

SOLUNUM PARAMETRELERİNİN ORGANİK ATIK ARITIMINDA KULLANIM AMAÇLARI

Nevim GENÇ*

ÖZET

Mikroorganizmaların en temel aktivitesi solunum olduğu için, biyolojik sistemlerdeki aktivitenin sayısal olarak ifade edilmesinde en temel gösterge olarak solunum parametreleri kabul edilmektedir. Ayrıca bu parametrelerin işletme süresince anlık olarak ölçülebilmesi, belirlenmesi uzun zaman alan ve pahalı fizikokimyasal ve mikrobiyolojik parametrelere göre daha avantajlı kılınmıştır. Bu yazıda solunum parametrelerinin organik atık arıtımında kullanım amaçları sunulmuştur. Bu parametreler inhibisyon testinde, stabilite belirlenmesinde, prosesin izlenmesi/kontrolünde, organik madde karakterizasyonunda, kinetik ve stokiyometrik katsayıların belirlenmesinde ve atığın ısı üretim kapasitesinin belirlenmesinde kullanılır.

Anahtar Kelimeler: Solunum Hızı, Oksijen Tüketim Hızı, Oksijen Transfer Hızı, Karbon Dioksit Üretim Hızı, Karbon Dioksit Transfer Hızı

USAGE OBJECTIVES OF RESPIRATION PARAMETER IN ORGANIC WASTE TREATMENT

ABSTRACT

Respirometric parameters are agreed as major indicators that numerically express the activity in biological systems, because the respiration is major activity of microorganisms. Also, because respirometric parameters can be a measure on-line during operating, they have more advantage than physicochemical and microbiological parameters the analysis of which are costly and take a long time. This paper reports usage objectives of respiration parameter in organic waste treatment. Respirometric parameters are used at the inhibition test, the determining of stability, the monitoring/controlling of process, the characterising of organic matter, the determining of kinetic and stociometry constants and the estimating of the heat generation capacity.

Keywords: Respiration Rate, Oxygen Uptake Rate, Oxygen Transfer Rate, Carbon Dioxide Production Rate, Carbon Dioxide Transfer Rate

* *Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, İzmit*

1. GİRİŞ

Aerobik koşullarda mikroorganizmaların en temel aktivitesi solunumdur. Mikroorganizmalar tarafından tüketilen O₂ ve üretilen CO₂ miktarı, aktivitesinin bir göstergesi olarak kabul edilir. Saf kültür ve belirli bir substrat ile yapılan uygulamalarda parçalanma mekanizması bilindiği için prosesi izlemek ve kontrol etmek oldukça kolaydır. Ancak karışık mikroorganizma populasyonları tarafından kompleks nitelikteki atıkların arıtıldığı atık arıtım proseslerinde güçtür. Ortam şartları ve kullanılabilir substratın niteliği/niceliğindeki değişim, mikroorganizma populasyonunun aktivitesine yansır. Bu yüzden prosesin izlenmesi ve optimizasyonunun sağlanmasında aktivitenin en iyi göstergesi olan solunum parametrelerinden faydalanılır.

Biyolojik sistemlerde solunum aktivitesinin değerlendirilmesinde tüketilen O₂/üretilen CO₂'yi belirleyen test tekniklerinden faydalanılır. Tüketilen O₂'yi belirleyen test teknikleri sistemde oluşan çözülmüş oksijen azalması (Casas Lopez vd., 2006; Gernaey vd., 2001; Marsilli-Libelli ve Vaggi, 1997) veya sisteme transfer edilen O₂ miktarı belirlemesini (Anderlei vd., 2004; Genç ve Yonsel, 2007; Sperandio ve Paul, 1997) esas alır. O₂'nin sudaki çözünürlüğü düşüktür (20 °C'de çözünürlüğü 44,4 mg/L). Çözülmüş oksijen derişiminin sabit kaldığı yatışkın durumda atıksudaki çözülmüş oksijen azalması yardımı ile belirlenen oksijen tüketim hızı (Oxygen uptake rate, OUR), sisteme giren ve çıkan gaz bileşenlerinin belirlenmesi yardımı ile hesaplanan oksijen transfer hızı (Oxygen transfer rate, OTR) değerine hemen hemen yakındır (Pratt vd., 2003). Üretilen CO₂'yi belirleyen test teknikleri, sıvıdaki CO₂ derişimindeki artış veya gaz akımına transfer olan CO₂'nin belirlenmesini esas alır (Genç ve Yonsel, 2007; Wu vd., 2003). Ancak CO₂'nin çözünürlüğünün yüksek oluşu (20 °C'de CO₂'nin çözünürlüğü 1730 mg/L) ve sıvı içinde HCO₃⁻, CO₃²⁻ gibi türler oluşturması bakımından O₂'den farklıdır. Bu sebepten dolayı mikroorganizmalar tarafından üretilip sıvı ortama verilen CO₂'nin bir kısmı ortam şartlarına bağlı olarak HCO₃⁻ ve CO₃²⁻ gibi türlere dönüşürken, kalan kısmı gaz akımına transfer olacaktır (Sperandio ve Paul, 1997; Lencki vd., 2004). Bundan dolayı gaz akımına transfer olan CO₂ yardımı ile hesaplanan karbon dioksit transfer hızı (Carbon dioxide transfer rate, CTR), üretilen CO₂'nin tümünü yansıtmaz. Üretilen CO₂'yi doğrudan belirleyebilen bir metot yoktur. Sıvı içinde inorganik karbonda meydana gelen artış ve gaz akışı ile sistemden transfer edilen CO₂'in göz önünde bulundurulması gerekir.

Pratt vd., (2003) tarafından titrasyon ve çıkış gazı analiz metotlarının bir araya gelmesi ile geliştirilen sensör yardımı ile hidrojen üretim hızı (Hydrogen ion production rate, HPR), OTR, azot transfer hızı (Nitrogen transfer rate, NTR) ve CTR ölçülmüştür. OTR ve NTR aerobik ve anoksik şartlara uygulanırken, HPR ve CTR aerobik, anaerobik ve anoksik şartlara uygulanmıştır. Sensörün en büyük faydası asit/baz tampon sistemlerinde özellikle bikarbonat sistemlerinde uygun bir biçimde kullanılabilmesidir. Bu sensörlerin aerobik ortamda karbon oksidasyonu ve nitrifikasyonun değerlendirilmesindeki etkinliği, kimyasal analiz sonuçları ile karşılaştırıldığında ileri bir laboratuvar aracı olduğu görülmüştür (Pratt vd., 2003).

Solunum ölçerler (respirometreler), mikrobiyal popülasyonların aktivitesinin belirlenmesinde çok iyi bir araçtır. En sık kullanılanı OUR ölçümüdür, fakat anoksik ve anaerobik şartlarda veya çözünmeyen substratlar için uygulanamaz. Bu şartlarda aktivite, üretilen CO₂ gaz dengesi kurularak doğru bir şekilde ölçülebilir. Ancak dinamik sistemlerde veya kısa süreli kesikli sistemdeki denemelerde CO₂ için kimyasal ve fiziksel transfer sınırlamaları üretilen CO₂'nin gerçek değeri ile CTR değerlerinin farklı çıkmasına neden olur. Bu transfer olayı göz önünde tutulup gerçek karbon dioksit üretim hızını (Carbon dioxide production rate, CPR) hesaplamak için kütle dengesi denklemlerini temel alan matematik model önerilir. Sperandio ve Paul (1997) tarafından yapılan çalışmada CO₂ içeren kimyasal denge ve pH göz önünde tutularak sıvıdan gaz fazına olan kütle transferi tanımlanmış ve model yardımı ile pH değişimine karşı gazdaki değişimin öngörülebileceği ifade edilmiştir.

Wu vd., (2003) tarafından, prosesten çıkan gazın gecikme ve sapma etkileri göz önünde bulundurulup, yüksek dinamik koşullar altında OUR ve CPR'nin değerlendirilmesinde bir metod geliştirilmiştir. Bu metotla değerlendirilen OUR ve CPR, mayanın kompleks dinamik durumunun anlaşılmasında önemli katkılar sağlamıştır, ayrıca mayanın hücre içi ana metabolizmasının kinetik modelinin kurulması ve geçerliliği için esas oluşturmuştur.

Solunum katsayısı (Respiratory quotient, RQ) tüketilen mol O₂ başına üretilen mol CO₂ olarak ifade edilen solunum parametresidir. Üretilen CO₂ ve O₂'nin nispi miktarları substratın oksidasyon derecesine ve metabolize oluş yoluna bağlıdır. Örneğin hegsoz aerobik olarak metabolize olduğu zaman RQ değeri 1'dir. Fakat bu değer yağ ve organik asitler için 0,8 ve 1,33'dür (Lencki vd., 2004). Farklı organik içeriğe sahip atıkların aerobik şartlar altında parçalanabilirliği farklıdır. Genelde kolay parçalanabilir organik madde içeren atıkların RQ değeri yüksektir. Örneğin kentsel katı atıklara düşük oranda oksitlenebilen organik maddeler, örneğin bazı yağlar karıştığı zaman RQ 0,95 den 0,87'ye azalır (Weppen, 2001).

Mikroorganizmaların solunum aktivitesini ifade eden solunum parametreleri atık arıtımında çeşitli amaçlar için kullanılmaktadır. Bu yazıda atık arıtım proseslerinde solunum parametrelerinin kullanım amaçları açıklanmıştır.

2. ATIK ARITIMINDA SOLUNUM PARAMETRESİNİN KULLANIMI

Biyolojik arıtım sistemlerinde proses kontrolünde/izlenmesinde kullanılan klasik parametrelerin (Biyokimyasal Oksijen İhtiyacı (BOİ), Kimyasal Oksijen İhtiyacı (KOİ), uçucu katı madde gibi), arıtılabilirliğin ve arıtılmış son ürünün kalitesinin değerlendirilmesi gibi pek çok uygulamada önemi büyüktür. Ancak bu parametrelerin belirlenmesi zaman alıcı olduğundan dolayı prosese acil müdahale gerektiği durumda yetersiz kalır. Bu açıdan değerlendirildiğinde prosesin anlık kontrolünde solunum parametreleri önem kazanır. Solunum parametreleri biyolojik sistemlerde çeşitli amaçlar için uygulanmaktadır.

2.1. Aktif Çamur Sistemlerinde İnhibisyon Testi Olarak Kullanımı

Aktif çamur sistemleri evsel ve evsel nitelikli endüstriyel atıksu arıtımına hizmet eden, geniş ölçüde kullanılan arıtım sistemidir. Aktif çamur mikroorganizmalarının en temel aktivitesi solunumdur. Bu nedenle solunum inhibisyonu, atıksudaki kimyasalların ekotoksikolojik riskinin değerlendirilmesi için önemli bir kriterdir. Solunum hızı, aktif biyokütle üzerine potansiyel toksisiteyi değerlendirmek için atıksu arıtım ünitelerinde oldukça sık kullanılır (Rozzi vd., 1998). Aktif çamur solunum inhibisyon testi Ekonomik İşbirliği ve Kalkınma Örgütü (OECD) 209 metodu ve Uluslararası Standartlar Teşkilatı (ISO) 8192 metodu ile standartlaştırılan, aktif çamur bakterisine kimyasalların toksisitesinin değerlendirilmesinde kullanılan etkili bir araçtır.

Gendig vd. (2003) ve Narita vd. (2005) tarafından OECD 209 metodu kullanılarak fenollerin aktif çamura inhibisyonu değerlendirilmiştir. Uygulanan metotta musluk suyu ile yıkanan ve 24 saat havalandırılan biyokütle, besi maddesi ile birlikte yeniden havalandırıldıktan sonra test kimyasalı ilave edilerek çözünmüş O₂ ve çözünmüş CO₂'deki değişim kaydedilmiştir. Bu veriler yardımı ile CPR ve OUR hesaplanmış ve doz-mikroorganizmaların test bileşiğine verdiği cevap eğrisi elde edilmiştir. Test bileşiğinin inhibitor etkisi (I) denklem (1)'e göre hesaplanmıştır.

$$\%I = \left(1 - \frac{2D_s}{D_{C1} + D_{C2}} \right) \cdot 100 \quad (1)$$

D_s = Test maddesinin test edilen derişimdeki solunum hızı

D_{C1} ve D_{C2} = Temas süresinden önce ve sonra kontrol/şahitin solunum hızları

%50 inhibisyon yaratan efektif konsantrasyon (EC_{50}) belirlenir.

Çeşitli kimyasal maddelerin aktif çamur sistemine olan toksisitesinin değerlendirildiği çalışmada OUR değerinden hesaplanan EC_{50} , CPR değerinden hesaplanan EC_{50} ile karşılaştırılmıştır (Narita vd., 2005). Elde edilen sonuçlar göstermiştir ki toksisite değerlendirmelerinde, ölçümlerin güvenilirliği ve hassaslığı açısından CPR kullanımı OUR kullanımından daha faydalıdır. Ayrıca incelenen bazı kimyasal maddeler için CPR değerinden elde edilen EC_{50} değeri, OUR değerinden elde edilene göre daha düşük bulunmuştur. Sınırlayıcı değer olduğundan dolayı toksisite değerlendirmelerinde CPR kullanımı önerilmektedir. Daha öncede ifade edildiği gibi suda O₂'nin çözünürlüğü CO₂'nin çözünürlüğünden çok düşüktür. Sistemde çözünmüş O₂'deki değişim CO₂'nin değişiminde daha küçüktür. CO₂'nin derişiminde meydana gelen artış, çözünmüş O₂ nin derişiminde meydana gelen azalmadan daha doğru belirlenir. OUR ve CPR'nin belirlenebilen aralığı, sırası ile 0-44,4 mg/L ve 0-1730 mg/L'dır. Bunlar göz önünde bulundurulduğunda OUR önemli

miktarda hatalar içerir. Bu yüzden CPR solunum aktivitesinin değerlendirilmesinde çok uygun bir parametredir (Narita vd., 2005).

2.2. Stabilite Belirlemede Kullanımı

Organik maddelerin biyolojik stabilitesi, biyolojik olarak kolay parçalanabilir maddelerin parçalanabildiği seviyeyi ifade eder. Stabiliteyi belirleyecek metod, parçalanmada ulaşılan bu noktayı sayısal olarak ifade edebilmelidir. Stabilite tespiti özellikle katı atık işleme ünitelerinde kullanılmaktadır.

Organik katı atıkların kompostlandığı ünitelerde kompost stabilitesi, ürün kalitesinin ve kompostlama sistemlerinin performansının değerlendirilmesinde ve farklı kompostlama sistemlerinin karşılaştırılmasında önemlidir, fakat ölçümü güç bir parametredir. Pek çok stabilite ölçüm metodları geliştirilmiştir. Ancak bunların hiçbiri genel olarak kabul görmemiştir. Bu parametrelerin içinde solunum ölçümü oldukça kabul görmüş bir teknik olmuştur. Lasaridi ve Stentiford (1998) tarafından yapılan bir çalışmada kompostlama prosesinden alınan kompost numunesine gerekli besi maddesi ilavesi ve pH ayarlaması yapıldıktan sonra solunum ölçerinde (respirometre cihazında) ölçülen OUR yardımı ile solunum aktivitesindeki değişim izlenmiştir. Mikroorganizmaların yeni çevresel şartlara uyum sağladığı alışma safhasından sonra, ortamdaki mevcut substratı kullanarak 2-18 saatleri arasında maksimum oksijen tüketim hızına ulaşırlar. Substrat sınırlanırken aktivite azalır ve sistem iç solunum safhasına ulaşır. Bu safhada OUR'de gözlenen düşük miktardaki artışlar kompostta biyolojik parçalanmaya dirençli organik maddelerin parçalandığının göstergesi olarak değerlendirilmiştir. Gözlenen düşük OUR, biyolojik olarak kolay parçalanabilir organik maddelerin tükendiğinin dolayısı ile stabiliteye ulaştığının bir göstergesi olabileceği gibi, parçalanma ile oluşan ara ürünlerin mikroorganizmaya toksik etki göstererek OUR'yi azaltması da göz önünde bulundurulmalıdır. Katı matriks yerine kompost süspansiyonunda solunum ölçümlerinin yapılması oksijenin yayılması, substrat, mikroorganizma ve oksijen arasındaki temasın artırılması gibi bazı avantajlar sağlar. Lasaridi ve Stentiford (1998) tarafından yapılan çalışmada ayrıca kompostun su ekstraktının 665 nm'deki optik yoğunluğu ve KOI ölçümleri, respirometrik ölçümler ile kıyaslandığında, kompost stabilitesinin değerlendirilmesinde bu parametrelerin uygun olmadığı saptanmıştır.

Arıtma çamurlarının stabilizasyonunda yaygın kullanım alanı bulan çamur çürütme ünitelerindeki mikrobiyal aktivite fizikokimyasal, mikrobiyolojik ve enzimatik parametrelerin ölçülmesi ile değerlendirilmiştir. Çalışmanın sonuçları göstermiştir ki, enzimatik parametreler prosesi çok iyi karakterize edebilmektedir (Oviedo vd., 2005; Sanchez vd., 2006). Scaglia vd. (2007) tarafından stabilitenin değerlendirilmesinde spesifik oksijen tüketim hızının (Specific oxygen uptake rate, SOUR) doğruluğu incelenmiştir. Çalışma sonuçları ISO-5725 göre ele alınıp tekrarlanabilirlik limitleri açısından değerlendirildiğinde 12 ve 20 saatten sonraki kümülatif oksijen ihtiyacı değerlerinin biyolojik stabiliteyi göstermek için yeterli olduğu ortaya konmuştur.

Çünkü bu değerler SOUR'den daha az rastgele hatalardan etkilenmektedir (Scaglia vd., 2007).

2.3. Prosesin İzlenmesinde Kullanımı

Fermentasyon teknolojisi ve atıksu arıtımı gibi biyoteknoloji alanları ile kompostlama prosesi karşılaştırıldığı zaman kompostlama prosesinin biyolojik aktivitesinin izlenmesi konusunda çok az bilginin mevcut olduğu görülür. Biyoteknoloji alanında mikrobiyal solunum, OUR olarak ifade edilir. OUR'nin belirlenmesinde herhangi bir spesifik şart gerekmez. Gea vd. (2004) tarafından farklı kimyasal kompozisyona sahip organik atıkların kontrol edilmiş şartlar altında kompostlama prosesinin biyolojik aktivitesinin izlenmesinde biyolojik indekslerin uygunluğu incelenmiştir. Havalandırmanın sürekli ve kesikli sağlandığı kompostlayıcı sisteminden elde edilen OUR değerleri karşılaştırıldığında, sürekli havalandırılan kompostlayıcıda daha yüksek OUR değeri elde edilmiştir. Bunun nedeninin havalandırmanın kesikli yapıldığı sistemde oksijen yayılımının sınırlanmasından kaynaklanabileceği şeklinde ifade edilmiştir. Proses sıcaklığı veya ele alınan atık değiştiği zaman RQ değerinde çok az bir değişim gözlenmiştir, bu yüzden bu parametrenin kullanımı kompostlama matrisinde aerobik şartları sağlamakta kullanımı ile sınırlandırılmıştır. RQ organik maddenin biyokimyasal kompozisyonuna bağlı olduğu halde aerobik şartlar altında ortalama olarak 1'e eşittir.

2.4. Proses Kontrolünde Kullanımı

Prosesin izlenmesinde önerilmeyen RQ değeri hava ihtiyacının öngörülmesinde kullanılabilir. Bilindiği gibi mikroorganizmaların büyümesi ve ürün oluşumu, oksijen seviyesindeki değişime cevap olarak çarpıcı bir biçimde değişim gösterir. Bazı prosesler için mikroaerobik şartlar özellikle tercih edilir. Franzen (2003) tarafından *Saccharomyces cerevisiae* ile mikroaerobik şartlar altında etanol üretimi incelenmiştir. Bu çalışmada mikroaerobik şartlar sistemde RQ kontrolü ile sağlanmıştır. Etanol üretiminin maksimum olarak sağlandığı RQ aralığı 20-12 olarak bulunmuştur. Sisteme verilen gazın oksijen konsantrasyonunun ayarlanması ile RQ kontrolü de sağlanabilir (Franzen vd., 1996). Zeng vd. (1994) tarafından yapılan çalışmada, laboratuvar ve pilot ölçekli reaktörlerde 2,3-butanediol+aseton'un optimum üretimi için mikroaerobik şartların oluşturulmasında RQ uygun kontrol parametresi olarak bulunmuştur.

RQ ayrıca sisteme yapılan besleme hızının belirlenmesinde kullanılarak da prosesi kontrol etmek mümkündür. Fermantörde RQ değerindeki herhangi bir sapma ürün kalitesinin bozulmasına sebep olacaktır.

Aiba ve Furuse (1990) tarafından yapılan çalışmada fermantörden çıkan atık gaz analizi yardımı ile RQ'nün belirlenip belirlenemeyeceği üzerinde durulmuştur. Çıkış

gazı analizi ile saptanan RQ'nün gerçek RQ değerinden önemli ölçüde farklı olduğu saptanmıştır. Bunun nedeni, alkali yönde yapılan fermantasyon proseslerinde mikroorganizma aktivitesi sonucu salınan CO₂'nin büyük bir kısmının ortamda absorblanması ile açıklanmıştır. Bu ise çıkış gazında gerçek CO₂ değerinin belirlenmesini önler. Royce (1992) tarafından yapılan çalışmada E-coli fermantasyonu sırasında fermantöre giren ve çıkan gaz içeriği yardımı ile belirlenen $RQ = \frac{CTR}{OTR}$ değerinin büyük ölçüde değişkenlik gösterdiği halde, fermantörde çözülmüş oksijen azalması ve karbon dioksit artışı yardımı ile belirlenen $RQ = \frac{CPR}{OUR}$ değerinin sabit olduğu saptanmıştır.

Aktif çamur proseslerinin kontrolünde OUR önemli bir kontrol parametresi olarak kullanılabilir. SOUR yüksek giderim performansını sağlamak ve iyi bir katı-sıvı ayırımının sağlanmasını kontrol etmek için aktif çamur prosesinin otomatik kontrolü için kullanılabilir (Goronszy, 1998). OUR havalandırıcıları kontrol ederek sistemde çözülmüş oksijen sınırlaması önlenmektedir. Quintela ve Ro (2003) tarafından atmosfere açık biyoreaktörlerde yerinde yapılan OUR ölçümlerinin bu açıdan pratik ve faydalı olduğu belirlenmiştir.

2.5. Biyolojik Parçalanabilirlik Testlerinde Kullanımı

Çevre ortamında kimyasalların biyolojik parçalanabilirliği sadece bileşiğin moleküler yapısına bağlı değildir, bunun yanı sıra mevcut mikroorganizmaya ve çevresel şartlara da bağlıdır. Biyolojik parçalanma hızının değerlendirilmesi ile bu kimyasalların risk değerlendirmelerinde önemli bir veri sağlanır. Ancak bu testler kimyasalın çevrede gerçek biyolojik parçalanma hızının tahmini için uygun değildir. Risk değerlendirilmesinde gerçek parçalanma hızına ihtiyaç duyulur (Ahtiainen vd., 2003). Biyolojik parçalanabilirlik testleri kimyasalın biyolojik parçalanabilme potansiyelini belirler. Bu testlerde kimyasalın mineralizasyonu ele alınır. Kimyasalın mineralizasyonu ise üç şekilde değerlendirilir.

- 1- Organik karbon azalmasının ölçülmesi
- 2- CO₂ üretiminin ölçülmesi
- 3- Oksijen ihtiyacının ölçülmesi

CO₂ üretimini ölçen standart metotta (ISO 14593) kapalı kap içine mineral çözelti ve aktif çamur ilave edilerek test edilecek kimyasalın biyolojik parçalanması veya CO₂'ye mineralizasyonu belirlenmektedir. Bu amaçla belli zaman aralıklarında alınan numunenin inorganik karbon (IC) analizi yapılmaktadır. IC derişimi konsantr H₃PO₄ (>%85 w/v) ile pH<3'e asidifikasyonundan sonra kabın gaz kısmındaki CO₂ derişimi temelinde hesaplanır. Bu pH'da, kap içinde sıvı ve gaz faz arasında CO₂ dağılımı denge sabiti 1 dir, bundan dolayı sadece kabın gaz kısmında IC derişimi analizlenmesi gerekmektedir. Biyolojik parçalanma derecesi, test bileşiğinin ilk ilave edilen miktarı esas alıp IC'nin teorik miktarının yüzdesi olarak ifade edilir. Ahtiainen vd. (2003) tarafından anilin ve 4-kloroanilin'in biyolojik parçalanabilirliği bu açıdan değerlendirilmiştir.

OECD ve ISO tarafından kabul edilen biyolojik parçalanabilirlik metotlarının bir kısmı kapalı kaptaki oluşan CO₂ ölçümünü ve manometrik solunum ölçümlerini esas alır (Battersby, 1997; Reuschenbach vd., 2003).

2.6. Organik Madde İçeriğinin Belirlenmesinde Kullanımı

Biyolojik parçalanma kinetiğini incelemek ve modellemek için solunum parametreleri, biyokütle derişimi, biyoparçalanabilir organik madde derişimi gibi temel mikrobiyolojik aktivite parametreleri temel alınır. Pratt vd. (2004) tarafından yapılan çalışmada OTR, HPR, NTR ve CTR verilerinin birlikte kullanımı ile aerobik karbon parçalanması modellenmiştir. Bu verilerin birlikte kullanımı numunelerin laboratuvar ölçümlerine ihtiyaç duyulmaksızın bakteri büyüme ve karbon depolama işleminin sayısal olarak belirlenmesini sağlar. Kullanılan modelde biyokütle büyümesi ve karbon depolama prosesi Monod kinetiği kullanılarak modellenmiştir. Fakat modelde iç solunum safhası göz önünde bulundurulmamıştır.

Biyolojik reaksiyonların oluşturduğu sistemlerde ölçülen OUR doğrudan biyolojik aktivite ve organik madde parçalanması ile ilintilidir. Tremier vd. (2005) tarafından yapılan çalışmada kompostlama prosesinde biyolojik parçalanma kinetiği ve organik madde içeriğini belirlemede solunum ölçüm metodunun kullanılabilirliği araştırılmıştır. Katı organik maddenin biyolojik parçalanmasında organik substrat 3 fazlı matriks olduğu kabul edilir. İlk faz mineral ve organik maddeden ibaret olan kuru madde bileşimidir. İkinci faz maddenin nemi ile oluşan sulu fazdır. Sulu fazın içeriğinde mineral ve organik çözümler madde vardır ve biyolojik reaksiyonlar bu fazda meydana gelir. Heterotrofik biyokütle (X) bu faz içinde yer alır. Maddenin gözenekliliği ile oluşan gaz halindeki üçüncü faz, ortam ile sıvı faz arasında gaz halindeki maddelerin değişimine olanak verir. Matriks içinde üç kısımda tanımlanan organik maddeler:

- kolay biyolojik parçalanabilir bileşen (Easily-biodegradable fraction, MB); çözümlüdür ve mikroorganizmalar tarafından hemen tüketilebilir
- yavaş biyolojik parçalanabilir bileşen (Slowly-biodegradable fraction, MH); katı veya çözümler büyük molekülleri içerir, ki bunlar biyolojik olarak tüketilmeden önce hidroliz olur
- inert bileşen (Inert fraction, MI) (veya biyolojik olarak parçalanamayan) kompostlama prosesinin aktif safhasında çok az veya hiç biyolojik reaksiyona uğramaz.

Reaksiyon kinetiği aşağıda verilen denklemler ile modellenir.

$$\frac{dX}{dt} = \mu_m \frac{MB(t)}{K_B + MB(t)} X(t) - bX(t) \quad (2)$$

$$\frac{dMH}{dt} = -K_h \frac{\frac{MH(t)}{X(t)}}{\frac{MH(t)}{X(t)} + K_{MH}} X(t) \quad (3)$$

$$\frac{dMB}{dt} = -\frac{1}{Y} \mu_m \frac{MB(t)}{K_B + MB(t)} X(t) + K_h \frac{\frac{MH(t)}{X(t)}}{\frac{MH(t)}{X(t)} + K_{MH}} X(t) \quad (4)$$

$$OUR(t) = \frac{(1-Y)}{Y} \mu_m \frac{MB(t)}{K_B + MB(t)} X(t) + b(1-f) X(t) \quad (5)$$

Burada K_B (mmolO₂/kg kuru madde substrat veya mg O₂/g kuru madde substrat) MB substratı için doygunluk sabitini, K_{MH} (-) MH/ X oranı için hidroliz doygunluk sabiti, K_h hidroliz hızı, b (saat⁻¹) ölüm hızı, μ_m (saat⁻¹) büyüme hızını göstermektedir. X, MH ve MB mmol O₂/kg kuru madde substrat veya mg O₂/g kuru madde substrat olarak ifade edilmiştir.

Denklem 2' de tanımlandığı gibi, mikroorganizmalar karbon ve enerji kaynağı olarak MB'yi kullanır. MB'nin bir kısmı yeni biyokütle için dönüşüme uğrar (denklem 4). Biyokütle büyüme dönüşüm katsayısı (oluşan biyokütle ile mevcut MB arasındaki oran) Y olarak tanımlanır. MB'nin diğer kısmı (1-Y) elektron alıcısı (kompostlama gibi aerobik proseslerde oksijen'dir) varlığında okside olur (denklem 5). Bu oksidasyon ısı, su ve CO₂ üretir. Diğer bileşen MH, MB bileşenin bir kısmı olan basit organik moleküllere indirgenir, denklem 3'de ifade edildiği gibi enzimatik hidroliz reaksiyonları yolu ile MB tüketimi ile oluşan biyokütle bir kısmı MI'ye dönüşür (f bileşeni) ve bir kısmı ise oksijenin varlığında okside olur ((1-f) bileşeni). Denklem 5'den görülebileceği gibi oksijen tüketimi MB biyolojik parçalanma ve biyokütle ölümü ile orantılı olarak modellenmiştir.

Atıksu parçalanabilirliğinin değerlendirilmesinde solunum ölçerler sık kullanılmaktadır. Solunum ölçer mikrobiyal ortamda substrat giderimi veya hücre büyümesi yerine oksijen tüketimi parametresini kabul eder. Solunum ölçümleri toksik ve toksik olmayan atıksuların BOİ, toksisite ve biyokinetik parametrelerinin tespiti için geniş ölçüde kullanılmıştır. OUR, spesifik büyüme hızı ve diğer kinetik katsayıların belirlenmesi için de kullanılabilir.

Ganesh vd., (2006), tarafından ardışık kesikli reaktörde deri atıksularında etkili bir KOİ giderimi sağlamak için hidroliz bekleme süresinin minimizasyonunda solunum ölçerlerin rolü araştırılmıştır. Yapılan çalışmada, reaktördeki solunum ölçümleri

metabolik aktivitenin göstergesi olarak kullanılmıştır. Reaktörden alınan numunelerin BOİ şişesinde çözünmüş oksijenin ölçülmesi ile belirlenen OUR profilinin, KOİ giderim profili ile birbirine yakın olduğu belirlenmiştir. Sistemde tüketilen KOİ'nin yaklaşık %74-88'i OUR ölçümleri ile açıklanabildiği ifade edilmiştir. Biyolojik parçalanabilirliği güç olan bu atıksuyun OUR ve KOİ tüketim hızı değerleri dikkate alınarak KOİ bileşenleri belirlenmiştir (Ganesh vd., 2006).

Biyokütle aktivitesini dikkate alarak atıksuyun KOİ bazında bileşiminin ve kinetik/stokiyometrik sabitlerin belirlenmesi atıksu arıtım ünitelerinin tasarım ve işletilmesinde önemlidir. Solunum ölçümüne dayanan metotlar bu konuda oldukça kabul görmüştür.

KOİ bileşenlerinin belirlenmesi amacı ile sadece heterotrofik büyümenin olduğu şartlarda atıksuyun OUR profili izlenmiştir (Orhon ve Okutman, 2003; Yıldız Töre vd, 2004). Zaman karşı OUR değişimi izlenerek kolay ayrışan, hızlı hidroliz olabilen ve yavaş ayrışan KOİ bileşenleri belirlenmektedir. Başlangıçta hızlı ve yüksek OUR, atıksuda mevcut olan kolay ayrışan substratın tüketiminden kaynaklanır. Bu substratın türü ortamda kısıtlı hale geldikçe tüketim hızı azalmakta ve tamamen bittiği noktadan itibaren yavaş ayrışan substratın etkili olduğu ve hidroliz fazının göstergesi olan ikinci bir seviyeye düşmektedir. Bu durumda iki seviye arasında tüketilen oksijen atıksudaki kolay ayrışan organik maddenin tüketimine karşı gelmektedir. Dönüşüm oranı bilindiği takdirde kolay ayrışan organik madde miktarı

$$(S_{SI}), S_{S1} = \frac{\Delta O}{1 - Y_H}$$

bağıntısı yardımı ile bulunabilmektedir (Ekama vd., 1986). Burada ΔO her iki seviye arasında harcanan oksijen miktarını göstermekte ve seviyeler arasındaki alan olarak hesaplanmaktadır.

2.7. Kinetik ve Stokiyometrik Katsayıların Belirlenmesinde Kullanımı

Pek çok yazar tarafından kinetik ve stokiyometrik katsayıların belirlenmesi için respirometrik prosedür kabul görmüştür. Bu yolla atıksuların arıtılabilirliği değerlendirilmiştir (Eremektar vd., 1999; Germirli Babuna vd., 1999; Nalbur vd., 2004; Orupold vd., 1998; Ubay Çokgör vd., 1998).

Heterotrofik Dönüşüm Katsayısı (Y_H): Aynı numune için aynı anda yapılan ölçümler sonucu elde edilen OUR ve KOİ profilleri değerlendirilmesi ile (Y_H) belirlenebilir (Ubay Çokgör vd., 1998). Aşağıda verilen ilişki OUR ile biyolojik parçalanabilir KOİ tüketimi arasındaki temel ilişkiyi dikkate alır.

$$\Delta O_2 = (1 - Y_H) \Delta KOI \quad (6)$$

ΔO_2 kolay biyolojik parçalanabilen KOİ'nin oksijen tüketimini ifade etmektedir.

İçsel Solunum Hızı (b_H) belirlenmesi: Aerobik olarak çürütülmüş aktif çamur reaktöründe denklem 7'de verilen ilişki OUR profilini tanımlayabilir (Orhon vd., 1999).

$$\ln OUR = \ln[(1 - f_E)b_H X_H] - b_H t \quad (7)$$

f_E inert biyokütle bileşeni, X_H aktif heterotrofik biokütleyi ifade etmektedir. B_h deneysel OUR profilinin eğimi olarak hesaplanabilir.

Heterotrofların maksimum spesifik büyüme hızı (μ_H): Önemli ölçüde yüksek F/M oranında kesikli reaktörde relatif OUR (OUR_t / OUR_{ilk}) ile zaman arasında doğrusal ilişki söz konusudur, eğim

$\mu_H - b_H$ dir. OUR_t ve OUR_{ilk} t anındaki ve ilk andaki OUR değerleridir.

$$\ln[OUR_t / OUR_{ilk}] = (\mu_H - b_H) \cdot t \quad (8)$$

2.8. Aktif Çamur Sistemlerinin Modellenmesinde Kullanımı

Biyokimyasal sistemlerin respirometrik modellenmesinde güvenilirlik Checchi ve Marsill-Libelli (2005) tarafından ele alınmıştır. Çözünmüş oksijen ölçümlerinin atıksu modellenmesinde çok güncel deneysel bir araç olduğu ifade edilmiştir.

Aktif çamur proseslerinde özellikle biyolojik substrat dönüşümünün modellenmesinde, büyümeyi basit olarak ele alan kinetik çalışmalar, son yıllarda proste eş zamanlı meydana gelen substrat depolama ve büyüme olayını tanımlayacak komplike modellere doğru gelişme göstermiştir. Sin vd., (2005) tarafından yapılan çalışmada, tam ölçekli atıksu arıtma sistemlerinin modellenmesinde düşük F/M oranı altında yavaş büyüyen biyokütle içeren aktif çamur sistemlerinde eş zamanlı meydana gelen substrat depolama ve büyüme prosesleri modellenmiştir. Bu çalışmada, kesikli şartlarda yürütülen denemeden elde edilen OUR verileri, modeli kalibre etmek için başarılı bir biçimde uygulanmıştır.

2.9. Biyolojik Isı Üretim Kapasitesinin Değerlendirilmesinde Kullanımı

Aerobik biyolojik kültürde substratın parçalanması ile oluşan enerjinin bir kısmı organizma büyümesinde kullanılırken, bir kısmı atık ısı olarak ortama salınır. Termofilik aerobik çamur çürütücüler sabit sıcaklıkta işletilmesi için biyolojik kültürün, başka deyişle çamurun biyolojik ısı üretim kapasitesinin bilinmesi önemlidir. Isı üretim kapasitesi genellikle çamurun yanma ısısının, uçucu katı içeriğinin veya KOİ'nin yardımı ile belirlenebilir. Gerek atıksu laboratuvarlarında yanma ısısını belirleyecek cihazların bulunmayışı gerekse uçucu katı ve KOİ gibi

parametrelerin belirlenmesinin uzun süre alması gibi dezavantajlarından dolayı ısı üretim kapasitesinin OUR ile ilişkilendirilmesi uygun bulunmuştur. Biyoenerjinin esasına bakıldığında spesifik ısı üretimi Y_h denklem 9 ile ifade edilebilmektedir (Messenger vd., 1990).

$$Y_h = (1/Z).(G_{ox} - B.E.N_{atp}).(4.2/32) \quad (9)$$

Burada

B: Fosforil bağ enerjisi (kcal/mol ATP)

E: Enerji kullanım verimliliği

N_{ATP} : Okside olan mol substrat başına üretilen ATP mol sayısı

G_{ox} : Okside olan mol substrat başına oluşan enerji (kcal/mol)

Z: Okside olan mol substrat başına kullanılan mol oksijen

Aerobik reaktörde ısı dengesi yapılarak biyolojik ısı üretim hızı H_{bio} (MJ/saat) bulunabilir. H_{bio} ile OUR arasında denklem 10 ile verilen ilişki kurularak çamur için Y_h bulunabilir.

$$H_{bio} = Y_h \cdot OUR \cdot V \quad (10)$$

Burada V reaktör hacmini göstermektedir. Termofilik aerobik çürütücülerde Y_h için literatürde ifade edilen en gerçekçi değer 13,5MJ/kgO₂ dır.

3. SONUÇ

Biyolojik sistemlerde solunum parametreleri biyolojik aktivitenin bir göstergesi olarak kabul edilmektedir. Bu yüzden aktiviteyi etkileyen toksik maddenin yarattığı inhibisyon derecesi uygun bir biçimde belirlenebilmektedir. İnhibisyon derecesinin CPR ile belirlenmesi önerilmektedir. Stabilitenin değerlendirilmesinde de solunum parametrelerinden faydalanılmaktadır. Düşük OUR değerleri organik madde stabilitesinin bir göstergesi olarak kabul edilmektedir. Bunun yanında sadece organik karbon parçalanmasının sağlandığı ortamda OUR izlenmesi yardımı ile KOİ bazında organik madde bileşenleri ve kinetik/stokiyometrik katsayıları belirlenebilmektedir. Solunum ölçümleri işletme sırasında anlık olarak yapılabildiği ve biyolojik aktiviteyi nicelik ve nitelik olarak tanımlayabildiği için atık arıtımında farklı amaçlar için kullanımı önerilmektedir.

4. KAYNAKÇA

Ahtiainen, J., Aalto, M., and Pessala, P., (2003), "Biodegradation of Chemicals in a Standardized Test and in Environmental Conditions", Chemosphere, 51, 529-537.

- Aiba, S., and Furuse, H., (1990), "Some Comments on Respiratory Quotient (RQ) Determination From The Analysis of Exit Gas From a Fermentor", *Biotechnology and Bioengineering*, 36, 5, 534-538.
- Anderlei, T., Zang, W., Papaspyrou, M., and Büchs, J., (2004), "Online Respiration Activity Measurement (OTR, CTR, RQ) in Shake Flasks", *Biochemical Engineering Journal*, 17, 187-194.
- Battersby, N. S., (1997), "The ISO Headspace CO₂ Biodegradation Test", *Chemosphere*, 34, 8, 1813-1822.
- Casas Lopez, J. L., Rodriguez Porcel, E. M., Oller Alberola, I., Ballesteros Martin, M. M., Sanchez Perez, J. A., Fernandez Sevilla, J. M., and Chisti, Y., (2006), "Simultaneous Determination of Oxygen Consumption Rate and Volumetric Oxygen Transfer Coefficient in Pneumatically Agitated Bioreactors", *Ind. Eng. Chem. Res.*, 45, 1167-1171.
- Checchi, N., and Marsilli-Libelli, S., (2005), "Reliability of Parameter Estimation in Respirometric Models", *Water Research*, 39, 3686-3696.
- Ekama, G. A., Dold, P. L., and Marais, G. V. R., (1986), "Procedure for Determining Influent COD Fractions and The Maximum Specific Growth Rate of Heterotrophs in Activated Sludge Systems", *Wat. Sci. Tech.*, 18, 91.
- Eremektar, G., Ubay Çokgör, E., Övez, S., Babuna, F. G., and Orhon, D., (1999), "Biological Treatability of Poultry Processing Plant Effluent- A Case Study", *Wat. Sci. Tech.*, 40,1, 323-329.
- Franzen, C. J., (2003), "Metabolic Flux Analysis of RQ-Controlled Microaerobic Ethanol Production by *Saccharomyces Cerevisiae*", *Yeast*, 20, 117-132.
- Franzen, C. J., Albers, E., and Niklasson, C., (1996), "Use of The Inlet Gas Composition to Control The Respiratory Quotient in Microaerobic Bioprocess", *Chemical Engineering Science*, 51,13, 3391-3402.
- Ganesh, R., Balaji, G., and Ramanujam, R. A., (2006), "Biodegradation of Tannery Wastewater Using Sequencing Batch Reactor-Respirometric Assessment", *Bioresource Technology*, 97, 1815-1821.
- Gea, T., Barrena, R., Artola, A., and Sanchez, A., (2004), "Monitoring The Biological Activity of The Composting Process: Oxygen Uptake Rate (OUR), Respirometric Index (RI), and Respiratory Quotient (RQ)", *Biotechnology and Bioengineering*, 88, 4, 520-527.
- Genç, N., and Yonsel, Ş., (2007), "Evaluation by Respiration Measurements (OTR, CTR and RQ) of The Biological Activity in Sludge Digestors Operated Under

Microaerobic Conditions”, *Chemical and Biochemical Engineering Quarterly*, 21, 2, 163-168.

Gendig, C., Domogala, G., Agnoli, F., Pagga, U., and Strotmann, U. J., (2003), “Evaluation and Further Development of The Activated Sludge Respiration Inhibition Test”, *Chemosphere*, 52, 143-149.

Germirli Babuna, F., Soyhan, B., Eremektar, G., and Orhon, D., (1999), “Evaluation of Treatability for Two Textile Mill Effluents”, *Wat. Sci. Tech.*, 40, 1, 145-152.

Gernaey, A. K., Petersen, B., Ottoy, J. P., and Vanrolleghem, P., (2001), “Activated Sludge Monitoring with Combined Respirometric-Titrimetric Measurements”, *Wat. Res.*, 35, 5, 1280-1294.

Goronszy, M. C., (1998), “Activated Sludge Process Control Using in Basin Oxygen Related Parameters”, *Fourth International Symposium on Waste Management Problems in Agro-Industries*, Istanbul, September, 61-68.

Lasaridi, K. E., and Stentiford, E. I., (1998), “A Simple Respirometric Technique for Assessing Compost Stability”, *Wat. Res.*, 32, 12, 3717-3723.

Lencki, R. W., Zhu, M., and Chu, C. L., (2004), “Comparison of Unsteady-and Steady-State Methods for Produce Respiration Rate Determination, 1.Model Development and Validation”, *Postharvest Biology and Technology*, 31, 229-238.

Marsili-Libelli, S., and Vaggi, A., (1997), “Estimation of Respirometric Activities in Bioprocesses”, *Journal of Biotechnology*, 52, 181-192.

Messenger, J. R., De Villiers, H. A., and Ekama, G. A., (1990), “Oxygen Utilization Rate as a Control Parameter for The Aerobic Stage in Dual Digestion”, *Wat. Sci. Tech.*, 22, 12, 217-227.

Nalbur, B. E., Aklan, U. ve Çalışkan Eleren, S., (2004), “Respirometrik Metot Kullanılarak Bursa Organize Sanayi Bölgesi (BOSB) Atıksularının Biyolojik Artılabilirliğinin İncelenmesi”, *9. Endüstriyel Kirlenme Kontrolü Sempozyumu*, İstanbul, 335-341.

Narita, N., Takahashi, M., and Shoji, R., (2005), “Rapid Activated Sludge Respiration Inhibition Test Performed by CO₂ Producingrate Using a Carbon Dioxide Sensor”, *Journal of Environmental Science and Health*, 40, 1987-1996.

Orhon, D., Ateş Genceli, E., and Ubay Çokgör, E., (1999), “Characterization and Modeling of Activated Sludge for Tannery Wastewater”, *Water Environmental Research*, 73, 1, 50-63.

Orhon, D., and Okutman, D., (2003), "Respirometric Assessment of Residual Organic Matter for Domestic Sewage", *Enzyme and Microbial Technology*, 32, 560-566.

Orupold, K., Hellat, K., and Tenno, T., (1998), "Estimation of Treatability of Different Industrial Wastewaters by Activated Sludge Oxygen Uptake Measurements", *Fourth International Symposium on Waste Management Problems in Agro-Industries, Istanbul*, 69-74.

Oviedo, M. D. C., Sanchez, J. B., and Alonso, J. M. Q., (2005), "Enzymatic Estimation of Biosolids Stability in Aerobic Digestion Systems", *Enzyme and Microbial Technology*, 36, 191-197.

Pratt, S., Yuan, Z., Gapes, D., Dorigo, M., Zeng, R. J., and Keller, J., (2003), "Development of a Novel Titration and Off-Gas Analysis (TOGA) Sensor for Study of Biological Processes in Wastewater Treatment Systems", *Biotechnology and Bioengineering*, 81, 4, 482-495.

Pratt, S., Yuan, Z., and Keller, J., (2004), "Modeling Aerobic Carbon Oxidation and Storage by Integrating Respirometric, Titrimetric, and Off-Gas CO₂ Measurements", *Biotechnology and Bioengineering*, 88, 2, 135-147.

Quintela, M., and Ro, K. S., (2003), "Atmospheric Oxygen Transfer During in Situ Oxygen Uptake Rate Measurement", *Journal of Environmental Engineering*, 129, 2, 183-186.

Reuschenbach, P., Pagga, U., and Strotmann, U., (2003), "A Critical Comparison of Respirometric Biodegradation Tests Based on OECD 301 and Related Test Methods", *Water Res.*, 37, 7, 1571-1582.

Royce, P. N., (1992), "Effect of Changes in The pH and Carbon Dioxide Evolution Rate on The Measured Respiratory Quotient of Fermentations", *Biotechnology and Bioengineering*, 40, 10, 1129-1138.

Rozzi, A., Ficara, E., Cellamare, C. M., and Bortone, G., (1998), "Characterization of Textile and Other Industrial Wastewaters by Respirometric and Titration Biosensors", *Fourth International Symposium on Waste Management Problems in Agro-Industries, Istanbul*, 75-82.

Sanchez, J. B., Alonso, J. M. Q., and Oviedo, M. D. C., (2006), "Use of Microbial Activity Parameters for Determination of a Biosolids Stability Index", *Bioresource Technology*, 97, 562-568.

Scaglia, B., Erriquens, F. G., Gigliotti, G., Taccari, M., Ciani, M., Genevini, P. L., and Adani, F., (2007), "Precision Determination for The Specific Oxygen Uptake

Rate (SOUR) Method Used for Biological Stability Evaluation of Compost and Biostabilized Products”, *Bioresource Technology*, 98, 706-713.

Sin, G., Guisasola, A., De Pauw, D. J. W., Baeza, J. A., Carrera, J., and Vanrolleghem, P. A., (2005), “A New Approach for Modelling Simultaneous Storage and Growth Processes for Activated Sludge Systems Under Aerobic Conditions”, *Biotechnology and Bioengineering*, 92, 5, 600-613.

Sperandio, M., and Paul, E., (1997), “Determination of Carbon Dioxide Evolution Rate Using On-Line Gas Analysis During Dynamic Biodegradation Experiments”, *Biotechnology and Bioengineering*, 53, 3, 243-252.

Tremier, A., Guardia, A., Massiani, C., Paul, E., and Martel, J. L., (2005), “A Respirometric Method for Characterising The Organic Composition and Biodegradation Kinetics and The Temperature Influence on The Biodegradation Kinetics, for a Mixture of Sludge and Bulking Agent to be Co-Composted”, *Bioresource Technology*, 96, 169-180.

Ubay Çokgör, E., Sözen, S., Orhon, D., and Henze, M., (1998), “Respirometric Analysis of Activated Sludge Behavior I. Assessment of the Readily Biodegradable Substrate”, *Wat. Res. (G.B.)*, 32, 2, 461-475.

Weppen, P., (2001), “Process Calorimetry on Composting of Municipal Organic Wastes”, *Biomass Bioenergy*, 21, 289-299.

Wu, L., Lange, H. C., Van Gulik, W. M., and Heijnen, J. J., (2003), “Determination of in Vivo Oxygen Uptake and Carbon Dioxide Evolution Rates From Off-Gas Measurements Under Highly Dynamic Conditions”, *Biotechnology and Bioengineering*, 81, 4, 448-458.

Yıldız Töre, G., Ubay Çokgör, E. ve Orhon D., (2004), “Kot Yıkama Atıksularının Biyolojik Arıtılabilirliğinin İncelenmesi”, 9. Endüstriyel Kirlenme Kontrolü Sempozyumu, İstanbul, 103-110.

Zeng, A. P., Byun, T. G., Posten, C., and Deckwer, W. D., (1994), “Use of Respiratory Quotient as a Control Parameter for Optimum Oxygen Supply and Scale Up of 2,3-Butanediol Production Under Microaerobic Conditions”, *Biotechnology and Bioengineering*, 44, 9, 1107-1114.