

Jet Çevrimli Biyoreaktörde O₂ Tüketiminin Lyapunov Tabanlı Doğrusal Olmayan Denetleyici ile Kontrolü

Control of O₂ Consumption in Jet Loop Bioreactors by means of a Lyapunov based Nonlinear Controller

Fatma Yıldız, İbrahim Alışkan, Şeref Naci Engin

Elektrik Mühendisliği Bölümü

Yıldız Teknik Üniversitesi

fayildiz@yildiz.edu.tr, ialiskan@yildiz.edu.tr, nengin@yildiz.edu.tr

Özet

Jet çevrimli biyoreaktör, organik maddenin parçalanması için kullanılan arıtma sistemlerinin genel performansını arttırmak için geliştirilmiş kompakt bir reaktör tipidir. Jet çevrimli biyoreaktörlerin en önemli özelliklerinden biri yüksek kütle transfer özelliğine sahip olmalarıdır. Dolayısıyla, mikroorganizmalar sisteme verilen oksijeni daha etkin bir şekilde kullanabilmektedir. Bu çalışmada modeli bilinen doğrusal olmayan bir jet çevrimli biyoreaktör sisteminde, çözünmüş oksijen miktarının ihtiyaç duyulan seviyede tutulabilmesi için klasik PI kontrol ve Lyapunov tabanlı doğrusal olmayan kontrol yöntemleri uygulanmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Doğrusal olmayan kontrol yöntemleri belirsizliklerin, doğrusalsızlıkların ve çevresel değişim faktörünün kayda değer olduğu sistemlerin denetiminde önemli bir üstünlük sağlamıştır.

Abstract

Jet loop bioreactor is a compact reactor type which was developed to improve the overall performance of treatment systems used for the degradation of organic matter. One of the most significant features of the jet loop bioreactors is that they have high mass transfer abilities. Therefore, the microorganisms within the system are able to use the oxygen supplied more efficiently. In this study, in order to keep the soluble oxygen quantity at a desired level, the classical PI control and Lyapunov based nonlinear control methods were applied to the jet loop bioreactor, whose dynamic behaviour exhibits nonlinearities and uncertainties, and the results were compared. The nonlinear control methods prove to be providing a significant advantage in the control of systems with considerable nonlinearities, uncertainties and environmental variation factors.

1. Giriş

Gaz fazında bulunan bir ya da daha fazla bileşenin sıvı faza absorplanması kimya proses sektöründe oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır. Genellikle iki fazda bulunan bileşenlerin arzulanan şekilde reaksiyona girmesi için iki faz arasındaki temasın mümkün olduğunca verimli olması gerekmektedir. Jet

reaktörler bu amaçla tasarlanmış olup basit yapılı ve düşük inşa maliyetlidir, hareketli parça bulundurmaması ve katı madde ile çalışabilmesi gibi avantajlara sahiptirler. Bu çalışmada Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Laboratuvarında kurulan ve kullanılmakta olan yüksek performanslı membran biyoreaktörün daha verimli çalışabilmesi için atıksu ile havanın istenilen oranlarda karıştırılmasını sağlayan kontrol sistemleri tasarlanmıştır. Prosesin etkin bir biçimde çalışması için sistemin dinamik davranışını iyi ifade eden bir matematiksel modelin elde edilmesi ve proses değişkenlerinden seçilecek büyüklüklerin gerçek-zamanlı izlenmesi ve otomatik kontrolünün gerçekleştirilmesi için çalışmalar yapılmaktadır [1,2]. Daha önceki çalışmalara ek olarak sistemin durum denklemlerinin doğrusal olmayan yapıda olması sebebiyle Lyapunov tabanlı nonlinear kontrol yöntemi uygulanmıştır. Uygulanan yöntemin etkinliğinin anlaşılabilmesi için klasik PI denetleyici tasarımı yapılmış ve benzetim sonuçları karşılaştırılmıştır.

İlk bölümde jet çevrimli biyoreaktörler ve kullanılmakta olan deneysel düzeneğin hakkında genel bilgi verilmiş daha sonra sürecin matematiksel modeli ve uygulanan kontrol algoritması sunulmuş ve son bölümde benzetim sonuçları karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.

2. Jet Çevrimli Biyoreaktörler

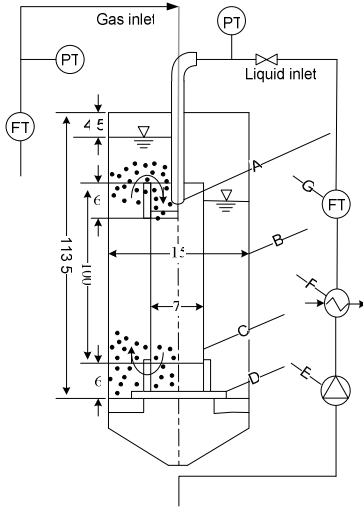
Daha önce Yıldız (1999) tarafından tasarlanan, [3], jet çevrimli membran biyoreaktör esas alınarak geliştirilen ve kurdurulan yüksek performanslı membran biyoreaktör Şekil 1'de ve şematik olarak Şekil 2'de sunulmuştur.

2.1. Deneysel Düzeneğin Yapısı

Reaktör, iç içe geçmiş yüksekliği 113,5 cm, iç çapı 15 cm olan ve emme tüpü uzunluğu 100 cm ve iç çapı 7 cm olan iki adet silindirik konik tabanlı pleksiglas tüpten oluşmaktadır, Şekil 1 ve 2, [4]. Bu tip reaktörlerin ana amacı atıksu ile havayı farklı oranlarda çarptırarak karıştırmak suretiyle atıksuya oksijen difüzyonunu artırıp mikroorganizmaların organik maddeyi daha etkin bir şekilde parçalamalarını sağlamaktır [5].



Şekil 1: Kullanılmakta olan yüksek performanslı membran biyoreaktör.



Şekil 2: Jet çevrimli biyoreaktörün şematik gösterimi.

Süzüntü vanası açılarak membran modülden sıvı geçişi sağlanıp bilgisayara bağlı hassas terazi ile veriler kayıt altına alınmaktadır. 10 sn zaman aralıklarıyla kaydedilen ağırlık değerlerinden hareketle süzüntü akışı değerleri hesap edilmektedir. 60 dakika süren her bir deney sonunda alınan süzüntü numunelerinden KOI, TKN ve NH_3 analizleri yapılarak sistem performansı değerlendirilmektedir.

Deney düzeneğinde çözünmüş oksijen, sıcaklık ve pH gibi önemli işletme parametreleri sürekli olarak multi-parametre ölçüm cihazı (Hach-Lange) ile ölçülmekte ve istenilen değerlerde tutabilmek için Programlanabilir Lojik Kontrolör (Phoenix Contact PLC) ile otomasyonu yapılmaktadır.

Mevcut sistemde reaktöre hava verme işlemi kompresörün sürekli olarak çalışmasıyla sağlanmaktadır. Oysaki kompresörün önünde yer alan oransal valfin sistemdeki oksijen ihtiyacına göre kontrol edilerek oransal olarak açılıp kapatılmasıyla çok daha verimli bir çalışma elde edilebilir.

2.2. Sistemin μ , $\mu_{\max}$ ve K_S Değerleri

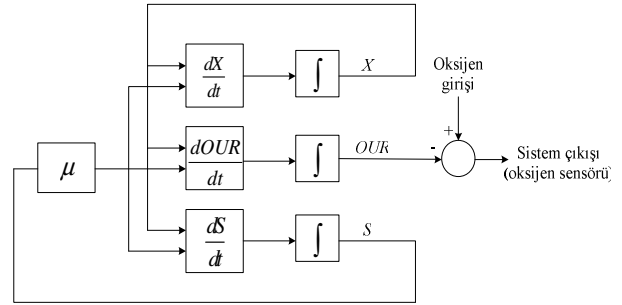
Tablo1’de görülen sistem parametrelerinin hesaplanmasına [1] referanslı çalışmada yer verilmiştir. Burada $\mu_{\max}$ maksimum spesifik büyüme oranını, Y verim katsayısını, k_d ölüm katsayısını, K_S ise yarı doygunluk katsayısını ifade etmektedir.

Tablo 1: Hesaplanan kinetik katsayılar

Kinetik parametre	Değer
$\mu_{\max}$, 1/gün	0.21
Y , gr/gr	0.28
k_d , 1/gün	0.019
K_S , mg/L	11000

3. Sürecin Modeli ve Denetimi

Sistemin optimum kontrolünü sağlamanın temel yolu, atıksu arıtma sürecinin dinamik davranışlarını en iyi biçimde matematiksel olarak ifade etmekten geçer [6]. Sürecin dinamik modeli blok diyagramı olarak Şekil 3’de verilmiştir.



Şekil 3: Sürecin blok diyagram gösterimi

3.1. Sistemin Dinamik Davranışının Belirlenmesi

Doğrusal olmayan davranış gösteren asetojenik ve metanojenik mikroorganizmaların büyüme oranı, aşağıda verilen Monod Kanunu ile ifade edilir [2].

$$\mu = \frac{\mu_{\max} S_e}{K_S + S_e} \quad (1)$$

Kesikli sistem ile çalışıldığı için, durum değişkenleri [1];

$$\begin{aligned} \frac{dX}{dt} &= \mu X - k_d X \\ \frac{dS}{dt} &= -\frac{\mu X}{Y} \end{aligned} \quad (2)$$

olarak ifade edilebilir. Burada X bakteri konsantrasyonunu, S ise substrat konsantrasyonunu ifade etmektedir. Oksijen kullanma oranı, OUR ,

$$\frac{dOUR}{dt} = \frac{1-Y}{Y} \mu X \quad (3)$$

denkleminde bulunur.

Belirtildiği gibi çözünmüş oksijen sistemde sürekli olarak ölçülebilen değişkenlerden birisidir. Mikroorganizmaların ihtiyacı olan oksijen miktarı da hesaplanabildiğine göre ikisinin arasındaki fark ortamda bulunan oksijen miktarını vermektedir. Bu durumda reaktör içerisindeki oksijen miktarını istenilen seviyede tutmak mümkündür.

3.2. Klasik Kontrol Yöntemi

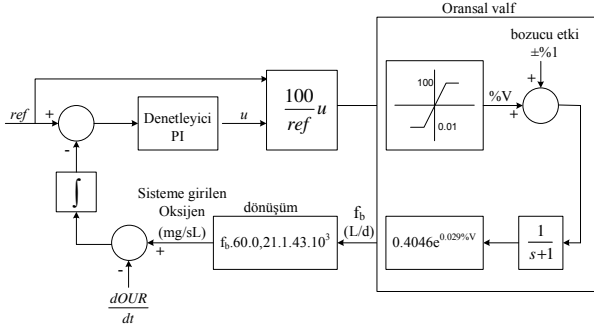
Önerilen kontrol sisteminin başarısının görülebilmesi için klasik PI denetleyici tasarımı yapılmıştır. Ziegler-Nichols PI tasarım yöntemi kullanılarak belirlenen katsayı sabiti, K_p ve integral sabiti, T_i ;

$$K_p = 1.18 \quad T_i = 9.83$$

olarak bulunmuştur [7]. Bu durumda denetleyici,

$$G_{PI}(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right) = 1.18 + \frac{0.12}{s}$$

şeklinde elde edilmektedir. Sistem ve denetleyiciye ait blok diyagramı Şekil 4'de verilmiştir. Oransal valf için kullanılan matematiksel model Şekil 4'te sunulmuştur.



Şekil 4: PI denetleyici blok diyagram gösterimi

3.3. Önerilen Denetleyici

Lineer olmayan sistemlerin kontrolünde Lyapunov fonksiyonu tabanlı kontrol yönteminin klasik kontrol yöntemlerinden daha etkin sonuçlar verdiği bilinmektedir. Yapılan temel işlem, hata işaretine bağlı bir enerji fonksiyonu belirleyip bu fonksiyonun sıfıra yaklaşmasını sağlayacak değişimi veren kontrol sinyalinin matematiksel olarak elde edilmesidir [8].

Hata işaretine ait enerji fonksiyonu aşağıdaki gibi kabul edilirse,

$$V = \frac{1}{2} k e^2 \geq 0, \quad k \in R^+ \quad (4)$$

hata değeri sıfıra ulaşmadığı sürece bu fonksiyon sıfır değerini almayacaktır. Buna göre yapılması gereken verilen fonksiyonu sıfıra taşımaktır. Bu sayede hata değeri de sıfır değerini alacaktır. Enerji fonksiyonuna ait değişim,

$$\dot{V} = k e \dot{e} \quad (5)$$

olmaktadır. Burada,

$$\begin{aligned} \dot{e} &= \frac{d}{dt} \left(ref - \int \left(u - \frac{dOUR}{dt} \right) dt \right) \\ \dot{e} &= -u + \frac{dOUR}{dt} \end{aligned} \quad (6)$$

ile ifade edilmektedir. Yapılması gereken işlem kontrol sinyalini kullanarak hata değeri sıfıra ulaşmadığı sürece değişimin sıfırın altında bir değer almasını sağlamaktır.

$$\dot{V} = k e \left(-u + \frac{dOUR}{dt} \right) \quad (7)$$

Burada u değişkeni sisteme verilen anlık oksijen değerini vermektedir. Bu durumda değişim ifadesinden,

$$-u + \frac{dOUR}{dt} = -\beta e \quad (8)$$

(8) eşitliği elde edildiğinde;

$$\begin{aligned} e \neq 0 &\Rightarrow \dot{V} < 0 \\ e = 0 &\Rightarrow \dot{V} = 0, \quad V = 0 \end{aligned}$$

sağlanacaktır. Buna göre,

$$\dot{V} = -\beta k V, \quad \alpha = \frac{\beta}{2}, \quad \alpha, \beta \in R^+ \quad (9)$$

sonucuna ulaşılabileceği ki, üstel kararlı yapının elde edildiği görülmüş olacaktır.

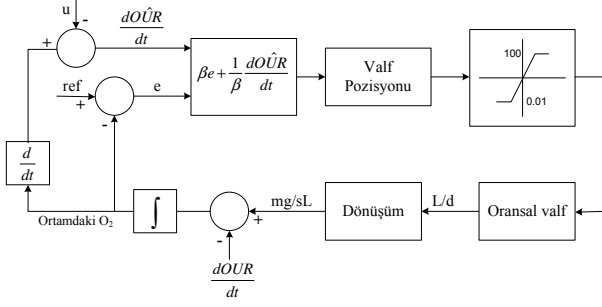
Elde edilen kontrol işaretine ulaşabilmek için hata ve bakterilerin anlık oksijen kullanım değerlerinin bilinmesi gerekmektedir. Reaktörde mevcut oksijen miktarı sürekli olarak ölçülebildiğine göre hata değeri doğrudan elde edilebilir. Ölçülen oksijen değerinin türevi alındığında anlık oksijen değişim değeri elde edilmiş olur ve kompresörden gelen oksijen miktarı da hesaplanabildiğine göre ikisinin arasındaki fark bakterilerin kullandığı anlık oksijen miktarını verecektir. Sensör ölçüm hatalarından ve yapılabilecek matematiksel sınırlamalardan dolayı tahmin değeri $\pm 5\%$ lik bir hata bandı içinde yer almaktadır.

Kontrol işaretinde dikkate alınması gereken bir diğer nokta bakterilerin oksijen ihtiyacında hata sinyaline ait kontrol payının artırılmasının istenmesi durumunda,

$$u = \frac{1}{\beta} \frac{dOUR}{dt} + \beta e \quad (10)$$

eşitliği yeterli olmaktadır.

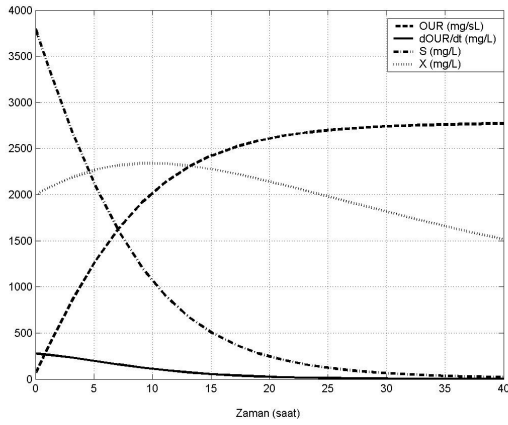
Önerilen denetleyiciye ait blok diyagramı Şekil 5'de verilmiştir.



Şekil 5: Doğrusal olmayan denetleyiciye ait işaret akış diyagramı

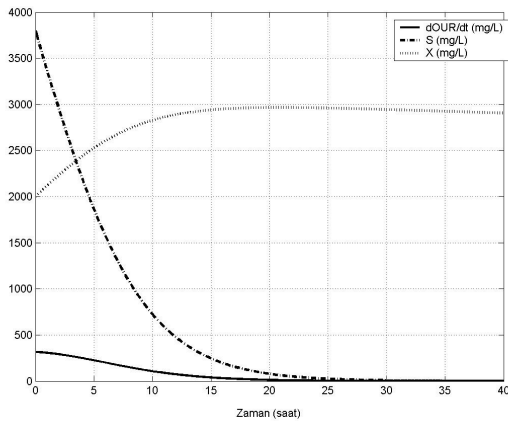
4. Benzetim Sonuçları

Lyapunov tabanlı doğrusal olmayan kontrol yönteminin etkinliğini daha iyi anlayabilmek için klasik yöntemlerden PI kontrol yöntemiyle karşılaştırma yapılmıştır. Şekil 3'de verilen blok diyagramından çıkarılan X , S ve OUR sistem değişkenlerinin değişimleri Şekil 6'da verilmiştir.

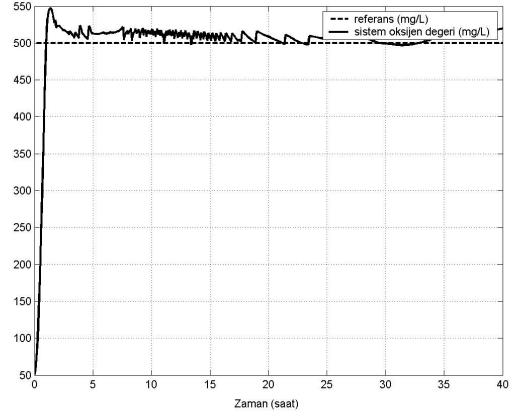


Şekil 6: Sürecin kontrolsüz X , S ve OUR değişkenleri

Sisteme Bölüm 3.2'de verilen PI denetleyici uygulandığında alınan sonuçlar Şekil 7-a ve b'de görülmektedir. Sistemin durum değişkenleri Şekil 7-a'da, referans giriş değeri 500 mg/L olarak alındığında ortamdaki oksijen miktarının değişimi Şekil 7-b'de verilmiştir.

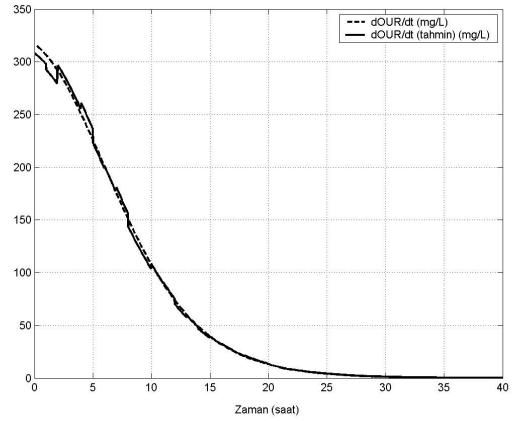


Şekil 7-a: PI denetleyici ile X , S ve OUR değişkenleri



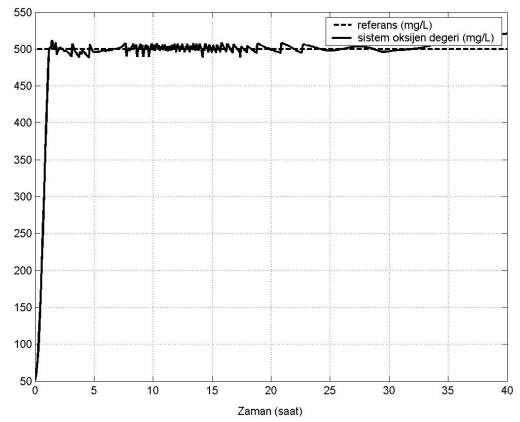
Şekil 7-b: PI denetleyicili sistemde referans giriş ve çıkış değerleri

Şekil 8'de oksijen kullanma oranının anlık değişimi ve bu değerin kestirimi verilmiştir.



Şekil 8: OUR ve $OÛR$ değişim hızları

Şekil 9'da ise önerilen Lyapunov tabanlı doğrusal olmayan denetleyicinin giriş ve çıkış değerleri verilmiştir.



Şekil 9: Doğrusal olmayan denetleyici ile referans giriş ve çıkış değerleri

5. Sonuçların Değerlendirilmesi

Benzetim sonuçları incelendiğinde Lyapunov tabanlı doğrusal olmayan denetimin klasik PI kontrol yöntemine göre üstün olduğu görülmektedir. Şekil 7-b ve Şekil 9'da verilen grafiklerden, doğrusal olmayan denetleyicinin yükselme hızının PI denetleyiciye göre daha yüksek, en büyük üst aşımının ve salınımlarının ise daha düşük olduğu görülmektedir. Ayrıca klasik denetleyicide kalıcı hal hatası daha uzun bir sürede ortadan kalkmaktadır.

Doğrusal olmayan kontrol yöntemleri uygulama ve yazılım güçlüklerinden dolayı endüstride klasik PID denetimi gibi yaygın olarak kullanılmamaktadır. Bu çalışmanın devamında, kurulu olan mevcut otomasyonlu jet çevrimli arıtma sisteminin gerçek zamanlı denetiminin burada sunulan doğrusal olmayan denetleyicinin Programlanabilir Lojik Kontrolöre (PLC) yazılmasıyla gerçekleştirilmesi planlanmaktadır.

6. Teşekkür

Bu çalışmada kullanılan veriler, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Çevre Mühendisliği Bölümü öğretim üyelerinden Doç. Dr. Güleda Engin ve Dr. Mahir İnce tarafından yürütülen TÜBİTAK-104Y310 no'lu araştırma projesinden elde edilmiştir. Adı geçen kurum ve kişilere teşekkürü borç biliriz.

7. Kaynaklar

- [1] Ince, M., Yıldız, F., Onkal, Engin, G., Engin, S.N., Keskinler, B., "Respirometric kinetic parameter calculations of a batch jet loop bioreactor treating leachate and oxygen uptake rate estimation by DTM", Journal of Hazardous Materials, 991-998, 2008
- [2] Engin S. N., Yıldız F., Ince M., Onkal Engin G., Keskinler B., "Modeling and Parameter Identification of a Jet-loop Bioreactor", 2007 American Control Conference, ACC'07, New York, USA, July 11-13, 2007.
- [3] Yıldız, E. *Çapraz akış mikrofıltrasyon sistemli püskürtme çevrimli (Jet Loop) reaktörlerde biyolojik arıtım* · Erzurum Atatürk Üniversitesi, 1999
- [4] İnce, M., *Düzenli Deponi Sahası Sızıntı Sularının Yüksek Performanslı Kompakt Membran Biyoreaktörlerle Arıtılabilirliğinin Araştırılması*, Doktora Tezi, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Çevre Mühendisliği Bölümü, 2008.
- [5] Yıldız, E., Keskinler, B., Pekdemir T., Akay G. and Nuhoglu, A., "High strength wastewater treatment in a jet loopmembrane bioreactor: kinetics and performance evaluation", Chemical Engineering Science, 60 1103 – 1116, 2005.
- [6] Antonelli, R., Harmand, J., Steyer, J-P., Astolfi, A., "Set-Point Regulation of an Anaerobic Digestion Process With Bounded Output Feedback," IEEE Transaction on Control Systems Technology, vol. 11, No. 4, pp. 495-504, July 2003.
- [7] Ogata, K., *Modern control engineering*, Prentice Hall, 2002
- [8] Khalil, H., *Nonlinear Systems*, Prentice Hall, 1996