (A - K_e C) e \quad (5.5)$$

denklem 5.4 elde edilir. Hata vektörünün dinamik davranışı, $(A - K_e C)$ matrisinin özdeğerleri ile belirlenir. Eğer bu matris kararlı ise hata vektörünün başlangıç değerlerine bağlı olmaksızın hata vektörü sıfırlanır ve gözlemci çıkışı \tilde{x} , gerçek x değerine yakınsar.

5.1. Biyoproseslerde Durum Gözlemeleme

Biyoproseslerde ölçülemeyen substrat ve ürün derişimlerinin durum gözlemleyicileri (state observer) ile belirlenmesi son 20 yıldır yapılan çalışmalarda önemli ölçüde yer edinmiştir. Pratikte pekçok uygulamada prosese ait çok az derişim ölçülebilmektedir. Genellikle proseslerin sıcaklık, pH, gaz fazında O₂ ve CO₂ ölçümleri yapılabilmekte, fakat reaksiyona katılan ve/veya üretilen bileşenlere ait derişimlerin güvenilir ve ekonomik olarak ölçülememektedir. Tanım olarak biyoproseslerde durum gözlemleyicisi, ölçülebilen durumlardan ölçülemeyen durum değişkenlerinin hesaplanması olarak verilebilir. Durum gözlemleyicilerini biyoproseslere uygulamada karşılaşılan zorluk, prosesin dinamik davranışını tanımlayan bazı model bileşenlerinin belirsizlik içermesidir. Biyoproseslerde başlıca durum değişkenleri (biyokütle, substrat derişimi gibi) laboratuvarlarda yapılan analizlerle belirlenmektedir. Bu analizlerin maliyeti ve süresi bu işlemlerin sıklıkla yapılmasına imkan vermemektedir. Üstelik çevrimiçi biyokütle sensörlerinin endüstriyel uygulamalarda güvenle kullanılabilir durumda olmamaları da başka bir sıkıntı kaynağıdır.

Durum gözlemleyicileri uygulamada iki ana grupta incelenmektedir. Birinci grupta klasik durum gözlemleyicileri (Luenberger, Kalman filtresi, EKF) yer almaktadır. Bu guruba üssel durum gözlemcileri de (exponential state observer) denmektedir. Literatürde bu grup gözlemleyicilerin pekçok biyokimyasal/biyoteknolojik proseste kullanımına ait örnekler yer almaktadır. Bu grup gözlemleyicilerin bir kısıtlaması ise ele alınan prosese ait sistem parametrelerinin ve kinetik parametrelerin yüksek doğrulukla bilinmesi zorunluluğudur. Bu da gerçekte pek mümkün olmamakta veya belirli bir hata ile mümkün olmaktadır.

İkinci grup durum gözlemleyiciler asimptotik durum gözlemcileri (asymptotik state observer) olarak adlandırılır. Bu gözlemleyicilerin tasarımı, proses kinetiklerine gereksinim duyulmadan enerji ve kütle korunumu yasaları esas alınarak gerçekleştirilir (Dochain, 2003).

5.1.1. Klasik (üssel) gözlemciler

Biyoteknolojik proseslerin kontrol ve izlenmesinde model tabanlı durum gözlemeleme (state observation) ve parametre belirlenmesi (parameter estimation) temel oluşturur. Biyoreaktörlerin durum uzayı dinamik modeli denklem 5.6 ile ifade edilmektedir (Bastin ve Dochain, 1990).

$$\frac{d\xi}{dt} = K \varphi(\xi) - D\xi + F - Q \quad (5.6)$$

Burada ξ durum vektörünü (n adet bileşen konsantrasyonu), K (n×n) boyutlu verim katsayı matrisini, D seyrelme hızını, F n-boyutlu besleme hız vektörünü ve Q ise n-boyutlu gaz çıkış hız vektörünü temsil eder. Burada ölçülebilen değişkenler F besleme hızı, D seyrelme hızı, Q gaz çıkış debileridir ve ölçülebilen durum değişkenlerini oluştururlar. Ölçülebilen durum değişkenlerini

$$\xi_1 = L \xi \quad (5.7)$$

ile gösterebilir. Burada L matrisi (q×n) boyutlu birim matristir ve ölçülebilen durum değişkenlerinin genel durum matrisinden ayrıştırılmasını sağlar. Bu tanımlamadan sonra ölçülemeyen durum değişkenlerini ξ_2 ile gösterebilir $\xi [\xi_1 \xi_2]$.

Bir durum gözlemleyicisi ölçülebilen durum değişkenlerinden ölçülemeyen durum değişkenlerini hesaplayan algoritma olarak tanımlanır. Doğrusal olmayan sistemler için durum izleyicisi genel olarak denklem 5.8 ile gösterilir.

$$\frac{d\hat{\xi}}{dt} = K \varphi(\hat{\xi}) - D\hat{\xi} + F - Q + \theta(\hat{\xi})[\xi_1 - \hat{\xi}_1] \quad (5.8)$$

Burada $\theta(\hat{\xi})$ (n×q) boyutlu kazanç matrisidir. Durum izleyicisi denkleminin genel dinamik model denkleminde farkı $\theta(\hat{\xi})(\xi_1 - \hat{\xi}_1)$ terimidir. Ölçülen durum ile gözlemeleme sonucu oluşan fark sifira indiğinde bu terimin etkisi ortadan kalkar.

Pratikte ölçülemeyen durumların gözlemlenmesi (belirlenmesi, hesaplanması) yukarıda izleyici denkleminin integrasyonu ile gerçekleştirilir. Burada hesaplanan durum vektörü tüm durumları kapsamaktadır.

Durum izleyicisi tasarım problemi $\theta(\xi)$ kazanç matrisinin uygun bir şekilde belirlenmesi problemidir. Bu problemi çözmek için izleme hatası tanımını yapılırsa:

$$e = \xi - \hat{\xi} \quad (5.9)$$

$$\frac{de}{dt} = K \left[\varphi(\hat{\xi} + e) - \varphi(\hat{\xi}) \right] - D e - \theta(\hat{\xi}) L e \quad (5.10)$$

$$\frac{de}{dt} = \left[A(\hat{\xi}) - \theta(\hat{\xi}) L \right] e \quad (5.11)$$

$$A(\hat{\xi}) = K \left[d\varphi(\xi) / d\xi \right]_{\xi=\hat{\xi}} - D I_N \quad (5.12)$$

$\theta(\xi)$ matrisinin uygun bir şekilde seçilmesi ile $\left[A(\hat{\xi}) - \theta(\hat{\xi}) L \right]$ matrisinin özdeğerleri serbestçe belirlenebiliyorsa gözlemleyici olması gereken gerçek değerini keyfi bir hızla takip edebilir. Böyle bir durumda sistem üssel gözlemlenebilir (exponential observable) sistem olarak tanımlanabilir. Gözlemlenebilirlik matrisini ve koşulunu şu şekilde yazabilir.

$$\text{rank}(O) = \text{rank} [L$$

$$L A(\xi)$$

$$L A(\xi)^2$$

$$L A(\xi)^3$$

$$(5.13)$$

$$L A(\xi)^{N-1}] = n.$$

Genel durum uzayı denklemi ile tanımlanan bir proses üssel gözlemlenebilir değil (non exponential observable) ise fakat ($e = 0$)' da asimptotik olarak kararlı ise proses gözlemlenebilir bir yapıdadır. Temel mikrobiyal üreme prosesleri için gözlemlenebilirliğin incelendiği örnekler Ek A.1 ve Ek A.2'de verilmiştir.

Gözlemleyici tasarımında amaç kazanç matrisinin uygun seçilmesidir. Üssel gözlemcilere örnek olarak genişletilmiş Luenberger gözlemleyici (extended Luenberger observer) ve genişletilmiş Kalman gözlemleyici (extended Kalman observer) verilebilir.

5.1.1.1 Genişletilmiş luenberger gözlemleyicisi (extended luenberger observer)

Bu gözlemleyici için tasarım kuralı aşağıdaki gibi özetlenebilir (Bastin ve Dochain, 1990);

- $[A(\xi) - \theta(\xi)L]$ matrisi ve onun türevi sınırlı (bounded) olmalıdır

$$\| A(\xi) - \theta(\xi)L \| \leq C_1 \quad (5.14)$$

$$\left\| \frac{d}{dt} A(\xi) - \theta(\xi)L \right\| \leq C_2 \quad (5.15)$$

- $[A(\xi) - \theta(\xi)L]$ matrisinin özdeğerleri negatif olmalıdır.

$$\text{Re}\{ \lambda_i [A(\xi) - \theta(\xi)L] \} \leq C_3 \leq 0 \quad (5.16)$$

5.1.1.2. Genişletilmiş kalman gözlemleyicisi (extended kalman observer)

Bu gözletleyici tasarımında quadratik optimizasyon yaklaşımı esas alınır. Gözlemeleme hatasının karesel ortalamasını minimize eden kazanç matrisi elde edilmeye çalışılır (Bastin ve Dochain, 1990).

$$E = \int_0^t \|\xi - \hat{\xi}\|^2 d\tau = \int_0^t \|e(\tau)\|^2 d\tau \quad (5.17)$$

$$\theta(\hat{\xi}) = R(\hat{\xi})L^T \quad (5.18)$$

$N \times N$ boyutlu simetrik kare $R(\hat{\xi})$ matrisi Riccati denklemini çözülmesi ile elde edilir.

$$\frac{dR}{dt} = -RL^T LR + R A(\hat{\xi}) + A(\hat{\xi}) R \quad (5.19)$$

Ek A.3'te verilmiş bulunan sistem için genişletilmiş Luenberger ve Kalman gözlemleyici çözümleri incelenmiştir.

5.1.2. Asimtotik gözlemciler

Tekrar genel dinamik model ele alarak başlanılsın,

$$\frac{d\xi}{dt} = K \varphi(\xi) - D \xi + F - Q \quad (5.20)$$

burada ξ , Q , F matrisleri n , φ matrisi m ve K kazanç matrisi ise $n \times m$ boyutundadır. Aşağıdaki tanımlamalar yapılarak,

$p = \text{rank}(K)$;

K_a ; $(p \times m)$ boyutlu ve rankı boyutuna eşit, K matrisinin alt matrisi.

K_b ; K matrisinin diğer alt matrisi.

$(\xi_a, \xi_b), (Q_a, Q_b), (F_a, F_b)$ matrisleri K matrisinin bölünmesiyle oluşmuş alt matrisler olsun. Bu durumda genel dinamik modeli 5.21 ve 5.22 eşitlikleriyle verilebilir.

$$\frac{d\xi_a}{dt} = K_a \varphi(\xi_a, \xi_b) - D \xi_a + F_a - Q_a \quad (5.21)$$

$$\frac{d\xi_b}{dt} = K_b \varphi(\xi_a, \xi_b) - D \xi_b + F_b - Q_b \quad (5.22)$$

$Z = A_o \xi_a + \xi_b$ durum dönüşümü olarak tanımlanırsa, A_o boyutu $\{(n-p) \times p\}$ olmak üzere, matrisin tek çözümü $A_o K_a + K_b = 0$ 'dır. Durum uzay gösterimi ise 5.23 ve 5.24 eşitlikleri ile yeniden yazılabilir.

$$\frac{d\xi_a}{dt} = K_a \varphi(\xi_a, \xi_b) - D \xi_a + F_a - Q_a \quad (5.23)$$

$$\frac{dZ}{dt} = -DZ + A_o (F_a - Q_a) + (F_b - Q_b) \quad (5.24)$$

Bu son ifade φ reaksiyon hızlarından bağımsızdır. Z vektörünü ölçülen (ξ_1) ve ölçülemeyen (ξ_2) durumların doğrusal kombinasyonu olarak yazılırsa,

$$Z = A_o \xi_a + \xi_b = A_1 \xi_1 + A_2 \xi_2 \quad (5.25)$$

elde edilebilir. Burada A_1 matrisinin boyutu $\{(n-p) \times q\}$ ve A_2 matrisinin boyutu $\{(n-p) \times (n-q)\}$ 'dur ($q = \text{rank}(K)$ olmak üzere). Eğer $\{(n-p) \times (n-q)\}$ boyutlu A_2 matrisinin tersi alınabiliyorsa, asimtotik gözlemleyici ifadesi 5.26 ve 5.27'deki gibi yazılabilir.

$$\frac{d\hat{Z}}{dt} = -D\hat{Z} + A_o (F_a - Q_a) + (F_b - Q_b) \quad (5.26)$$

$$\hat{\xi}_2 = A_2^{-1} (\hat{Z} - A_1 \xi_1) \quad (5.27)$$

Denklem 5.26 ve 5.27 ile verilen asimtotik gözlemleyicinin gerçekleştirilmesi Luenberger ve Kalman gözlemleyicilerine göre çok daha kolay bir yöntemdir. Basitliği yanında prosese ait reaksiyon hızlarına gereksinim duymamaktadır. Bu tip gözlemleyicinin bir dezavantajı ise yakınsama süresinin diğer gözlemcilere göre daha geç olmasıdır (Bastin ve Dochain, 1990).

5.1.2.1. Luenberger tip asimtotik gözlemci

Genel dinamik model denklemini ölçülen ve ölçülemeyen durumlara göre tekrar yazılsın;

$$\frac{d\xi_1}{dt} = K_1 \varphi(\xi) - D \xi_1 + F_1 - Q_1 \quad (5.28)$$

$$\frac{d\xi_2}{dt} = K_2 \varphi(\xi) - D \xi_2 + F_2 - Q_2 \quad (5.29)$$

Burada K_1 tam ranka sahip ölçülen durumlara ait kazanç matrisidir.

$$Z = \xi_2 - K_2 K_1^{-1} \xi_1 \quad (5.30)$$

5.30 eşitliği ile Luenberger tipi asimptotik gözlemci ifadeleri elde edilir (Oliveira, 1998). Asimptotik gözlemlenebilirliğin incelendiği örnekler Ek A.4.'te verilmiştir

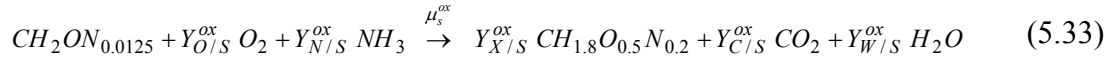
$$\frac{d\hat{Z}}{dt} = -D\hat{Z} + K_2 K_1^{-1} (F_1 - Q_1) + (F_2 - Q_2) \quad (5.31)$$

$$\hat{\xi}_2 = \hat{Z} + K_2 K_1^{-1} \xi_1 \quad (5.32)$$

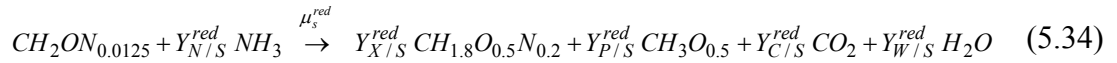
5.2. Yarıkesikli Ekmek Mayası Fermentasyonu Prosesinde Durum Gözleme

Bir önceki bölümde basit mikrobiyal üreme prosesi için geliştirilen asimptotik gözlemci algoritmaları, burada yarı kesikli ekmek mayası fermentasyonuna uygulanacaktır. Ekmek mayası üremesi denklem 5.33, 5.34, 5.35 ile karakterize edilmektedir (Türker, 2003).

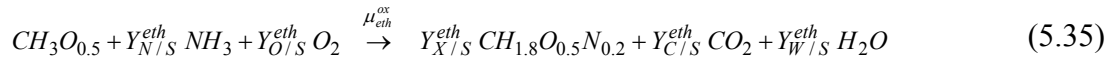
(glüköz üzerinde oksijen ile üreme, solunum)



(glüköz üzerinde oksijensiz üreme, fermentasyon)



(etanol üzerinde solunum ile üreme)



Yukarıda verilen üreme denklemlerinde de görüldüğü gibi ekmek maya hücresi *Saccharomyces cerevisiae* üç farklı metabolik yol izleyerek üreyebilmektedir. Yarı kesikli fermentasyon için dinamik model denklemleri, fermentasyon işlemine katılan tüm bileşenleri için kütle korunumundan elde edilmektedir. Bu yaklaşımda reaktörün iyi karıştığı, verim katsayılarının bilindiği ve zamanla değişmediği kabul edilmiş ve

gaz fazındaki dinamikler ihmal edilmiştir. Bileşenlere ait derişimler cinsinden kütle balanslarını yazarsak;

$$\frac{dX}{dt} = (\mu_s^{ox} + \mu_s^{red} + \mu_e^{ox} - D) X \quad (5.36)$$

$$\frac{dS}{dt} = D(S_{in} - S) + (-Y_{X/S}^{ox} \mu_s^{ox} - Y_{X/S}^{red} \mu_s^{red}) X \quad (5.37)$$

$$\frac{dE}{dt} = -D E + (Y_{X/E}^{red} \mu_s^{red} - Y_{X/E}^{eth} \mu_e^{ox}) X \quad (5.38)$$

$$\frac{dO}{dt} = -D O + r_o + (-Y_{X/O}^{ox} \mu_s^{ox} - Y_{X/O}^{eth} \mu_e^{ox}) X \quad (5.39)$$

$$\frac{dC}{dt} = -D C - r_c + (Y_{X/C}^{ox} \mu_s^{ox} + Y_{X/C}^{red} \mu_s^{red} + Y_{X/C}^{eth} \mu_e^{ox}) X \quad (5.40)$$

$$D = \frac{F}{V} \quad (5.41)$$

Burada, r_o oksijen transfer hızı, r_c karbondioksit üretim hızıdır.

$$r_o = \frac{F_n}{V} \left[\frac{P_{O_2}^{in}}{1 - P_{O_2}^{in} - P_{CO_2}^{in} - P_W^{in}} - \frac{P_{O_2}^{out}}{1 - P_{O_2}^{out} - P_{CO_2}^{out} - P_W^{out}} \right] \quad (5.42)$$

$$r_c = \frac{F_n}{V} \left[\frac{P_{CO_2}^{in}}{1 - P_{O_2}^{in} - P_{CO_2}^{in} - P_W^{in}} - \frac{P_{CO_2}^{out}}{1 - P_{O_2}^{out} - P_{CO_2}^{out} - P_W^{out}} \right] \quad (5.43)$$

Yukarıda denklem 5.36 ... 5.41 ile verilen denklemler matris formunda yazılırsa

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} X \\ S \\ E \\ O \\ C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ -Y_{X/S}^{ox} & -Y_{X/S}^{red} & 0 \\ 0 & Y_{X/E}^{red} & -Y_{X/E}^{eth} \\ -Y_{X/O}^{ox} & 0 & -Y_{X/O}^{eth} \\ Y_{X/C}^{ox} & Y_{X/C}^{red} & Y_{X/C}^{eth} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mu_s^{ox} \\ \mu_s^{red} \\ \mu_e^{ox} \end{bmatrix} X - D \begin{bmatrix} X \\ S \\ E \\ O \\ C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ DS_{in} \\ 0 \\ r_o \\ -r_c \end{bmatrix} \quad (5.44)$$

elde edilir.

$$F^T = [0, DS_{in}, 0, r_o, 0] \quad , \quad Q^T = [0, 0, 0, 0, r_c]$$

$$K = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ -Y_{X/S}^{ox} & -Y_{X/S}^{red} & 0 \\ 0 & Y_{X/E}^{red} & -Y_{X/E}^{eth} \\ -Y_{X/O}^{ox} & 0 & -Y_{X/O}^{eth} \\ Y_{X/C}^{ox} & Y_{X/C}^{red} & Y_{X/C}^{eth} \end{bmatrix} \quad \xi^T = [X, S, E, O, C]$$

Genel dinamik yapıda 5 durum değişkeni, 3 reaksiyon hızı mevcuttur. Pratikte kolaylıkla ölçülebilen durum değişkenleri O₂, CO₂ ve etanoldür. Verim katsayı matrisinde (K), O₂ (O), CO₂ (C) ve etanol (E) katsayıları birbirinden bağımsız değildir. Önceki bölümlerde anlatılan gözlemci algoritmalarında bu matrisin tersi kullanıldığından dolayı, nümerik hatalara karşı algoritmalar çok hassas duruma gelmektedir ve gözlemci performansı düşmektedir (Pomerleau ve Perrier, 1991).

Bu olumsuzluğu önlemek için Pomerleau ve Perrier, denklem 5.44 ile verilen modeli esas alan ve 2 alt kısımdan oluşan yeni bir yaklaşım önermektedir. Bu yeni yaklaşımda model, solunum (respirative) ve fermentasyon (respiro-fermentative) olarak ikiye bölünmektedir. Yeni durumda her iki üreme modeli durum denklemleri yazılırsa,

- fermentasyonla üreme modeli için

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} X \\ S \\ E \\ O \\ C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ -Y_{X/S}^{ox} & -Y_{X/S}^{red} \\ 0 & Y_{X/E}^{red} \\ -Y_{X/O}^{ox} & 0 \\ Y_{X/C}^{ox} & Y_{X/C}^{red} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mu_s^{ox} \\ \mu_s^{red} \end{bmatrix} X - D \begin{bmatrix} X \\ S \\ E \\ O \\ C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ DS_{in} \\ 0 \\ r_o \\ -r_c \end{bmatrix} \quad (5.45)$$

- solunumla üreme modeli için

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} X \\ S \\ E \\ O \\ C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ -Y_{X/S}^{red} & 0 \\ Y_{X/E}^{red} & -Y_{X/E}^{eth} \\ 0 & -Y_{X/O}^{eth} \\ Y_{X/C}^{red} & Y_{X/C}^{eth} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mu_s^{ox} \\ \mu_e^{ox} \end{bmatrix} X - D \begin{bmatrix} X \\ S \\ E \\ O \\ C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ DS_{in} \\ 0 \\ r_o \\ -r_c \end{bmatrix} \quad (5.46)$$

türetilir. Burada verilen iki alt model (prosesten ölçülen etanol üretim/tüketim hızına göre) sırasıyla kullanılarak biyokütle, substrat ve etanol derişimleri gözlemlenmeye çalışılmaktadır. Prosesten ölçülen etanol derişimi, artan yönde ise fermentasyon, azalan yönde ise solunum modeli işlemektedir. Bu yeni modelde 2 reaksiyon hızı vardır ve gözlemleyici için 2 durum değişkeni ölçülmesi yeterlidir. Uygulamada baca gazı O₂, CO₂ derişim ölçümlerinden yola çıkılarak proses için durum değişkenleri hesaplanmış ve denklem 5.31 ve denklem 5.32'ye uygulanarak denklem 5.47 ve 5.48 ile ölçülemeyen diğer durumlar belirlenmiştir (Oliveira, 1998).

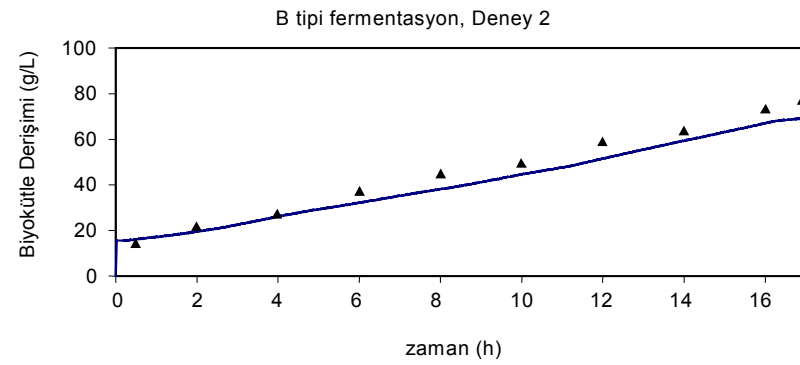
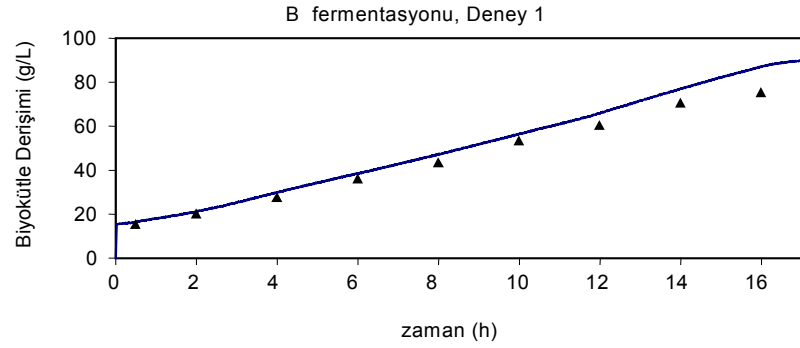
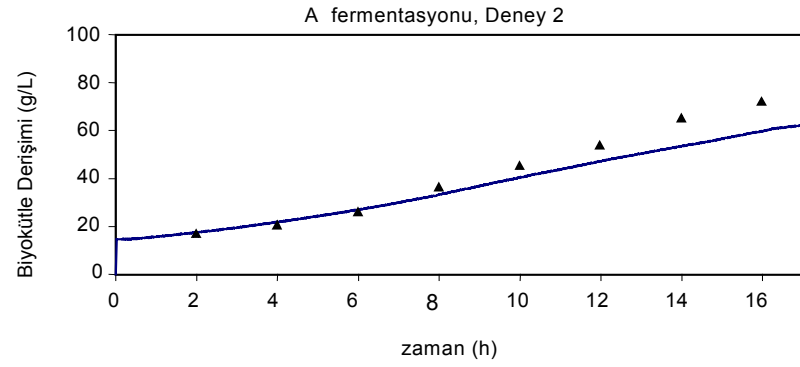
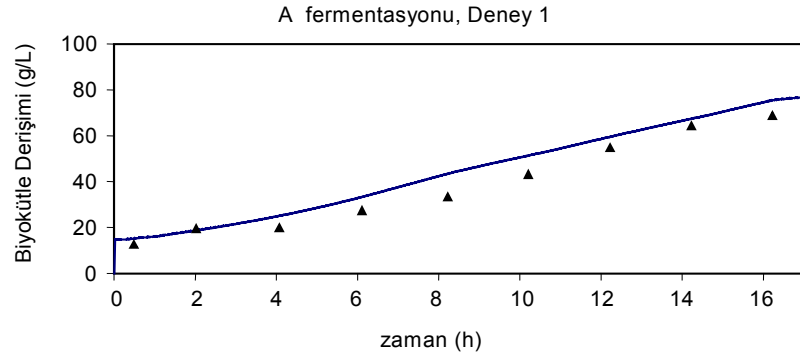
$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} Z_1 \\ Z_2 \\ Z_3 \end{bmatrix} = -D \begin{bmatrix} Z_1 \\ Z_2 \\ Z_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ DS_{in} \\ 0 \end{bmatrix} - K_2 K_1^{-1} \begin{bmatrix} r_o \\ r_c \end{bmatrix} \quad (5.47)$$

$$\begin{bmatrix} \hat{X} \\ \hat{S} \\ \hat{E} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_1 \\ Z_2 \\ Z_3 \end{bmatrix} + K_2 K_1^{-1} \begin{bmatrix} O \\ C \end{bmatrix} \quad (5.48)$$

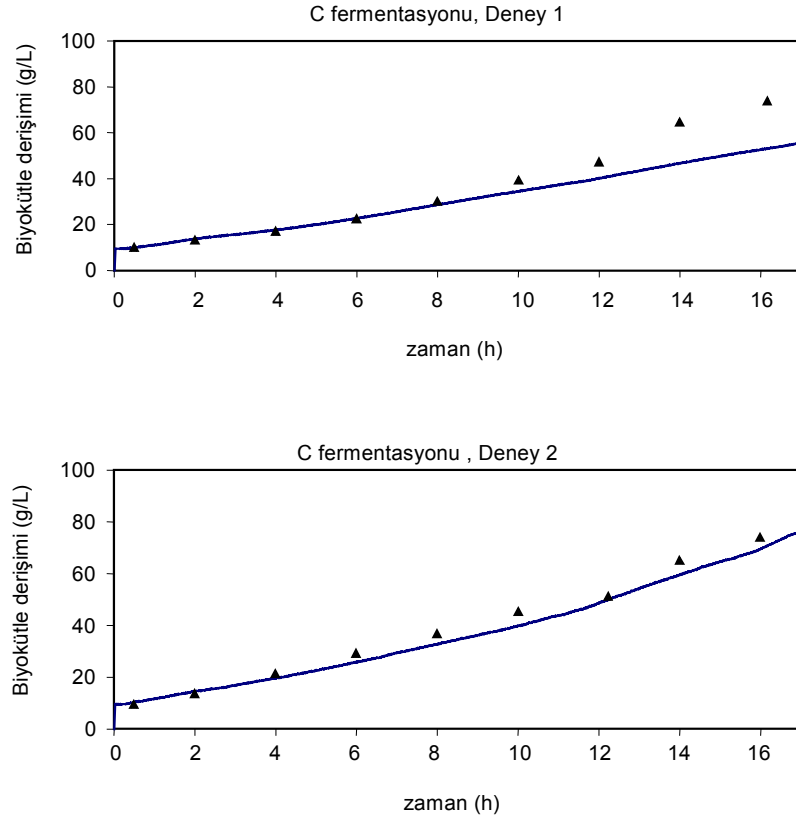
Deneysel çalışmalarda endüstriyel boyutlarda ticari maya fermentasyonları ele alınmıştır. Bu çalışmalarda üç farklı maya fermentasyonu için (A, B, C) ikişer takım ölçümler yapılmış, çevrimiçi ölçümler kullanılarak asimtotik durum gözlemcisinin ürettiği biyokütle derişimi ile çevrimdışı biyokütle derişimleri karşılaştırılmıştır.

5.2.1. Deneysel çalışmalarda

Deney fermentasyonları 100 m³'lük reaktörlerde, daha önceden öngörülen dozajlar yapılarak gerçekleştirilmiştir. Fermentasyon boyunca melas besleme, amonyak besleme ve hava debisi besleme kontrolleri ile sıcaklık ve pH kontrolleri için öngörülen ayar değerleri PLC kontrollü olarak yapılmıştır. Ölçülen durum değişkenleri ise gaz fazında O₂ ve CO₂ 'dir. Ele alınan fermentasyon türleri, hedeflenen ticari maya türüne göre farklı başlangıç değerleri ve aş tiplerine göre tasnif edilmiştir. Fermentasyon türleri bölüm 4.5'te açıklanmıştır.



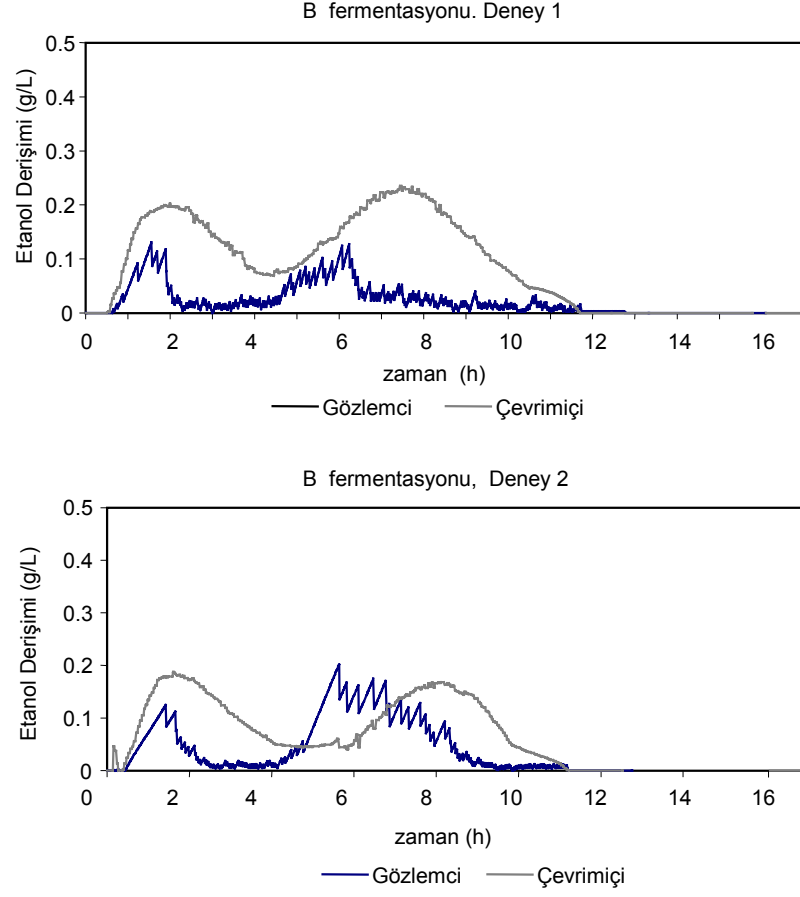
Şekil 5.2. Deney fermentasyonlardan elde edilen biyokütle eğrileri ve laboratuvar ölçümleri.



Şekil 5.2. (devamı) Deneş fermentasyonlardan elde edilen biyokütle eğrileri ve laboratuvar ölçümleri.

Şekil 5.2 ile verilen deneş sonuçları incelendiğinde, farklı tipteki fermentasyonlardan elde edilen biyokütle gözlem değerlerinin çevrimdışı biyokütle ölçümlerine yakın olduğu görülmektedir. Model esas olarak gaz fazında yapılan iki ölçümü kullanmakta ve asimtotik gözlemci algoritmasıyla da ölçülemeyen değişkenlerin (biyokütle, substrat, etanol) değerlerini öngörmektedir. Model çıktısı ile çevrimdışı biyokütle ölçümleri arasında var olan farklılığın modelde kullanılan hava debisi, O_2 ve CO_2 derişim ölçümlerinin içerdiği hatalardan ve verim katsayılarının sabit kabul edilmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Ölçülemeyen diğer durumlar olan substrat ve etanol derişimleri de model tarafından öngörülmektedir. B tipi fermentasyonlar için elde edilen etanol derişimleri ile ölçülen etanol derişimlerinin birlikte gösterildiği eğriler Şekil 5.3'te verilmiştir. Burada da gözlemci ile ölçümler arasındaki tutarlılık görülmektedir. Asimtotik gözlemci algoritması kullanılarak ve iki durum değişkeninin (O_2 , CO_2) ölçümü ile biyokütle derişiminin ölçümü herhangi bir kinetik modele gereksinim duyulmadan belirlenmesi basitlik ve ölçüm sayısının

az olması yönüyle bir avantaj olmasına rağmen proses verim katsayılarının bilindiği ve zamanla değişmediği kabulü bir dezavantajdır.



Şekil 5.3. B tipi fermentasyonlar için ölçülen ve gözlenen etanol derişimi eğrileri

6. GERİBESLEMELİ KONTROL

Uygulamada geribeslemenin kullanıldığı pekçok durum sözkonusudur. Kontrol problemleri, amaçlanan tasarım hedeflerine göre farklı şekillerde tasarlanmaktadır. Kararlılık, takip ve gürültü bastırma gibi farklı amaçlar için pekçok farklı kontrol problemi oluşturulabilmektedir. Herbir durumda sistem durumlarının veya çıkışının geribeslenmesi zorunlu olmaktadır. Geribeslemeli kontrol, sistem değişkenlerinden elde edilen çıktı ile hedeflenen değişken değerinin farkının, hata sinyali olarak kontrol amaçlı kullanılması esasına dayanmaktadır. Kontrol sistemlerinin sınıflandırılması, amaca göre farklı şekilde yapılmaktadır (Khalil, 2002).

- analiz ve tasarım açısından ;
 - doğrusal ve doğrusal olmayan
 - zamanla değişen, zamanla değişmeyen
- işaret türleri yönünden;
 - sürekli verili
 - ayrık verili
 - modüle edilmiş
 - modüle edilmemiş
- modelleme açısından;
 - dağınık parametrelili (distributed)
 - tekil parametrelili (lumped)
- ana amaç olarak ;
 - konum kontrol
 - hız kontrol sistemi şeklinde sınıflandırılabilir.

Klasik kontrol teorisinde sadece sistem giriş, çıkış ve hata sinyalleri dikkate alınmakta ve kontrol sistem tasarımında transfer fonksiyonu, kök yer eğrilei veya frekans cevabı analizleri kullanılmaktadır. Klasik kontrol sistemlerinin en önemli dezavantajı doğrusal, tek giriş-çıkışlı ve zamanla değişmeyen sistemlere

uygulanmasıdır. Zamanla değişen, doğrusal olmayan ve çok giriş-çıkışlı sistemlerin kontrolünde yetersiz kalmaktadır. Klasik kontrol teorisinde, kontrolcü tasarımı frekans domeninde Nyquist, Bode diyagramları ile yapılmakta, transfer fonksiyonu elde edilmektedir. Kontrolcü tasarımı da grafik metodlarıyla elle yapılmaktadır (Ogata, 2002). Kontrolcü olarak PID veya faz ilerlemeli/gerilemeli (lead-lag) kontrolcüler kullanılmaktadır.

Modern kontrol teorisinde durum uzayı (state-space) yaklaşımı kullanılmaktadır ve bu metodla tasarımcı kapalı döngü sistem kutuplarını istenilen yerde olacak şekilde tasarım yapabilmekte veya optimal kontrol problemini istenilen performans kriterlerini sağlayacak şekilde tasarlayabilmektedir. Bu da sistem dinamiklerinin matematiksel ifadelerinin daha doğru olmasını ve daha fazla matematiksel işlemi gerektirmektedir. Durum uzayı yaklaşımı ile kontrol problemlerinin çözümü bilgisayar ortamında çok daha kolay ve hızlı olmaktadır. Bu yaklaşımın en önemli özelliği durum değişkenlerinin mutlaka fiziksel veya ölçülebilir/gözlemlenebilir değişken olma zorunluluğunun olmamasıdır. Bu da durum değişkeni seçiminde tasarımcıya kolaylık sağlamaktadır. Modern kontrol teorisinin asıl gücü, çok giriş çıkışlı sistemleri tek giriş-çıkışlı sistem yapısına indirgemesinde yatmaktadır.

Kontrol sistemlerindeki incelemeler geniş anlamda uygulamalı matematiğin kullanım alanına girer. Klasik kontrol teorisindeki analizlerde ; diferansiyel ve fark denklemleri, Laplace dönüşümleri, z- dönüşümleri, giriş-çıkış bağıntıları, transfer fonksiyonları kullanılmaktadır. Modern kontrol kuramında ise bunlara ek olarak; matris kuramı, doğrusal dönüşümler, varyasyon hesabı, olasılık, programlama kullanılmaktadır.

6.1. Durum Değişkenleri Analizi

Modern kontrol teorisi temel olarak zaman düzleminde bir yaklaşımdır. Kontrol edilecek olan sistemin durum-uzayı gösteriminin tam olmasını gerekli kılar. Bir sisteme ait dinamik denklemler, sisteme ait giriş, çıkış ve bozucu girişlerle gösterilir. Mertebesi n olan bir sistem, n adet durum denklemiyle gösterilir;

$$\frac{dx_i(t)}{dt} = f_i[x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t), u_1(t), u_2(t), \dots, u_n(t), w_1(t), w_2(t), \dots, w_n(t)]$$

$$y_i(t) = g_i[x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t), u_1(t), u_2(t), \dots, u_n(t), w_1(t), w_2(t), \dots, w_n(t)]$$

Burada $x_i(t)$ durum değişkenini, $u_i(t)$ girişi ve $w_i(t)$ ise bozucu girişi göstermektedir. Bir sistemde n mertebe ve m boyut olması durumunda m adet durum denklemini olacaktır. Bu durumda gösterim aşağıdaki gibi olacaktır.

$$\frac{dx(t)}{dt} = Ax(t) + Bu(t) + Ew(t) \quad (6.1)$$

$$y(t) = Cx(t) + Du(t) + Hw(t) \quad (6.2)$$

Denklem 6.1 ile verilen ifade durum geçiş denklemini olarak adlandırılır. Sağ tarafta yeralan ilk terim homojen, diğer iki terim ise zorlayıcı terim olarak tanımlanır. Doğrusal homojen durum denklemini sağlayan $\phi(t)$ matrisine durum geçiş matrisi denir.

$$\frac{d\phi(t)}{dt} = A\phi(t) \quad (6.3)$$

$t=0$ anındaki başlangıç durumu $x(0)$ ile ifade edilirse ; $\phi(t)$ homojen denkleminin çözümü, denklem 6.4'ü $t > 0$ için sağlar.

$$x(t) = \phi(t)x(0) \quad (6.4)$$

$\phi(t)$ durum geçiş matrisini hesaplamanın diğer bir yolu denklem 6.1'in homojen kısmının Laplace dönüşümünü almaktır.

$$sX(s) - x(0) = AX(s) \quad (6.5)$$

$$x(t) = L^{-1}[(sI - A)^{-1}]x(0) \quad (6.6)$$

$$\phi(t) = L^{-1}[(sI - A)^{-1}] \quad (6.7)$$

Durum geçiş matrisi, homojen durum denklemini sağladığından sistemin serbest cevabını belirler. Diğer bir ifade ile sistemin ilk koşullar tarafından yönlendirilen cevabını belirler.

Durum geçiş denklemi, doğrusal, homojen olmayan durum denkleminin çözümü olarak tanımlanır. Denklem 6.1'in çözümü için denklemin her iki tarafının Laplace dönüşümü alınırsa;

$$sX(s) - X(0) = AX(s) + BU(s) + EW(s) \quad (6.8)$$

$$X(s) = (sI - A)^{-1}X(0) + (sI - A)^{-1}[BU(s) + EW(s)] \quad (6.9)$$

elde edilir. Durum geçiş denklemi, denklem 6.9'un ters Laplace dönüşümü alınarak elde edilir.

$$x(t) = \phi(t)x(0) + \int \phi(t - \tau)[Bu(\tau) + Ew(\tau)]d\tau \quad t \geq 0 \quad (6.10)$$

Durum geçiş matrisinden karakteristik denkleme geçiş ise; $|sI - A|$ ifadesi ile bulunur. Karakteristik denklemin kökleri genellikle A durum geçiş matrisinin özdeğerleri olarak adlandırılır. λ_i 'ler A matrisinin özdeğerleri olmak üzere;

$$(\lambda_i I - A)p_i = 0 \quad (6.11)$$

matris denklemini sağlayan her bir sıfır olmayan p_i vektörüne A'nın özdeğerleriyle ilişkili özvektörü denir. n. dereceden bir sistem, diferansiyel denklem ile genel olarak aşağıdaki gibi gösterilebilir,

$$\frac{d^n y(t)}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} y(t)}{dt^{n-1}} + \dots + a_1 \frac{dy(t)}{dt} + a_0 + \dots + b_m \frac{d^m u(t)}{dt^m} + b_{m-1} \frac{d^{m-1} u(t)}{dt^{m-1}} + \dots + b_1 \frac{du(t)}{dt} + b_0 u(t) \quad .$$

$$s^k = \frac{d^k}{dt^k} \quad k = 1, 2, \dots, n \quad \text{olarak tanımlanırsa,}$$

$$(s^n + a_{n-1}s^{n-1} + \dots + a_1s + a_0)y(t) = (b_ms^m + b_{m-1}s^{m-1} + \dots + b_1s + b_0)u(t)$$

formu elde edilir. $(s^n + a_{n-1}s^{n-1} + \dots + a_1s + a_0)$ ifadesi sistemin karakteristik denkleminin karşılığı gelmektedir (Bir, 1999).

6.2. Kontrol Sistemlerinin Kontrol Edilebilirliği ve Gözlemlenebilirliği

Modern kontrol teorisinde kontrol edilebilirlik ve gözlemlenebilirlik kavramları ilk olarak Kalman (1960) tarafından öne sürülmüştür ve kontrol sistemlerinin durum uzayında çözümünde çok yaygın kullanılan bir yöntemdir. Klasik kontrol teorisinde tasarımcı istenen tasarım kriterleri için bir çözümün mevcudiyetini baştan bilmemesine rağmen, optimal kontrol kuramında verilen sistem parametreleri ve tasarım amaçları yönünde bir çözümün var olup olmadığını belirleyen kriterler mevcuttur (Bir, 1999).

Bir sistemin kontrol edilebilirliği, özdeğerlerinin kompleks düzlemde istenilen yere yerleştirilebilmesini açıklamaktadır. Burada durum geribeslemesi ile kutup yerleştirme tasarımı ortaya çıkmaktadır. Bir sistemde tüm durumlar, sınırlandırılmamış bir $u(t)$ kontrol değişkeni ile sonlu bir zamanda öngörülen hedeflere ulaştırılabiliyorsa sistem tam durum kontrol edilebilir bir sistem olarak adlandırılır. Pratikte bir sistemin tüm durumlarını kontrol etmek yerine sistem çıkışını kontrol etmek daha uygun olabilir.

Bir sistemin tam durum kontrol edilebilir olması için gerek ve yeter koşul aşağıda verilen kontrol edilebilirlik matrisinin rankının n 'e eşit olmasıdır.

$$S = [B \quad AB \quad A^2B \quad \dots \quad A^{n-1}B] \quad (6.12)$$

Çıkış kontrol edilebilirliği için ise ;

$$S = [CB \quad CAB \quad CA^2B \quad \dots \quad CA^{n-1}B \quad D] \quad (6.13)$$

matrisinin rank'ının m'e eşit olması gereklidir. m ise (m×n) boyutlu C matrisinden gelmektedir.

Tamamen gözlemlenebilir bir sistemde herbir durum değişkeni bazı çıkışlara etki etmelidir. Çıkış ölçümlerinden eğer bir durum gözlenemiyorsa sistem tam olarak gözlenemez bir sistemdir. Bir sistemin tam gözlenebilir olması için gerek ve yeter koşul denklem 6.14'te verilen gözlenebilirlik matrisinin rankının n'e eşit olmasıdır.

$$V = \begin{bmatrix} C \\ CA \\ CA^2 \\ \vdots \\ CA^{n-1} \end{bmatrix} \quad (6.14)$$

6.2.1. Durum uzayı denklemlerinin kanonik biçimde gösterimi

Kontrol sistemlerinin durum uzayı şeklinde gösteriminde farklı teknikler mevcuttur ve kanonik veya Jordan kanonik biçimde gösterim bu yöntemlerden bazılarıdır. Denklem 6.1 ve 6.2 ile tanımlanan bir sistem için A matrisine ait karakteristik denklem

$$|sI - A| = s^n + a_{n-1}s^{n-1} + \dots + a_1s + a_0 = 0$$

ile tanımlanırsa, kontrol edilebilir kanonik biçimde durum uzayında göstermek için

$$M = \begin{bmatrix} a_1 & a_2 & \dots & a_{n-1} & 1 \\ a_2 & a_3 & \dots & a_{n-1} & 0 \\ \vdots & \vdots & & & \\ a_{n-1} & 1 & \dots & 0 & 0 \\ 1 & 0 & \dots & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (6.15)$$

$$P = SM$$

olmak üzere A ve B matrisleri kontroledilebilir kanonik biçimde 5.16 denklemlerindeki gibi yazılabilir.

$$\bar{A} = P^{-1}AP = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \cdot & \cdot & \cdot & & \\ \cdot & \cdot & \cdot & & \\ -a_0 & -a_1 & -a_2 & \dots & -a_n \end{bmatrix}_{(n \times n)} \quad \bar{B} = P^{-1}B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \cdot \\ \cdot \\ 1 \end{bmatrix}_{(n \times 1)} \quad (6.16)$$

Gözlemlenebilir kanonik biçimde durum uzayında göstermek için, genel gözlemlenebilirlik matrisi ve M matrisi kullanılarak;

$$\begin{aligned} Q &= (MV)^{-1} \\ \bar{A} &= Q^{-1}AQ \\ \bar{B} &= Q^{-1}B \\ \bar{C} &= CQ \end{aligned} \quad (6.17)$$

gözlemlenebilir kanonik biçimde durum uzayı gösterimleri elde edilir (Bir, 1999).

6.3. Durum Uzayı Yöntemleriyle Kontrol Sistemlerinin Tasarımı

Klasik kontrol teorisinin tek giriş çıkışlı ve zamanla değişmeyen doğrusal sistemlere uygulanabilir olması en büyük dezavantajıdır. Klasik teoride giriş çıkış ve hata işaretleri kullanılarak transfer fonksiyonu üzerinden frekans cevabı, kök yer eğrileri yöntemleri ile tasarım yapılmaya çalışılmaktadır.

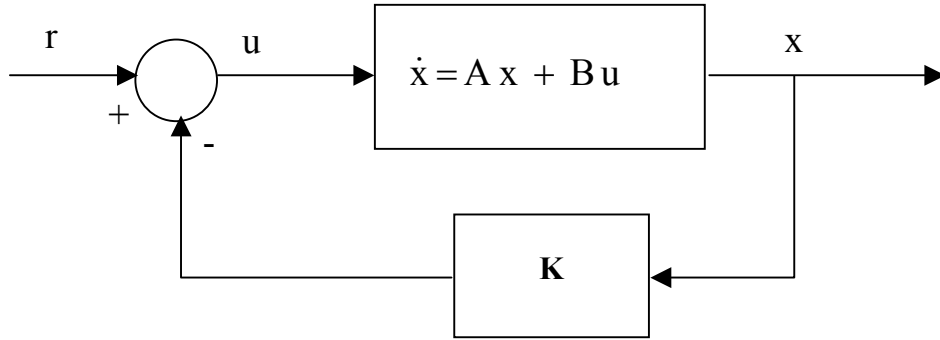
Diğer taraftan durum uzayı metodları kullanılarak sistem tasarımında, tasarımcı, sistemin kapalı döngü kutuplarını istenen yere koyabilmekte veya istenen performans indeksine uygun optimal kontrol tasarımını yapabilmektedir. Doğrusal olmayan, zamanla değişen ve çok giriş-çıkışlı sistemlerin kontrolü durum uzayı metodları ile gerçekleştirilmektedir.

Modern kontrol yaklaşımında klasik teoriye göre daha fazla matematik kullanımı sözkonusudur ve gerekli çözümlerin bilgisayar ortamında yapılabilir olması kolaylık sağlamaktadır. Ayrıca durum değişkeni olarak fiziksel olmayan değişkenlerin de kullanılabilir olması tasarımcıya kolaylık sağlamaktadır.

6.3.1. Durum geribeslemeli kutup yerleştirme yöntemi ve gözlemci tasarımı

Durum geribeslemesi ile sistem özdeğerlerinin kompleks düzlemde istenilen yere yerleştirilebilmesi, sistemin kontroledilebilirlik koşulu ile yakın ilişkilidir. Gözlemlenebilirlik koşulu ise durum değişkenlerinin ölçülebilen çıkış değişkenlerinden hesaplanabilmesi ile ilişkilidir.

Durum geribeslemeli kapalı çevrimli bir kontrolcü tasarımında, durum değişkenleri sabit katsayılı K matrisi üzerinden beslenerek elde edilir. Bu durumda durum geribeslemeli kapalı döngü sistemi Şekil 6.1'deki gibi gösterebilir.



Şekil 6.1. Durum geribeslemeli kapalı döngü kontrol sistemi (Bir, 1999).

Kapalı çevrim sistem dinamiğini denklemlerle ifade edersek,

$$\frac{dx(t)}{dt} = Ax(t) + Bu(t) \quad (6.18)$$

$$u(t) = -Kx(t) + r(t) \quad (6.19)$$

Denklem 6.19 denklem 6.18’de yerine konulursa,

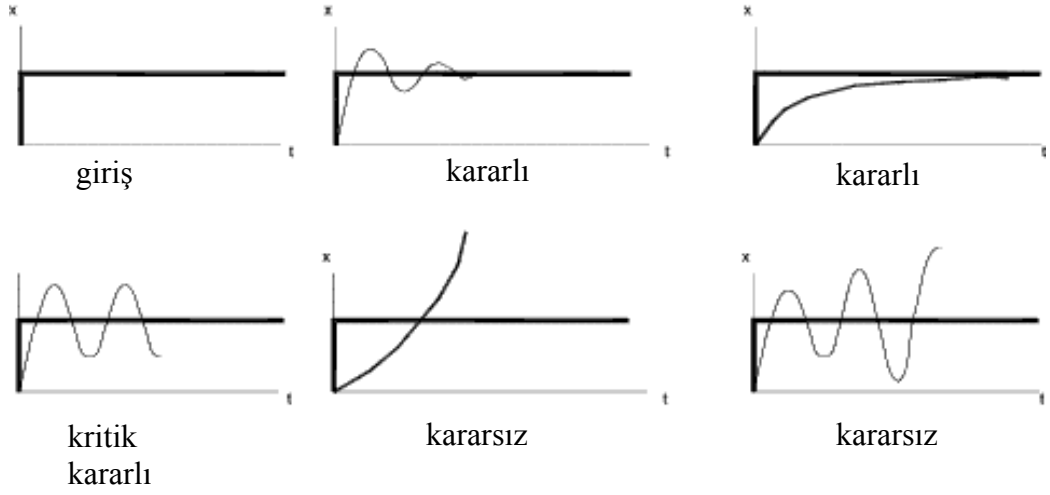
$$\frac{dx(t)}{dt} = (A - BK)x(t) + B r(t) \quad (6.20)$$

elde edilir ve denklem 6.20 durum geribesleme ile kutup yerleştirme tasarımı olarak adlandırılır. Burada K matrisi durum geribesleme kazanç matrisi olarak isimlendirilir. Sistemin kararlılığı ve geçici hal yanıtı (A - BK) matrisinin özdeğerleri ile belirlenir. K matrisinin değerleri (A - BK)’nın özdeğerlerini kompleks düzlemde negatif bölgede yapacak şekilde seçilirse, kararlı bir kapalı döngü sistem elde edilmiş olur. Bu yöntemde kontrolcü tasarlama için tüm durumların bilinmesi ve tam durum kontroledilebilir olması gereklidir. Kapalı döngü kutuplar bilindiğine göre direkt yerine koyma metodu veya Ackerman yöntemlerinden biriyle K matrisinin alması gereken değerler hesaplanmaktadır (Ogata, 2002). Durum geribeslemesi yapılarak kutup yerleştirme yöntemi ile çözülmüş bir örnek Ek. E’de verilmiştir.

6.4. Liapunov Kararlılık Analizi

Tüm kontrol sistemlerinin kararlı olması istenir. Bir sistemin kararlılığı, sistemin girişlerine uygulanan sinyal veya bozucu girişlere karşı üreteceği çıkışın göstergesidir. Herhangi bir giriş sinyali uygulanmadığı durumda sistem konumunu değiştirmiyorsa veya uygulanan giriş sinyaline cevabı belli bir süre sonra belirli bir çıkış üretecek şekilde ise sistem kararlıdır.

Doğrusal ve zamanla değişmeyen sistemlerde kararlılık analizinde Nyquist, Routh analizleri gibi testler mevcuttur. Doğrusal olmayan veya zamanla değişen sistemlerde kararlılık analizinde Liapunov metodu önemli bir analizdir. Ayrıca optimal kontrol problemlerinin çözümünde de önemli bir araçtır. Liapunov’un önerdiği metodta (liapunov’un ikinci metodu veya direkt metod), adi diferansiyel denklemlerle ifade edilen dinamik sistemlerin kararlılığının belirlenmesi işlemi, diferansiyel durum denklemleri çözülmmeden incelenmektedir.



Şekil 6.2. Girişe uygulanan basamak işaretine cevap olabilecek çıkışlar ve kararlılık durumları (Roymech, 2006).

Zamanla değişen bir sistem 6.21 denklemiyle tanımlanmış olsun;

$$\dot{x} = f(x, t) \quad (6.21)$$

Bu sistemin verilmiş olan başlangıç koşullarında tek bir çözümünün olduğu kabul edilsin ve bu çözümde $\phi(t; x_0, t_0)$ ile gösterilsin. Denklem 6.21 ile verilen olan sistem için denge durumu (x_e)

$$f(x_e, t) = 0 \quad (6.22)$$

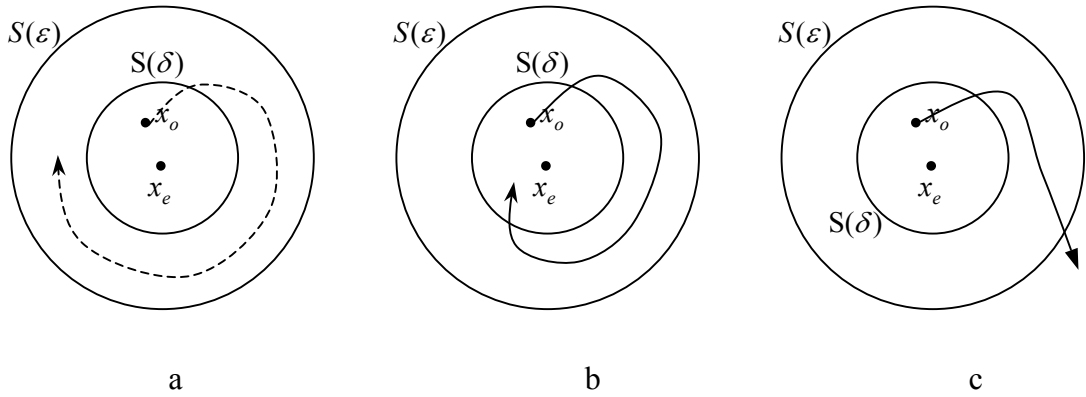
ile tanımlanır. Doğrusal zamanla değişmeyen sistemlerde A matrisi tekil değilse sisteme ait tek bir denge durumundan söz edilir. Tersine A matrisi tekil bir matris ise sistemin birden fazla denge durumu söz konusudur. Doğrusal olmayan sistemlerde de bir veya birden fazla denge durumu olabilir. Denge durumunun belirlenmesi denklem 6.20 yerine denklem 6.21'in çözülmesi ile sağlanır.

6.4.1. Liapunov kararlılığın grafiksel gösterimi

x_e denge durumunu çevreleyen ve yarıçapı k olan bir dairesel alan tanımlansın,

$$\|x - x_e\| = [(x_1 - x_{1e})^2 + (x_2 - x_{2e})^2 + \dots + (x_n - x_{ne})^2]^{1/2} = \|x - x_e\| \leq k \quad (6.23)$$

Bu alan içinde yine $\|x_o - x_e\| \leq \delta$ şartını sağlayan $S(\delta)$ düzlemi tanımlansın ve $S(\varepsilon)$ düzlemi içinde tüm noktalarda $\|\phi(t; x_o, t_o) - x_e\| \leq \varepsilon$ ($t \geq t_o$) çözümünün varolduğu kabul edilsin. Denklem 6.21 ile verilen sistemin x_e denge durumunda kararlı olduğunun kabul edilmesi için, t sonsuza giderken $S(\varepsilon)$ düzlemi içinde kalmak koşulu $S(\delta)$ düzlemi içinde başlayan ve $S(\varepsilon)$ dışına çıkmayan yörüngeye sahip olması gereklidir (Şekil 6.3.a). Şekil 6.3.b'de pratikte tercih edilen asimtotik kararlılık gösterilmiştir. Burada yörünge zamanla ilerledikçe $S(\delta)$ düzlemi içine geri dönmektedir. Şekil 6.3.c'de ise denge durumunda kararsız bir sisteme ait yörünge eğrisi gösterilmiştir.



Şekil 6.3. a- kararlı denge durumu ve yörüngesi, b- asimtotik kararlı denge durumu ve yörüngesi, c- kararsız denge durumu ve yörüngesi (Ogata , 1997).

Liapunov kararlılık analizinde sistem diferansiyel denklemlerini çözmek yerine bir skaler Liapunov fonksiyonunun $V(x,t)$, varlığı araştırılmakta ve bu fonksiyonun bazı şartları sağlayıp sağlamadığı test edilmektedir.

Aday skaler Liapunov fonksiyonunun gösteriminde kuadratik veya Hermitian gösterim önemli bir rol oynamaktadır. Bu türde gösterilen fonksiyonun pozitif tanımlı olup olmadığının testinde Sylvester kriteri uygulanır ve $V(x,t)$ ile $\frac{dV(x,t)}{dt}$ 'nin işaretine göre Liapunov fonksiyonu olup olmayacağına karar verilir.

6.4.2. Doğrusal zamanla değişmeyen sistemlerde Liapunov kararlılığı

Doğrusal ve zamanla değişmeyen bir sistem

$$\dot{x} = Ax \quad (6.24)$$

ile gösterilsin. A matrisinin tekil olmadığı ve $x=0$ 'da denge durumunun mevcut olduğu kabul edilsin. Bu sistemin kararlılığı Liapunov metodu ile incelensin. Ele alınan sistem için aday Liapunov fonksiyonu (Ogata , 1997)

$$V(x) = x^T P x \quad (6.25)$$

olsun. P pozitif Hermitian matris veya pozitif tanımlı matristir. $V(x)$ matrisinin türevini elde edersek,

$$\begin{aligned} \dot{V}(x) &= \dot{x}^T P x + x^T P \dot{x} \\ &= (Ax)^T P x + x^T P Ax \\ &= x^T A^T P x + x^T P Ax \\ &= x^T (A^T P + P A) x \end{aligned} \quad (6.26)$$

Pozitif tanımlı $V(x)$ matrisinin türevi negatif tanımlı oluyorsa asimptotik kararlılık sözkonusudur. Bunun için

$$\dot{V}(x) = -x^T Q x \quad (6.27)$$

olmak zorundadır. Buradan da $\dot{x} = Ax$ ile verilen sistemin asimptotik kararlılığa sahip olması için

$$Q = -(A^T P + P A) \quad (6.28)$$

matrisinin pozitif tanımlı olması yeterlidir. Bir matrisin ($n \times n$ boyutlu) pozitif tanımlı olması için tüm minörlerinin determinantı pozitif olmalıdır (Sylvester kriteri). Doğrusal bir sistemin Liapunov kararlılığının incelendiği bir örnek Ek. F'te verilmiştir.

6.5. Doğrusal Olmayan Sistemlerin Kontrolü

Bundan önceki bölümlerde doğrusal ve zamanla değişmeyen sistemlerin durum uzayında incelenmesi, kontroledilebilirliği, gözlemlenebilirliği ve kararlılık konuları irdelenmiştir. Gerçekte hiçbir sistem belirli bir ölçünün ötesinde doğrusal yapıda değildir. Doğrusal geribeslemeli modeller analiz ve tasarım kolaylığı sağladığı için geliştirilmişlerdir.

Tasarım hedeflerine bağlı olarak kontrol problemlerinin tanımlanması farklı şekillerde yapılmaktadır. Sistemlerin kararlılığı, istenen referansı izleyebilmesi, bozucu gürültünün sistemden uzaklaştırılması gibi konular kontrol problemini karmaşık hale getirmektedir. Tüm bu problemlerin analiz ve çözümünde geribesleme (durum veya çıkış geribeslemesi) önemli rol oynamaktadır.

Doğrusal olmayan sistemlerin kontrolünde birbirinden farklı metodlar kullanılmaktadır (Khalil, 2002). Bu metodlar

- yerel doğrusallaştırma (local linearization)
- integral kontrol (integral control)
- kazanç çizelgeleme (gain scheduling)
- geribesleme doğrusallaştırması (feedback linearization)
- kayan mode control (sliding mode control)

- Liapunov tasarımı (liapunov design)
- yüksek kazançlı gözlemciler (high gain observer)

olarak sıralanmaktadır.

6.5.1. Doğrusallaştırma ile geribeslemeli kontrol

Durum geribeslemeli kontrol için aşağıda verilen sistem ele alınsın;

$$\dot{x} = f(x, u) \quad f(0, 0) = 0 \quad (6.29)$$

burada $f(x, u)$ sürekli türevi alınabilir bir fonksiyondur ve sistem $u = \gamma(x)$ ile kontrol edilecektir. Denklem 6.29'un $x=0$ ve $u=0$ 'da doğrusallaştırılması ile doğrusal sistem elde edilir.

$$\dot{x} = Ax + Bu$$

$$A = \left. \frac{\partial f}{\partial x}(x, u) \right|_{x=0, u=0} \quad B = \left. \frac{\partial f}{\partial u}(x, u) \right|_{x=0, u=0} \quad (6.30)$$

Elde edilen A ve B matrisleri kontroledilebilirlik şartını sağlarsa (A-BK)'nin özdeğerleri kompleks düzlemin sol tarafında kalacak bir sistem tasarlanabilir.

Kapalı döngü (geribeslemeli durumda) sistem $\dot{x} = f(x, -Kx)$ ile gösterilsin. Bu durumda doğrusallaştırma yapılırsa

$$\dot{x} = \left[\frac{\partial f}{\partial x}(x, -Kx) + \frac{\partial f}{\partial u}(x, -Kx)(-K) \right]_{x=0} \cdot x = (A - BK)x \quad (6.31)$$

elde edilir. (A-BK)'nin özdeğerlerinin sol tarafta olması şartı sağlanıyorsa kapalı döngü sistem kararlıdır ve kontrol edilebilir. Geribeslemeli kapalı döngü sistemin Liapunov kararlılığı incelenirse, öncelikle pozitif tanımlı simetrik Q matrisi seçilerek başlanırsa

$$P(A-BK)+(A-BK)^T P = -Q \quad (6.32)$$

denklemden P matrisi elde edilir ve (A-BK)'nin özdeğerleri kompleks düzlemde sol tarafta kaldığından $V(x)=x^T P x$ Liapunov fonksiyonu doğrusallaştırmanın yapıldığı nokta civarında elde edilir.

Durum geribeslemesi yerine çıkış geribeslemesinin kullanıldığı durumda ise yerel doğrusallaştırma ile kontrolü incelenmektedir. Bunun için denklem 5.33 ile verilen sistem verilsin

$$\begin{aligned} \dot{x} &= f(x,u) & f(0,0) &= 0 \\ y &= h(x) & h(0) &= 0 \end{aligned} \quad (6.33)$$

ve burada çıkış geribesleme kontrolcüsü tasarlanmak istensin. $x=0$ ve $u=0$ 'da denklem 6.33 doğrusallaştırılma yapılarak 6.34 eşitliği elde edilir.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu \\ y &= Cx \end{aligned} \quad (6.34)$$

Burada $C = \frac{\partial h}{\partial x}(x)|_{x=0}$ olarak hesaplanır. (A, B) kontroledilebilir ve (A, C) gözlemlenebilir ise doğrusal çıkış geribeslemeli kontrolcü

$$\begin{aligned} \dot{z} &= F z + G y \\ u &= L z + M y \end{aligned} \quad (6.35)$$

şeklinde elde edilebilir. Burada

$$z = \hat{x}, \quad F = A - BK - HC, \quad G = H, \quad L = -K, \quad M = 0$$

olarak yazılırsa, kapalı döngü matrisi denklem 6.36 gibi elde edilir (Khalil, 2002).

$$\begin{bmatrix} A + BMC & BL \\ GC & F \end{bmatrix} \quad (6.36)$$

6.5.2. İntegral kontrol

Bir önceki bölümde yapılan doğrusallaştırmalı kontrol analizlerinde iki temel kabul mevcuttur. Bunlar sistem parametrelerinin bilindiği, zamanla değişmediği ve çalışma noktasının orijine kaydırıldığı idi. Sistem parametrelerinin değişimleri sistem kararlılığını zorladığı yada bozduğu değerler aldığı anda kontrolcü başarısız olur ve sistem kararsızlığa doğru gider.

Genel bir doğrusal olmayan sistem 6.37 denklemleriyle verilmiş olsun;

$$\begin{aligned} \dot{x} &= f(x, u, w) \\ y &= h(x, w) \\ y_m &= h_m(x, w) \end{aligned} \quad (6.37)$$

Burada u kontrol girişi, y kontrol edilen çıkış, y_m ölçülen çıkış ve w ise bilinmeyen parametre ve bozucu girişlerdir. Verilen sistem $t \rightarrow \infty$, $y(t) \rightarrow r$ olacak şekilde kontrol edilmek istenmektedir (r referans giriş değerini göstermektedir). Sistem yatışkın duruma geldiğinde (denge durumu)

$$\begin{aligned} 0 &= f(x_{ss}, u_{ss}, w) \\ r &= h(x_{ss}, w) \end{aligned} \quad (6.38)$$

sistemi x_{ss} 'de tutmak için gerekli giriş u_{ss} ile gösterilebilir. İntegral kontrol etkisini oluşturabilmek için ölçülen çıkış ile referans giriş farkından hesaplanan hatanın entegre edilmesi gereklidir.

$$\dot{\sigma} = e = y - r \quad (6.39)$$

Yeni durumda denklem 6.37'ye bir denklem daha eklenecektir.

$$\dot{x} = f(x, u, w)$$

$$\dot{\sigma} = h(x, w) - r \quad (6.40)$$

İntegral kontrolde çıkış ve referans giriş çevrimiçi ölçülmek zorundadır. İntegral kontrolcünün yapısı bir integral alıcı (hatanın integrali) ve kontrolcüden oluşur. İntegral kontrol ile parametrelerdeki küçük salınımlara karşı sistem gürbüzlüğü arttırılmış olmakta ve kalıcı durum hataları sıfırlanmaktadır (Khalil, 2002).

6.5.2.1. Doğrusallaştırılmalı integral kontrol

Denklem 6.40 ile verilen doğrusal olmayan sisteme, denklem 6.41 ile verilen doğrusal geribeslemeli kontrol girişi uygulanırsa

$$u = -K_1 x - K_2 \sigma - K_3 e \quad (6.41)$$

kapalı döngü sistem ifadeleri denklem 6.42'deki gibi yazılabilir;

$$\dot{x} = f(x, -K_1 x - K_2 \sigma - K_3 (h(x, w) - r), w) \quad (6.42)$$

$$\dot{\sigma} = h(x, w) - r$$

Denge noktalarında $(\bar{x}, \bar{\sigma})$ denklem 6.42, 6.43 eşitliğine dönüşür.

$$0 = f(\bar{x}, \bar{u}, w)$$

$$0 = h(\bar{x}, w) - r \quad (6.43)$$

$$\bar{u} = -K_1 \bar{x} - K_2 \bar{\sigma}$$

Çalışılan bölge içinde denge denklemleri (6.38) verilen çözümlerin tek çözüm olduğu kabul yapılırsa;

$$u_{ss} = -K_1 x_{ss} - K_2 \sigma_{ss} \quad (6.44)$$

elde edilir (Khalil, 2002).

6.5.3. Kazanç çizelgeleme kontrolü

Doğrusallaştırma yaklaşımıyla çözümlerde kontrolcünün belirlenen çalışma noktası civarında çalışması öngörülmektedir. Kazanç çizelgeleme yöntemi ile farklı çalışma (denge durumları) bölgelerinde de kontrolcünün başarıyla çalışması hedeflenmektedir. Bu işlem yapılırken çalışma noktasının belirlenmesi bir yada birden fazla parametreye bağlı olarak yapılmaktadır. Bilinen farklı çalışma noktaları için farklı doğrusallaştırmalar yapılır ve herbir nokta için doğrusal geribesleme kullanılarak kontrolcü tasarlanır. Bu yöntem 20. yy.da uçuş ve füze sistemlerinin kontrolü amacıyla geliştirilen ilk yöntemlerden biridir (Khalil, 2002).

6.6. Sistemlerin Doğrusal Olmayan Yöntemlerle Kontrolü

Günümüzde doğrusal olmayan proseslerin davranışlarının incelenmesinde pekçok yöntem geliştirilmiş olmasına rağmen, doğrusal olmayan proseslerin kontrolünde doğrusallaştırmalı yöntemler daha fazla öne çıkmaktadır.

6.6.1 Ayar parametrelerinin hatanın fonksiyonu olarak belirlenmesi

Basit doğrusal olmayan bir kontrolcünün sentezi, çok bilinen PID kontrol formunda ayar parametrelerini, hatanın bir fonksiyonu olarak değiştirmek şeklinde yapılmaktadır. PID kontrolde, oransal kazanç 6.45 ifadesinde yazıldığı gibi hatanın bir fonksiyonu şekline sokulabilir (Luyben, 1989).

$$k_c = k_o (1 + b|e(t)|) \quad (6.45)$$

Burada k_o , hatanın sıfır olduğundaki kazanç değeri ve b ise ayar katsayısıdır. Burada sistem çıkışı set değerine yakın olduğunda istenmeyen gürültünün sisteme etkisi minimumdur. Fakat sistem çıkışı set değerinden uzaklaştığında ise büyük bir etkiyle, sistem çıkışına müdahale eder.

Ayar parametrelerinin, hatanın geçmişteki trendi ve anlık hata değeri kullanımı ile belirlenmesi Jutan (1989) tarafından önerilmiştir. Burada Luyben'in (1989) önerdiği ifadeye hatanın türevi eklenmektedir. Yeni durumda giriş ifadesi

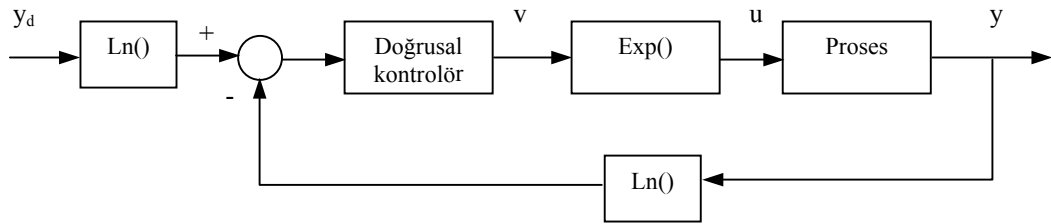
$$u(t) = k_c \left\{ \left[e(t) - \alpha \beta |e(t)| \right] + \frac{I}{T_i} \int e(t) dt \right\} \quad (6.46)$$

şeklinde yazılmaktadır. Denklem 6.46'daki β ifadesi proses hatasının geçmişi hakkında bilgi vermektedir ve 6.47 şeklinde yazılabilir (Willis, 2000).

$$\beta = \frac{0.3(y_t - y_{t-3}) + 0.1(y_{t-1} - y_{t-2})}{T} \quad (6.47)$$

6.6.2 Doğrusal olmayan dönüşümler (nonlinear transformations)

Doğrusal olmayan kontrolcü tasarımında basit yöntemlerden biri de doğrusal olmayan dönüşümler kullanarak sistem giriş-çıkış bağıntılarının (input-output mapping) doğrusallaştırılmasıdır (Willis, 2000). Bu yaklaşımın kullanıldığı bir yöntemde L/A (logarithmic/Antilogarithmic) kontroldür (Şekil 6.4).



Şekil 6.4 : L/A kontrol blok gösterimi (Willis, 2000)

Bu yapıda çıkış hata oranının logaritması doğrusal kontrolcüye uygulanmakta, elde edilen çıkışın ters logaritması alınarak proses'e giriş olarak uygulanmaktadır.

$$e = \ln(y_d) - \ln(y) = \ln(y_d/y) \quad (6.48)$$

$$u = \exp(v)$$

6.7. Doğrusal Olmayan Sistemlerin Geometrik Yöntemlerle Kontrolü

6.7.1 Geribesleme doğrusallaştırılmalı kontrol

Geribesleme doğrusallaştırılmalı kontrol kavramsal olarak bir sistemin çıkışını kontroledilen girişler şeklinde adi diferansiyel denklemlerle ifade etmeye dayanmaktadır. Bu tür bir ifadeyi elde etmek için çıkış denkleminin ardışıl türevi alınarak çıkış ile kontrol edilen değişken arasında doğrusal bir ifade elde edilmeye çalışılmaktadır. Bu elde edildikten sonra diferansiyel geometrik kuramlar kontrolcü ifadesinin elde edilmesinde kullanılmaktadır.

Denklem 6.49'la verilen tek giriş/çıkışlı doğrusal olmayan bir sistem ele alınsın;

$$\begin{aligned}\dot{x} &= f(x) + g(x)u \\ y &= h(x)\end{aligned}\tag{6.49}$$

Burada u girişi, y çıkış ifadesinin bir argumanı olmadığı için, y çıkışının u 'ya bağlı olmadığı açıkça görülmektedir. u girişindeki anlık bir değişim y çıkışında hemen gözükmeyecek ve x 'in değişimiyle yavaş yavaş çıkışta gösterecektir. Çıkış ifadesi y 'nin türevi alınarak davranışı incelenebilir (Khalil, 2002).

$$\begin{aligned}\dot{y} &= \frac{\partial h}{\partial x} \dot{x} = \frac{\partial h}{\partial x} (f(x) + g(x)u) \\ &= \frac{\partial h}{\partial x} f(x) + \frac{\partial h}{\partial x} g(x) u\end{aligned}\tag{6.50}$$

Denklem (6.50) incelendiğinde eğer $\frac{\partial h}{\partial x} g(x) \neq 0$ şartı sağlanırsa \dot{y} ifadesinin u girişi ile doğrusal bağıntıya sahip olduğu görülmektedir. Burada $\frac{\partial h}{\partial x} g(x) \neq 0$ ile sistemin serbestlik derecesinin bir olduğu söylenebilir. Bir sistemin serbestlik derecesi başka bir ifadeyle sistem transfer fonksiyonunda pay derecesi ile paydanın

derecesi arasındaki farktır. $\frac{\partial h}{\partial x} g(x) = 0$ olması durumunda \dot{y} ifadesinin bir daha türevi alınırsa

$$\ddot{y} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{\partial h}{\partial x} \right] f(x) + \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{\partial h}{\partial x} f(x) \right] g(x) u \quad (6.51)$$

elde edilir. Burada $\frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{\partial h}{\partial x} f(x) \right] g(x) \neq 0$ şartı sağlanıyorsa sistemin serbestlik derecesi 2 olarak kabul edilir. Sistemlere ait serbestlik derecesinin belirlenmesinde bu tür ardışık türev alınmasıyla elde edilmesi işlemi Lie türevi olarak adlandırılmaktadır. Denklem 6.50’de herbir terim Lie türevi şeklinde gösterilirse 6.52 eşitliği elde edilir.

$$\dot{y} = \frac{\partial h}{\partial x} f(x) + \frac{\partial h}{\partial x} g(x) u = L_f h(x) + L_g h(x) u \quad (6.52)$$

$L_f h(x) = \frac{\partial h}{\partial x} f(x)$ ifadesi h’in f’e göre f boyunca Lie türevi olarak adlandırılır.

$L_g h(x)$ ’ın sifıra eşit olması durumunda $\dot{y} = L_f h(x)$ ifadesi u girişinden bağımsız olacaktır. y çıkış ifadesinin ikinci türevi alınırsa

$$y^2 = \frac{\partial(L_f h)}{\partial x} [f(x) + g(x) u] = L_f^2 h(x) + L_g L_f h(x) u \quad (6.53)$$

elde edilir. Eğer son ifadede $L_g L_f h(x) = 0$ ise $y^2 = L_f^2 h(x)$ denkleminde u girişinden bağımsızdır. Ardışık türev alma işlemi $L_g L_f h(x) \neq 0$ elde edilinceye kadar devam ettirilirse

$$y^{(\rho)} = L_f^\rho h(x) + L_g L_f^{\rho-1} h(x) u \quad (6.54)$$

elde edilir. Bu son ifade de görüldüğü gibi sistem giriş-çıkışı doğrusallaştırılmıştır ve buradan durum geribesleme kontrolcü ifadesi

$$u = \frac{1}{L_g L_f^{\rho-1} h(x)} \left[-L_f^\rho h(x) + v \right] \quad (6.55)$$

$$v = y^{(\rho)}$$

elde edilir. Burada ρ , sistemin serbestlik derecesidir. Ardışıl türev alma işleminde gösterim kolaylığı sağlayan Lie türevi notasyonu ile gösterirsek;

$$L_g L_f h(x) = \frac{\partial(L_f h)}{\partial x} g(x)$$

$$L_f^2 h(x) = L_f L_f h(x) = \frac{\partial(L_f h)}{\partial x} f(x)$$

$$L_f^k h(x) = L_f L_f^{k-1} h(x) = \frac{\partial(L_f^{k-1} h)}{\partial x} f(x)$$

$$L_f^0 h(x) = h(x)$$

şeklindedir.

Sistem serbestlik derecesi (ρ) sistem boyutuna (n) eşit ise yukarıda denklem 6.53 ve denklem 6.54 ile verilen bağıntılar kullanılarak koordinat dönüşümleri yapılırsa çalışma noktası için geribesleme doğrusallaştırılmış kontrolcü ifadesi elde edilir. Koordinat dönüşümlerini detaylı yazılırsa;

$$\varphi(x) = \begin{bmatrix} \varphi_1(x) \\ \cdot \\ \varphi_n(x) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h(x) \\ L_f h(x) \\ \cdot \\ L_f^{n-1} h(x) \end{bmatrix} \quad (6.56)$$

$$z_i = \varphi_i(x) = L_f^{i-1} h(x) \quad , \quad 1 \leq i \leq n$$

$$\dot{z}_1 = z_2$$

...

$$\dot{z}_{n-1} = z_n$$

$$\dot{z}_n = b(z) + a(z)u \quad (6.57)$$

$z_0 = \varphi(x_0)$ noktası ve civarında kontrolcü ifadesi en genel haliyle

$$u = \frac{1}{a(z)(-b(z) + v)}, \quad \dot{z}_n = v \quad (6.58)$$

şeklindedir. Sistem serbestlik derecesi (ρ) sistem boyutundan (n) küçükse $n-\rho$ adet ilave fonksiyon tanımlayarak giriş çıkışlar arasındaki bağıntıların sayısı n 'e eşitlenebilir. Bu durumda

$$z_i = \varphi_i(x)$$

$$\dot{z}_i = \frac{\partial \varphi_i}{\partial x} \dot{x} = L_f \varphi_i(x) = \varphi_{i+1} = z_{i+1}$$

...

$$\dot{z}_{r-1} = \frac{\partial \varphi_{r-1}}{\partial x} \dot{x} = L_f^{r-1} \varphi_{r-1}(x) = \varphi_r = z_r$$

$$\dot{z}_r = L_f^r \varphi_r(x) + L_g L_f^{r-1} \varphi_r(x) u$$

Koordinat dönüşümleri yapılırsa,

$$x = \varphi^{-1}(z)$$

$$a(z) = L_g L_f^{r-1} \varphi_r(\varphi^{-1}(z))$$

$$b(z) = L_f^r \varphi_r(\varphi^{-1}(z))$$

$$\dot{z}_r = b(z) + a(z)u$$

Eğer $\varphi_{r+1}(x), \dots, \varphi_n(x)$ denklemleri $L_g \varphi_i(x) = 0$ olacak şekilde seçilirse

$$\dot{z}_{r+1} = q_{r+1} = L_g \varphi_{r+1}(\varphi^{-1}(z))$$

...

$$\dot{z}_n = q_n(z)$$

olarak belirlenir (Khalil, 2002). Geribesleme doğrusallaştırmasıyla ilgili buraya kadar verilen teorik bilgiler Ek. B.2’de örnek bir doğrusal olmayan sisteme uygulanmıştır.

7. ENDÜSTRİYEL YARIKESİKLİ EKMEK MAYASI FERMENTASYONUNDA ÖZGÜL ÜREME HIZI KONTROLÜ

Ekmek mayası fermentasyonu prosesi ve *Saccharomyces cerevisiae* kültürü, uzun yıllar öncesinden bugüne üzerinde en çok çalışmanın yapıldığı biyoteknolojik bir prostir. Bu uzun süreç içinde; yapısı ve davranışı en iyi bilinen bir doğrusal olmayan biyoteknolojik proses olması nedeniyle endüstriyel üretimi yanında, pek çok yeni modelleme ve kontrol tekniğinin performanslarının test edilmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır .

Bu çalışmada şimdiye kadar yapılan tüm çalışmalardan farklı olarak endüstriyel boyutlu yarıkesikli ekmek mayası fermentasyonu prosesi üretim boyutlarında ele alınmış, birincil proses ölçümlerinden ölçülemeyen kinetik hızların güvenilir şekilde elde edilmesi, bu hızlar kullanılarak biyokütle kestiriminin gerçekleştirilmesi ve farklı model esaslı kontrol yöntemlerinin gerçekleştirilmesi çalışılmıştır. Ölçüm doğruluklarının incelenmesi ve biyokütle kestirimi çalışmaları öncelikle 100 m³'lük fermentörde gerçekleştirilmiştir. Geliştirilen kestirim modeli daha sonra 20 m³'lük pilot fermentörde uygulanmıştır. Model esaslı kontrol çalışmaları pilot fermentörde gerçekleştirilerek, kontrol deneylerinin sonucu olası düşük kalitede ki ürün miktarının minimize edilmesidir.

Yarıkesikli fermentasyon prosesinde başlangıç aşısının kalitesi ve miktarı, substrat beslemesinin derişimi ve içeriği, prosten alınan ölçümlerdeki belirsizlikler geribeslemeli kontrolü zorunlu kılmaktadır. Etkili bir proses kontrol uygulaması için, doğru bir model ve etkin bir kontrol stratejisine gereksinim vardır. Model esaslı kontrol stratejisi temel olarak önemli makroskopik değişkenlerin (özümlü üreme hızı, etanol üretim/tüketim hızı) ölçümünden/kestiriminden yola çıkılarak, biyokütlenin maksimize/yan ürünün minimize edilmesini sağlayacak şekilde substrat beslemesinin öngörülmesi hedeflenmiştir.

Fermentasyon proseslerinde ulaşılmak istenen hedeflere göre farklı proses değişkenlerinin kontrolü ne çıkmaktadır :

- Üreme hızı
- yan ürünün maksimize edilmesi/minimize edilmesi
- biyokütlenin maksimize edilmesi

şeklinde yazılabilir.

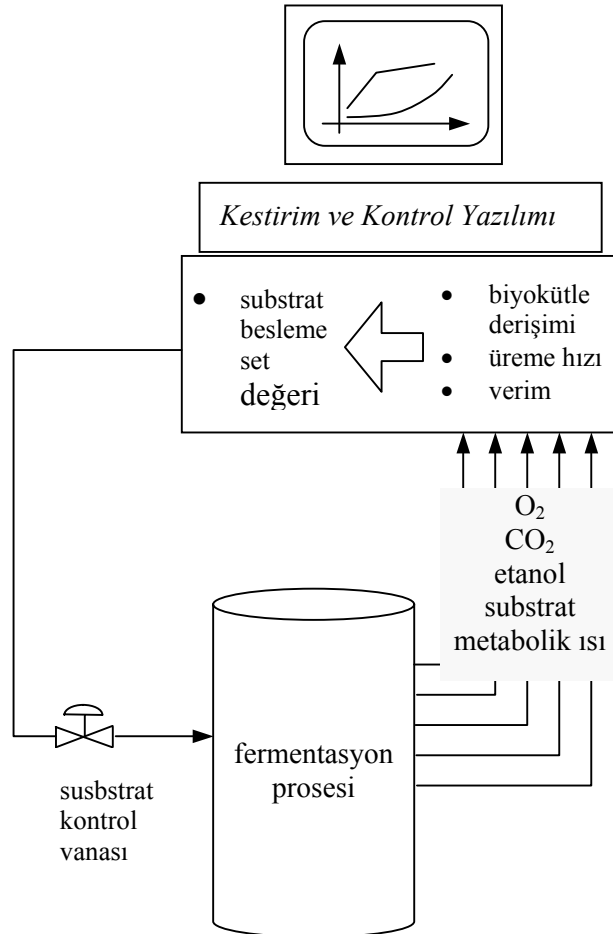
Ekmek mayası fermentasyonunda genel kabul, üreme evresinde yüksek biyokütle derişimine ulaşmak istenirken, sonraki evrede ise ürün/substrat veriminin yüksek olması hedeflenmektedir.

Bu amaçla yapılan ilk kontrol çalışmalarında pH ve çözünmüş oksijen (dissolved oxygen) lmleri kullanıldığı görülmektedir. Daha sonra yapılan çalışmalarda özgül üreme hızının kontrolü ve özgül oksijen tüketim hızının kontrolde uygulama alanı bulmuştur (Keuler, 1993; Claes, 1999). Tüm bu uygulamalarında ayar değişkeni olarak karbon kaynağının (substart beslemesi) kontrolü seçilmiştir (Keuler, 1993; Axellson, 1989; Pomerleau ve Viel 1992). Son on yılda yapılan çalışmalarda etanol derişimi, proses davranışını gösteren bir proses değişkeni olarak kullanılmaya başlanmıştır. Bu çalışmalarda fermentasyon sıvı ortamındaki glikoz derişimi, minimum etanol derişimi oluşturacak değerde tutulması hedeflenmiştir (chen, 1992; Cannizzaro ve diğ. 2004;).

Bu tez çalışmasında yarıkesikli ekmek mayası fermentasyonu prosesinin model esaslı kontrolünde, yukarıda bahsedilen kriterlere ulaşmak için dört farklı stratejinin uygulanması hedeflenmiştir. Yöntemler sırasıyla;

- sabit özgül üreme hızı yörüngeli substrat beslemesi kontrolü
- etanol geribeslemeli, özgül üreme hızı yörüngeli substrat beslemesi kontrolü
- doğrusal olmayan özgül üreme hızı kontrolü
- doğrusal olmayan etanol derişimi kontrolü

şeklinde yazılabilir. Bu kontrol stratejilerinin teorik altyapıları ve endüstriyel boyutta uygulanması bundan sonraki kısımlarda detaylı olarak incelenecektir. Bu stratejilerin gerçekleştirilmesi için gerekli kestirim algoritmaları bölüm 4'te detaylı anlatıldığı gibi bilgisayar ortamında gerçekleşmiştir (Şekil 7.1). Kontrol algoritmalarında bilgisayar ortamında gerçekleşirken kestirim algoritmalarının çıktılarını kullanmaktadır. Kontrol algoritması çıkışında elde edilen substrat besleme değeri daha sonra programlanabilir kontrol ünitesine aktarılmakta ve burada PID kontrol bloğu ile kontrol edilmektedir. Substrat debisi ölçümü elektromagnetik debimetrelerle yapılmaktadır. Ayrıca herbir kontrol deneyi öncesinde substrat çözeltisinin derişimi laboratuarda ölçülmekte ve bu değer kestirim/kontrol programlarında kullanılmaktadır.



Şekil 7.1 : Kontrol mimarisinin blok gösterimi.

Şekil 7.1'deki kontrol mimarisinde görüldüğü gibi fermentasyon prosesinden çevrimiçi hızlardan dönüşüm hızları elde edilmekte daha sonra bilgisayar ortamında kestirim ve kontrol algoritması ile substrat besleme değeri hesaplanmaktadır. Hesaplanan bu set değerine göre PLC tabanlı kontrol sistemi ile nihai kontrol elemanın denetimi yapılmaktadır.

7.1. Açık Döngü Özgül Üreme Hızı Kontrolü

Bu kontrol stratejisinde hedeflenen özgül üreme hızı profilini sağlayabilmek için gerekli substrat beslemesi miktarı, bölüm 5'te denklem 5.37 ile verilmiş olan substrat derişimi diferansiyel denkleminin, kalıcı durumda ortamdaki glikoz derişiminin sıfıra yakın olduğu kabulü ile elde edilmektedir.

$$\frac{dS}{dt} = D(S_{in} - S) + \left(\overset{\text{üreme}}{-\frac{\mu_x^{ox}}{Y_{X/S}^{ox}}} - \overset{\text{ürün}}{\frac{q_{s,red}}{Y_{E/S}^{red}}} - \overset{\text{bakım}}{m} \right) X \quad (7.1)$$

Denklem 7.1 ile, hücrelerin enerji kaynağı ve biyosentez işlemleri için kaynak olarak kullandıkları karbon substratının dinamik dengesi gösterilmektedir ve

D	[1/h]	: substrat çözeltisinin seyrelme hızı (F_s/V)
S_{in}	[g/L]	: substrat çözeltisinin derişimi
X	[g/L]	: biyokütle miktarı
$Y_{X/S}^{ox}$	[g/g]	: substrat üzerindeki oksidatif biyokütle verimi
$Y_{E/S}^{red}$	[g/g]	: substrat üzerindeki redüktif ürün verimi
μ_x^{ox}	[1/h]	: özgül üreme hızı
$q_{s,red}$	[mol/Cmol]	: özgül redüktif glikoz tüketim hızı
m	[g/g]	: bakım enerjisi
V	[L]	: hacim
F_s	[L]	: substrat besleme debisi

olarak tanımlanmaktadır.

Sonnlietner ve Kappeli (1986)'nin *Saccharomyces cerevisiae* için geliştirmiş olduğu kinetik modelde, yarıkesikli işletim modunda aerobik ortamda (oksidatif) özgül üreme hızı, kritik bir değerin altında ve glikoz derişiminin çok düşük olması durumunda, denklem 7.1 sadeleştirilerek 7.2 ifadesi ile özgül üreme hızı kontrol edilebilir.

Bu yeni durumda denklem 7.1 ifadesi

$$\frac{dS}{dt} = D S_{in} - \frac{\mu_x^{ox}}{Y_{X/S}^{ox}} X \quad (7.2)$$

şeklinde olacaktır. Bu yeni yaklaşımda $\frac{\mu_x^{ox}}{Y_{X/S}^{ox}} \gg m$ ve $\frac{\mu_x^{ox}}{Y_{X/S}^{ox}} \gg \frac{q_{s,red}}{Y_{E/S}}$

doğrusallaştırmaları yapılmıştır. Yatışkın durumda denklem 7.2 ile verilen ifade

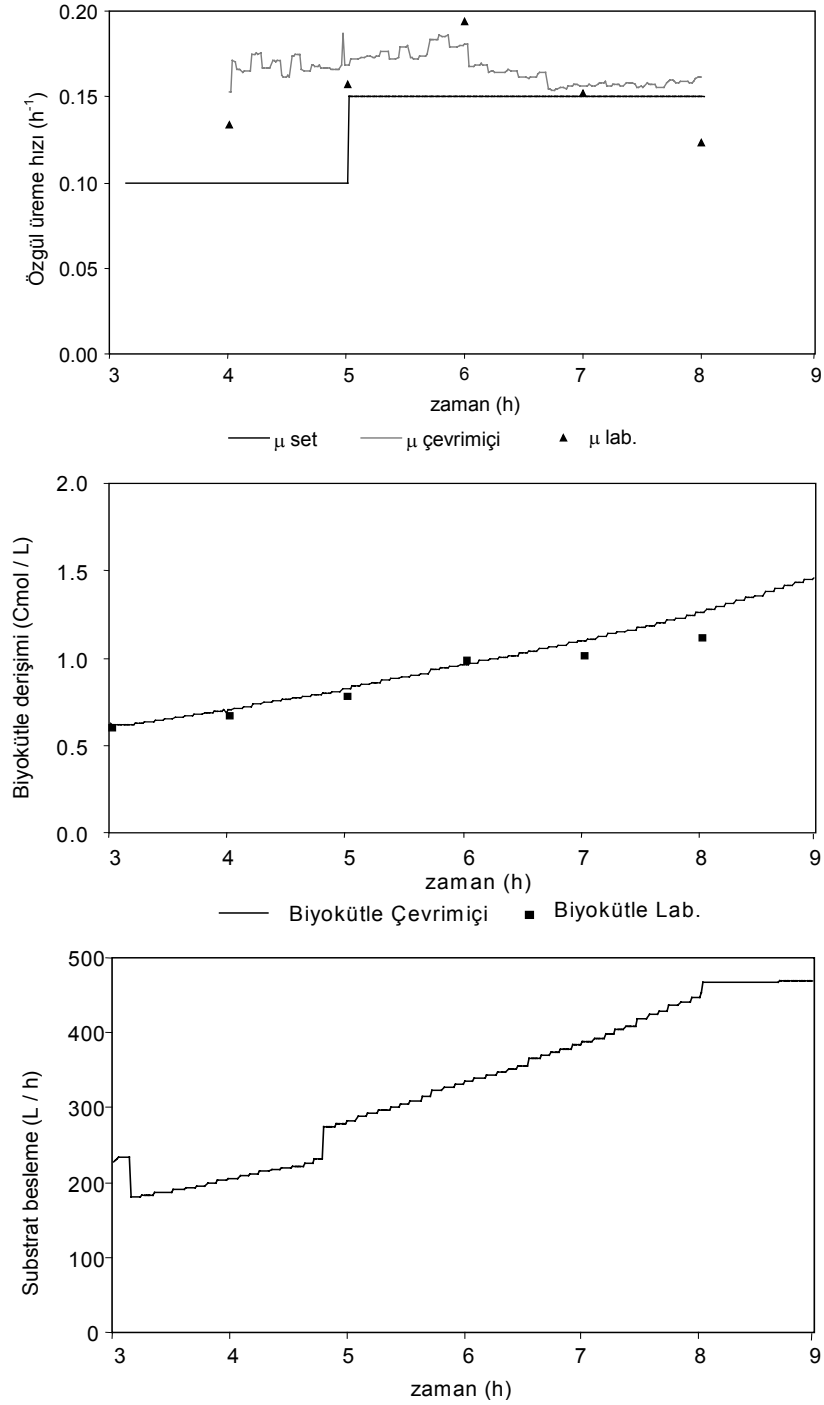
$\frac{dS}{dt} = 0$ kabulü yapılarak çözülrse substrat besleme ifadesi,

$$F_s = \frac{\mu_{set}}{Y_{X/S}^{ox}} \frac{1}{S_{in}} X V \quad (7.3)$$

şeklini alır. Burada μ_{set} hedeflenen özgül üreme hızını ve $Y_{X/S}^{ox}$ ise oksidatif durumda biyokütle/substrat verimidir.

Denklem 7.3 ile verilen substrat besleme denkleminin uygulanabilmesi için ifade de yeralan ölçülemeyen biyokütle derişiminin bilinmesi gereklidir. Biyokütle değeri bölüm 4.3'te detaylı olarak anlatılan mekanistik model denklemleriyle ve çevrimiçi olarak hesaplanmıştır. Kestirim modelinden gelen biyokütle derişim değerleri kullanılarak, istenen özgül üreme hızını sağlayacak substrat besleme değerinin hesaplanması ve kontrol edilebilmesi mümkün olmuştur. Denklem 7.2 ve 7.3'ün temel alındığı kontrol uygulaması endüstriyel fermentörde birbirini tekrarlayan şekilde uygulanmış ve burada üç kontrol deneyinden elde edilen sonuçlar sunulmuştur. Kontrol işlemi üssel (hızlı) üremenin olduğu süre boyunca ve

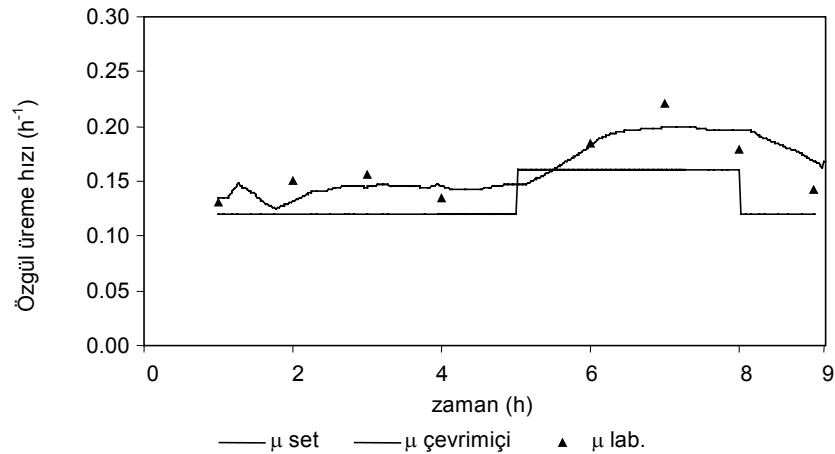
fermentasyon boyunca öngörülen özgül üreme hızı profiline uygulanmıştır. Bu kontrol gurubundaki deneyler A gurubu kontrol deneyleri olarak isimlendirilmiştir. Proseste gerçekleştirilmeye çalışılan kontrol yörüngesi Şekil 7.2 ve Şekil 7.3'de sürekli düz çizgilerle gösterilmiştir.



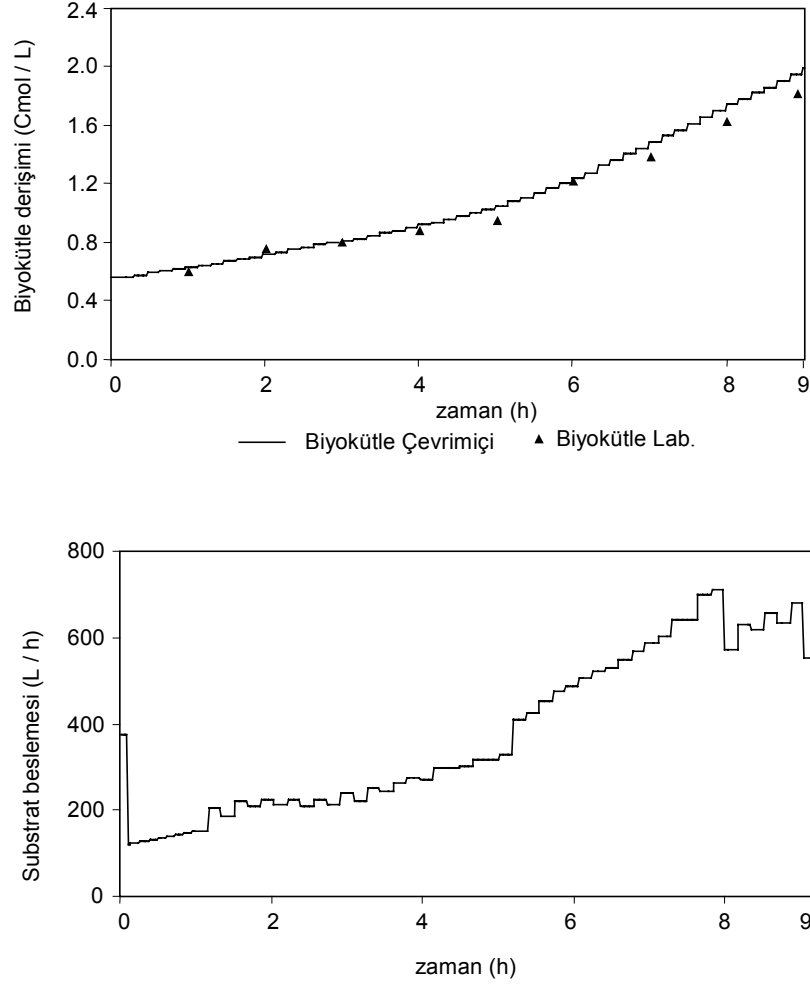
Şekil 7.2. A1 fermentasyonu özgül üreme hızı, biyokütle derişimi ve substrat besleme eğrileri.

Şekil 7.2 ile sonuçları verilen A1 kontrol deneyi fermentasyonunda iki farklı özgül üreme hızı set değeri kontrol edilmeye çalışılmıştır ($\mu_{set1}=0.1$ ve $\mu_{set2}=0.15$). Proseste kontrol etkisi fermentasyonun 180. dakikasında (3. saat) başlatılmış ve 480. dakikada (8. saat) sonlandırılmıştır. Bu süre içinde laboratuarda saatlik çevrimdışı numune analizleri biyokütle derişimi ölçülmüş ve özgül üreme hızı hesaplanmıştır. Kestirimci ve kontrolcü hesaplamaları 10 dakikalık peryotla yapılmış ve hesaplanan substrat besleme set değerleri bu peryotla nihai kontrol elemanlarına uygulanmıştır. Prosesten elde edilen biyokütle derişim eğrileri incelendiğinde çevrimiçi ve laboratuvar değerlerinin birbiriyle örtüştüğü görülmektedir. Şekil 7.2’de özgül üreme hızı grafiği incelendiğinde hedeflenen sabit üreme hızı yörüngesinin etkili bir şekilde kontrol edilemediği görülmektedir. Kontrol deneylerinde üssel üreme evresinde iki farklı sabit özgül üreme hızı kontrol edilmeye çalışılmıştır. Biyokütle derişimi dışında, elde edilen çevrimiçi verim katsayıları substrat beslemesi hesabında kullanılmamıştır. Çevrimiçi verim katsayılarının kullanımı substrat besleme hesaplamalarında ciddi sınımlara yol açtığı görülmüştür.

Benzer deney fermentasyonu tekrarlanmış (A2 deneyi) elde edilen sonuçlar Şekil 7.3’te verilmiştir. Deneyin 1. saatinden itibaren kesintisiz 8 saatlik süre ile üreme hızı kontrolü iki farklı set değeri için ($\mu_{set1}=0.12$ ve $\mu_{set2}=0.15$) gerçekleştirilmiştir.



Şekil 7.3. A2 fermentasyonu özgül üreme hızı, biyokütle derişimi ve substrat besleme eğrileri.

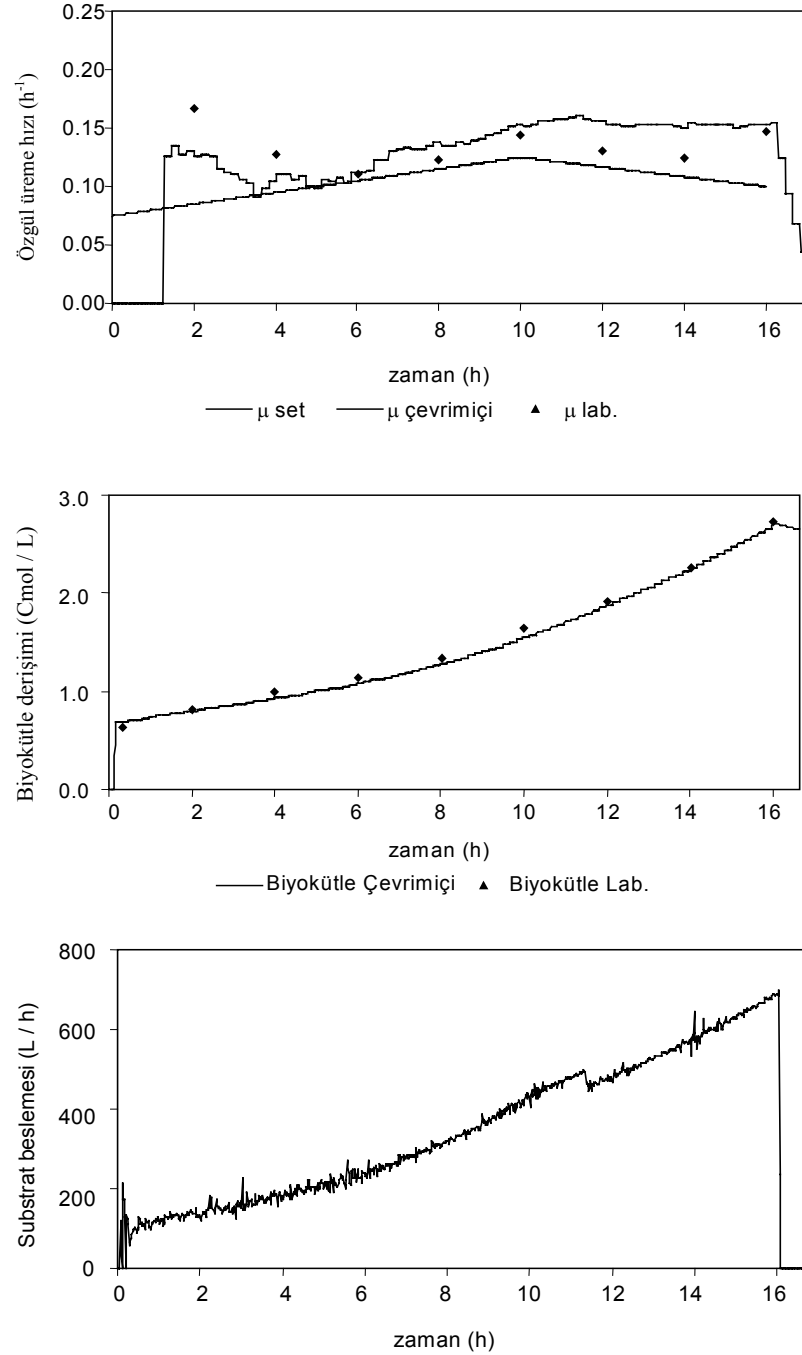


Şekil 7.3.(devamı) A2 fermentasyonu özgül üreme hızı, biyokütle derişimi ve substrat besleme eğrileri.

Burada üzerinde çalışılan kontrol stratejisinde geribeslemenin olmaması önemli bir eksiklik olmasına rağmen ve endüstriyel ortamda uygulamasının kontrol tekniği açısından çok iyi sonuçlar vermeyeceği öngörülmekle beraber, geliştirilen kontrol stratejisi pratikte yaygın kullanılan bir yöntem olması nedeni ile ele alınan kontrol yöntemi tam bir fermentasyon prosesi boyunca uygulanmıştır.

Sonuçları Şekil 7.4 ile verilmiş bulunan A3 deneyinin önceki kontrol deneylerinden farkı özgül üreme hızının hesaplanma şekli ve kontrolcünün tüm fermentasyon boyunca etkili olmasıdır. İlk iki deneyde özgül üreme hızı ile biyokütle kestirim periyodu eş zamanlı (10 dakikalık periyotla) hesaplanırken bu deneyde üreme hızı kayan ortalama alan bir algoritma ile hesaplanmış ve kullanılmıştır. Bu şekilde hem üreme hızı hesabında ve hemde substrat besleme değerlerinde salınımlar

azaltılmıştır. Substrat besleme değerinin hesaplanma periyodu bu deneyde beş dakika olarak kullanılmıştır.



Şekil 7.4. A3 fermentasyonu özgül üreme hızı, biyokütle derişimi ve substrat besleme eğrileri.

Endüstriyel uygulamalarda biyokütle/substrat veriminin ($Y_{X/S}$) düşük olmaması için substrat beslemesi fermentasyon ortamında etanol oluşmayacak şekilde öngörülmekte (başlangıç aşısı miktarı, üreme hızı profili, fermentör sonu hacmi gibi değişkenlerle) ve substrat yörüngesi kontrol edilmeye çalışılmaktadır. Laboratuarda yapılan etanol, pH, sıcaklık gibi ölçüm ve analizler ile prosesin gidişatı gözlenmekte ve gerekli görülürse substrat yörüngesi modifiye edilmektedir. Tüm bu uygulamaların çevrimdışı olarak ve gecikmeli olarak yapılması fermentasyon performansını düşürmekte ve operatör müdahalesini gerekli kılmaktadır.

7.2. Etanol Geribeslemeli Özgül Üreme Hızı Kontrolü

Bu kontrolcü tasarımında da başlangıç noktası 7.1 denklemdir. Bu denklem stokiyometrik bir denklemdir ve önkabuller yapılarak açık döngü özgül üreme hızı

kontrolünde kullanılmıştır. Denklem 7.1 incelendiğinde varolan $\frac{q_{s,red}}{Y_{E/S}^{red}}$ terimi,

oksidatif ortamda ve etanolün olmadığı önkabulü ile denklem 7.2 türetilmiştir. Oysa gerçek durumda her zaman bu koşulların sağlanması mümkün olmamaktadır. Fermentasyon prosesinin zamanla değişen doğrusal olmayan bir proses olması, bazı kinetik hızların ve parametrelerin öngörülememesi ile ölçü ve kontrol cihazlarının yol açtığı problemlerden dolayı, fermentasyon prosesinde etanol oluşumu sıkça karşılaşılan bir durumdur. Etanol fermentasyon prosesi için istenmeyen bir yan üründür ve biyokütle/substrat verimini düşüren bir etkendir. Denklem 7.1'de etanol

oluşumunu gösteren $\frac{q_{s,red}}{Y_{E/S}^{red}}$ terimi proses için bir geribesleme olarak kabul edilerek

ve bu geribesleme bir oran katsayısı (k_c) ile kullanılarak etanol geribeslemeli üreme hızı kontrolcü ifadesi denklem 7.4'teki gibi elde edilebilir. Bu denklemde özgül etanol oluşum hızı hesaplanarak denklem 7.1'deki yerine konarak substrat beslemesi hesaplanmıştır. Bir ileri adım olarak ta etanol oluşum hızı için entegrasyon ifadesi ile denklem 7.5 elde edilmiştir. Her iki durum için substrat besleme ifadeleri denklem 7.4 ve 7.5'teki gibi olmaktadır;

$$F_{in} = \mu_{set} \frac{X V}{Y_{X/S}^{ox} S_{in}} \left(1 - k_c \frac{q_{s,red}}{X}\right) \quad (\text{oransal}) \quad (7.4)$$

$$F_{in} = \mu_{set} \frac{X V}{Y_{X/S}^{ox} S_{in}} \left(1 - k_c \frac{q_{s,red}}{X} - \frac{k_i}{Ti} \sum \frac{\Delta q_{s,red}}{X}\right) \quad (\text{oransal} + \text{integral}) \quad (7.5)$$

burada,

$q_{s,red}$: özgül redüktif glikoz tüketim hızı

k_c : kazanç sabiti

k_i : integral sabitidir.

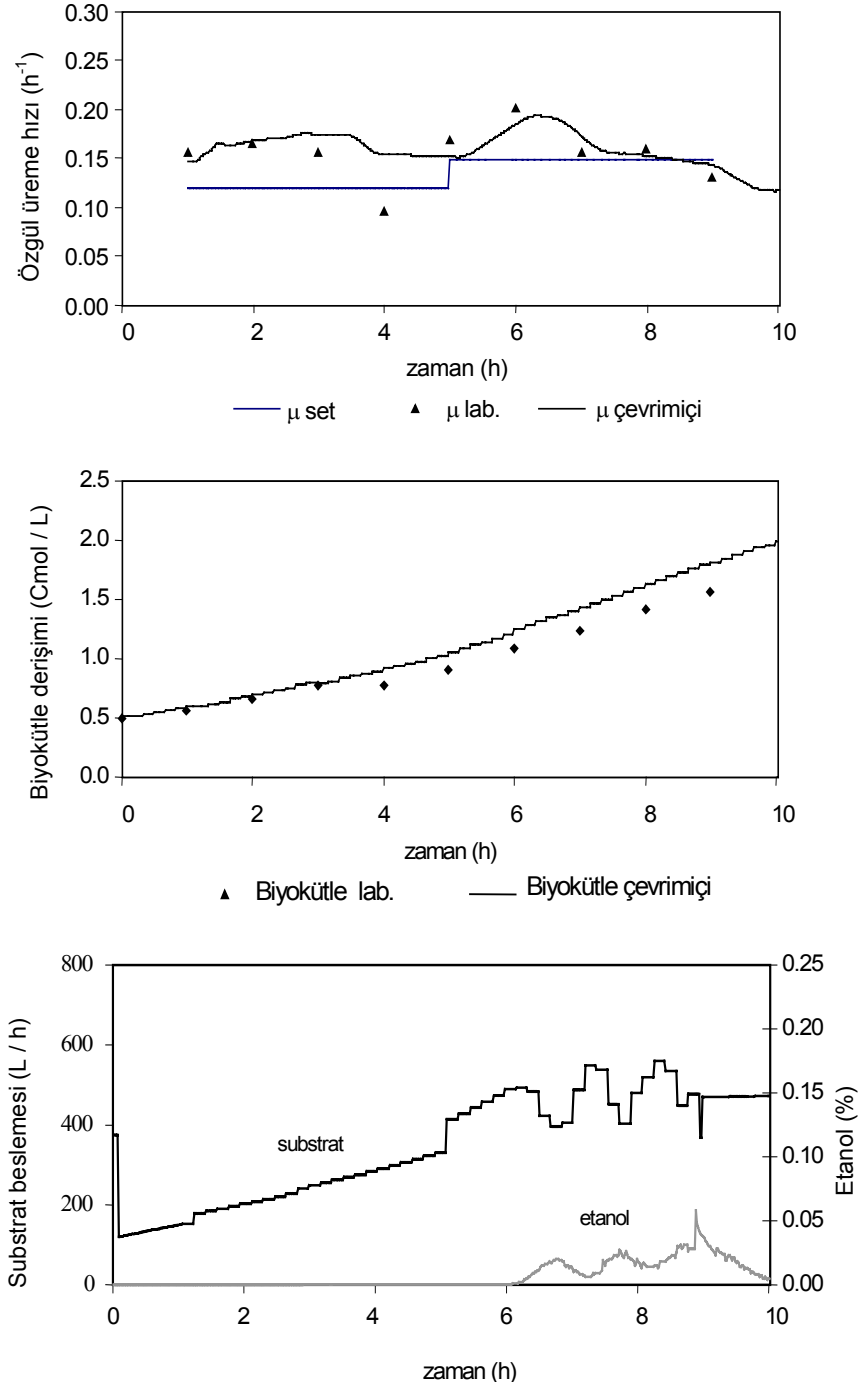
Substrat yörüngesinin belirlenebilmesi için denklem 7.4 ile verilen ifadede yer alan biyokütle derişiminin bilinmesi/hesaplanması gerekmektedir. Biyokütle değeri bölüm 4.3'te verilen mekanistik model tarafından hesaplanmakta, özgül redüktif glikoz tüketim hızı ise gaz fazında etanol ölçümü yapılarak türetilmiştir.

Denklem 7.4'ün temel alındığı kontrol uygulaması endüstriyel fermentörde birbirini tekrarlayan şekilde uygulanmıştır. Kontrol işlemi üssel (hızlı) üremenin olduğu süre boyunca uygulanmıştır. Burada sonuçları verilen deneyler B gurubu kontrol deney fermentasyonları olarak adlandırılmıştır ve iki deneye ait sonuçlar verilmiştir.

Her iki deney benzer ilk koşullar altında gerçekleştirilmiştir kontrol işlemleri fermentasyonların birinci saati sonrası başlatılmıştır. Proseste gerçekleştirilmeye çalışan kontrol yörüngesi Şekil 7.5 ve Şekil 7.6'da özgül üreme hızı grafiklerinde sürekli düz çizgilerle gösterilmiştir. Üssel üreme evresinde iki farklı sabit özgül üreme hızı kontrol edilmeye çalışılmıştır.

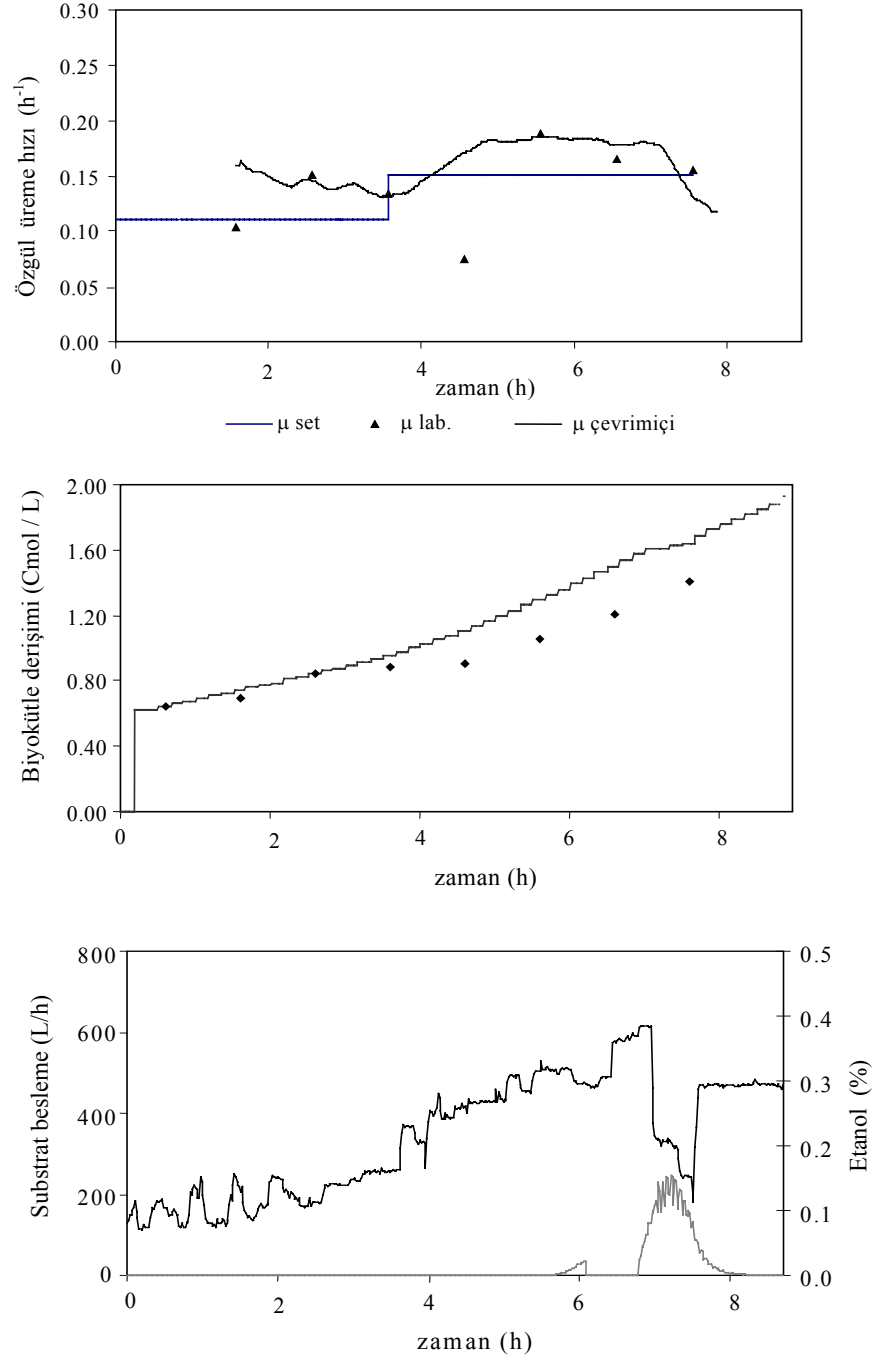
B1 deneyinde denklem 7.4 ile verilen kontrolcü ifade $k_c=0.2$ olarak alınmış ve deney sonuçları şekil 7.5'te verilmiştir. Şekil 7.5'te verilen substrat-etanol grafiği incelendiğinde, fermentasyonun 6. saatinden itibaren etanol oluşumu gözlenmektedir. Kontrol algoritmasında bu oluşan etanolü kompanse edecek şekilde substrat beslemesini k_c ve $q_{s,red}$ ile orantılı bir şekilde azaltarak tepki vermiştir. Özgül üreme hızının istenen değerden uzaklaşmasını ve etanol oluşumunu engelleyerek fermentasyon substrat veriminin düşmesi engellemeye çalışılmıştır.

Ayrıca özgül üreme hızı set değerindeki adım değişikliğine (basamak cevabı), beklenen substrat artışı yönünde tepki vermiş ve bunun özgül üreme hızındaki karşılığı ölçümlerde görülmüştür.



Şekil 7.5. B1 fermentasyonu özgül üreme hızı, biyokütle derişimi ve substrat besleme eğrileri.

Etanol geribeslemeli özgül üreme hızı kontrolü için ikinci kontrol deneyi, farklı kazanç değeri ($k_c=0.7$) ile tekrarlanmıştır (B2 fermentasyonu).



Şekil 7.6. B2 fermentasyonu özgül üreme hızı, biyokütle derişimi ve substrat besleme eğrileri.

Her iki deneyde, farklı kazanç değerleri ile etanol oluşum hızına bağlı olarak substrat beslemesinin ayarlanması ile gerçekleştirilen kontrolde çok etkin bir özgül üreme hızı kontrolü gerçekleştirilebildiğini söylemek mümkün değildir. Fakat etanol oluşumunu giderecek yönde etkide bulunan bir terimin olması, bir önceki yönteme göre fermentasyon prosesinin istenen koşullarda devamını sağlama açısından daha etkin olduğu söylenebilir. Bu uygulamada k_c değişkeninin mutlak değeri, etanol oluşumu durumunda, substrat değerinin belirlenmesinde önemli rol oynamaktadır. Bunun büyük seçilmesi önemli salınımlara neden olacağı gibi küçük seçilmesi etanol oluşumunu engelleyemeyeceği için istenen sonuca ulaştırmayacaktır. Substrat beslemesinin bu şekilde değiştirilmesinin pratik açıdan bir anlamı olmasına rağmen kontrol algoritmasında özgül üreme hızı (μ) geribeslemesinin olmaması etkin bir üreme hızı kontrolünü sağlamamaktadır.

7.3. Doğrusal Olmayan Özgül Üreme Hızı Kontrolcüsü

Bundan önce verilen her iki kontrol uygulamasında özgül üreme hızı herhangi bir geribesleme olmaksızın, açık döngü kontrol edilmeye çalışılmıştır. Elde edilen sonuçlarda açık döngü kontrol ve etanol geribeslemeli kontrol ile özgül üreme hızının kontrolü etkin bir şekilde gerçekleştirilemediği görülmüştür. Bu bölümde ise detayları bölüm 6.7.1'de verilen doğrusal olmayan kontrol metodu (geribesleme doğrusallaştırması, feedback linearization) ile özgül üreme hızı kontrolü endüstriyel fermentasyonda gerçekleştirilmeye çalışılmıştır.

Üssel üreme evresi olarak adlandırılan evre, maya hücrelerinin aşı sonrası ortamdaki besin kaynaklarını ve oksijeni kullanarak hızla üreme faaliyeti (büyüme ve bölünme) içine girdikleri evredir. Bu evrede yeterli miktarda substrat derişimi ve oksijen olması durumunda üreme üssel olarak gerçekleşir. Dolayısı ile substrat derişimi kısıtlayıcı tek etkidir.

Ekmek mayası fermentasyonunda substrat/biyokütle verimini ($Y_{X/S}$) maksimize etmek ancak fermentasyon süresince etanol oluşumunu engellemek veya minimum değerde tutmak ile mümkün olmaktadır. Etanol oluşumu ise oksijen sınırlaması veya ortamda aşırı substrat olması durumunda ortamda gözlenmektedir. Bu yüzden

substrat derişimini kritik bir değerin altında tutmak etanol derişiminin dolaylı olarak kontrol edilmesini sağlamaktadır. Diğer taraftan endüstriyel olarak fermentasyon sıvı ortamındaki substrat derişimini ölçmek mümkün değildir. Bunun yerine substrat derişiminin bir fonksiyonu olan özgül üreme hızını ölçmek ve kontrolünü sağlamak daha akılcı bir yöntemdir.

Maya fermentasyonu prosesinde substrat derişim dinamiğini ifade eden denklem 7.6 incelendiğinde, substrat derişimi ile özgül üreme hızı arasında doğrusal bir bağıntı olmadığı görölmektedir. Dolayısı ile kullanımı planlanan yöntemde göre, özgül üreme hızı ise substrat derişimi arasında doğrusal bir bağıntı bulunan bir kontrolcü ifadesinin elde edilmesi gereklidir. Bu amaçla, bölüm 6.7.1’de verilen ve kontrol edilmek istenen çıkış değişkeni özgül üreme hızı ile kontrol değişkeni substrat beslemesi arasında giriş-çıkış modeli kullanılarak geribesleme doğrusallaştırması yapılmıştır (giriş / çıkış modeli). Bu geribesleme doğrusallaştırması ise aşığıda verilen yarıkesikli substrat besleme dinamiğinden elde edilebilir.

$$\frac{dC_s}{dt} = \frac{(F_s C_{s,in})}{V} - \left(\frac{\mu_x^{ox}}{Y_{X/S}^{ox}} + \frac{q_{s,red}}{Y_{E/S}^{red}} + m \right) X - \frac{(F_s C_s)}{V} \quad (7.6)$$

Bu denklem, $\sigma = \left(\frac{\mu_x^{ox}}{Y_{X/S}^{ox}} + \frac{q_{s,red}}{Y_{E/S}^{red}} + m \right)$ tanımı ile düzenlenirse,

$$\frac{dC_s}{dt} = -\sigma X + \frac{F_s}{V} (C_{s,in} - C_s) \quad (7.7)$$

elde edilir.

İkinci adımda ise, kararlı doğrusal referans modelin elde edilmesi gereklidir. Giriş çıkış modelinde birinci dereceden türev içeren bir ifade olduğundan, birinci dereceden doğrusal referans modeli denklem 7.8’deki gibi yazılabilir.

$$\frac{d}{dt}(C_s - C'_s) = -\lambda(C_s - C'_s) \quad (7.8)$$

Denklemden C'_s fermentasyon sıvı ortamında tutulmak istenen substrat derişimi referans değerini, λ ile ise ayar parametresini göstermektedir.

Denklem 7.7 yatişkin durum için ($C_s \cong 0$) yeniden düzenlenirse

$$\frac{dC_s}{dt} = -\sigma X + \frac{F_s}{V} C_{s,in} \quad (7.9)$$

elde edilir ve $\sigma = \left(\frac{\mu_x^{ox}}{Y_{X/S}^{ox}} + \frac{q_{s,red}}{Y_{E/S}^{red}} + m \right)$ ifadesinde $\frac{\mu_x^{ox}}{Y_{X/S}^{ox}} \gg \frac{q_{s,red}}{Y_{E/S}^{red}} + m$ şartı

sağlanırsa (etanol oluşumunun olmadığı durumda) giriş/çıkış için geribesleme doğrusallaştırmalı model elde edilir.

Yatişkin durumda denklem 7.9, denklem 7.8'de yerine konur ve substrat beslemesi çekilirse,

$$F_s = \frac{\sigma X - \lambda(C_{s,in} - C'_s)}{C_{s,in} - C'_s} V \quad (7.10)$$

elde edilir. Kabulü yapılan koşullarda (fermentasyon ortamında yeterli oksijenin olduğu ve etanol bulunmadığı durumda) özgül üreme hızı (μ), tamamen substrat derişiminin bir fonksiyonu kabulüne göre, denklem 7.10 aşağıdaki gibi özgül üreme hızı için de yazılabilir.

$$F_s = \frac{\frac{\mu_x^{ox}}{Y_{X/S}^{ox}} C_x - \lambda (\mu - \mu')}{C_{s,in}} V \quad (7.11)$$

Denklem 7.11 ile verilen kontrolcü ifadesi fermentasyon ortamında

- oksijen limitasyonunun olmadığı
- etanol oluşumunun olmadığı

durumda geçerli olan bir ifadedir. Bu kontrolcü ifadesi temel alınarak üç farklı deney gerçekleştirilmiştir. Bu deneyler

- üssel üreme evresinde sabit özgül üreme hızı kontrolü
- fermentasyon boyunca iki farklı referans üreme hızı değerinin kontrolü
- fermentasyon boyunca zamanla değişen özgül üreme hızı profilinin kontrolü

şeklinde sınıflandırılmıştır.

7.3.1 Üssel üreme evresinde sabit özgül üreme hızı kontrolü

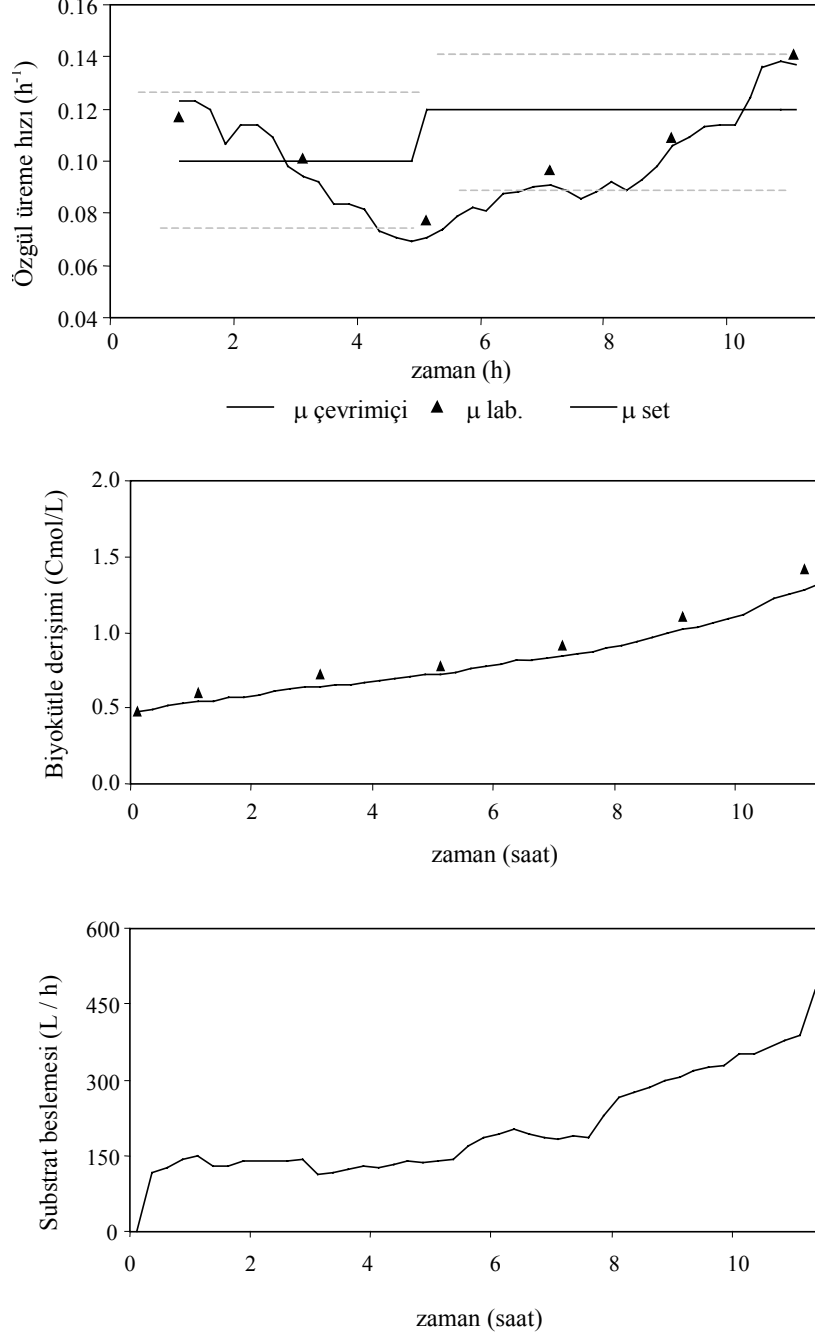
Bu bölümde gerçekleştirilen tüm kontrol deneylerinde (C tipi kontrol fermentasyonları), model esaslı kontrol işlemleri fermentasyonun ikinci saatinde başlatılmıştır. Bundaki amaç aşının yapılması ve maya hücrelerinin fermentasyon ortamına uyumunun sağlanmasıdır (optimum pH, sıcaklık koşulları). Bu süre içinde fermentöre daha önceden belirlenen profile göre substrat beslemesi yapılmıştır.

Aşağıda verilen C1 deney fermentasyonunda, denklem 7.11 ile verilen doğrusal olmayan kontrolcü ifadesi ile substrat beslemesi yapılarak iki farklı özgül üreme set değeri (Şekil 7.7) için kontrol gerçekleştirilmiştir.

Şekil 7.7’de verilen biyokütle derişim eğrisi incelendiğinde çevrimiçi derişim değerleri ile laboratuarda yapılan ölçümlerin uyumlu olduğu görülmektedir. Bu yakınsama özgül üreme hızı eğrisinde de görülmektedir.

Ancak şekil 7.7’de görüldüğü gibi proste, referans özgül üreme hızı eğrisini 0.02 h⁻¹’lik band içinde takip etmiştir. Bu deneylerde λ ayar parametresi için keyfi değerler kullanılmıştır. Tekrarlanan deneyler sonucunda çevrimiçi üreme hızı eğrisi, referans üreme hızını belli bir band içinde kalacak şekilde takip ettiği görülmüştür.

Referans üreme hızına bağlı olarak hesaplanan substrat beslemesi de referans değerle orantılı artış göstermektedir.



Şekil 7.7. C1 fermentasyonundan elde edilen özgül üreme hızı, biyokütle derişimi ve substrat besleme eğrileri.

7.3.2. İki farklı üreme hızı değerinin fermentasyon boyunca kontrolü

Yukarıda sonuçları şekil 7.7’de verilen deneyde kontrol işlemi sınırlı süreyle (ilk 2 saati takibeden 8 saatlik dilimde) yapılmış ve üreme hızı set değerlerinin kontrolü, set değeri etrafında bir band içinde kalacak şekilde gerçekleşmiş idi. Özgül üreme hızının bir band içinde kalması, istenen değerleri yakınsamaması problemini gidermek için denklem 7.11 ile verilen ifadeye bir integral terimi eklenerek elde edilen yeni bir kontrolcü ifadesinin kullanılmasını daha iyi sonuç vereceği düşünülmüştür. Yeni durumda kontrolcü ifadesi denklem 7.12’de verilmiştir,

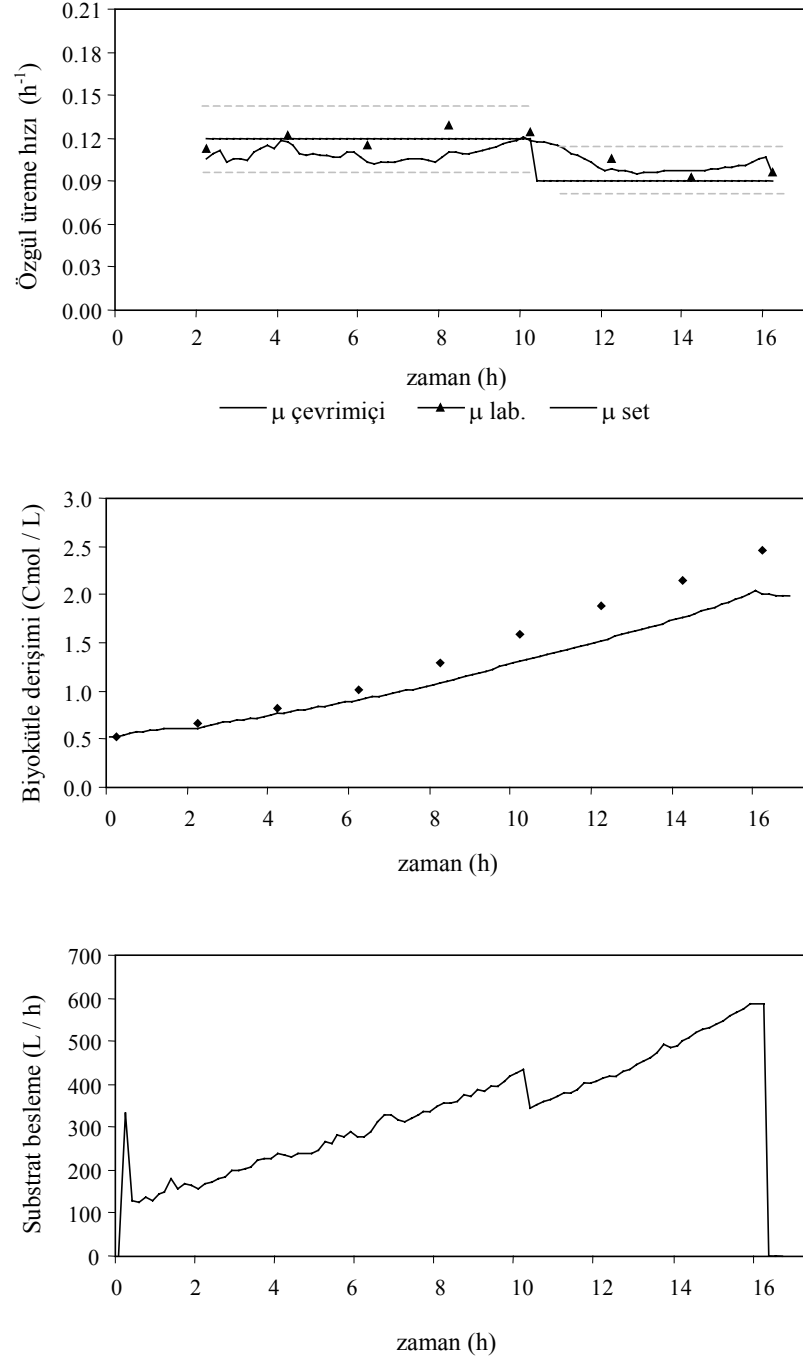
$$F_s = \frac{\frac{\mu_x}{Y_{X/S}^{ox}} X - \lambda_P \left\{ (\mu_s - \mu') - \frac{I}{\lambda_i} \Sigma (\mu_s - \mu') \right\}}{C_{s,in}} V \quad (7.12)$$

burada λ_P ve λ_i , sırasıyla ayar parametresi ve integral zamanıdır.

Model esaslı kontrol algoritmalarında kullanılan kestirim (estimation) hesaplamalarının periyodu, model çıktılarında salınımlara neden olabilmektedir. Kestirim/hesaplama periyodunun küçük seçilmesi durumunda, durum değişkenlerinin çok fazla salınıma sahip olduğu, aksine periyodun büyük seçilmesi durumunda ise sistem davranışının gecikmeli şekilde belirlenmesi problemleriyle karşılaşmıştır. Açık döngü kontrol deneylerinde kestirim ve kontrol periyotları 5 dakika olarak kullanılmıştır. Doğrusal olmayan yöntemlerle özgül üreme hızının kontrolü deneylerinde kestirim ve kontrol periyodu 15 dakika olarak seçilmiştir.

Burada yapılan deneylerde (C2, C3 kontrol deneyleri) iki farklı özgül üreme hızı referans değeri fermentasyon prosesi boyunca kontrol edilmeye çalışılmıştır. Kestirim algoritmaları proses başlıgıcı ile birlikte, kontrol işlemleri ise yaklaşık iki saatlik süre sonrasında başlatılmıştır. Şekil 7.8.’de C2 deney fermentasyonundan elde edilen özgül üreme hızı, biyokütle derişimi ve substrat besleme eğrileri verilmiştir. Bu kontrol deneyinde kontrol katsayıları $\lambda_P = 30$ ve $\lambda_i = 3000$ olarak kullanılmıştır. Fermentasyonun üssel üreme evresinde ve sabit üreme evresinde biyokütle kestirim değerleri ile çevrimdışı ölçümler arasındaki farklılığa rağmen denklem 7.12’de

verilen (integral etkisi) kontrolcü ifadesi kullanılarak gerçekleştirilen substrat beslemesi ile şekil 7.8'deki özgül üreme hızı eğrisi elde edilmiştir.

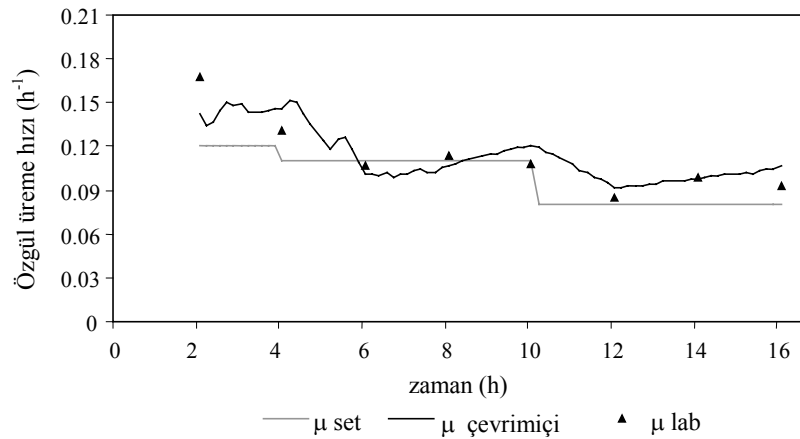


Şekil 7.8. C2 fermentasyonu özgül üreme hızı, biyokütle derişimi ve substrat besleme eğrileri.

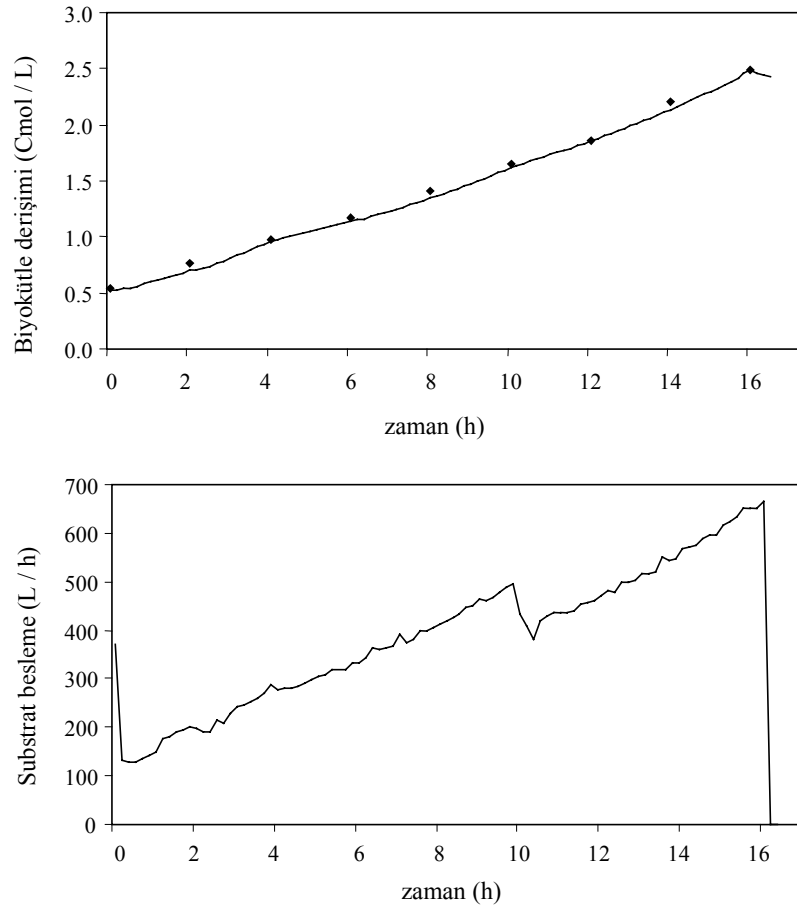
Şekil 7.8’de verilen özgül üreme hızı eğrisi incelendiğinde, salınımların az olduğu ve set değerindeki basamak değişikliği uygun şekilde takip eden bir özgül üreme hızı eğrisi elde edildiği görülmektedir. Ayrıca modelde hesaplanan özgül üreme hızı değerleri ile laboratuarda yapılan biyokütle analizlerinden elde edilen özgül üreme hızı hesaplarının çok iyi örtüştüğü gözlemlenmektedir. Substrat eğrisinde görülen salınımsız ve basamak girişine karşı uyumlu substrat beslemesi kontrol tekniği açısından olduğu gibi endüstriyel fermentasyon tekniği açısından da başarılı ve kabul edilebilir sonuçlar vermiştir.

Yukarıda sonuçları verilen C2 deney fermentasyonunda proses boyunca üssel üreme koşulları etanol üretimi olmaksızın ve proses oksijen limitasyonuna sokulmadan sağlanmıştır. Benzer deney üç farklı referans değeri için tekrarlanmış ve sonuçları Şekil 7.9’da verilmiştir. Elde edilen özgül üreme hızı eğrileri incelendiğinde laboratuvar sonuçları ile çevrimiçi değerler arasında kabul edilebilir bir yakınsama mevcuttur. Referans değeri bir band içinde kalacak şekilde kontrol edilmektedir.

Literatürde benzer metodla geliştirilmiş bir kontrol uygulaması laboratuvar koşullarında gerçekleştirilmiş olup, düşük biyokütle derişimlerinde bir band içinde kalan özgül üreme hızı değerleri elde edilmiş olup, yüksek biyokütle derişimi değerlerinde iyi sonuçlar alınmadığı belirtilmiştir. (Claes, 1999).



Şekil 7.9. C3 fermentasyonu özgül üreme hızı, biyokütle derişimi ve substrat besleme eğrileri.



Şekil 7.9.(devamı) C3 fermentasyonu özgül üreme hızı, biyokütle derişimi ve substrat besleme eğrileri.

C2 ve C3 deneylerinde dikkati çeken diğer bir nokta ise özgül üreme hızı referans değerlerinin düşüklüğüdür. Literatürde ekmek mayası prosesi için kritik özgül üreme hızı olarak $\mu_c = 0.2 - 0.3$ (ortalama değer olarak alınmıştır) değeri kabul edilirken bir sonraki deneylerde görüleceği gibi burada referans özgül üreme hızı değeri 0.14'ün üzerine çıktığında etanol oluşumun başlamasıdır. Etanol oluşumunun açıklanmasında substrat derişimi, oksijen limitasyonu ve diğer proses dinamikleri rol oynamaktadır. Etanol oluşumu durumda ise üssel üreme evresi sonrasında özgül üreme hızına ek olarak etanol derişimi kontrolünün de yapılması zorunluluğu ortaya çıkmaktadır.

7.3.3. Zamanla değişen özgül üreme hızı kontrolü

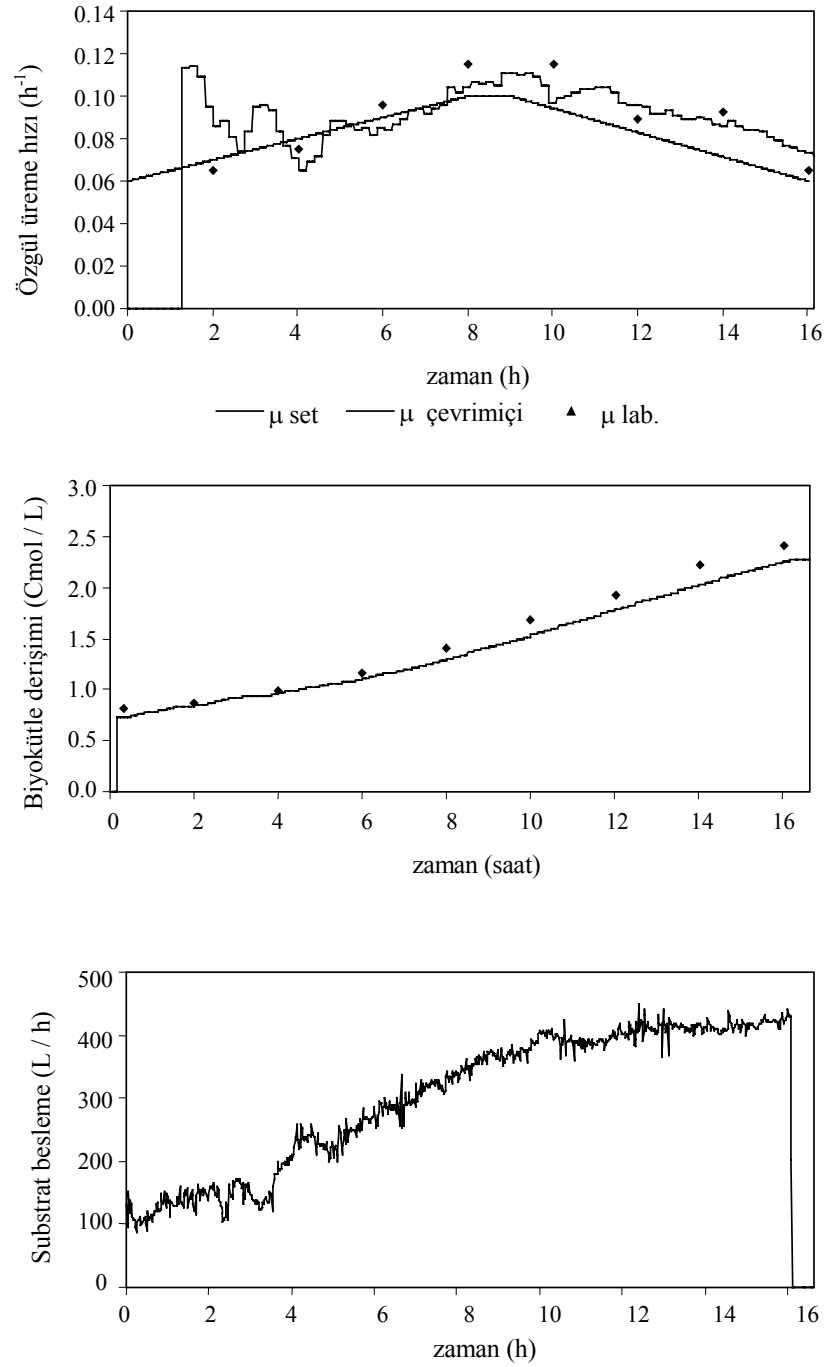
Burada denklem 7.12 ile verilen doğrusal olmayan kontrolcü ifadesi, özgül üreme hızının fermentasyon boyunca değiştiği bir fermentasyona uygulanmıştır. Bu eğri,

endüstriyel olarak fermentasyon substrat beslemesinin öngörülmesinde kullanılan eğridir. Fermentasyon operatörleri bu tür üreme hızı eğrilerini kullanarak, hedeflenen verim hesaplarına uygun olarak substrat besleme eğrilerini hazırlanmaktadır. Daha sonra substrat beslemeleri, hesaplanan bu eğriye göre yapılmaktadır.

Çalışmanın bu kısmında kontrol edilmek istenen özgül üreme hızı, çevrimiçi ölçülen ve kestirimi yapılan hızlarla biyokütle derişimi kestirimleri kullanılarak, çevrimiçi geribeslemeli biçimde ve substrat beslemesi değiştirilerek edilerek gerçekleştirilmiştir. Deneylerde kontrol işlemleri proses başlangıcıyla birlikte başlatılmıştır. Şekil 7.10'da sonuçları verilen C4 kontrol deneyinde, özgül üreme hızı eğrisi üssel üreme evresinde artım yönünde ve daha sonrada zamanla azalacak şekilde öngörülmüştür. Burada verilen yaklaşım pratikte yarıkesikli fermentasyon proseslerinde substrat beslemesinin belirlenmesinde kullanılan özgül üreme hızı eğrisidir.

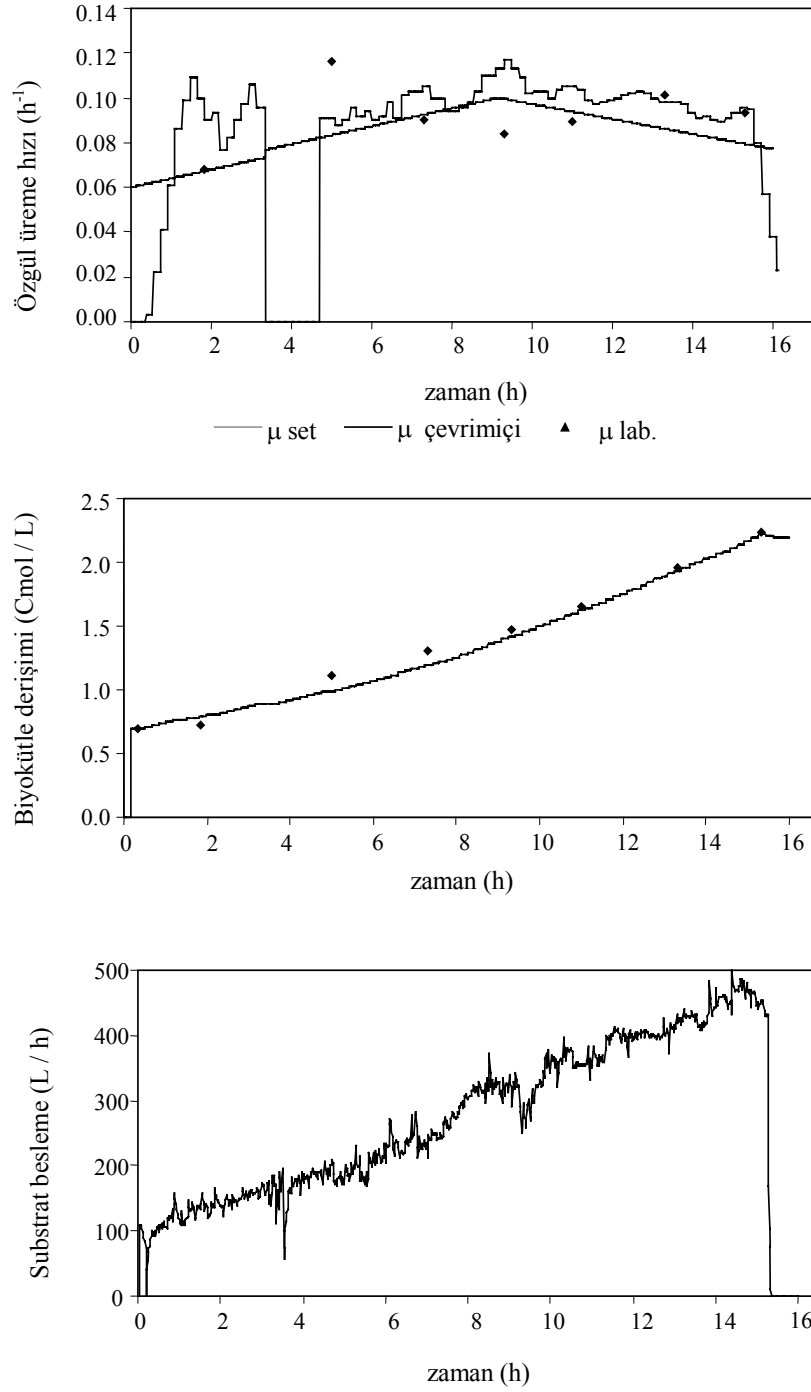
Özgül üreme eğrileri incelendiğinde, üssel üreme bölgesinde özgül üreme hızı kontrolünün sabit üreme bölgesine göre çok daha başarılı şekilde gerçekleştiği görülmektedir. Bu deney fermentasyonlarında özgül üreme hızının kontrolünde, geribesleme amacıyla kestirimi yapılan üreme hızının hesaplanmasında saatlik kayan ortalama (moving averaging) tekniği kullanılmıştır. Deney fermentasyonlarında kontrol algoritması, genel olarak fermentasyonun 2. saatinde başlatılmıştır (bu deneyde 3. saatte). Bu iki saat boyunca aşı kültürü yeni ortama uyum sağlamakta, kayan ortalama alan programda sağlıklı bir şekilde çıkış üretmeye başlamaktadır. Proses durum değişkenleri 10 dakikalık peryotla hesaplanırken, doğrusal olmayan kontrolcü çıkışı ise 5 dakikalık peryotla hesaplanmıştır.

Diğer önemli bir farklılık ise referans eğrinin artım yönünde kullanılan kazanç değeri ($\lambda_p = 0.15$) iken, referansın azaldığı evrede ise kazanç değeri ($\lambda_p = 0.25$) olarak çalışılmıştır ($\lambda_i = 1800$). Tüm proses süresince sabit ayar parametresinin kullanımı, eğrinin azalan bölgesinde referans değerini yakınsamada problem yaratmıştır.



Şekil 7.10. C4 fermentasyonu özgül üreme hızı, biyokütle derişimi ve substrat besleme eğrileri.

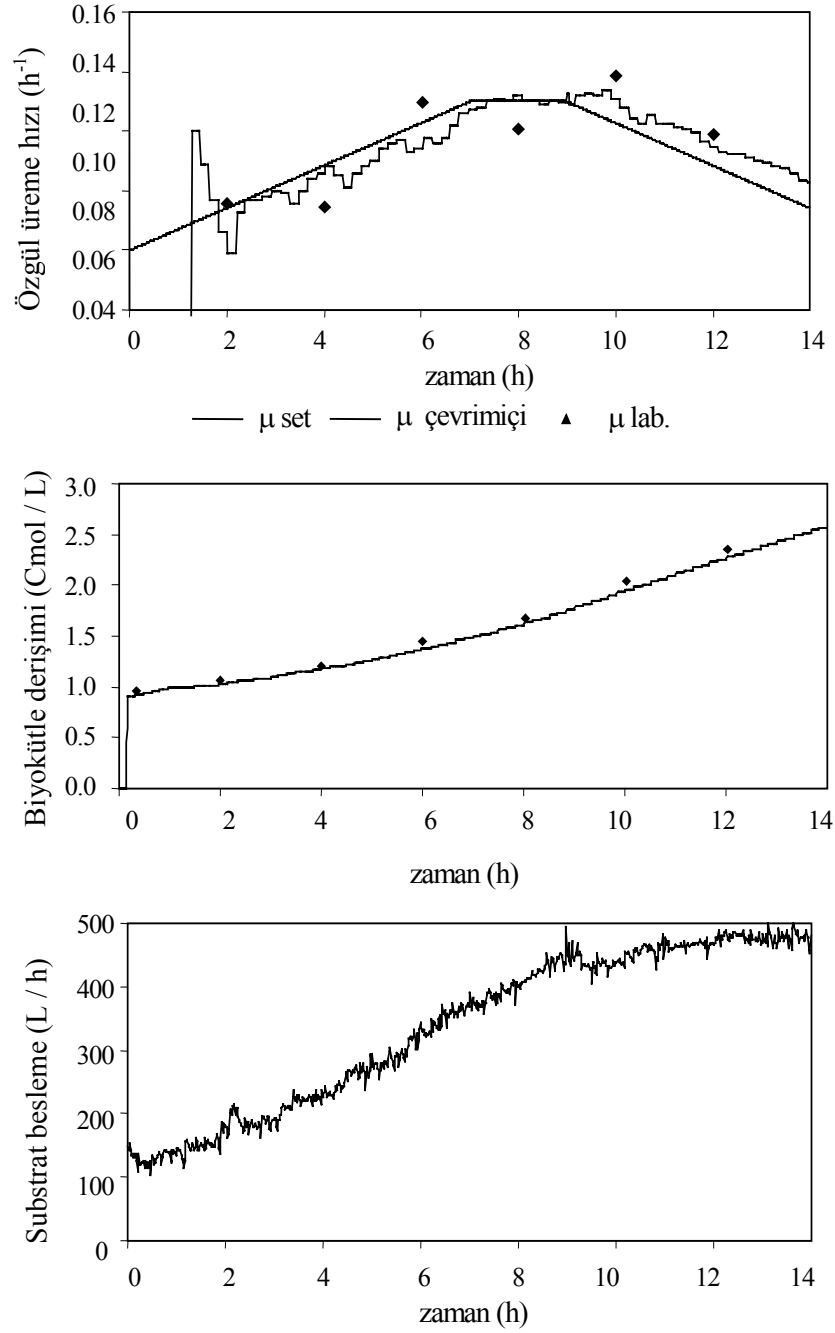
C5 kontrol deneyinde, prosesin 3. saatinde bilgisayar tabanlı kontrol sistemindeki bir arızadan dolayı kontrol işlemleri kesintiye uğramıştır. Oluşan bu kesintiden dolayı kontrol işlemleri 5. saatte tekrar başlatılmıştır. Bu durum özgül üreme hızı eğrisindeki kesinti ile görülmektedir.



Şekil 7.11. C5 fermentasyonu özgül üreme hızı, biyokütle derişimi ve substrat besleme eğrileri.

Tekrar start işleminden sonra bir saatlik gecikme ile kontrol işlemlerine başlanmasının nedeni, özgül üreme hızı hesabındaki kayan ortalama programının çıkış üretebilmesi için gerekli olan süredir. Bu deneyde ayar parametreleri olarak referans eğrinin artım yönünde kullanılan kazanç değeri ($\lambda_p = 0.16$) iken, referansın

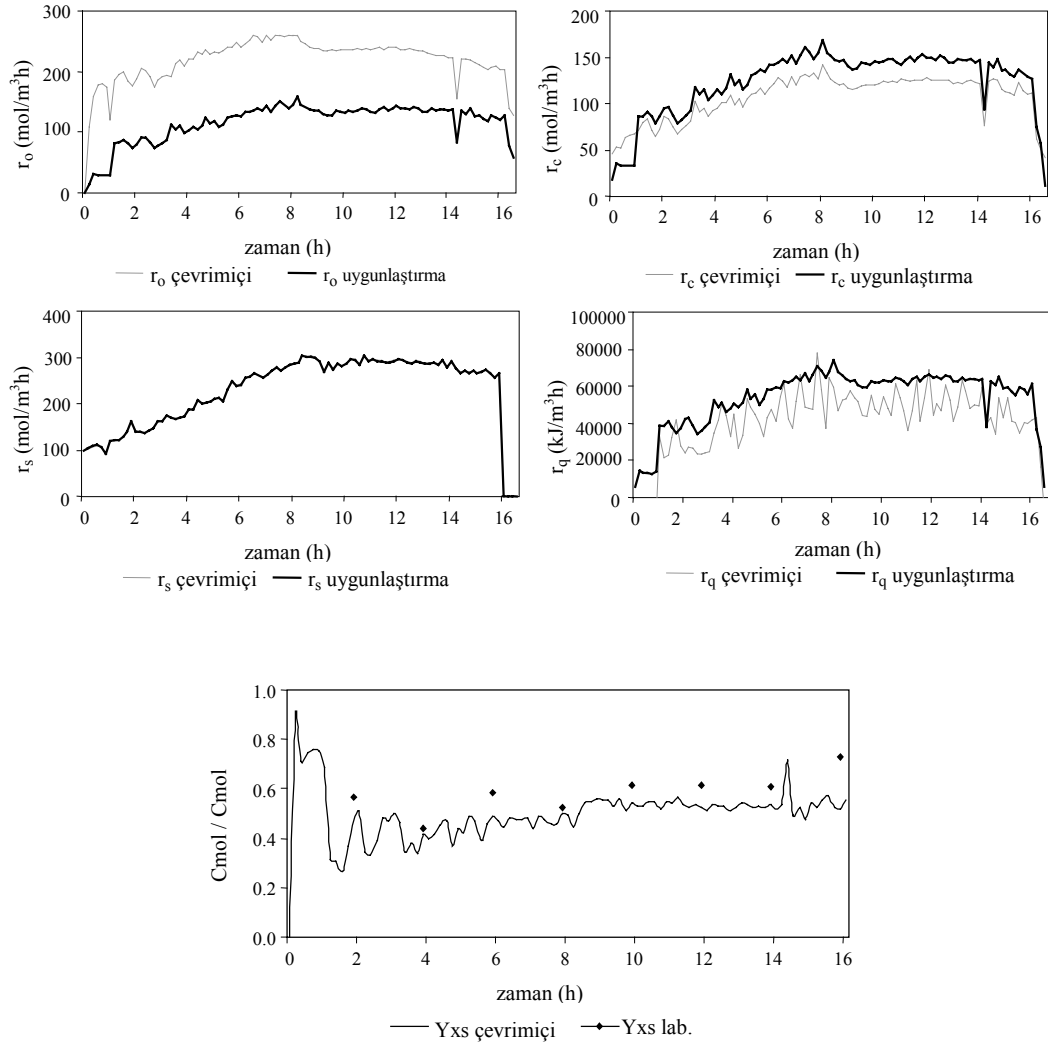
azaldığı evrede ise kazanç değeri ($\lambda_p = 0.3$) olarak çalışılmıştır ($\lambda_i = 1800$) seçilmiştir. Bir önceki C4 deneyinden farklı ayar parametreleri ile çalışılmasına rağmen sonuçların birbirine yakın çıktığı görülmüştür. Elde edilen sonuçların tekrarlanabilirliğini test etmek amacı ile kontrol deneyi benzer başlangıç koşullarında tekrarlanmış ve sonuçları şekil 7.12 ile verilmiştir.



Şekil 7.12. C6 fermentasyonu özgül üreme hızı, biyokütle derişimi ve substrat besleme eğrileri.

Şekil 7.10, 7.11, 7.12 ile verilen substrat besleme grafikleri incelendiğinde salınımların çok çok az olduğu, zamanla değişen üreme profiline uygun substrat değerleri ürettiği, prosesi önemli durum değişikliklerine izin vermediği söylenebilir. Ayrıca kontrolcü çıktısı substrat eğrisi, endüstriyel üretimde kullanılan substrat öngörü profilleri ile çok uyumlu olduğu söylenebilir. Elde edilen sonuçların çalışma noktası sürekli değişen doğrusal olmayan ve endüstriyel koşullarda işletilen bir proses için kabul edilebilir olduğu görülmektedir.

Tekrarlanabilirliğin test edilmesi amacıyla gerçekleştirilen deney fermentasyonuna ait çevrimiçi ve uygunlaştırılmış hız eğrileri Şekil 7.13'te verilmiştir.



Şekil 7.13. C6 fermentasyonu çevrimiçi, uygunlaştırılmış hızlar ve çevrimiçi biyokütle/substrat verimi.

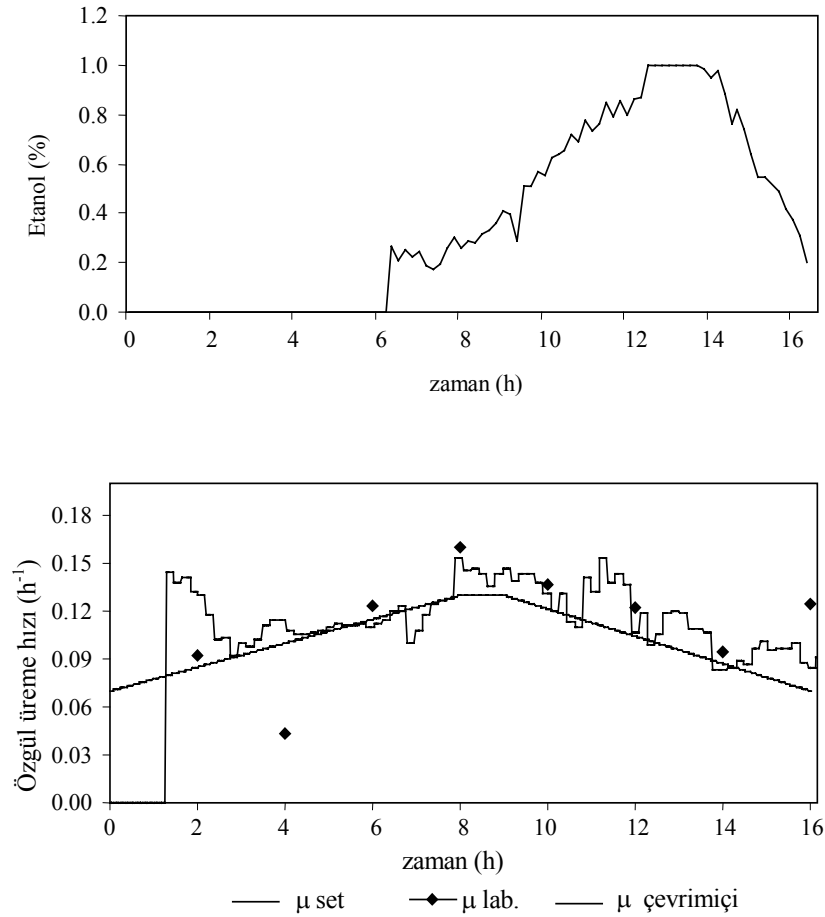
Çevrimiçi ve uygunlaştırılmış hız eğrileri incelendiğinde oksijen tüketim hızı ölçümlerinde önemli farklılıklar olduğu görülmektedir. Bu deneye ait çevrimiçi elde edilen biyokütle/substrat verim eğrisinin, laboratuarda yapılan analizlerden elde edilen değerlerle örtüştüğü şekil 7.13’de görülmektedir. Ele alınan fermentasyon için seri eliminasyon yöntemi ile elde edilen ki-kare dağılım tablosu incelendiğinde (Tablo 7.1) ise O₂ ölçümlerinde sistematik hata olduğu görülmektedir.

Tablo 7.1 : C6 fermentasyonu için ki-kare (chi-square) test değerleri

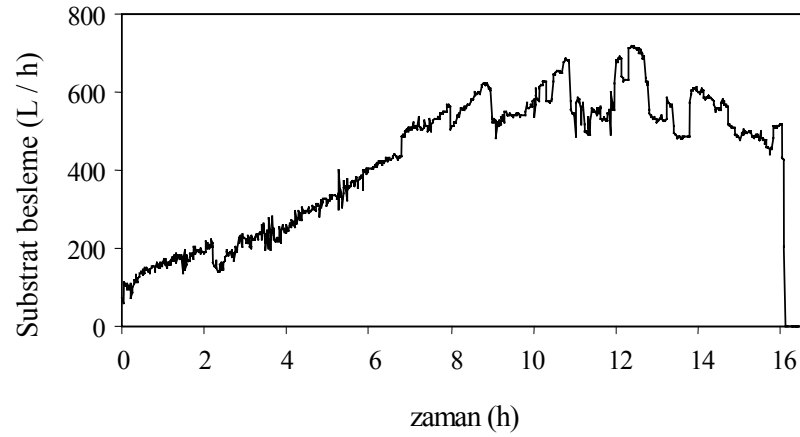
zaman (h)	-	CO ₂	O ₂	etanol	substrat	met. ısı
0	0	0	0	0	0	0
1	231	205	149	220	191	32
2	58	42	0	35	56	72
3	60	56	1	49	70	68
4	52	41	1	35	54	62
5	45	23	0	18	34	55
6	42	14	0	10	22	53
7	38	24	0	20	34	45
8	38	10	0	7	16	48
9	36	14	0	10	21	44
10	37	23	0	19	33	44
11	36	21	0	17	30	43
12	33	5	1	4	10	42
13	37	29	1	24	39	40
14	30	15	0	11	22	36
15	34	20	0	16	29	40
16	33	21	0	17	30	38

Özgül üreme hızının, kritik değeri (μ_c) aşması durumunda etanol oluşumu başlayacaktır. Deney fermentasyonlarında kontrol edilmeye çalışılan özgül üreme hızı set değerleri literatürde verilen kritik değerinin altında olmasına rağmen etanol oluşumu gözlemlenmiştir. Etanol oluşumu özgül üreme hızı kontrolünde istenmeyen bir durumdur, biyokütle oluşumuna harcanacak substrat etanole dönüştüğü için özgül üreme hızını azaltıcı bir etkiye de sahiptir. Etanol oluşumu başladığında özgül üreme hızı kontrolünün devam ettirilmesi fermentasyon prosesini kararsızlığa götürmektedir. Diğer bir deyişle, sisteme beslenen substrat büyük oranda etanole dönüşmekte, biyokütle oluşum hızı düşmekte ve substrat verimliliği azalmaktadır. Diğer taraftan sistemin kontroledilebilirliği için gerekli önkoşullar değiştiği içinde

kontroledilebilirlik ortadan kalkmaktadır. Endüstriyel ortamda bu durumda elde edilen proses çıktısı ürünlerin (biyokütle, ekmeek mayası) endüstriyel değeri de düşüktür. Kontrol deneylerinde bu tür bir durumlarla karşılaşılması ve bir deneye ait sonuçlar Şekil 7.13'te verilmiştir. Fermentasyon prosesinin 6. saatinden itibaren etanol oluşumu başlamıştır. Etanol oluşumu ile birlikte özgül üreme hızı kestirim değeri düşük hesaplanmaya başlanmıştır. Kontrolcü ifadeside bu düşmeyi giderecek şekilde substrat beslemesini arttırmaya başlamıştır. Ortamdaki substrat derişiminin artması etanol oluşumunu hızlandırmış ve özgül üreme hızı referans değeri zamanla azalmasına rağmen ortamdaki etanol derişimi artmaya devam etmiştir. Bu kısır döngü ile özgül üreme hızının kontrol edilebilirliği ortadan kalkmaktadır.



Şekil 7.14. C7 fermentasyonu etanol derişimi, özgül üreme hızı ve substrat besleme eğrileri.



Şekil 7.14.(devamı) C7 fermentasyonu etanol derişimi, özgül üreme hızı ve substrat besleme eğrileri.

Endüstriyel fermentasyon deneylerinde etanol oluşumu nedeni ile biyokütle/substrat verimliliği düşmekte ve etanol oluşumu ürün kalitesini düşürmektedir. Şekil 7.14'te verilen özgül üreme eğrisi incelendiğinde 6. saatte etanol oluşumu ile birlikte, özgül üreme hızı referans eğrisinden önemli farklılık görülmektedir. Substrat eğrisinde ise ciddi salınımlar ve substrat beslemesinde yüksek değerlere çıkıldığı görülmektedir.

Biyokütle/Substrat verimini yüksek elde etmenin yolu etanol oluşturmaksızın tamamen oksidatif ortamda biyokütle üremesinin sağlanmasıdır. Maya hücrelerinin ortamdaki substrat ve oksijeni kullanarak biyokütle oluşumunu belirleyen darboğaz'ın tamamının kullanıldığını belirlemek çeşitli yöntemlerle mümkündür. Ortamdaki substrat derişiminin ölçülmesi, çözülmüş oksijen derişiminin ölçülmesi veya etanol derişiminin ölçülmesi bu darboğazın ölçülmesi için birer yöntemdir. Fakat endüstriyel olarak substrat derişiminin ölçülmesi zor ve pahalı bir yöntemdir. Gaz fazında ölçüm ile sıvı ortamdaki etanol derişiminin ölçülmesi ve bu ölçümlere göre etanol derişiminin kontrol altına alınması son dönemde yapılan çalışmalarda öne çıkmaktadır (Chen, 1992, Canizzaro 2004).

Yukarıda da belirtildiği gibi özgül üreme hızı kontrolünde, oksidatif üreme koşullarının olması ve etanol olmaması gereklidir. Endüstriyel koşullarda bu iki şartın, çeşitli nedenlerden dolayı (ölçümlerin yanlışlığı, maya kültürünün farklılık arzemesi, substrat derişimindeki oynamalar gibi) her zaman kolaylıkla

sağlanamamaktadır. Bu sınırlandırmaları aşmanın ve biyokütle/substrat verimliliğini maksimize etmenin yolu etanol derişimi kontrolünden geçmektedir. Bundan sonraki bölümlerde endüstriyel fermentasyon ortamında etanol derişiminin kontrolü çalışılmıştır.

8. ENDÜSTRİYEL YARIKESİKLİ EKMEK MAYASI FERMENTASYONUNDA ETANOL DERİŞİMİ KONTROLÜ

Yarıkesikli maya fermentasyonlarının en önemli karakteristiklerinden biri de verimlilik ile biyokütle/substrat verimi arasındaki zıtlıktır. Kısaca açıklamak gerekirse, yüksek substrat besleme hızında genellikle yüksek biyokütle verimliliği elde edilirken etanol oluşumu biyokütle/substrat verimliliğini düşürmektedir. Bu durumun tersi de düşük substrat besleme hızı için sözkonusudur. Son yıllarda yapılan kontrol çalışmaları incelendiğinde, bu zıtlığı optimize etmede, substrat besleme hızı kullanılarak etanol derişiminin kontrolünün öne çıktığı görülmektedir (Cannizzaro 2004, Claes 1999, Keuler 1993).

Literatürde yeralan ve kaynaklarına ulaşılabilen kontrol çalışmaları, kontrol edilen değişkenler ve uygulanan kontrol teknikleri baz alınarak Tablo 8.1’de verilmiştir.

Etanol derişiminin doğrusal olmayan kontrolünde, geribesleme doğrusallaştırmalı kontrolcü tasarımında proses dinamik denklemlerine dayalı iki farklı yöntem kullanılmaktadır. Bu yöntemler,

- singular perturbation tasarımı ile doğrusallaştırmalı kontrolcü
- adaptif doğrusallaştırmalı kontrolcü tasarımı.

şeklinde yazılabilir. Geribesleme doğrusallaştırmalı yöntemlerde tasarımın başlangıç noktası bölüm 5’te verilen sisteme ait dinamik durum denklemleridir.

Tablo 8.1. Maya fermentasyonlarında uygulanan kontrol yöntemleri.

Kaynak	Ölçülen değişkenler	Kestirim değişkenleri	Kontrol edilen değişken	Yöntem
Keuler (1993)	O ₂ , CO ₂ , C _e	μ	μ	PI
Tham ve diğ. (2003)	-	μ	seyrelme hızı	kayan mod.
Beşli ve diğ. (1995)	O ₂ , CO ₂	C _x , C _e	RQ	bulanık kontrol
Chen (1992)	O ₂ , CO ₂ , C _e	C _x	C _e	adaptive doğrusallaştırma
Karakuzu ve diğ. (2006)	C _e , μ	C _x	F	bulanık kontrol
Cannizzaro ve diğ. (2004)	C _e	C _x	C _e	adaptif optimal
Wang ve diğ. (1977)	O ₂ , CO ₂	OUR, CPR, RQ	verim katsayı	Oransal (P) kont.
Axellson (1989)	C _e		C _e	PID
Claes (1999)	C _x	μ	μ	adaptive doğrusallaştırma
Oliveira (1998)	Substrat, CO ₂ , NH ₄	Karbon işaretçisi (presursor)	NH ₄	hybrid model (mekanistik + ANN)
Pomerleau ve Viel (1992)	C _e , O ₂ , CO ₂	OTR, CPR	C _e	adaptive doğrusallaştırma

Herbir proses durum değişkeni için denklem 5.36 ... 5.41 ile verilen dinamik durum denklemleri ele alınarak kontrolcü tasarımına başlanabilir. Denklem 5.36, ... 5.41'e kadar sırasıyla biyokütle, substrat, etanol, oksijen, karbondioksit ve seyrelme hızı için dinamik ifadelerdir. Dinamik denklemlerde yeralan verim katsayıları matris formunda gösterilerek denklikler tekrar yazılırsa,

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} X \\ S \\ E \\ O \\ C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ -Y_{X/S}^{ox} & -Y_{X/S}^{red} & 0 \\ 0 & Y_{X/E}^{red} & -Y_{X/E}^{eth} \\ -Y_{X/O}^{ox} & 0 & -Y_{X/O}^{eth} \\ Y_{X/C}^{ox} & Y_{X/C}^{red} & Y_{X/C}^{eth} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mu_x^{ox} \\ \mu_x^{red} \\ \mu_e^{ox} \end{bmatrix} X - D \begin{bmatrix} X \\ S \\ E \\ O \\ C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ DS_{in} \\ 0 \\ r_o \\ -r_c \end{bmatrix} \quad (8.1)$$

$$F^T = [0, DS_{in}, 0, r_o, 0] \quad , \quad Q^T = [0, 0, 0, 0, r_c] \quad , \quad \zeta^T = [X, S, E, O, C]$$

$$K = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ -Y_{X/S}^{ox} & -Y_{X/S}^{red} & 0 \\ 0 & Y_{X/E}^{red} & -Y_{X/E}^{eth} \\ -Y_{X/O}^{ox} & 0 & -Y_{X/O}^{eth} \\ Y_{X/C}^{ox} & Y_{X/C}^{red} & Y_{X/C}^{eth} \end{bmatrix} \quad (8.2)$$

Burada verilen verim katsayılarının zamanla değişmediği kabul edilmektedir. Çok sayıda diferansiyel denklem içeren proseslerde singular perturbation yöntemi ile sadeleştirme yapılarak (n+m) adet diferansiyel denklemden oluşan yapı, n adet diferansiyel denklem ve m adet cebirsel ifadeye dönüştürülür. Bu yöntem özellikle biyoproseslerde sıvı ortamda farklı çözünürlüklere sahip bileşenlerin dinamiklerinin ihmal edilmesiyle, karmaşık olmayan çözümlere ulaşılmasını sağlar.

8.1. Singular Perturbation Tasarımı ile Doğrusal Olmayan Kontrolcü Tasarımı

Bu yöntem aynı zamanda indirgenmiş yöntem olarak ta adlandırılmaktadır. Bu yöntemde durum değişkenleri hızlı ve yavaş değişen durum değişkenleri olarak ikiye ayrılır. Sistem durum değişkenleri vektörü ile verim katsayılar matrisi yavaş ve hızlı değişen durumlar olarak ayrıştırılırsa, yavaş değişen durumlar $\zeta_S^T = [X, E]$ ile ve hızlı değişen durumlar $\zeta_F^T = [S, O, C]$ ile gösterilir. Benzer şekilde denklem 8.8 ile gösterilen verim katsayılar matrisi $K = [K_S, K_F]$ şeklinde gösterilebilir.

Hızlı değişen durumların dinamiklerinin singular perturbation indirgemesine izin verdiği kabulü yapılarak dinamik durum denklemleri yeniden yazılırsa,

$$\frac{d\zeta_S}{dt} = K_S \varphi - D \zeta_S + F_S - Q_S \quad (8.3)$$

$$K_F \varphi + F_F - Q_F = 0 \quad (8.4)$$

denklem 8.3 ile yavaş değişen durum değişkenlerine ait dinamik ifade ve denklem 8.4'le da hızlı değişen durumlar için cebirsel ifade elde edilmiş olur. Çıkış ifadesi sadece yavaş değişen durumlardan oluşmaktadır.

$$y = C_S^T \xi_S \quad (8.5)$$

Hızlı değişen durumlara ait verim katsayısı matrisinin rankı boyut sayısına eşitse reaksiyon hızları denklem 8.4'ün ters alınarak hesaplanabilir.

$$\varphi = -K_F^{-1} (F_F - Q_F) \quad (8.6)$$

Denklem 8.6 ile elde edilen reaksiyon hız ifadesi denklem 8.3'de yerine konulursa,

$$\frac{d\xi_S}{dt} = -D\xi_S + [I_{N \times M} - K_S K_F^{-1}] (F - Q) \quad (8.7)$$

elde edilir. $J = [I_{N \times M} - K_S K_F^{-1}]$ ile gösterilerek çıkış dinamiği yazılırsa denklem 8.8 elde edilir.

$$\frac{dy}{dt} = -Dy + C_S^T J (F - Q) \quad (8.8)$$

Yeni durumda indirgenmiş giriş/çıkış modeli aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\frac{dy}{dt} = -Dy + C_S^T Jbu + C_S^T J (F - Q) \quad (8.9)$$

İzleme hatası için birinci dereceden referans model seçilirse,

$$\frac{d}{dt}(y^* - y) + \lambda (y^* - y) = 0 \quad (8.10)$$

ve denklem 8.9 ile elde edilen ifade denklem 8.10'da yerine konursa doğrusallaştırılmış kontrolcü ifadesi 8.11 eşitliğindeki gibi elde edilir (Bastin ve Dochain, 1990).

$$u(y, y^*, f, Q) = (C_S^T J b)^{-1} \left[\frac{dy^*}{dt} + \lambda (y^* - y) + D y + C_S^T J (Q - F) \right] \quad (8.11)$$

Buraya kadar teorisini verilen yöntem ekmeğın mayası fermentasyonu prosesine uygulanmıştır.

Yarıkesikli ekmeğın mayası fermentasyonu için hızlı değışen durum değışkenleri olarak substrat, oksijen ve karbondioksit seçilmiştir. Denklem 8.1 ile ifade edilen dinamik durum denklemleri buna göre düzenlenerek, hızlı değışen durumlar için dinamik denklem

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} S \\ O \\ C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -Y_{X/S}^{ox} & -Y_{X/S}^{red} & 0 \\ -Y_{X/O}^{ox} & 0 & -Y_{X/O}^{eth} \\ Y_{X/C}^{ox} & Y_{X/C}^{red} & Y_{X/C}^{eth} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mu_s^{ox} \\ \mu_s^{red} \\ \mu_e^{ox} \end{bmatrix} X - D \begin{bmatrix} S \\ O \\ C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} DS_{in} \\ r_o \\ -r_c \end{bmatrix} \quad (8.12)$$

şeklinde ve denklem 8.12 kalıcı durumda sıfıra eşit olduğu kabulü yapılacaktır. Yavaş değışen durum değışkenleri ise biyokütle ve etanol derişimidir ve bunlara ait dinamik denklemler denklem 8.13 ile verilmiştir.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} X \\ E \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 0 & Y_{X/E}^{red} & -Y_{X/E}^{eth} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mu_s^{ox} \\ \mu_s^{red} \\ \mu_e^{ox} \end{bmatrix} X - D \begin{bmatrix} X \\ E \end{bmatrix} \quad (8.13)$$

Denklem 8.12 sıfıra eşitlenir ve çözülrse kinetik hızlar elde edilir.

$$\begin{bmatrix} \mu_s^{ox} \\ \mu_s^{red} \\ \mu_e^{ox} \end{bmatrix} = -K_F^{-1} \begin{bmatrix} DS_{in} \\ r_o \\ -r_c \end{bmatrix} \quad (8.14)$$

Kinetik hızların elde edilebilmesi için K_F 'in tersinin alınabilmesi gereklidir. Modelde kullanılan verim katsayıları Tablo 8.2'de verilmiştir.

Tablo 8.2. Modelde kullanılan verim katsayıları.

$k_1, Y_{X/S}^{ox}$	3.65 Cmol/mol	$k_2, Y_{X/S}^{red}$	0.36 Cmol/mol
$k_3, Y_{X/E}^{red}$	0.19 Cmol/mol	$k_4, Y_{X/E}^{eth}$	1.35 Cmol/mol
$k_5, Y_{X/O}^{ox}$	1.56 Cmol/mol	$k_6, Y_{X/O}^{eth}$	0.83 Cmol/mol
$k_7, Y_{X/C}^{ox}$	1.45 Cmol/mol	$k_8, Y_{X/C}^{red}$	0.2 Cmol/mol
$k_9, Y_{X/C}^{eth}$	1.99 Cmol/mol		

K_F 'in tersi aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

$$\det(K_F) = k_7 k_2 k_6 - k_1 k_8 k_6 - k_2 k_5 k_9$$

$$K_F^{-1} = \frac{1}{(\det K_F)} \begin{bmatrix} k_6 k_8 & k_2 k_9 & k_2 k_6 \\ (k_5 k_9 - k_6 k_7) & -k_1 k_9 & -k_1 k_6 \\ -k_5 k_8 & (k_1 k_8 - k_2 k_7) & -k_2 k_5 \end{bmatrix}$$

Denklem 8.13, 8.12 eşitliğinde yerine konursa,

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} X \\ E \end{bmatrix} = -D \begin{bmatrix} X \\ E \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 0 & k_4 & -k_3 \end{bmatrix} * \text{inv}(K_F) \begin{bmatrix} DS_{in} \\ r_o \\ -r_c \end{bmatrix} \quad (8.15)$$

elde edilir. Aşağıdaki kısaltmalar kullanılarak etanol derişimi kontrolcüsüne ait dinamik ifade 8.16'daki gibi yazılabilir.

$$\psi = \det(K_F) = (k_7 k_6 k_2 - k_5 k_9 k_2 - k_1 k_8 k_6)$$

$$\theta_1 = (-k_4 k_1 k_6 + k_3 k_2 k_5) \psi^{-1}$$

$$\theta_2 = (-k_4 k_1 k_9 + k_3 k_2 k_7 - k_3 k_1 k_8) \psi^{-1}$$

$$\theta_3 = (k_4 k_5 k_9 - k_4 k_6 k_7 + k_3 k_5 k_8) \psi^{-1}$$

$$\frac{dE}{dt} = -DE + \theta_3 DS_{in} + \theta_2 r_o - \theta_1 r_c \quad (8.16)$$

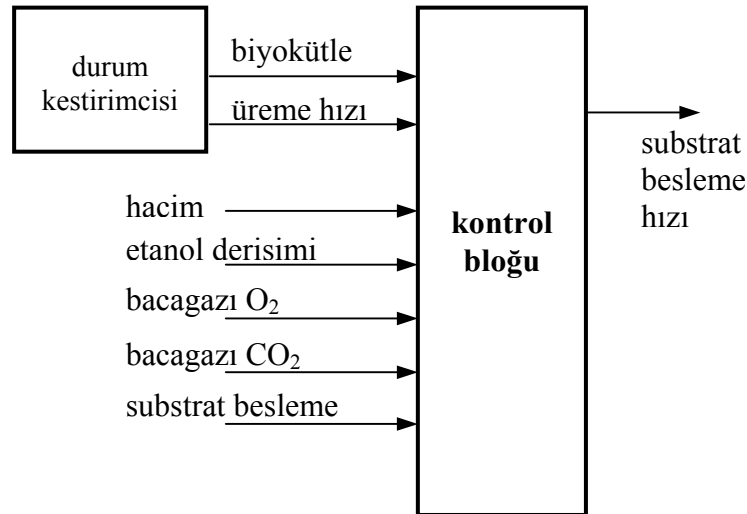
İzleme hatası (tracking error) için birinci dereceden referans model seçilerek (denklem 8.10), denklem 8.16 burada kullanılırsa F_s substrat besleme hızı denklem 8.17'deki gibi yazılabilir.

$$F_s = \frac{1}{\theta_3} \left\{ \frac{dE^*}{dt} + \lambda_1(E_s - E) + D E + \theta_1 r_c - \theta_2 r_c \right\} \quad (8.17)$$

şeklinde elde edilir (Bastin ve Dochain, 1990). Burada E , E_s terimleri ise etanol derişimi ve etanol derişimi set değerini göstermektedir.

8.2. Etanol Derişimi Kontrolü Deneysel Çalışmaları

Bölüm 8.1'de teorisi verilen singular perturbation tasarımı geliştirilen etanol derişimi kontrolcüsü, daha önceki kontrol deneylerinde olduğu gibi 25 m³'lük fermentöre uygulanmıştır. Bu bölümdeki kontrol deneylerinde, durum değişkenleri için elde edilen kestirimler kullanılmıştır. Etanol derişimi kontrolü için öngörülen kontrol yapısı Şekil 8.1'de verilmiştir. Verilen kontrol mimarisinin bilgisayar ortamında gerçekleştirildiği program mimarisi Şekil 8.2'de verilmiştir.



Şekil 8.1. Etanol derişimi kontrol mimarisi şematik gösterimi.

Tüm kestirim ve kontrol algoritmaları Nematron Paragon V5.4 programında çevrimiçi gerçekleştirilmiştir.

Şekil 8.1’de gösterilen durum kestirimcisinden elde edilen biyokütle derişimi ve özgül üreme hızı dışındaki tüm ölçümler procesten alınmaktadır. Etanol kontrol programında birinci dereceden iki farklı referans modeli üzerinde çalışılmıştır. Bu referans modeller;

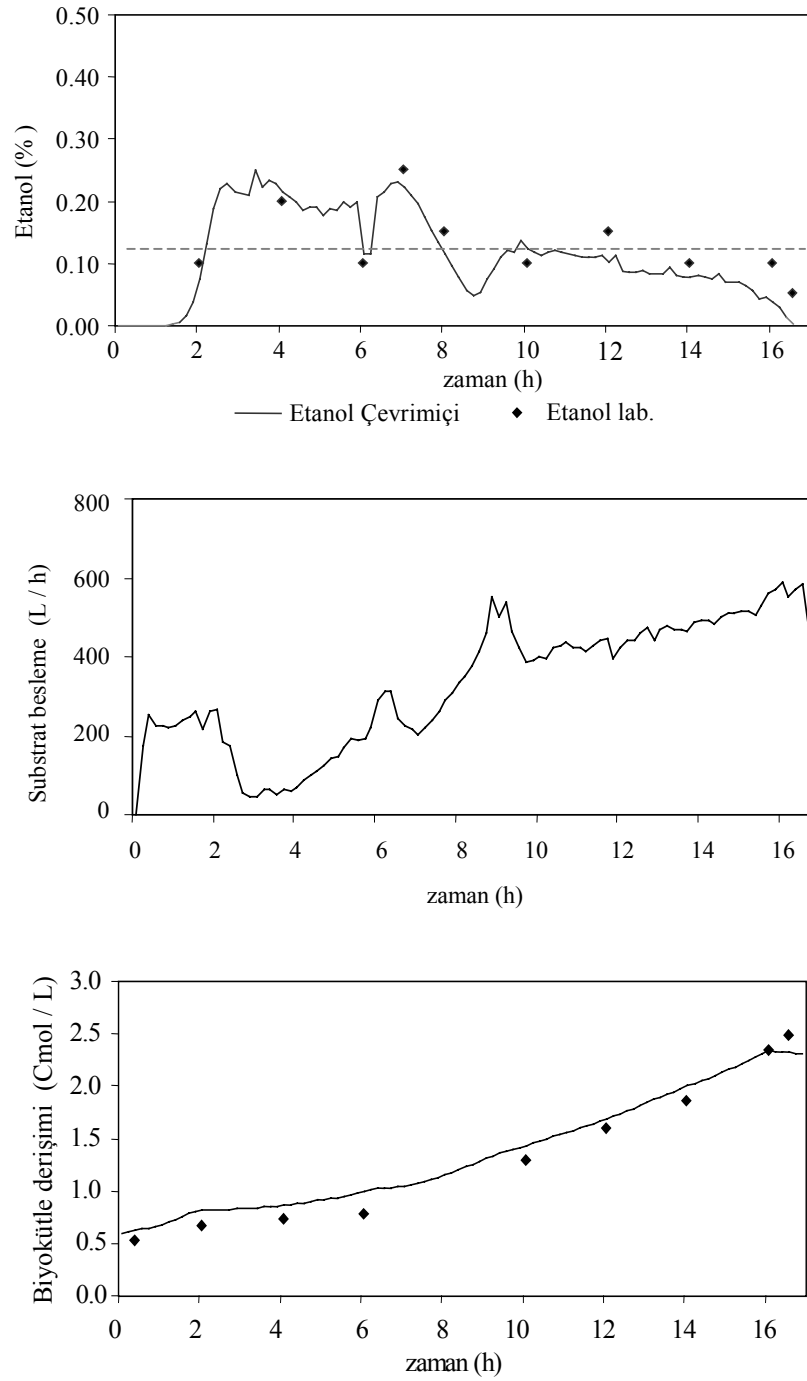
$$\frac{d}{dt}(y^* - y) + \lambda(y^* - y) = 0 \quad (\lambda > 0) \quad (8.18)$$

$$\frac{d}{dt}(y^* - y) + (\lambda_1 + \lambda_2 x)(y^* - y) = 0 \quad (\lambda_1, \lambda_2 > 0) \quad (8.19)$$

şeklinde gösterebilir. Kontrol deneylerinde sıcaklık, pH ve hava debisi besleme kontrolleri kapalı döngü öngörülen değerlere göre kapalı döngü kontrolcülerle yapılmıştır. Etanol derişimi kontrol deneyleri, D gurubu kontrol deney fermentasyonları olarak isimlendirilmiştir.

Tek bir ayar parametresinin kullanıldığı ve denklem 8.18 ile verilen referans modelin uygulandığı bir deney fermentasyonuna ait sonuçlar Şekil 8.3’te verilmiştir. Sonuçları verilen kontrol deneyinde, etanol derişimi kontrolcüsü, fermentasyonun prosesinin 2. saatinde kontrole başlatılmıştır. Fermentasyon prosesinin ilk saatlerinde, ortamda yeterli oksijen olması ve fazla substrat olmaması nedeni ile ortamda etanol derişimi çok düşük ölçülmektedir. Bu koşullarda etanol derişim kontrolcüsü substrat derişimini, istenen etanol set değeri, bacagazı ölçümleri ve ayar parametresi ile uyumlu olarak arttırmaktadır. Proceste etanol derişimi ölçülmeye başladığında ise substrat derişimi istenen set değerine göre ayarlanmaktadır.

D1 deney fermentasyonunda, tüm fermentasyon boyunca sabit etanol derişimi hedeflenmiştir ve bu değer $E_{set} = \% 0.12$ olarak belirlenmiştir. Şekil 8.3'te verilen biyokütle eğrisi incelendiğinde kestirim sonuçlarının laboratuvar ölçümleriyle örtüştüğü görülmektedir.

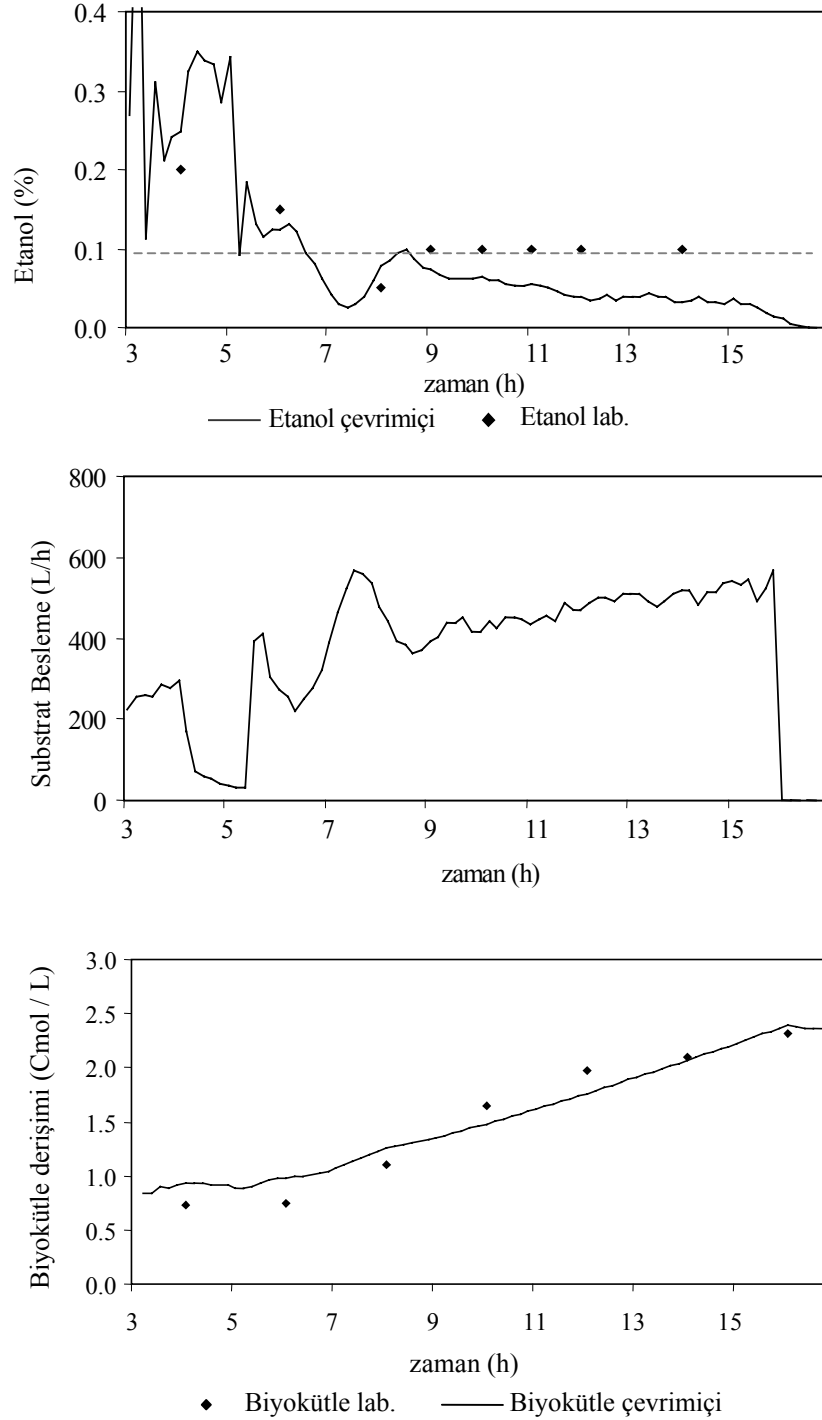


Şekil 8.3. D1 fermentasyonu etanol derişimi, substrat besleme ve biyokütle derişimi eğrileri.

Fermentasyon prosesinin başlaması ile birlikte kontrol algoritması çalıştırılmıştır. Başlangıçta fermentasyon ortamında etanol gözlemlenmemesi nedeni ile kontrolcü, substrat beslemesini hızla arttırmıştır ve ortamdaki etanol derişimi % 0.25 değerine ulaşmıştır. Sonuçları Şekil 8.3'de verilmiş fermentasyonda üssel üreme evresi ve sonraki sabit üreme evresinde farklı λ katsayıları kullanılmıştır. Prosesin bu evrelerdeki farklı davranışı (darboğaz prensibinin neden olduğu), yarıkesikli fermentasyonun süre sınırlaması ve oksijen transferinde karşılaşılan sınırlamalar her iki evrede farklı katsayılar kullanılmasını zorunlu kılmıştır. Bu deneyde üssel üreme evresinde $\lambda =16$, daha sonra ise $\lambda =25$ olarak seçilmiştir. Fermentasyonun üssel üreme evresinde seçilen ayar parametresinin tüm proses boyunca kullanılması durumunda fermentasyon ilk saatlerinde gözlemlenen fazla miktardaki etanolün oluşumu engellenmekte fakat ilerleyen istenen referans derişim değerinin kontrolü zorlaşmaktadır. Sabit üreme evresinde, üssel üreme evresine göre daha farklı (büyük) bir λ parametresi kullanılarak istenen derişim kontrol edilebildiği gözlemlenmiştir. Diğer taraftan uygulamada fermentasyon süresinin sabit (çeşitli endüstriyel sınırlamalardan dolayı) ve oksijen transferinin kısıtlı olması, λ ayar parametresinin izleme hatasına hızla etkiyecek şekilde seçilmesini gerektirmektedir. Dolayısıyla etanolün hızla oluşumu, tüketilmesi ve istenen referans değerinde tutulmasındaki zorluk ayar parametresinin seçimi ve proses kısıtlamalarından kaynaklanmaktadır.

Kontrol deneylerinde karşılaşılan bir diğer problem ise çevrimiçi etanol ölçüm cihazına olan (doğru ve hassas ölçüm yapması zorunluluğu) bağımlılıktır. Ölçüm cihazının yanlış değerler okuması kontrol programının öngördüğü substrat beslemesinde önemli farklılıklar oluşturmakta, kestirimleri ve proses davranışını modellemede hatalara sebep olmaktadır. Olası ölçme hatalarını en aza indirgenmesi amacıyla etanol ölçüm cihazı her bir deney fermentasyonu öncesinde laboratuarda hazırlanan çözeltilerle kalibre edilmiştir. Deneyler sırasında karşılaşılan etanol ölçme problemleri bir fermentasyona ait sonuçlar Şekil 8.4'te verilmiştir. Burada etanol ölçüm cihazının yanlış değerler okuduğu laboratuvar analizleri ile karşılaştırıldığında tespit edilmiş ve cihaz tekrar kalibre edilmiştir (fermentasyonun 5. saatinde). Kalibrasyon sonrası proses kararlı bir şekilde ilerlemiştir. Fakat fermentasyon başlangıcında substrat beslemesinin büyük salınımlı şekilde öngörülmesi, etanol

cihazının tekrar kalibre edilip prosesin yatışkın duruma dönmesi için geçen süre zarfında proseste fazla miktarda etanol oluşmuştur.



Şekil 8.4. D2 fermentasyonu etanol derişimi, substrat besleme, biyokütle derişimi eğrileri.

Şekil 8.4'te etanol eğrisinde görüldüğü gibi fermentasyonun 4. saatinde % 0.2'nin üzerinde bir etanol hem çevrimiçi hemde laboratuvar ölçümlerde gözlenmiştir. Çevrimiçi ölçümler % 0.4 seviyesinde olduğu içinde substrat beslemesi çok düşük değerlere düşmüştür. Etanol ölçüm cihazının fermentasyonun 5. saatinde kalibrasyonundan sonra etanol ölçümleri doğru değerler göstermeye başlamış ve substrat beslemesi de, etanol set değerine göre zaman içinde λ katsayısıyla orantılı artarak devam etmiştir. Bu deneyin 3. saatinde bilgisayar sistemindeki bir problemten dolayı deney kesintiye uğramış ve kontrol deneyi tekrar başlatılmıştır bundan dolayı grafiklerde de bundan sonraki veriler sunulmuştur. Deneyde kontrol edilmek istenen etanol derişimi set değeri $E_{set} = \% 0.1$ olarak seçilmiştir.

Burada ele alınan her iki fermentasyon deneyinde benzer kontrol algoritması işlemesine rağmen D2 deneyinde, fermentasyon sonunda yapılan verim ve kalite analizlerinin D1 deney fermentasyonuna göre daha kötü olduğu görülmüştür. Fermentasyon sonunda elde edilen biyokütle miktarının fermentöre beslenen substrat miktarına oranı sonucu elde edilen verim değeri D1 deneyi için %97 iken, D2 deneyinde bu değer % 89 hesaplanmıştır. Benzer farklılık mayaların kalite göstergesi olan ve aktivite ölçümü olarak adlandırılan kalite ölçümlerinde de gözlenmiştir.

Gerçekleştirilen fermentasyon deneylerinin ilk saatlerinde ortamda etanolün gözlenmediği, üssel üreme evresinde tamamen oksidatif ortamda doğrusal olmayan kontrolcü substrat beslemesi, λ ayar parametresi ile orantılı olarak sürekli arttırdığı gözlenmiştir. Metabolizamanın etanol üretimi, belli bir zaman gecikmesi ile olmaktadır. Bu nedenden dolayı fermentasyon ortamında etanol gözlemleninceye kadar kadar geçen süre zarfında ortama verilen substrat, etanol derişiminin hızla yükselmesine neden olmaktadır. Etanol derişiminin hızla oluşumunu müteakip kontrol programı bu yeni durumda substrat beslemesini hızla kısmakta ve proseste substrat beslemesinde ciddi salınımlar görülmektedir. Bu salınım sonrasında istenen etanol derişimi set değerine yaklaşılmaktadır. Burada sonuçları verilen her iki fermentasyonda bu durum açıkça görülmektedir.

Deney fermentasyonlarında etanol derişiminin kontrolünü daha iyi gerçekleyebilmek için denklem 8.24 ile verilen referans modeli (Bastin ve Dochain, 1990) yerine yeni

bir referans model tanımlamasına gidilmiştir. Bu referans model denklem 8.19 ile verilmiştir (Chen, 1992). Burada biyokütle derişimindeki artış ile paralel olarak kontrolcü dinamiğininde hızlandırılması hedeflenmiştir. Bu model, iki farklı geribesleme doğrusallaştırmasının farklı ölçeklerde ağırlıklandırılması olarak görülebilir. Bu yeni referans model ifadesi Denklem 8.20’de yerine konursa, yeni durumda F_s substrat besleme ifadesi

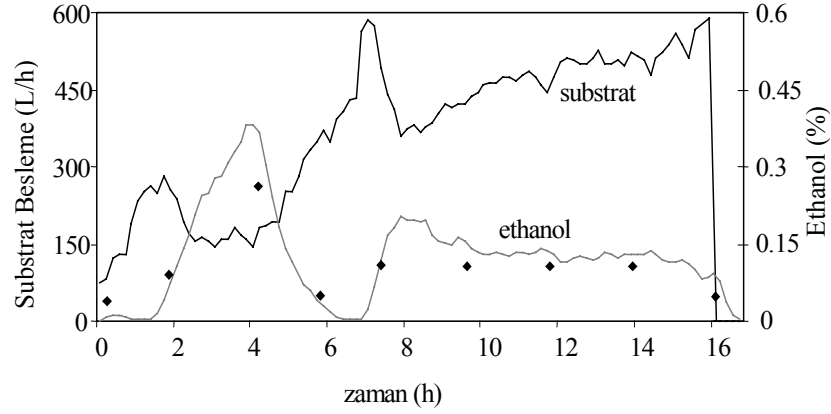
$$F_s = \frac{I}{\theta_3} \left\{ \frac{dy^*}{dt} + (\lambda_1 + \lambda_2 \hat{X})(E_s - E) + D E + \theta_1 r_c - \theta_2 r_o \right\} \quad (8.20)$$

şeklinde hesaplanacaktır ki bu denklemde de çevrimiçi biyokütle kestirim değerleri kullanılmaktadır.

Denklem 8.20 ile verilen kontrolcü ifadesinin kullanıldığı bir deney fermentasyonuna (D3 fermentasyonu) ait sonuçlar Şekil 8.5 ve 8.6’da verilmiştir. Burada yapılan kontrol deneylerinde üssel üreme evresi ve sabit üreme evresinde farklı λ_1, λ_2 katsayıları kullanılmıştır. D3 fermentasyonunda etanol set değeri % 0.15 olarak çalışılmıştır ve fermentasyon başlangıcı ile birlikte kontrolcü çalıştırılmıştır. Etanol cihazı ölçüm değerleri, laboratuvar analizleri ile uyumlu elde edilmiştir. Şekil 8.5’te substrat besleme-etanol derişimi grafiği incelendiğinde, fermentasyon başlangıcında ortamda etanol olmadığı için kontrol programı etanol okununcaya kadar substrat beslemesini arttırmaktadır, bu evrede $\lambda_1 = 20, \lambda_2 = 8$ değerleri kullanılmıştır. Hızlı etanol oluşumu ile birlikte, substrat beslemesi kısılmakta ve ayar parametreleri ile ölçümlerle ilişkili olarak besleme yapılmaktadır. Etanol ölçüm değerleri, istenen set değerinin çok üzerine çıktığında ise substrat beslemesi önemli oranda kısılmıştır. Daha sonra prosesin 4. saatinden itibaren ortamdaki etanol derişiminin düşerken, substrat beslemesi artım yönünde gerçekleştirilmiştir.

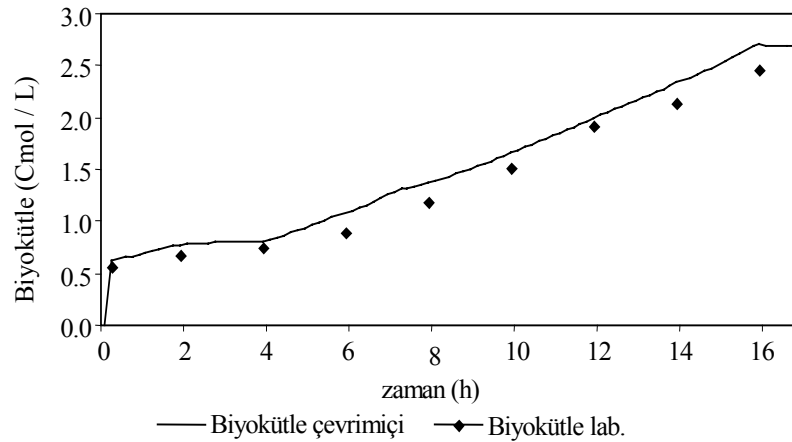
Prosesin 4. saatinden 6. saatine kadar geçen süre içinde ortamdaki etanolün azalmasına karşın substrat besleme değeri 400 L/h ‘e ulaşmasına rağmen prostesten etanol okunmaması üzerine fermentasyonun 7. saatinde $\lambda_1 = 30, \lambda_2 = 12$ değişikliği

yapılmıştır. Bu değişiklik sonucu substrat beslemesi program tarafından hızlı bir şekilde artırılmış ve etanol derişimi okunmaya başlanması ile birlikte karalı bir değere oturmuş ve deney sonuna küçük salınımlarla artarak devam etmiştir.



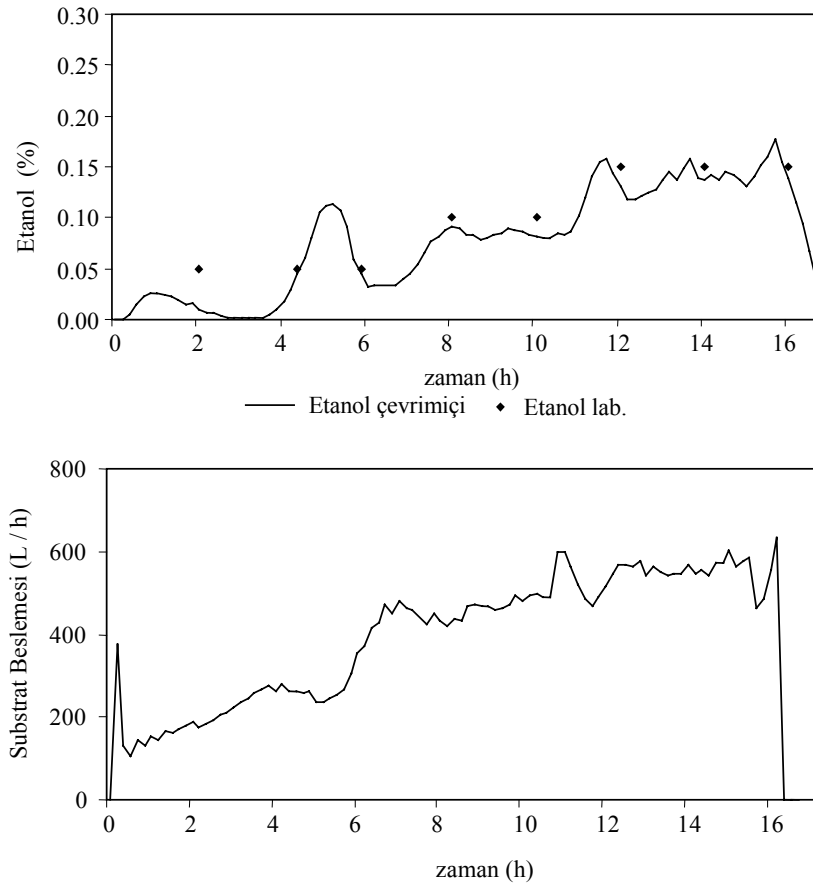
Şekil 8.5. D3 fermentasyonu etanol derişimi ve substrat besleme eğrileri.

Model kontrolcüsü, son girilen parametre değerleri ile fermentasyon sonuna kadar etanol derişimini istenen etanol set değerinde kontrol etmiştir. Çevrimiçi etanol ölçümlerinin, laboratuvar ölçümleriyle örtüştüğü Şekil 8.5'de görülmektedir. Burada procesteki etanol oluşumunun bir zaman gecikmesi ile başladığıda görülmektedir. Etanol derişim kontrolünde, kontrolcü ifadesinde kullanılan biyokütle kestirimleri ve laboratuvar ölçümleri ise Şekil 8.6'da verilmiştir.



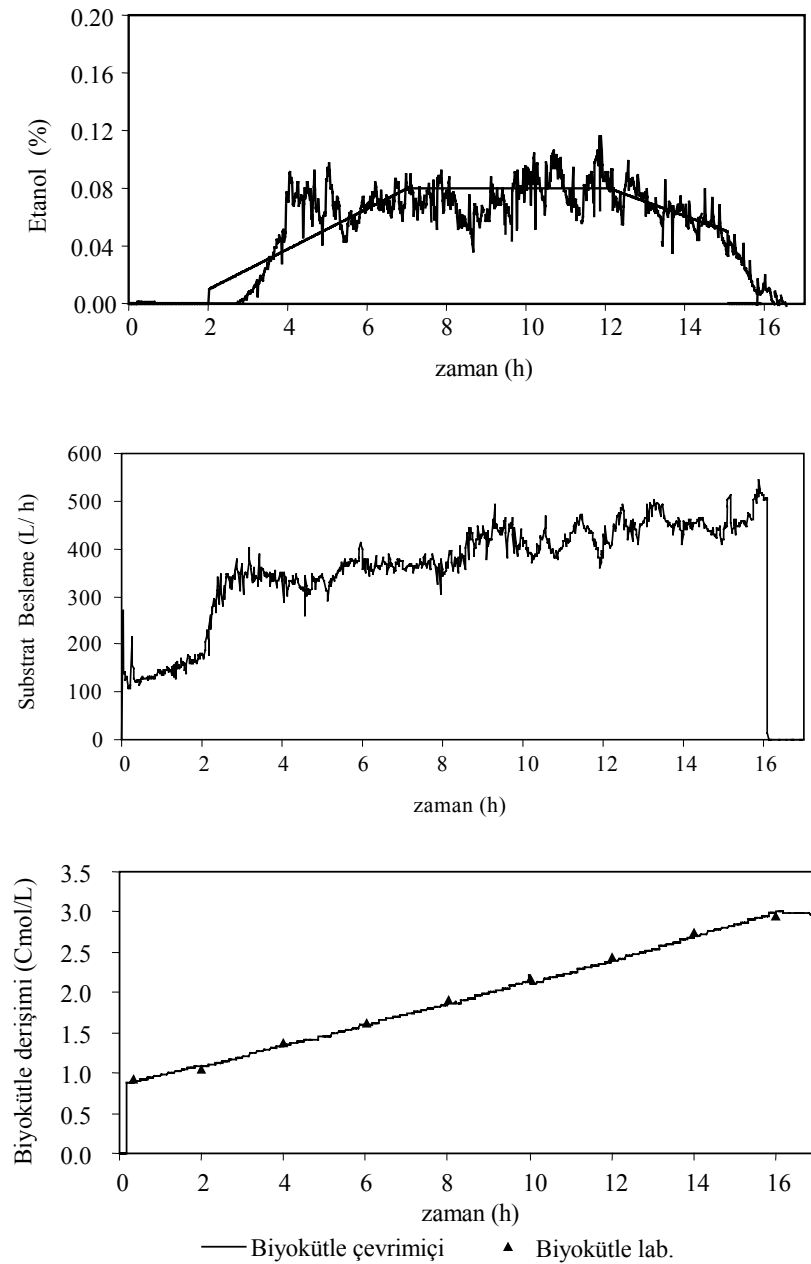
Şekil 8.6. D3 fermentasyonu çevrimiçi ve laboratuvar biyokütle derişimi ölçümleri.

Kontrol algoritması benzer λ_1 , λ_2 parametreleri ve başlangıç koşullarında başka bir fermentasyona (D4 deneyi) daha uygulanmıştır. Bir önceki deneyden farklı olarak, kontrol programı fermentasyonun üçüncü saatinde % 0.1 etanol derişim set değeri ile başlatılmıştır. Fermentasyonun onbirinci saatinde etanol set değeri % 0.15'e alınmıştır. Elde edilen etanol derişimi sonuçları Şekil 8.7'de verilmiştir. Prosesten elde edilen etanol grafiği incelendiğinde, kontrolün başlamasından itibaren hızla artan bir etanol derişimi gözlenmekte, set değeri aşıldığında bu aşmayı düzeltecek yönde bir substrat beslemesi ile ortamdaki etanol derişimi kontrol edilmeye çalışılmış ve prosesin 8. saatinden itibaren istenen değerde etanol derişimi kontrol edilmiştir. Prosesin 11. saatinde ise etanol derişimi set değeri % 0.15'e yükseltilmiştir. Kontrolcü ifadesi bu set değeri değışikliğine göre uygun bir çıkış üreterek substrat beslemesini arttırmış ve set değeri değışiminden bir saat sonra ortamdaki etanol derişimi istenen değerde kontrol edilmeye başlanmıştır.



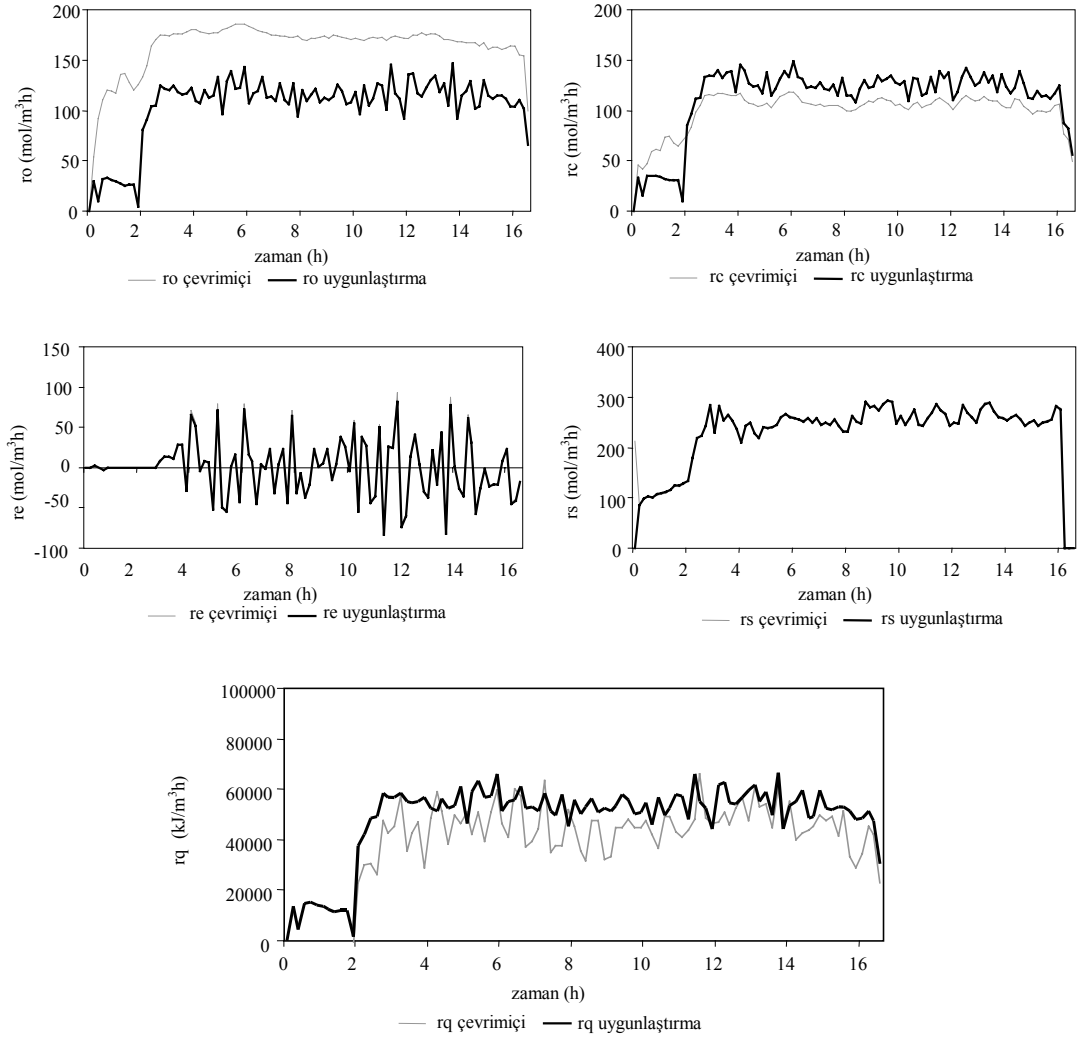
Şekil 8.7. D4 fermentasyonu etanol derişimi ve substrat besleme eğrileri.

Denklem 8.26 kontrolcü ifadesi ile gerçekleştirilen kontrol denemelerinin (D3 ve D4 deney fermentasyonları) sonuçları incelendiğinde, elde edilen sonuçlar endüstriyel koşullarda başarılı kabul edilebilir. Buraya kadar yapılan etanol derişimi kontrol denemelerinde sabit set değeri kontrol edilmeye çalışılmıştır. Doğrusal olmayan kontrolcünün davranışının zamanla değışen etanol profilinde test edilmesi için benzer başlangıç koşullarında (aşı miktarı, ilk hacim ve substrat derişiminde) kontrol deneyi tekrarlanmıştır (D5 fermentasyonu).



Şekil 8.8. D5 fermentasyonu etanol derişimi, substrat ve biyokütle derişimi sonuçları.

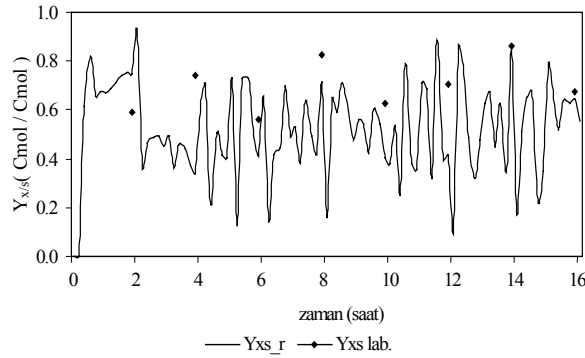
Fermentasyonun ilk saatinde substrat beslemesi, açık döngü özgül üreme hızı profil kontrolüne göre hesaplanmıştır. Etanol derişimi kontrol değeri, çok düşük bir profil değerinden zamanla artarak 7. saat sonunda % 0.08 değerine çıkarılmış, bu değerde 5 saat boyunca sabit götürülmüş ve daha sonra yine zamanla azaltılarak fermentasyon sonunda ortamdaki etanol derişimi sıfırlanmıştır (Şekil 8.8’de düz çizgi ile gösterilmiştir). Substrat besleme eğrisi incelendiğinde, doğrusal olmayan kontrolcü çalışmaya başladığında ortamdaki etanol derişiminin sıfır olması nedeni ile besleme artma yönünde ilerlemektedir. Etanol derişiminin gözlenmeye başlanması ile substrat beslemesi azaltılarak/arttırılarak istenen profil değerinde kontrol edilmeye devam edilmiştir. Tüm kontrol evresi boyunca, ayar parametreleri sabit tutulmuştur.



Şekil 8.9. D5 deney fermentasyonunda ölçülen ve hesaplanan çevrimiçi ve uygunlaştırılmış hacimsel hızlar.

D5 deney fermentasyonunda, çevrimiçi olarak üretilen uygunlaştırılmış hız değerlerine ait eğriler Şekil 8.9’da verilmiştir. Bacagazı oksijen derişimi ölçümlerinden hesaplanan, oksijen tüketim hızına ait hız değerlerinde yapılan uygunlaştırma, diğer hızlara göre daha fazla olduğu görülmektedir. Yapılan tüm uygunlaştırmalar, veri artıklığı kullanılarak fazla ölçümler ve kütle denkliliği kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Endüstriyel maya fermentasyonu prosesi için kullanılmış olan ölçüm cihazlarının güvenli, doğru, tekrarlanabilir değer üretmesi ve çok pahalı ölçüm cihazları olmaması, model esaslı kestirimlerin çok başarılı olmasını sağlamıştır. Yüksek doğrulukla ölçümü ve/veya kestirimi yapılan biyolojik proses değişkenlerinin (etanol derişimi, biyokütle derişimi, özgül üreme hızı) model esaslı kontrol uygulamalarında kullanımı ise kontrolcülerinin performanslarını ve etkinliğini güven altına almaktadır.



Şekil 8.10. D5 deney fermentasyonunda ölçülen ve hesaplanan verim katsayısının zamanla değişimi.

Fermentasyondan ölçülen ve laboratuvar analizleri ile doğrulanan biyokütle/substans verimi (Y_{xs} verim katsayısı) değişimi Şekil 8.10’te verilmiştir. Ölçülen verimler ve laboratuvar sonuçları hem örtüşmekte ve hemde literatürde verilen 0.5 (g/g) değerine uygundur.

Çevrimiçi ölçümler ve dolayısıyla hızlarda varolan hataları ve hangi ölçümde hata olduğunun belirlenmesi için ki-kare testi D5 deney fermentasyonu ölçümlerine uygulandığında elde edilen test değerleri aşağıda Tablo 8.3’te verilmiştir. Tablo

incelendiğinde bacagazı oksijen ölçümlerinde hata olduğu, hem test değerlerinde ve hemde Şekil 8.9’da verilen oksijen tüketim hızı ölçüm grafiklerinde görülmektedir.

Tablo 8.3’de saatlik ki-kare test değerleri verilmiştir. İkinci kolonda yer alan normal ki-kare test değerleridir ve 3 serbestlik dereceli bir sistem öngörülen değerler dışındadır. Daha sonra modelde, ölçülebilenler tarafında yeralan bir bileşenin ölçülemediği kabulü ile test tekrarlandığında oksijen ölçümü çıkarıldığında elde edilen test değerlerinin çok düştüğü gözlenmiştir. Bu düşüş oksijen ölçümlerinde sistematik bir hatanın mevcudiyetini göstermektedir. Bu hatalı ölçümlerin, kestirim modelinde yanlış sonuçlar üretilmesini engellemek için çevrimiçi ölçümlerden elde edilen hızlar yerine, uygunlaştırılmış hızlar kullanılmıştır.

Tablo 8.3: D-5 fermentasyonu için ki-kare test değerleri

zaman (h)	-	CO ₂	O ₂	etanol	substrat	met. Isı
0	0	0	0	0	0	0
1	216	202	134	214	193	41
2	295	215	183	241	181	33
3	21	11	0	8	16	23
4	30	34	9	31	40	15
5	14	7	0	6	11	14
6	11	3	0	2	4	13
7	25	14	0	11	20	29
8	47	5	3	3	10	59
9	28	25	2	21	33	26
10	29	8	0	6	13	36
11	15	9	0	7	13	16
12	50	8	3	5	15	64
13	15	7	0	5	10	17
14	48	8	2	5	15	61
15	10	4	0	3	6	12
16	30	27	2	23	36	27

8.3. Endüstriyel Çözüm Önerisi

Buraya kadar yapılan tüm kontrol deney fermentasyonlarında ele alınan kontrol yöntemlerinin endüstriyel fermentasyonlardaki sonuçları ve etkinliği incelenmiştir. Tablo 8.1’de verilen yöntemler incelendiğinde, maya fermentasyonlarında yapılan

kontrol amaçlı çalışmalarda kontrol değişkeni olarak özgül üreme hızı ve etanol derişiminin öne çıktığı görölmektedir.

Bu tez çalışmasında özgül üreme hızının zamanla değişen profil kontrolünde, model çıktısının belirlenmesinde kayan ortalama (moving average) ile elde edilen özgül üreme hızı değerinin kullanılması, fermentasyonun başlaması ile kontrolcünün hemen devreye girmesini engellemektedir. Bu yüzden doğrusal olmayan kontrolcü, yapılan deneylerde 2. saatten itibaren devreye alınmıştır. Özgül üreme hızı hesabında kayan ortalama yeralan örnek sayısı (çalışmalarda saatlik ortalama alınmıştır), kontrolcü çıkışında oluşacak çıktının salınımlı olup olmayacağına etkili olmaktadır. Çevrimiçi ölçümlerden elde edilen biyokütle derişimi ve bununla bağıntılı özgül üreme hızı değeri, daha sonra doğrusal olmayan kontrolcü ifadesinde kullanılarak, ayar parametrelerine göre substrat besleme değeri üretilmektedir.

Diğer taraftan özgül üreme hızı kontrolü için geliştirilmiş olan doğrusal olmayan kontrolcü için gerek şart olan ve fermentasyon ortamında yeterli miktarda oksijen olması gerekliliği ile etanol oluşumunun olmaması gerekliliğinin sağlanması da bir diğer problemdir. Endüstriyel fermentasyonlarda biyokütle derişiminin ve fermentasyon hacminin artması ile birlikte ortamdaki çözünmüş oksijen derişimi düşmektedir.

Fermentasyon sıvı ortamındaki çözünmüş oksijen derişiminin kontrol altında tutulması endüstriyel koşullarda zor ve pahalı bir işlemdir. Bunun için endüstriyel boyutlu karıştırıcı ve kontrolü gereklidir. Literatürde karşılaşılan laboratuvar ölçekli pekçok çalışmada bu tür karıştırıcılarla çözünmüş oksijen derişimi kontrolü de yapılmaktadır.

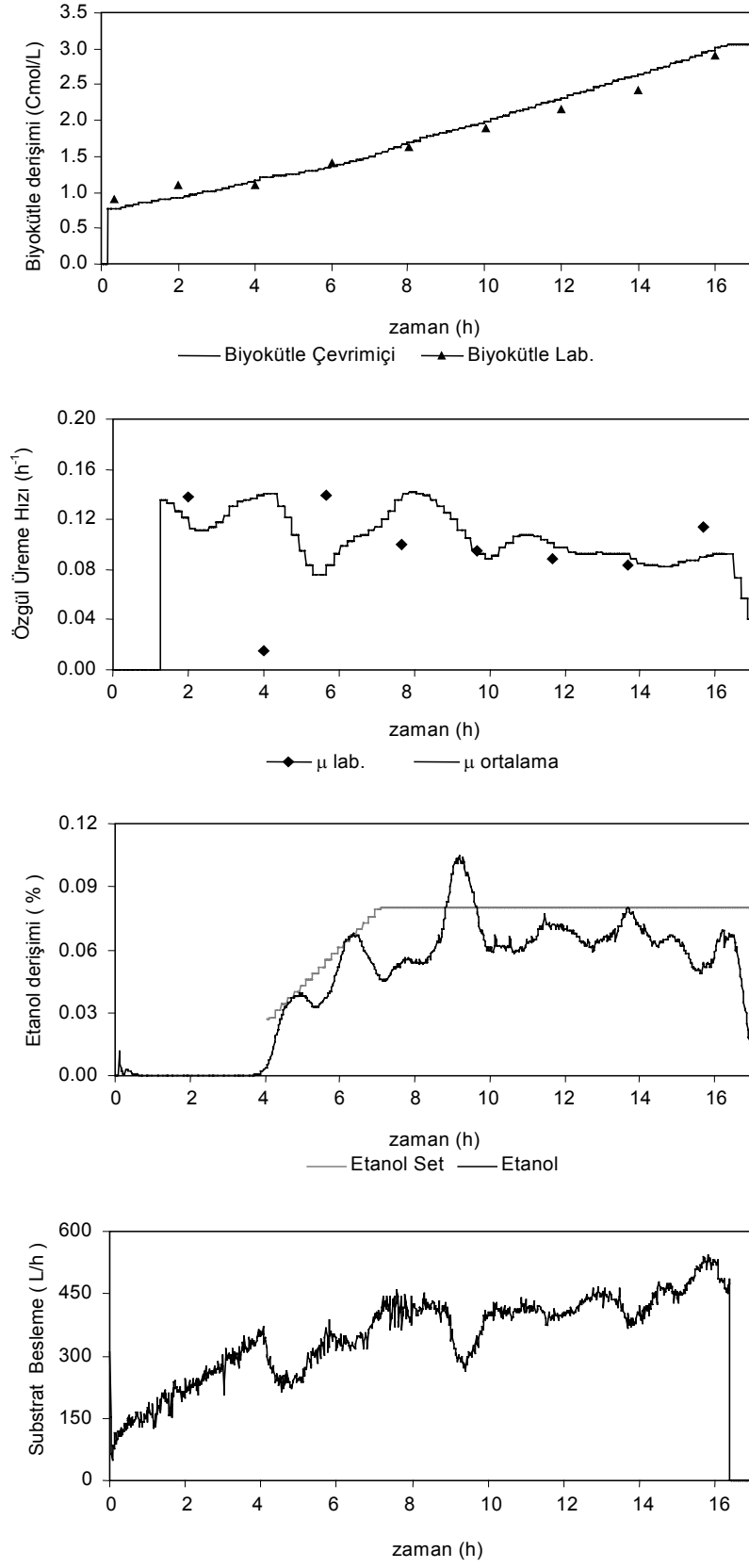
Bir diğer problem ise fermentasyon sıvı ortamında etanol oluşumudur. Fermentasyon süresince çeşitlik nedenlerden dolayı (oksijen transferinin yetersiz kalması, sıvı ortama fazla substrat beslemesi, substrat derişiminin artması gibi) etanol oluşumu gözlenebilir. Ortamdaki etanol derişimi arttıkça ortama beslenen substrat, biyokütle üremesi yerine etanol oluşumuna harcanacaktır. Bu da biyokütle/substrat veriminin düşmesine neden olmaktadır. Fermentasyon sıvı ortamındaki etanol derişimini

minimum değerde kontrol etmek ve buna göre substrat beslemesi stratejisi uygulamak bir önceki bölümde incelenmiştir.

Yapılan kontrol deneylerinden elde edilen tecrübeler ışığında, endüstriyel ortama uygun bir kontrol stratejisi geliştirilmiştir. Buna göre fermentasyon prosesinin başlaması ile birlikte özgül üreme hızı için öngörülen profile göre etanol kontrol algoritmaları devreye girmektedir. Hazırlanan reme hızı profillerinde proses üreme hızının kısa sürede maksimum üreme hızına çıkması hedeflenmektedir. Fermentasyon prosesi özgül üreme hızı kontrolüne devam ederken fermentasyon ortamında etanol oluşumunun başlaması ile birlikte etanol kontrolcü ifadesi işlem görmeye başlamakta ve fermentasyon sonuna kadar kontrol devam etmektedir.

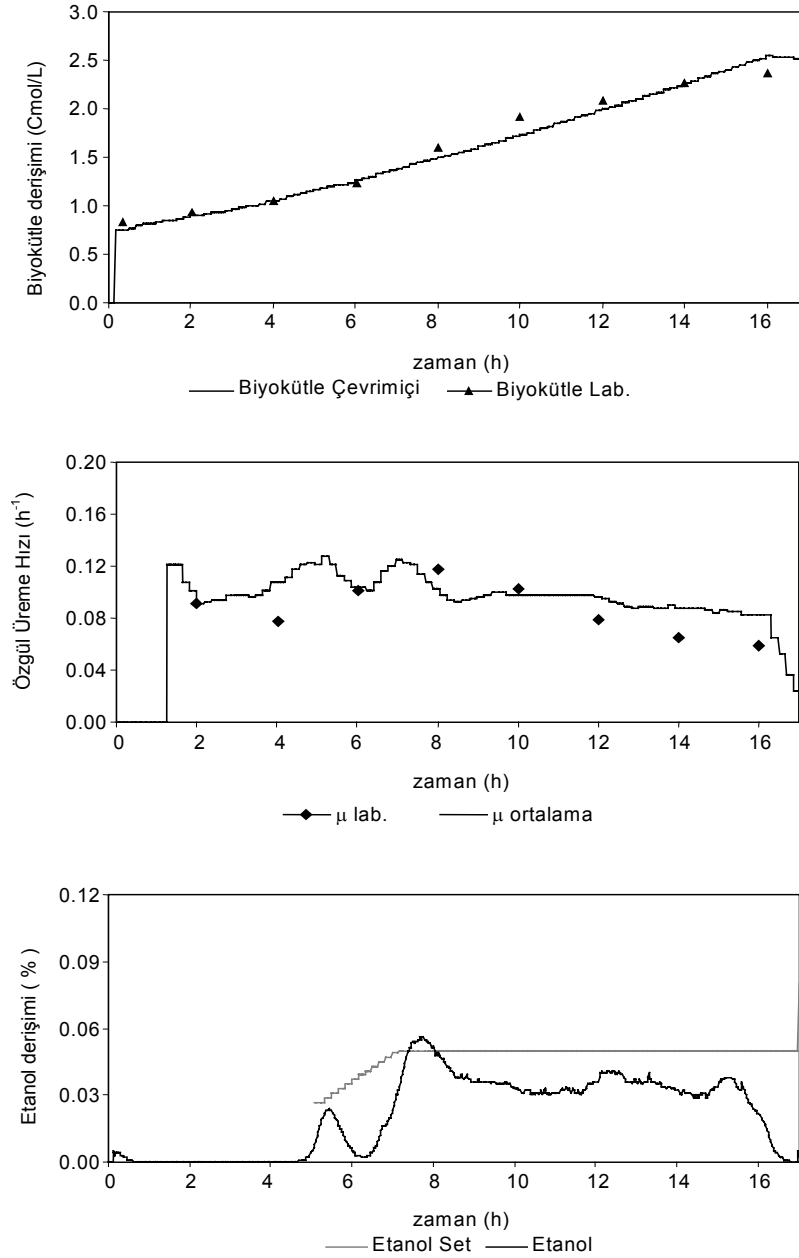
Burada ngrlen kontrol yapısı birbirini tekrarlayan 4 fermentasyona benzer başlangıç koşulları, maya kültürü ve üreme hızı profili ile uygulanmıştır. Aşağıda kontrol deneylerinden ikisi için (D6 ve D7 deneyleri) elde edilen biyokütle, özgül üreme hızı, substrat ve etanol eğrileri laboratuvar ölçümleri ile birlikte Şekil 8.11’da verilmiştir. Tüm deneylerde elde edilen biyokütle eğrileri ve özgül üreme hızı eğrileri ile laboratuvar analizlerinden elde edilen sonuçlar birbiriyle örtüşmektedir. Elde edilen evrimii biyokütle derişim değerleri etanol kontrolcü denklemlerinde kullanılmıştır.

Kontrol deneylerinde proses başlangıı ile birlikte üreme profiline göre açık döngü substrat beslemesi başlamaktadır. Süreç içinde etanol gözlemlenmesi ile birlikte etanol kontrolcüsü otomatikman devreye girmektedir. Etanol derişimi set değeri zaman içinde arttırılarak 3 saatlik süre sonunda % 0.08 değerine ulaşması sağlanmıştır. Kontrolcü ifadesinde yeralan ayar parametreleri kontrol boyunca sabit tutulmuştur. Bu deneylerde kullanılan ayar parametreleri $\lambda_1 = 40, \lambda_2 = 16$ olarak kullanılmıştır.

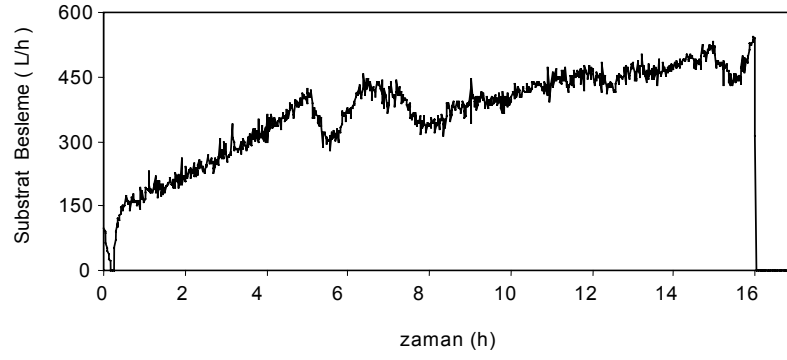


Şekil 8.11. D6 fermentasyonu biyokütle derişimi, özgül üreme hızı, etanol derişimi, substrat besleme grafikleri.

Benzer başlangıç koşulları ve ayar parametreleri ile deney tekrar edildiğinde elde edilen sonuçlar Şekil 8.12’de verilmiştir. Bu deneyde etanol set değeri % 0.05 olarak seçilmiştir.



Şekil 8.12. D7 fermentasyonu biyokütle derişimi, özgül üreme hızı, etanol derişimi, substrat besleme grafikleri.



Şekil 8.12.(devamı) D7 fermentasyonu biyokütle derişimi, özgül üreme hızı, etanol derişimi, substrat besleme grafikleri.

Sonuçları verilen son iki kontrol deneyi ile endüstriyel ekmek mayası fermentasyonunda etanol derişiminin istenen set değerinde kontrol edilebildiği gösterilmiştir. Bu deneylerde operatör müdahalesi olmadan, proses başlangıcında girilen ayar parametreleri ile kontrol işlemleri gerçekleştirilmiştir. Kontrol işlemlerinin gerçekleştirildiği SCADA (supervisory control and data acquisition) ortamı, bu çalışmada geliştirilen kestirimci ve denetleyici algoritmaları ile çok daha verimli ve fayda sağlayıcı konuma getirilmiştir.

9. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Bu çalışmada ekmeek mayası fermentasyonunun endüstriyel boyutlu fermentörlerde modellenmesi ve kontrolü gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla tez çalışmasının ilk bölümlerinde, fermentasyon prosesinde ölçülemeyen durum değişkenlerinin doğru ve güvenilir şekilde belirlenebilmesi için durum gözlemcileri geliştirilmiştir.

Modelleme çalışmalarında mekanistik modelleme ve asimtotik gözlemci tasarımı ile iki farklı yöntem geliştirilmiştir. Her iki durum gözlemci algoritmaları üç farklı tipte fermentasyon verilerine uygulanmış ve sonuçları (Şekil 4.15 ve 5.2) gösterilmiştir. Mekanistik modellemede, birincil proses ölçümlerinden yola çıkarak reaksiyon hızları hesaplanmıştır. Mekanistik modelde yeralan fazla ölçümler ve bunlara ait bağıl hatalar kullanılarak tüm dönüşüm hızları için uygunlaştırılmış dönüşüm hız değerleri hesaplanmıştır. Uygunlaştırılmış hızlar kullanılarak tüm proses durumları daha doğru şekilde hesaplanmıştır. Mekanistik model tasarımında proses giriş ve çıkış değişkenlerinin ölçümleri yanında reaktörler için ısı balansı kurulmuş ve hızların hesabında kullanılmıştır. Ayrıca bu yöntem literatürden (Cannizzaro, 2004) alınan proses verilerine de uygulanmıştır.

Geliştirilen diğer bir kestirimci modeli olan asimtotik gözlemci (observer) tasarımında ise yakınsama problemi ve hızlı hesaplama yapma zorunluluğu ile karşılaşmıştır. Ayrıca farklı fermentasyon türleri için kestirim sonuçlarında farklılıklarla karşılaşmıştır.

Kestirim sonuçları karşılaştırıldığında mekanistik modelle elde edilen biyokütle derişimi ve özgül üreme hızı kestirim değerlerinin, asimtotik gözlemci ile elde edilen kestirimlerden daha güvenilir olduğuna karar verilmiş ve model esaslı kontrol çalışmalarında bu yaklaşımın kullanılması benimsenmiştir.

Tez çalışmasının model esaslı kontrol bölümlerinde ise fermentasyon prosesi için dört farklı kontrol yöntemi belirlenmiştir,

- sabit özgül üreme hızı yörüngeli substrat beslemesi kontrolü
- etanol geribeslemeli, özgül üreme hızı yörüngeli substrat beslemesi kontrolü
- doğrusal olmayan özgül üreme hızı kontrolü
- doğrusal olmayan etanol derişimi kontrolü

Bu yöntemlerin en basiti ve endüstriyel uygulamalarda sıklıkla kullanılan açık döngü özgül üreme hızı profiline göre substrat besleme kontrolü 25 m³'lük fermentöre uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlar (Şekil 7.2 ve Şekil 7.3) incelendiğinde istenen özgül üreme hızı set değerlerinde kontrolün gerçekleştirilemediği görülmektedir. Bu yöntem basitliği ve prosesin öngörülebilmesi nedeniyle endüstride geniş kullanıma sahiptir. Fakat proses durumlarında öngörülme yen değişimlerle karşılaşıldığında (oksijen yetersizliği, etanol oluşumu gibi) yetersiz kalan bir yöntemdir.

Kontrol deneylerinde üzerinde çalışılan ikinci yöntem etanol geribeslemeli özgül üreme hızı kontrolüdür. Bu yöntem, açık döngü üreme hızı kontrolcü denklemine (denklem 7.3) etanol geribesleme terimi ile elde edilen kontrolcü ifadesini içermektedir. Kontrol deneylerinde etanol geribeslemesi oransal ve oransal+integral formunda geribeslenmiştir (denkem 7.4 ve denklem 7.5). Bu yöntemle açık döngü özgül üreme hızı kontrolünde, ortamda etanol oluşumu durumunda bunun tüketilmesi mümkün olmaktadır. Fakat prosesi kontrol parametresiyle orantılı olarak salınımına sokması nedeni ile etkin bir yöntem değildir.

Model esaslı kontrol çalışmalarında üzerinde detaylı çalışılan bir diğer yöntem, durum geribeslemeli doğrusal olmayan kontrolcü tasarımı ile özgül üreme hızının kontrolü olmuştur. Bu bölümde (bölüm 7.4) farklı sabit set değerlerinde ve zamanla değişen özgül üreme hızı profilinin kontrolü çalışılmıştır. Tüm proses boyunca ve zamanla değişen özgül üreme hızının kontrolü başarıyla gerçekleştirilmiştir. Uygulamada bu yöntemin gerçekleştirilmesinde karşılaşılan en önemli zorluk, kontrol yönteminin gerek koşulu olan, fermentasyon ortamında çözünmüş oksijen derişiminin yeterli olması ve etanol oluşumunun gözlenmemesi şartlarının

sağlanmasıdır. Bu durum fermentasyon prosesinin ilerleyen saatlerinde biyokütle derişiminini artması ile birlikte oksijen sınırlaması problemi olarak kendini göstermektedir. Deneilerin gerçekleştirildiği fermentörde cebri karıştırıcı bulunmaması ve hava beslemesi ile oksijen transferinin doğrusal olarak arttırılmaması, deneyler sırasında karşılaşılan ve kontrolcü performansını düşüren en önemli problem olarak gözlenmiştir.

Endüstriyel fermentasyonlara uygulanan dördüncü yöntem doğrusal olmayan etanol derişimi kontrolcüsü olmuştur. Bu yöntemle aşı kültürünün fermentasyon ortamına adaptasyonundan sonra etanol derişiminin istenen set değerinde ve zamanla değişen profil boyunca kontrol edilebilirliği gösterilmiştir. Etanol derişimi kontrolünde biyokütle/substrat verimini yüksek elde edebilmek için etanol derişim seti düşük değerlerde tutulmuştur.

Yapılan kontrol deneylerinden elde edilen tecrübelerden yola çıkılarak, endüstriyel ortama uygun bir kontrol stratejisi geliştirilmeye çalışılmıştır. Bu amaçla, fermentasyon başlangıcı ile birlikte özgül üreme hızı profiline göre substrat beslemesi, ortamda etanol oluşumu ile birlikte minimum etanol derişimi kontrolüne otomatik geçiş sağlayan karma bir kontrolcü yapısı geliştirilmiştir. Bu yapı ile birlikte proses hızla maksimum özgül üreme hızına çıkarılmakta, etanol oluşumunun başlaması ile birlikte minimum değerde etanol derişiminin kontrolü yapılmaktadır. Etanol derişimi kontrolüne geçildikten sonra fermentasyon sonuna dek etanol derişimi düşük değerlerde kontrol edilmiştir (Şekil 8.11 ve 8.12).

Geliştirilen bu yeni yapı ile endüstriyel ortamda ve operatör müdahalesi olmadan işletilen, model esaslı doğrusal olmayan kontrolcü ile denetlenen etanol derişimi kontrolcüsü başarıyla uygulamaya sakulmuştur. Fermentasyonlarda biyokütle/substrat verimi ve kalite parametreleri kabul edilebilir sınırlar içinde elde edilmiştir.

Bu tez çalışması 25 m³'lük endüstriyel boyutlu fermentörlerde, endüstriyel ölçüm cihazları, programlanabilir mantıksal denetleyiciler (programmable logic controller) ve SCADA (supervisory control and data acquisition) ortamında gerçekleştirilmiştir.

Geliştirilen model esaslı kestirimci ve kontrolcüler ile çok pahalı yatırım bedeli olan kontrol sistemi akıllı algortimalar ile donatılmış ve endüstriyel bir ortamda ileri düzeyde proses izleme ve kontrolü gerçekleştirilmiştir.

Gerçeklemesi yapılan doğrusal olmayan kontrol algoritmalarının 100 m³'lük ticari fermentörlere uygulanması burada yapılan çalışmanın tamamlayıcı ileri bir adımı olacaktır. Ticari fermentörlerde bu çalışma gerçekleştirilirken, kontrol sistemi mimarisinin (PLC ve SCADA mimarisi) ve kontrol algoritmalarının olası ölçme problemlerine/salınımlarına karşı daha güvenle çalışmasının sağlanması gereklidir.

Literatürde yarıkesikli ekmek mayası fermentasyonuna ve benzer biyoteknolojik proseslere uygulanan, farklı yöntemle gerçekleştirilmiş (yapay sinir ağları, genetik algoritmalar, bulanık mantık, çeşitli optimizasyon teknikleri) modelleme, optimizasyon ve kontrol çalışması mevcuttur. Bunların büyük bir kısmı laboratuvar ölçekli çalışmalardır. Bu çalışmalarda geliştirilen model ve kontrolcülerin endüstriyel boyutlu biyoteknolojik proseslere uygulanması içerdiği zorluklara karşın özellikle ölçmenin yetersiz olduğu durumlarda faydalı olacağı açıktır. Ayrıca detayları çok iyi bilinmeyen proseslerde ve tanımlanması zor kalite parametrelerinin modellenmesinde bu yöntemlerin başarılı sonuç vereceği düşünülmektedir. Günümüzde yarıiletken teknolojisi ve programcılık tekniğinin gelmiş olduğu noktada, bu yöntemlerin biyoteknolojik proseslere uygulanması işletme ve hammadde maliyetlerinde önemli kazanımlar sağlayacaktır.

KAYNAKLAR

AEG Schneider Automation Inc., Modicon Modsoft Programmers Manual. 043503386, Ver.1.0, (1994).

AEG Schneider Automation Inc., Modicon 512/612 Hardware User Manual. 890 USE 145 00, Ver. 1.0., (1995)

AXELSSON, J.P., “Modelling and Control of Fermentation Processes”, Ph.D. Thesis, *Lund Institute of Technology*, Sweden, (1989).

AXELSSON, J.P., MANDENIUS, C.F., HOLST, O., HAGANDAR, P., MATTISON, B., “Experience in Using an Etanol Sensor to Control Molasses Feed-Rates in Baker’s Yeast Production”, *Bioprocess Engineering, Springer Verlag*, 3, 1-9, (1988).

BASTIN, G., DOCHAIN, D., “Online Estimation and Adaptive Control of Bioreactors”, *Elsevier Science Publishers B.V.*, Amsterdam, Netherlands. ISBN 0-444-88430-0, (1990).

BERBER, R., PERTEV. C., TÜRKER. M., “Optimization of Feeding Profile for Baker’s Yeast Production by Dynamic Programming”, *Bioprocess Engineering*, 20, 263-269, (1999).

BEŞLİ, N., TÜRKER, M., GÜL, E., “Design and Simulation of a Fuzzy Controller for Fedbatch Yeast Fermentation”, *Bioprocess Eng.*, 13, 141-148, (1995).

BİR, A., “Otomatik Kontrol Sistemleri”, *Literatür Yayıncılık*, 35. ISBN: 975.8431.64.1, (1999).

BİRCAN. H., KARAGÖZ. Y., KASAPOĞLU. Y., “Ki-kare ve Kolmogorov Smirnov Uygunluk Testlerinin Simulasyon ile Elde Edilen Veriler Üzerinde Karşılaştırılması”, *Cumhuriyet Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi*, cilt 4, sayı 1, (2003).

CANNIZZARO, C., VALENTINOTTI, S., von STOCKAR, U., “Control of Yeast Fed-Batch Process Through Regulation of Extracellular Ethanol Metabolite”, *Bioprocess Biosystem Engineering*, 26, 377-383, (2004).

CHEN, L., “Modelling, Identifiability and Control of Complex Biotechnological Systems”, PhD Thesis, *Universite Catholique de Louvan. Faculte des Sciences Appliquees*, (1992).

CLAES J., “Optimal Adaptive Control of the Fed-batch Bakers Yeast Fermentation Process”, PhD Thesis, *Katholieke Universiteit Leuven*, (1999).

DAIRAKU, K., IZUMOTO, E., MOURIKAWA, H., “An Advance Micro Computer Control System in a Baker Yeast Fed-batch Culture”, *Journal of fermentation technology*, Vol. 64., (1983).

DOCHAIN, D, “State and Parameter Estimation in Chemical and Biological Processes: a tutorial”, *Journal of Process Control*, 13, 801-818, (2003).

FREDRIKSSON, J., “Probing Control of Glucose Feeding in Cultivation of *Saccharomyces cerevisiae*”, Msc. Thesis, *Department of Automatic Control, Lund Institute of Technology*, ISRN LUTFD2/TFRT—5660—SE., (2001).

HAYKIN, S., “Neural networks; A comprehensive foundation”, *Macmillan College Publishing Company New York*, (1994).

HEIJDEN Van der, R.T.J.M., “State Estimation and Error Diagnosis for Biotechnological Processes”, PhD Thesis, *Delft University of Technology*, (1991) <http://repository.tudelft.nl/file/275295/201701> (ziyaret tarihi : 17 Mayıs 2007).

HEIJDEN. Van der, R.T.J.M, HEIJNEN. J. J., HELLINGA, C., ROMEIN, B. LUYBEN K.Ch.A.M., “Linear Constraint Relations in Biochemical Reaction Systems: I. Classification of Calculability and the Balanceability of Conversion Rates”, *Biotechnology and Bioengineering*, Vol. 43, Pp.3-10, (1994-a).

HEIJDEN. Van der, R.T.J.M, HEIJNEN. J. J., HELLINGA, C., ROMEIN, B. LUYBEN K.Ch.A.M., “Linear Constraint Relations in Biochemical Reaction Systems: II. Diagnosis and Estimation of Gross Errors”, *Biotechnology and Bioengineering*, Vol. 43, Pp.11-20, (1994-b).

HEIJDEN. Van der, R.T.J.M, HEIJNEN. J. J., HELLINGA, C., ROMEIN, B. LUYBEN K.Ch.A.M., “Linear Constraint Relations in Biochemical Reaction Systems: III. Sequential Application of Data Reconciliation for Sensitive Detection of Systematic Errors”, *Biotechnology and Bioengineering*, Vol. 44, Pp.781-791, (1994-c)

HISBULLAH, HUSSAIN, M.A., RAMACHANDRAN, K.B., “Comparative Evaluation of Various Control Schemes for Fed-batch Fermentation”, *Bioprocess and Biosystems Engineering*, 24, 309-318, (2002).

JAMES, S., LEGGE, R., BUDMAN, H., “Comparative study of black-box and hybrid estimation methods in fed-batch fermentation”, *Journal of Process Control*, 12 , 113-121, (2002).

KALMAN, R.E., “A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems”, Transactions of the ASME - *Journal of Basic Engineering*, Vol. 82: pp. 35-45, (1960).

KARAKUZU, C., TÜRKER, M., ÖZTÜRK, S., “Design and Simulation of a Fuzzy Substrate Feeding Controller for an Industrial Scale Fed-Batch Baker Yeast Fermentor”, IFSA 2003, LNAI 2715, *Springer-Verlag Berlin Heidelberg*, pp. 458-465, (2003).

KARAKUZU, C., TÜRKER, M., ÖZTÜRK, S., “Modelling, On-line State Estimation and Fuzzy Control of Production Scale Fed-batch Baker’s Yeast Fermentation”, *Control Engineering Practice*, 14, 959–974, (2006).

KEULERS, M., “Identification and Control of a Fedbatch Process; Application to Culture of *Saccharomyces cerevisiae*”, Ph.D. Thesis, *Technische Universiteit Eindhoven*, (1993).

KHALIL, K.H., “Nonlinear Systems 3rd Edition”, *Prentice-Hall Inc*, ISBN 0-13-067389-7, (2002).

KONSTANTINOV, K., YOSHIDA, T., “The Way to Adequate Control of Microbial Processes Passes via Real-time Knowledge Based Supervision”, *Journal of Biotechnology*, 24, 33-51, (1992).

KRISTIANSSEN, B., “Integrated Design of a Fermentation Plant”. *VCH Publishers, Newyork*, ISBN 1-56081-766-6 , (1994).

LI, T., “Probing Control of a Fedbatch Fermentation. Simulation and Implementation in ABB Industrial IT”, *Department of Automatic Control, Lund Institute of Technology*, (2004).

MADAR, J., ABONYI, J., SZEIFERT, F., “Feedback Linearizing Control Using Hybrid Neural Networks Identified by Sensitivity Approach”, *Engineering Application in Artificial Intelligence*, vol. 18, issue 3, 343-351, (2005).

MOU, D., COONEY, C.L., “Growth Monitoring and Control Through Computer-aided On-line Mass Balancing in a Fed-batch Penicilin Fermentation”, *Biotechnology and Bioengineering*, vol 25, 225-255, (1983)

NA, J.G., CHANG, Y.K., CHUNG, B.H., LIM, H.C., “Adaptive Optimisation of Fed-batch Culture of Yeast by Using Genetic Algorithms”, *Bioprocess and Biosystems Engineering*. 24, 299-308, (2002).

NEJJARI, F., BENHAMMOU, A., DAHOU, B., ROUX, G., “Nonlinear Multivariable Control of a Biological Wastewater Treatment Process”, *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*, 13, 5, 347-365, (1999).
benhamou@open.net.ma , (ziyaret tarihi : 17 Mayıs 2007).

O’CONNOR, G.M., RIERA, F.S., COONEY, C., “Design and Evaluation of Control Strategies for High Cell Density Fermentations”, *Biotechnology and Bioengineering*, 39, 293-304, (1992).

OGATA, K., “Modern Control Engineering”. University of Minnesota. *Prentice Hall*. Englewood Cliffs. New Jersey. 07632, (1997).

OGATA, K., Modern Control Engineering. University of Minnesota. *Prentice Hall*. Englewood Cliffs. New Jersey. 07458, (2002).

OLIVEIRA. R.M.F., “Supervision, Control and Optimization of Biotechnological Processes Based on Hybrid Models”, PhD.Thesis, *Martin-Luther Universitat*, (1998).

PHAM, H.T.B., LARSSON, G, ENFORS, S.O., “Growth and Energy Metabolism in Aerobic Fed-batch Cultures of *Saccharomyces cerevisiae* Simulation and Model Verification”, *Biotechnol. Bioeng*, 60, 4, 474-482, (1998).

POMERLEAU, Y., PERRIER, M., “Estimation of Multiple Specific Growth Rates in Bioprocess”, *AIChE Journal*, Vol. 36, n.21, 207-215, (1991).

POMERLEAU, Y., VIEL, G., “Industrial Application of Adaptive Nonlinear Control for Baker’s Yeast Production”, *IFAC Modelling and Control of Biotechnological Processes*, Colorado, USA, (1992).

POTOCNIK. P., GRABEC. I., “Empirical Modelling of Antibiotic Fermentation Process Using Neural Network and Genetic Algorithms”, *Mathematics and Computer in Simulation*, 49, 363-379, (1999).

RINGBOM, K., ROTHBERG, A., SAXEN, B., “Model Based Automation of Baker’s Yeast Production”, *Journal of Biotechnology*, 51, 73-82, (1996).

ROCHA, I., FERREIRA, E.C., “Optimisation Methods for Improving Fed-batch Cultivation of E.Coli producing recombinant proteins”, *Proceedings of the 10th Mediterranean Conference on Control and Automation* – MED 2002, (2002).

RONEN, M., SHABTAI, Y., GUTERMAN, H., “Optimization of Feeding Profile for a Fed-batch Bioreactor by an Evolutionary Algorithm”, *Journal of Biotechnology*, 97, 253-263, (2002).

ROUBOS, H., “Bioprocess Modelling and Optimization Fedbatch Clavulanic Acid Production by *Streptomyces Clavuligerus*”, PhD thesis, *Kluyver Laboratory for Biotechnology of the Delft University of Technology*, ISBN 90-6464-868-9, (2002).

ROUBOS, J.A, de GOOIJER, C.D., van STRATEN, G., van BOXTEL, A.J.B, “Comparison of Optimisation Methods for Fed-batch Cultures of Hybridoma Cells”, *Bioprocess Engineering*, 17, 99-102, (1997).

ROUBOS, J.A, KRABBEN, P., SETNES, M., BABUŞKA, R., HEIJNEN, J.J., VERBRUGGEN, H.B., “Hybrid Model Development for Fed-batch Bioprocess; Combining Physical Equations with The Metabolik Network and Black-box Kinetics”, *Proceedings of the 7th European Congress on Intelligent Techniques & Soft Computing*, EUFIT'99 Aachen, Germany, 1-9, (1999).

ROYMECH. 2006, Control system stability, <http://www.roymech.co.uk/Related/Control/Stability.html>. (ziyaret tarihi : 22 Mayıs 2007)

SONNLEITNER, B. AND KAPPELI, O., "Growth of *Saccharomyces cerevisiae* is Controlled by its Limited Respiratory Capacity : Formulation and Verification of a hypothesis", *Biotechnol. Bioengineering*, 28, 79-84, (1986).

STEPHANOPOULOS, G., HAN, C., "Intelligent System in Process Engineering: a review", *Comput. Chem. Eng.*, 20: 743-791, (1996).

STEPHANOPOULOS, GN., ARISTIDOU, AN., NIELSEN, J., "Metabolic Engineering: Principles and Methodologies", *Academic Press*, (1998).

SUZUKI, T., YAMANE, T., SHIMIZU, S., "Control of Carbon Source Supply and Dissolved Oxygen by Use of Carbondioxide Concentration of Exhaust Gas in Fed-batch Culture", *Journal of fermentation technology*, Vol. 64. 317-326, (1986).

THAM, H.J., RAMACHANDRAN, K.B., HUSSAIN, M.A., "Sliding Mode Control for a Continuous Bioreactor", *Chem. Biochem. Engineering*, 4, 267-275, (2003).

TORO-ANDRES, B., GIRON-SIERRA, J.M., LOPEZ-OROZCO, J.A, CONDE, C.F., "Optimisation of a batch fermentation process by genetic algorithms", Proceedings IFAC int. Symp. On Advanced Control of Chemical Processes. (ADCHEM 97), *Elsevier*, ISBN 0-08-043038-4, pp.183-188, (1997).

TSUCHIYA, H.M., FREDRICKSON, A.G., ARIS, R., "Dynamics od Microbial Cell Population", *Advance Chemical Engineering*, 6, 499-507, (1966).

TÜRKER, M., "Development of Biocalorimetry as a Technique for Process Monitoring and Control in Technical Scale Fermentations", *Thermochimica Acta*, 419: 73-81, (2004).

TÜRKER, M., "Biyoreaksiyon Mühendisliği Biyolojik Proseslerin Kinetiği ve Modellenmesi", *Su Vakfı Yayınları*. ISBN: 975-6455-19-5, (2005).

TÜRKER,M., "Measurement of Metabolic Heat in a Production Scale Bioreactor by Continuous and Dynamic Calorimetry", *Chem. Eng. Comm.*, 190: 573-598, (2003).

VALENTINOTTI, S., SRINIVASAN, B., HOLMBERG, U., BONVIN, D., CANNIZZARO, C., RHIEL, M., von STOCKAR, U., "Optimal Operation of Fed-batch Fermentations via Adaptive Control of Overflow Metabolite", *Control Engineering Practice*, 11, 665-674, (2003).

WANG H.Y., COONEY C.L., WANG D.I.C., "Computer-aided Baker's Yeast Fermentations", *Biotechnology and Bioengineering*, 19, 69-86, (1977).

WILLIS, M., 2000. Review of Methods for Nonlinear Control. <http://lorien.ncl.ac.uk/ming/control/gen/nonlinear.pdf>. (ziyaret tarihi : 22 Mayıs 2007).

WILLIS, M., THAM. M., Advanced Process Control. Chemical Engineering and Advanced Materials. <http://lorien.ncl.ac.uk/ming/advcontrl/sect2.htm>, (ziyaret tarihi : 17 Mayıs 2007)

EK A. MİKROBİYAL ÜREME PROSELERİNDE GÖZLEMLENEBİLİRLİĞİN VE KONTROLEDİLEBİLİRLİĞİN ÖRNEKLERLE İRDELENMESİ

A.1. Basit Bir Mikrobiyal Üreme Prosesi İçin Gözlemlenebilirlik

Mikrobiyal üreme süreci ve dinamikleri aşağıdaki gibi verilmiş olsun (Bastin ve Dochain, 1990).

$$S \xrightarrow{\varphi} X \quad (\text{A.1})$$

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} S \\ X \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -k_1 \\ 1 \end{bmatrix} \varphi - D \begin{bmatrix} S \\ X \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} DS_{in} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (\text{A.2})$$

Ele alınan proses için $A(\xi)$ matrisini yazarsak;

$$\varphi_X = \frac{\partial \varphi}{\partial X} \quad \varphi_S = \frac{\partial \varphi}{\partial S} \quad \text{olmak üzere,}$$

$$A(\xi) = \begin{bmatrix} -k_1 \varphi_S - D & -k_1 \varphi_X \\ \varphi_S & \varphi_X - D \end{bmatrix} \quad (\text{A.3})$$

S, substrat derişiminin ölçülebilir olduğu kabul edilirse;

$$\xi = [\xi_1, \xi_2] \quad , \quad \xi_1 = S \quad , \quad \xi_2 = X \quad \text{ve} \quad L = [1 \quad 0]$$

Gözlemlenebilirlik matrisi (O) 'yu aşağıdaki gibi yazabiliriz.

$$O = \begin{bmatrix} L \\ LA \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -k_1 \varphi_S - D & -k_1 \varphi_X \end{bmatrix} \quad (\text{A.4})$$

O matrisinin rankının 2'ye eşit olması durumunda ($\varphi_X \neq 0$) gözlemlenebilirlik şartı sağlanmış olur.

A.2. Ürün Oluşumu İçeren Mikrobiyal Üreme Prosesi İçin Gözlemlenebilirlik

Burada proseste biyokütle dışında bir P ürününün oluştuğu kabul edilsin. Bu durumda gözlemlenebilirlik koşulları bu mikrobiyal üreme süreci için irdelensin (Bastin ve Dochain, 1990).



$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} S \\ X \\ P \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -k_1 \\ 1 \\ k_2 \end{bmatrix} \varphi - D \begin{bmatrix} S \\ X \\ P \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} DS_{in} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (\text{A.6})$$

Ele aldığımız proses için $A(\xi)$ matrisini yazarsak;

$$\varphi_X = \frac{\partial \varphi}{\partial X} \quad \varphi_S = \frac{\partial \varphi}{\partial S} \quad \varphi_P = \frac{\partial \varphi}{\partial P} \text{ olmak üzere,}$$

$$A(\xi) = \begin{bmatrix} -k_1 \varphi_S - D & -k_1 \varphi_X & -k_1 \varphi_P \\ \varphi_S & \varphi_X - D & \varphi_P \\ k_2 \varphi_S & k_2 \varphi_X & k_2 \varphi_P - D \end{bmatrix} \quad (\text{A.7})$$

Sadece P, ürün derişiminin ölçülebilir olduğu kabul edilirse;

$$\xi = [\xi_1, \xi_2] \text{ , } \xi_1 = P \text{ , } \xi_2 = S, X \text{ ve } L = [0 \ 0 \ 1]$$

Gözlemlenebilirlik matrisi (O) ‘yu aşağıdaki gibi yazabilir.

$$O = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ k_2 \varphi_S & k_2 \varphi_X & k_2 \varphi_P - D \\ k_2 \varphi_S \bar{\varphi} & k_2 \varphi_X \bar{\varphi} & k_2 \varphi_P \bar{\varphi} + D^2 \end{bmatrix} \quad (\text{A.8})$$

Burada $\bar{\varphi} = \varphi_X - k_1 \varphi_S + k_2 \varphi_P - 2D$ şeklinde tanımlanmıştır. O gözlemlenebilirlik matrisinin determinanı $\varphi_X, \varphi_S, \varphi_P$ 'lere bağılı olmadan daima sıfır olduğundan gözlemlenebilirlik şartı sağlanamamaktadır. Dolayısı ile P derişimi ölçümlerinden, S ve X derişimleri hesaplanamayacaktır. Benzer şekilde sadece S veya X derişimi ölçümlerinden de ölçülemeyen diğer durumlar hesaplanamaz. Bu sistem tek bir durumun ölçülmesi durumunda üssel olarak gözlemlenebilirlik şartını sağlamamaktadır.

A.3. Basit Bir Mikrobiyal Üreme Prosesi İçin Luenberger ve Kalman tip Gözlemcilerin Geliştirilmesi

Daha önce A.1.'de ele alınan basit sistemde reaksiyon hızı φ Contois kuralına göre tanımlanmış olsun (Bastin ve Dochain, 1990). Buna göre reaksiyon hızı aşağıdaki gibi ifade edilmektedir.

$$\varphi(S, X) = \frac{\mu^* X S}{K_C X + S} \quad (\text{A.9})$$

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} S \\ X \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -k_1 \\ 1 \end{bmatrix} \varphi - D \begin{bmatrix} S \\ X \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} DS_{in} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (\text{A.10})$$

$$\frac{dS}{dt} = -k_1 \frac{\mu^* XS}{K_C X + S} - DS + DS_{in} \quad (\text{A.11})$$

$$\frac{dX}{dt} = \frac{\mu^* XS}{K_C X + S} - DX \quad (\text{A.12})$$

$$A(\hat{\xi}) = \begin{bmatrix} -k_1 \\ 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial \varphi}{\partial S} & \frac{\partial \varphi}{\partial X} \end{bmatrix}_{\xi=\hat{\xi}} - D \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{A.13})$$

$$A(\hat{\xi}) = \begin{bmatrix} -k_1 \bar{\varphi}_s - D & -k_1 \bar{\varphi}_x \\ \bar{\varphi}_s & \bar{\varphi}_x - D \end{bmatrix} \quad (\text{A.14})$$

$$\bar{\varphi}_s = \left. \frac{\partial \varphi}{\partial S} \right|_{\xi=\hat{\xi}} = \frac{\mu^* K_C \hat{X}^2}{(K_C \hat{X} + \hat{S})^2}, \quad \bar{\varphi}_x = \left. \frac{\partial \varphi}{\partial X} \right|_{\xi=\hat{\xi}} = \frac{\mu^* \hat{S}^2}{(K_C \hat{X} + \hat{S})^2}$$

Gözlemleyici ifadesi ;

$$\frac{d\hat{S}}{dt} = -k_1 \frac{\mu^* XS}{K_C \hat{X} + \hat{S}} - D\hat{S} + DS_{in} + \omega_1(\hat{X}, \hat{S})(S - \hat{S}) \quad (\text{A.15})$$

$$\frac{d\hat{X}}{dt} = \frac{\mu^* XS}{K_C \hat{X} + \hat{S}} - D\hat{X} + \omega_2(\hat{X}, \hat{S})(S - \hat{S}) \quad (\text{A.16})$$

şeklinindedir. Bundan sonra genişletilmiş Luenberger ve Kalman gözlemleyicileri için kazanç değerlerinin hesap edilmesi gereklidir.

Luenberger tip gözlemleyici için ;

$$\omega_1 = -\lambda_1 - \lambda_2 - k_1 \hat{\varphi}_s + \hat{\varphi}_x - 2D \quad (\text{A.17})$$

$$\omega_2 = \frac{1}{k_1 \hat{\varphi}_x} \{-\lambda_1 \lambda_2 - (\lambda_1 + \lambda_2)(D - \hat{\varphi}_x) - (D - \hat{\varphi}_x)^2 + k_1 \hat{\varphi}_s \hat{\varphi}_x\} \quad (\text{A.18})$$

Kalman gözlemleyici tasarımında kazanç matrisi,

$$R = \begin{bmatrix} R_1 & R_3 \\ R_3 & R_2 \end{bmatrix}$$

$$\frac{dR_1}{dt} = -R_1^2 - 2R_1(k_1\hat{\phi}_S + D) - 2R_3k_1\hat{\phi}_X \quad (\text{A.19})$$

$$\frac{dR_2}{dt} = -R_3^2 + 2R_3\hat{\phi}_S - 2R_2(\hat{\phi}_X - D) \quad (\text{A.20})$$

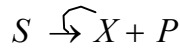
$$\frac{dR_1}{dt} = -R_1R_3 - R_3(k_1\hat{\phi}_S - \hat{\phi}_X + 2D) + R_1\hat{\phi}_S - R_2k_1\hat{\phi}_X \quad (\text{A.21})$$

$$\omega_1(\hat{X}, \hat{S}) = R_1 \text{ ve } \omega_2(\hat{X}, \hat{S}) = R_3 \quad (\text{A.22})$$

şeklinde elde edilir.

A.4. Ürün Oluşumu İçeren Mikrobiyal Üreme Prosesi İçin Asimtotik Gözlemcilerin Geliştirilmesi

Aşağıda verilen sistemi ele alalım,



$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} S \\ X \\ P \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -k_1 \\ 1 \\ k_2 \end{bmatrix} \varphi - D \begin{bmatrix} S \\ X \\ P \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} DS_{in} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

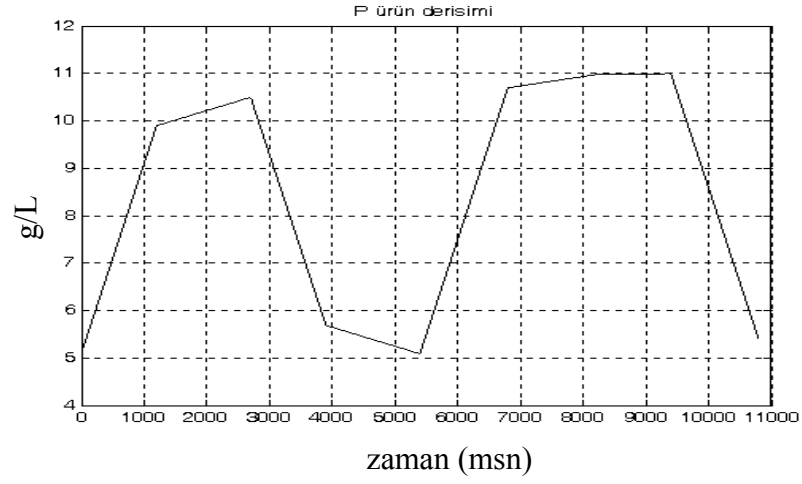
Prosesine ait $K = [-k_1; 1; k_2]$ kazanç matrisinin rankı 1'e eşittir. Asimtotik gözlemleyici ile ölçülemeyen durumları belirlemek için tek bir ölçüm yeterli olacaktır. Burada örnek olması açısından P ürün derişiminin ölçüldüğünü kabul edersek,

$$\xi_1 = [P] \text{ ve } \xi_2 = [S; X]$$

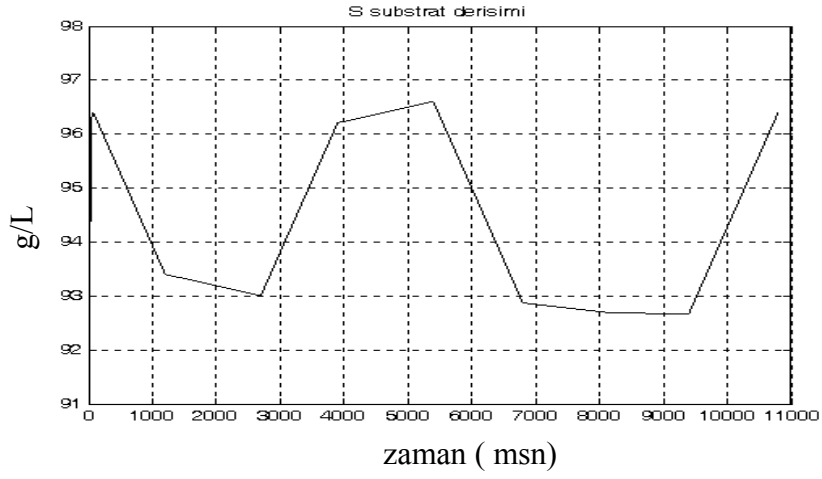
$$A_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad A_2 = \begin{bmatrix} 1 & k_1 \\ 0 & -k_2 \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned} \frac{d\hat{Z}_1}{dt} &= -D\hat{Z}_1 + DS_{in} & \frac{d\hat{Z}_2}{dt} &= -D\hat{Z}_2 \\ \hat{S} &= \hat{Z}_1 + \frac{k_1}{k_2}(\hat{Z}_2 - P) & \hat{X} &= \frac{-1}{k_2}(\hat{Z}_2 - P) \end{aligned}$$

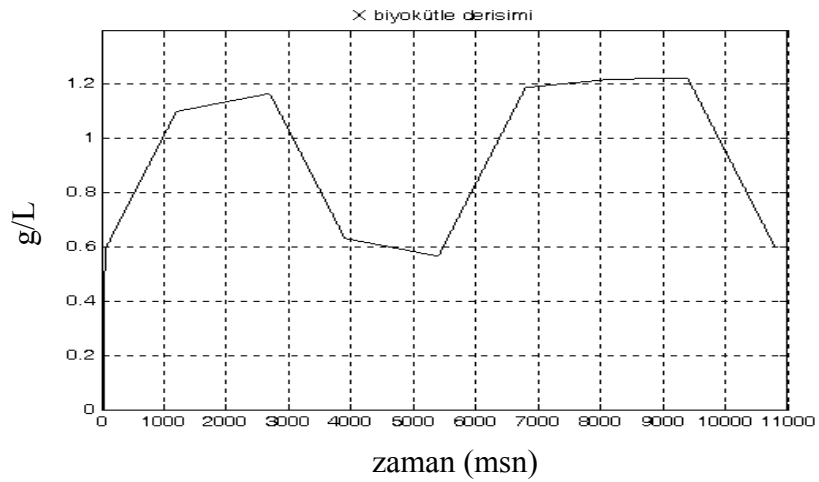
Başlangıç koşulları aşağıdaki verilmiş olsun;
 $X(0) = 0.365 \text{ g/L}$, $S(0) = 90 \text{ g/L}$, $P(0) = 5.1 \text{ g/L}$
 $D(0) = 0.1 \text{ h}^{-1}$, $S_{in}(0) = 100 \text{ g/L}$.
 $\hat{Z}_1(0) = 1$ ve $\hat{Z}_2(0) = 110$



Şekil A.1. Ölçülen ürün derişim grafiği.



Şekil A.2. Gözlemlenen substrat derişim grafiği.



Şekil A.3. Gözlemlenen biyokütle derişim grafiği.

Verilen sistemin bilgisayar ortamında simülasyonu aşağıdaki program kodu ile yapılmıştır.

```
%% Bu program basit bir mikrobiyal bir sistem için ASIMPTOTİK OBSERVER ile belirler
```

```
Mu=0.23;  
Ki=297;  
Km=0.26;  
Kp=7.77;  
Pl=85.82;
```

```
h=1;
```

```
Xo_init=0.365;  
So_init=90;  
Po_init=5.1;  
S=[];  
X=[];  
D=[];  
P=[];  
P(1)=5.1;
```

```
Sin=100;
```

```
%% KARE DALGA BESLEME  
for i=2:10800  
    if i<=1200  
        D(i)=0.1;  
        P(i)=P(i-1)+0.004;  
    end  
  
    if i>=1200 & i<=2700  
        D(i)=D(i-1)-0.0000266;  
        P(i)=P(i-1)+0.0004;  
    end  
  
    if i>=2700 & i<=3900  
        D(i)=0.06;  
        P(i)=P(i-1)-0.004;  
    end  
  
    if i>=3900 & i<=5400  
        D(i)=D(i-1)+0.0000266;  
        P(i)=P(i-1)-0.0004;  
    end  
  
    if i>=5400 & i<=6800  
        D(i)=0.1;  
        P(i)=P(i-1)+0.004;  
    end  
  
    if i>=6800 & i<=8200  
        D(i)=D(i-1)-0.0000266;  
        P(i)=P(i-1)+0.0002;  
    end  
  
    if i>=8200 & i<=9400  
        D(i)=0.06;
```



```

P(i)=P(i-1)+0.00002;
end

if i>=9400 & i<=10800
D(i)=D(i-1)+0.0000266;
P(i)=P(i-1)-0.004;
end

end

Z1(1)=1;
Z2(1)=110;

k1=6;
k2=9;
S(1)=90;

for i=2:10800

d_Z1(i)=-D(i-1)*Z1(i-1)+D(i-1)*Sin;
d_Z2(i)=-D(i-1)*Z2(i-1);

Z1(i)=d_Z1(i)*h+Z1(i-1);
Z2(i)=d_Z2(i)*h+Z2(i-1);

S(i)=Z1(i)+(k1/k2)*(Z2(i)-P(i-1));
X(i)=(-1/k2)*(Z2(i)-P(i-1));
end

disp('PROGRAM TAMAMLANMISTIR')
disp('SONUÇLARI KONTROL EDİNİZ !!!')

```

A.5. Durum Uzayında Kontrol edilebilirlik ve Kutup Yerleştirme Yöntemi ile Kontrolör Tarasımı

Aşağıdaki sistem verilmiş olsun,

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad , \quad A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ -1 & -5 & -6 \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (\text{A.23})$$

Durum geribeslemesi ile sistem kapalı döngü kutupları $s = -2 + 4j$, $s = -2 - 4j$ ve $s = -10$ 'a yerleştirilmek istenmektedir. Bunun için gerekli ($u = -Kx$) K matrisinin hesaplanması için öncelikle sistemin tam durum kontrol edilebilirliğini M matrisi türetilerek incelenirse,

$$M = [B \quad AB \quad A^2B] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & -6 \\ 1 & -6 & 31 \end{bmatrix} \quad (\text{A.24})$$

Kontroledilebilirlik matrisinin determinantı sıfırdan farklı ve rank'ı $n=3$ olduğu için kontroledilirlik şartları sağlanmaktadır. Durum geribesleme matrisi $K = [k_1 \ k_2 \ k_3]$ şeklinde tanımlanırsa

$$|sI - A + BK| = \left| \begin{bmatrix} s & 0 & 0 \\ 0 & s & 0 \\ 0 & 0 & s \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ -1 & -5 & -6 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} [k_1 \ k_2 \ k_3] \right| \quad (\text{A.25})$$

$$= \begin{vmatrix} s & -1 & 0 \\ 0 & s & -1 \\ 1+k_1 & 5+k_2 & s+6+k_3 \end{vmatrix}$$

$$= s^3 + (6+k_3)s^2 + (5+k_2)s + 1+k_1$$

elde edilir. Diğer taraftan yerleştirilmek istenen kutupları $(s - \mu_1)$ $(s - \mu_2)$ $(s - \mu_3)$ şeklinde yazılır ve her iki ifade birbirine eşitlenirse

$$s^3 + 14s^2 - 60s + 200 = s^3 + (6+k_3)s^2 + (5+k_2)s + 1+k_1$$

$K = [k_1 \ k_2 \ k_3] = [199 \ 55 \ 8]$ elde edilir (Ogata, 2002).

EK B. KONTROL SİTEMLERİNDE LIAPUNOV KARARLILIĞI VE GERİBESLEME DOĞRUSALLAŞTIRMASI İLE KONTROLÖR TASARIMI

B.1. Durum Uzayında Liapunov Kararlılığının Örnekle İncelenmesi

Aşağıda verilen ikinci dereceden bir sistemi ele alınsın ve Liapunov fonksiyonu belirlenmeye çalışılsın,

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} \quad (\text{B.1})$$

Aday Liapunov fonksiyonu olarak $V(x) = x^T P x$ seçilsin. Pozitif tanımlı P matrisi $A^T P + P A = -I$ ile belirlenmektedir. Bu matrisi elde etmek için açıkça yazılırsa

$$\begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} \\ p_{12} & p_{22} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} \\ p_{12} & p_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & -1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \quad (\text{B.2})$$

elde edilir. Bu ifade çözülürse P matrisi aşağıdaki gibi elde edilir.

$$\begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} \\ p_{12} & p_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3/2 & 1/2 \\ 1/2 & 1 \end{bmatrix}$$

P matrisinin pozitif tanımlı olması için ardışıl minörlerinin determinatının sıfırdan büyük olması gereklidir ve burada bu şart sağlanmaktadır. Dolayısı ile Liapunov fonksiyonu

$$V(x) = x^T P x = \frac{1}{2} (3x_1^2 + 2x_1 x_2 + 2x_2^2) \quad (\text{B.3})$$

$$\dot{V}(x) = -(x_1^2 + x_2^2) \quad (\text{B.4})$$

şeklinde elde edilir ve sistemin kararlı olduğu söylenebilir.

B.2. Durum Uzayında Geribesleme Doğrusallaştırması İle Kontrolör Tasarımı

Aşağıda verilen doğrusal olmayan sistem verilmiş olsun,

$$\begin{aligned}\dot{x}_1 &= x_2 + 2x_1^2 \\ \dot{x}_2 &= x_3 + u \\ \dot{x}_3 &= x_1 - x_3 \\ y &= x_1\end{aligned}\tag{B.5}$$

$$f(x) = \begin{bmatrix} x_2 + 2x_1^2 \\ x_3 \\ x_1 - x_3 \end{bmatrix}, \quad g(x) = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad \text{ve } y = h(x) = x_1$$

Çıkış ifadesinin ardışıl türevi alınarak sistemin serbestlik derecesini belirlenirse.

$$\begin{aligned}\dot{y} &= \dot{x}_1 = x_2 + 2x_1^2 \\ \ddot{y} &= \dot{x}_2 + 4x_1 \cdot \dot{x}_1 = x_3 + u + 4x_1(x_2 + 2x_1^2) = 8x_1^3 + 4x_1x_2 + x_3 + u\end{aligned}\tag{B.6}$$

elde edilir. Sistemin serbestlik derecesi 2'dir. Değişken değişimi ile koordinat dönüşümleri gerçekleştirilirse,

$$z = T(x) = \begin{bmatrix} \phi_1(x) \\ h(x) \\ L_f h(x) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \eta \\ \zeta \end{bmatrix}\tag{B.7}$$

$$h(x) = x_1\tag{B.8}$$

$$L_f h(x) = \frac{\partial h}{\partial x} f(x) = [1 \ 0 \ 0] \begin{bmatrix} x_2 + 2x_1^2 \\ x_3 \\ x_1 - x_3 \end{bmatrix} = x_2 + 2x_1^2\tag{B.9}$$

$\phi_1(0) = 0$ ve $\frac{\partial \phi_1}{\partial x} g(x) = 0$ şartlarını sağlayan $\phi_1(x)$ fonksiyonu hesaplanırsa,

$$\frac{\partial \phi_1}{\partial x} g(x) = 0 = \begin{bmatrix} \frac{\partial \phi_1}{\partial x_1} & \frac{\partial \phi_1}{\partial x_2} & \frac{\partial \phi_1}{\partial x_3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} = \frac{\partial \phi_1}{\partial x_2} = 0, \quad \phi_1(x) = x_3 \quad \text{olarak seçilirse}$$

$$T(x) = \begin{bmatrix} x_3 \\ x_1 \\ x_2 + 2x_1^2 \end{bmatrix} = z = \begin{bmatrix} \eta \\ \zeta_1 \\ \zeta_2 \end{bmatrix}, \quad x = T^{-1}(z) = \begin{bmatrix} \xi_1 \\ \xi_2 - 2\xi_1^2 \\ \eta \end{bmatrix}$$

elde edilir. Yeni durum değişkenlerinin türevlerini hesaplırsak,

$$\begin{aligned} \dot{\eta} &= \dot{x}_3 = x_1 - x_3 = \xi_1 - \eta \\ \dot{\xi}_1 &= \dot{x}_1 = x_2 + 2x_1^2 = \xi_2 \\ \dot{\xi}_2 &= \dot{x}_2 + 4x_1 \cdot \dot{x}_1 = 8x_1^3 + 4x_1x_2 + x_3 + u \end{aligned} \quad (\text{B.10})$$

$$\begin{aligned} \dot{\eta} &= \zeta_1 - \eta \\ \dot{\zeta} &= A_c \zeta + B_c \left[u - (-8x_1^3 - 4x_1x_2 - x_3) \right] \\ y &= C_c \zeta \end{aligned} \quad (\text{B.11})$$

burada

$$A_c = \begin{bmatrix} 0 & I \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad B_c = \begin{bmatrix} 0 \\ I \end{bmatrix} \quad \text{ve} \quad C_c = [I \quad 0]$$

Hatayı minimize eden kontrolcü ifadesi için yeni bir durum değişkeni tanımlayalım,

$$e = \begin{bmatrix} \zeta_1 - r \\ \zeta_1 - \dot{r} \end{bmatrix} \quad (\text{B.12})$$

$$\begin{aligned} \dot{\eta} &= e + r - \eta \\ \dot{e} &= A_c e + B_c \left[u - (-8x_1^3 - 4x_1x_2 - x_3) - \ddot{r} \right] \end{aligned} \quad (\text{B.13})$$

Yeni durumda doğrusallaştırılmış geribesleme ifadesi

$$u = a(x) + v + \ddot{r} = -8x_1^3 - 4x_1x_2 - x_3 + v + \ddot{r}$$

Şeklinde olacaktır ki burada $v = -Ke$ şeklindedir. Sistemin kararlılığı için K matrisi, $[A_c - B_c K]$ matrisinin özdeğerleri kompleks düzlemin sol tarafında olacak şekilde seçilmelidir. Bu durumda karakteristik polinom,

$$\det(\lambda I - A_c + B_c K) = \begin{vmatrix} \lambda & -1 \\ k_1 & \lambda + k_2 \end{vmatrix} = \lambda^2 + k_2 \lambda + k_1 \quad (\text{B.14})$$

Şeklinde ve $k_1 > 0$, $k_2 > 0$ seçildiğinde kararlılık sağlanmaktadır. Son olarak nihai kontrolcü ifadesi yazılırsa

$$\begin{aligned}
u &= -8x_1^3 - 4x_1x_2 - x_3 + \begin{bmatrix} k_1 & k_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \end{bmatrix} + \ddot{r} \\
&= -8x_1^3 - 4x_1x_2 - x_3 - k_1(x_1 - r) - k_2(x_2 + 2x_1^2 - \dot{r}) + \ddot{r}
\end{aligned}
\tag{B.15}$$

elde edilir.

EK C. Ki-kare (*chi-square*) dağılım tablosu.

Tablo C.1. Ki-kare dağılım tablosu (Stephanopoulos ve diğ., 1998)

Serbestlik Derecesi	0.5	0.75	0.9	0.95	0.975	0.99
1	0.46	1.32	2.71	4.84	5.02	6.63
2	1.39	2.77	4.61	5.99	7.38	9.21
3	2.37	4.11	6.25	7.81	9.35	11.3
4	4.36	5.39	7.78	9.49	11.1	14.3
5	4.35	6.63	9.24	11.1	12.8	15.1

KİŞİSEL YAYINLAR ve ESERLER

HOCALAR, A., TÜRKER, M., ÖZTÜRK, S., 2005. Endüstriyel Maya Fermentasyonunda Karakutu Yaklaşımı ile Durum Kestirimi ve Ölçümlerin Uygunluğu. *XIV. Ulusal Biyoteknoloji Kongresi*. s. 106-110. 31.Ağustos-2 Eylül 2005. Eskişehir, Türkiye.

HOCALAR, A., TÜRKER, M., ÖZTÜRK, S., 2006. State Estimation and Error Diagnosis in Industrial Fed-Batch Yeast Fermentation. in: *AIChE Journal*. Vol. 52, No.11, pp. 3967-3980.

ÖZGEÇMİŞ

1971 yılında Adapazarı'nda doğdu. İlk ve orta öğrenimini Adapazarında, liseyi İzmit Endüstri Meslek Lisesinde tamamladı. 1988 yılında girdiği Uludağ Üniversitesi Elektronik mühendisliği bölümünden Şubat 1993'te mezun oldu. Haziran 1992 – Mart 1997 yılları arasında Emko Elektronik A.Ş.'de çeşitli görevlerde çalıştı. Mayıs 1997 yılından beri Pak Gıda Üretim ve Pazarlama A.Ş.'de proses kontrol mühendisi olarak çalışmaktadır. 1999-2002 yılları arasında, Kocaeli Üniversitesi, Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği bölümünde Yüksek Lisans eğitimini tamamladı. Evli ve iki çocuk sahibidir.