

Atık boyutunun ve karakterizasyonunun havalandırılmalı bioreaktörlerde atık stabilizasyonuna etkisi

Esra TINMAZ*, İbrahim DEMİR

İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Çevre Bilimleri ve Mühendisliği Programı, 34469, Ayazağa, İstanbul

Özet

Ülkemizde ve dünyada katı atıkların bertarafı için en yaygın olarak kullanılan yöntem, atıkların depolanmasıdır. Katı atıklar, bu depolama alanlarında anaerobik prosesler sonucu bozunmaktadır. Gerekli önlemlerin alınmaması durumunda, anaerobik bozunma sonucunda depolama alanlarından oluşan sızıntı suyu ve depo gazı çevresel sorunlara neden olmaktadır. Son yıllarda katı atıkların aerobik bioreaktör depolama alanlarında depolanması konusunda araştırmalar ve uygulamalar yaygınlaşmaya başlamıştır. Söz konusu alanlarda, atıklar daha hızlı bir şekilde bozunmakta ve daha kısa sürede stabil hale gelmektedir. Aerobik bioreaktör depolama alanlarında oluşan sızıntı suyu miktarlarında azalma sağlanırken kalitesinde artış gözlenmektedir. Metan gazı oluşumu ise önemli ölçüde azalmakta veya tamamen bitmektedir. Böylelikle, bir yandan depolama alanının faydalı kullanım ömrü artarken, diğer yandan da depolama alanının rehabilitasyonu ve sızıntı suyu arıtım maliyetlerinde düşüş olmaktadır. Bu çalışma kapsamında, bioreaktör depolama yöntemi simüle bioreaktörlerde pilot ölçekli olarak denenmiştir. Sızıntı suyu geri devirli ve havalandırılmalı iki simüle bioreaktörlerde, atık boyutunun ve karakterizasyonunun atık stabilizasyonunu, sızıntı suyu ve depo gazı kalitesini ne yönde etkilediği incelenmiştir. Bu amaçla, reaktörden biri ham atıkla doldurulurken diğeri aynı atığın 80 mm'lik elekten elenmesiyle elde edilen elek altı atıkla doldurulmuştur. Karışık ham atığın ve elek altı atığın organik madde içeriği yaklaşık olarak % 58 ve % 66 olarak belirlenmiştir. Çalışma sonucunda elde edilen veriler, organik madde içeriğinin artmasının ve atık boyutunun küçülmesinin, sızıntı suyu oluşumunu hızlandırdığı, sızıntı suyu kalitesini iyileştirdiği ve atık stabilizasyonunu hızlandırdığı belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Evsel katı atık, bioreaktör, depolama alanı, stabilizasyon.

*Yazışmaların yapılacağı yazar: Esra TINMAZ. esratinmaz@gmail.com; Tel: (282) 652 94 76.

Bu makale, birinci yazar tarafından İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Çevre Bilimleri ve Mühendisliği Programı'nda tamamlanmış olan "Bioreaktör depolama alanlarında sızıntı suyu geri devrinin, atık boyutunun, havalandırmanın ve havalandırma yönünün atık stabilizasyonuna etkisi" adlı doktora tezinden hazırlanmıştır. Makale metni 16.01.2009 tarihinde dergiye ulaştırılmış, 25.02.2009 tarihinde basım kararı alınmıştır. Makale ile ilgili tartışmalar 31.03.2010 tarihine kadar dergiye gönderilmelidir.

Effect of particle size and characteristic of waste on waste stabilization: Application of pilot scale simule aerated bioreactor

Extended abstract

Sanitary landfills are widely used for the disposal of Municipal Solid Waste (MSW) primarily due to their economical and convenient advantages. However leachate and gas generation from landfills may pollute the environment if not properly managed. Landfill designs include soil and/or plastic barriers above and below the waste in an attempt to reduce the infiltration of moisture into the waste mass and thus into the environment. This design method induces anaerobic decomposition of waste. Many of the world's landfills are becoming significant risks to the environment. Over time, anaerobic decomposition of wastes can have negative effects on landfill operations, which actually increase the potential for risks to human health and the environment. In addition, an extended post-closure care period is required to maintain the final cap because the settlement that occurs as organic material in the landfill continues to decompose.

In recent years, due to the advance knowledge of landfill behavior and decomposition processes of waste, there has been a strong thrust to upgrade existing landfill technology, as a bioreactor landfill. The bioreactor landfill has been defined as "A sanitary landfill operated for the purpose of transforming and stabilizing the readily and moderately decomposable organic waste constituents control to enhance microbiological processes. The bioreactor landfill significantly increases the extent of waste decomposition, conversion rates and process effectiveness over what would otherwise occur within the landfill. Managing landfills as bioreactors has been suggested as an environmentally alternative and bioreactor landfills offer many environmental and financial benefits including accelerated stabilization of the waste which reduces the long-term potential for groundwater contamination and should allow for shorter post-closure care periods, accelerated methane production which makes recovery most cost-effective and more rapid settlement which creates additional volume for waste disposal during useful operating life. Techniques used to enhance biological degradation of waste, in bioreactor landfills, are shredding, leachate recirculation, aeration, pH adjustment, temperature control and addition of nutrient and sludge.

In this study, the effects of waste size and characterization on the waste stabilization and leachate characterization were investigated in two simulated aerated bioreactors landfill. The reactors constructed using metal cylinder with a length of 5.65 m and diameter of 2.5 m. auxiliary equipments consisted of water/leachate recirculation system and air injection system. Both of them were operated with leachate recirculation. One of them (R1) was loaded with raw waste and the other one was loaded with sieved waste having a diameter smaller than 80 mm. The average specific weights of the wastes were 670 kg/m³ in R1 and 1040 kg/m³ in R2. The percentage of organic content is 58% in R1 and 66% in R2. The leachate recirculation rates were 0.42 and 0.21 l/ton waste-day in R1 and R2, respectively. Leachate recirculation volume was determined according to moisture content of waste. Air injection rates were adjusted according to gas measurements. The air injection rates in R1 and R2 were, respectively, 1.819 and 1.565 m³/ton waste-day. Waste stabilization and leachate quality was improved in these recirculation volumes and air injection rates. pH, electrical conductivity, alkalinity, chloride, Chemical Oxygen Demand (COD), Biochemical Oxygen Demand (BOD), ammonium nitrogen (NH₄-N), Total Kjeldhal Nitrogen (TKN), nitrate (NO₃), alkaline and heavy metals (Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn, Ca, K, Mg, Na) concentrations in leachate and pH, moisture, carbon / nitrogen (C/N) ration, alkaline and heavy metal (Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn, Ca, K, Mg, Na) concentrations in solid waste samples were regularly monitored. Additionally, waste temperatures in reactors were measured daily and settlement was calculated according to height of waste. A decreased trend of the organic load, measured as chemical oxygen demand and biochemical oxygen demand, was observed. Leachate analyses showed that the R1 and R2 could remove above 44% and 87% of chemical oxygen demand and 81% and 94% biochemical oxygen demand from leachate. At the end of study, waste settlement reached 25% and 15% mainly due to decomposition of the organic matter. The average pH value was in the range of in leachate and at about 8 in solid waste samples.

The results of this study show that size reduction of MSWs contributed to stabilization of solid waste, increase the treatment characteristics of leachate. Bioreactors operated with leachate recirculation and aeration and loaded with sheared waste was found suitable for waste stabilization and improved leachate characterization.

Keywords: Municipal solid waste, bioreactor, landfill, stabilization.

Giriş

Son yıllarda yapılan araştırmalarla, katı atıkların konvansiyonel depolama alanları yerine aerobik ya da anaerobik bioreaktör depolama alanlarında depolanmalarının çevre sorunlarının azaltılmasında etkin rol oynadığı belirlenmiştir. 1970'lerin başlarında laboratuvar, 1980'lerde ise pilot ve arazi ölçekli çalışmalarla bioreaktörlerin yararları kanıtlanmıştır. 1988'de ABD'de 200'den fazla tesiste sızıntı suyu geri devri uygulanırken, 1993'te ABD'deki 12 eyalette sızıntı suyu geri devri uygulanmıştır. Aynı yıllarda Almanya, İngiltere ve İsviçre'de bioreaktörlere yönelik çalışmalara devam edilmiştir. ABD'de sızıntı suyu geri devri uygulanan tesis sayısı 1997'de 130'a ulaşmıştır.

Atıkların anaerobik ortamda bozunarak stabil hale gelmeleri esasına dayalı olan konvansiyonel depolama alanları, her ne kadar zemin ve üst yüzey geçirimsizliğinin sağlandığı ortamlar olsa da insan ve çevre sağlığı açısından bir takım risklere de sahiptir. Bu tür alanlarda depolanan atıkların bozunması sonucu oluşan sızıntı suları, yüksek konsantrasyonlarda organik bileşikler, ağır metaller ve patojenler içermektedir. Konvansiyonel depolama alanlarında atıkların stabilizasyon sürecinin uzun olması nedeniyle oluşan sızıntı suyunun olumsuz etkileri uzun süre devam edebilmektedir. Depolama alanının taban geçirimsizliği sağlanmış olsa bile geçirimsiz taban zamanla tahrip olabilmekte ve bu nedenle sızıntı suyu depolama alanı dışına çıkabilmektedir. Depolama alanında oluşan depo gazı, anaerobik koşullar altında yüksek oranda metan ve VOC içermektedir. Geçirimsiz tabakada ve gaz toplama sisteminde meydana gelebilecek bir tahribat depo gazının yeraltı suyuna karışarak su ortamının kirlenmesine neden olabilmektedir.

Havalandırılmalı bioreaktör depolama sistemlerinde, mikroorganizmaların yaşamsal faaliyetlerinin devamı için gerekli oksijenin sağlanabilmesi için ortama hava verilirken nem ve besi maddesi ihtiyacı sızıntı suyunun geri devrettirilmesi ile sağlanır. Katı atıklar, uygun hava ve nem sağlanmış ortamlarda aerobik bozunma ile anaerobik şartlara göre çok daha kısa sürede stabil hale gelmektedir. Buna ek olarak, sızıntı suyunun atık kütlesi içine geri devrettirilmesi

bozunmayı hızlandırmakta, sızıntı suyu miktarını ve kirletici konsantrasyonlarını azaltmakta, organik asitlerin inhibitör etkisinin nötralize edilmesini sağlamaktadır (Rhyner vd., 1995).

Bu çalışma, farklı kompozisyon ve boyuttaki atıkların materyal olarak kullanıldığı simüle havalandırılmalı ve sızıntı suyu geri devirli bioreaktörlerde pilot ölçekli olarak gerçekleştirilmiştir. Çalışma kapsamında, atık boyutunun ve atık karakterizasyonunun, atık stabilizasyonunu ve sızıntı suyu karakterizasyonunu ne yönde etkilediği incelenmiştir.

Materyal ve yöntem

Atık özellikleri

Çalışmada, İstanbul'un Avrupa yakasından toplanarak İstanbul Büyükşehir Belediyesi (İBB) Kompost ve Geri Kazanım Tesisi'ne getirilen günlük atık kullanılmıştır. Reaktörlerin içindeki atığın homojen olarak havalandırılabilmesi için tesise gelen atıkların içindeki poşetler açılmış ve içleri boşaltılmıştır. R1'e bu atık doldurulmuştur. Aynı atığın 80 mm'lik elekten elenmesiyle elde edilen elek altı atık, R2'ye doldurulmuştur. R1'e doldurulan atığın yoğunluğu 670 kg/m³ iken R2'e doldurulan atığın yoğunluğu 1040 kg/m³'tür. Atıklar reaktörlere doldurulmadan önce karıştırılarak homojen hale getirilmiş ve toplam atık kütlesi içindeki her bir madde grubunun oranı belirlenmiştir. Reaktörlere doldurulan atık bileşenlerinin yaş ağırlık bazında oranları Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Reaktörlerde depolanan atıkların karakterizasyonu

Atık bileşeni	Karışık atık ağırlık (%)	Elek altı altı ağırlık (%)
Organik	57.72	65.55
Teneke	4.00	1.12
Tahta	0.91	1.19
Pet	0.91	0.06
Taş	2.18	4.35
Cam	4.63	8.65
Strafor	0.35	0.18
Tetrapak	0.21	-
Plastik	3.58	2.28
Kemik	0.21	-
Tekstil	10.67	3.99
Kağıt	7.23	10.73
Poşet	3.37	1.9
Ç.Bezi	2.74	-
Ambalaj	1.26	-
Toplam	100.00	100.00

Reaktör dizaynı

Çalışma kapsamında, farklı karakterizasyona ve partikül boyutuna sahip atıkların depolandığı aerobik bioreaktör depolama alanlarını simüle edecek 5.65 m yükseklikte 2.5 m çapında ve ortalama 22 m³ eş hacme sahip iki adet reaktör kullanılmıştır.

Reaktörler metalden yapılmış olup yapım aşamasında iç yüzeyleri zımparalanarak pürüzsüzleştirildikten sonra epoksi boya ile boyanmıştır. Oluşan sızıntı sularının drene edilebilmesi amacıyla reaktör tabanından yaklaşık 1 metre yükseğe yerleştirilen ızgaranın üzeri, tıkanmaların önlenmesi amacıyla ortalama 30 cm kalınlıkta yıkanmış dere çakılı örtülmüştür. Sızıntı suyu reaktörlerin tabanından drene edildikten sonra reaktör dışında bulunan sızıntı suyu toplama tanklarında toplanmıştır. Sızıntı suyunun geri devrettirildiği reaktörlerde geri devir, dalgıç pompa kullanılarak yağmurlama metoduyla yapılmıştır. Bu amaçla, reaktörlerin üst yüzeylerine spiral şeklinde delikli borular yerleştirilmiştir. Havalandırma, reaktör tabanından uygulanacak şekilde 2500 m³/saat kapasiteli fan yardımıyla yapılmıştır. Reaktörler atık doldurulduktan sonra atık yüzeyleri 20-30 cm örtü toprağı ile kapatılmıştır. Örtü toprağı olarak Kompost ve Geri Kazanım Tesisinde üretilen kompostun 15 mm'lik elek üstü kısmı kullanılmıştır. Reaktörlerin yan yüzeylerinde katı atık numunelerinin alınabilmesi için üç adet numune alma gözü yapılmıştır. En üstteki numune alma gözü 40x40 cm, alttaki iki göz ise 30x30 cm boyutlarındadır. Reaktörlerdeki atık sıcaklığının ölçülebilmesi amacıyla her bir reaktörün farklı iki noktasına reaktörlerin ortasına kadar uzanan ikişer adet sıcaklık probu yerleştirilmiştir.

Reaktörlerin işletilmesi

Her iki reaktör de alttan havalandırılmalı ve sızıntı suyu geri devirli olarak çalıştırılmıştır. Geri devrettirilen sızıntı suyu ve verilen hava miktarları ortamın nem muhtevası, sıcaklık ve depo gazı bileşenleri değerlendirilerek ayarlanmıştır. R2'de sızıntı suyu çalışma başlangıcında hemen oluşmasına rağmen R1'de, ancak yağışlar başladıktan sonra reaktör içindeki atığın suya uygun hale gelmesiyle Kasım ayında oluşmuştur.

R2'de, R1'e göre sızıntı suyunun daha erken oluşmasının nedeni bu reaktördeki atığın organik içeriğinin fazla olması ve atık boyutunun daha küçük olmasıdır. Organik içeriğin fazla olması ve boyutun küçük olması biyolojik aktivitenin daha hızlı gerçekleşmesine dolayısıyla da sızıntı suyunun daha çabuk oluşmasına neden olmuştur. R2'de R1'e göre sızıntı suyu daha erken oluşmuşsa da her iki reaktörlerde de, yaz ayları süresince, oluşan sızıntı suyu, reaktörler için yeterli nem miktarını sağlamak konusunda yetersiz kalmıştır. Nemin yetersiz olduğu dönemlerde reaktörlere sızıntı suyu geri devir hatından zaman zaman sızıntı suyuyla birlikte musluk suyu da verilerek nemin istenilen seviyeye ulaşması sağlanmıştır. Reaktörlere verilen hava miktarı, haftalık olarak ölçülen gaz bileşenleri değerlendirilerek belirlenmiştir. Reaktörlerin üst yüzeylerinin açık olmasından dolayı reaktörlere yağışla birlikte doğal bir su girdisinin olması ve doğal havalandırmanın sağlanması nedeniyle reaktörlere verilen su ve hava miktarları tahmin edilen ve literatürde yer alan laboratuvar ölçekli çalışmalarda değerlerin altında olmakla birlikte, arazi ölçekli çalışmalarda verilerle uygunluk göstermektedir. Çalışma süresince R1 ve R2 için reaktörlere geri devrettirilen su/sızıntı suyu miktarları 0.42 ve 0.21 (l/ton atık-gün) ve verilen hava miktarları 1.819 ve 1.565 (m³/ ton atık-gün)

Deneysel çalışma

Çalışma süresince, reaktörlerde oluşan sızıntı suyu ve katı atık özelliklerindeki değişimler periyodik olarak izlenmiştir. Sızıntı suyu karakterizasyonundaki değişimler yaklaşık olarak aylık periyotta izlenirken, katı atık özelliklerinin değişimi 15 günlük ve aylık olarak izlenmiştir. Sızıntı suyunda, pH elektrometrik metot ile; klorür APHA (1998) gümüş nitratla titrasyon (Mohr metodu) ile; alkalinite, KOİ, TKN, NH₄-N ve NO₃-N, parametreleri APHA (1998)'e göre; BOİ, WTW OXITOP IS 6 ile; metaller (Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn, Ca, Na, Mg, K) ICP Optik Emisyon Spektrofotometrik Metodu ile ölçülmüştür. Katı atık numunelerinde pH çözünmüş numunede elektrometrik metot ile; toplam karbon ve azot kurutulmuş numunenin 950°C'de yakılması ile; nem numunenin

75 °C'de 48 saat kurutulması sonucu ağırlık kaybı ile; metaller çözülmüş numunede (Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn, Ca, Na, Mg, K) ICP Optik Emisyon Spektrofotometrik Metodu ile sıcaklık ise sıcaklık probu ile ölçülmüş ve hacim kaybı atık yüksekliğindeki azalmaya bağlı olarak hesaplanmıştır.

Deneysel çalışma sonuçları

Sızıntı suyu analiz sonuçları

pH ve alkalinite

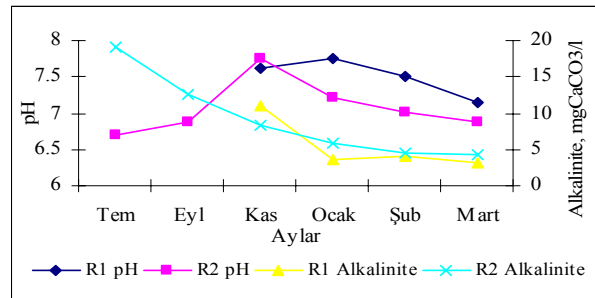
Aerobik reaktörlerde pH değeri daha kısa sürede alkali değerlere ulaşmaktadır. Bu tip reaktörlerde CO₂'nin reaktörlere verilen hava ile sıyrılması sonucu CO₂ konsantrasyonu düşer. CO₂ konsantrasyonunun azalması ile birlikte karbonik asit (H₂CO₃) ve bikarbonat iyonu (HCO₃⁻) konsantrasyonlarını azaltmakta ve ortamdaki H⁺ iyonu konsantrasyonu azalmaktadır. Bunun sonucunda da ortamdaki pH artmaktadır. Aerobik şartlar altında gerçekleşen bozunma sonucunda ölçülen pH 7-9 değerleri arasındadır (Ağdağ ve Sponza, 2004; Kim, 2005; Jun vd., 2007; Erses vd., 2007).

Alkalinite, biyolojik aktivitenin optimum düzeyde tutulması için gerekli pH'nın düşmesine neden olan uçucu ve diğer asitlerin tamponlanma kapasitesini ifade etmektedir. Katı atıkların içinde yer alan kolay bozunabilen organik maddelerin bozunması ile ortamdaki uçucu yağ asidi ve CO₂ konsantrasyonları artar ve pH 5'in altına kadar düşer (Quasim ve Chiang, 1994). Alkalinitenin de düşük olması durumunda düşen pH'nın tamponlanamaması ve biyolojik aktivitenin azalmasına ve/veya durmasına neden olabilir. Biyolojik aktivitenin sağlanabilmesi için gerekli alkalinite değeri 1000-5000 mg CaCO₃/l olarak önerilmektedir (Tchobanoglous, 1993).

Önceki çalışmalar göz önüne alındığında pH değerlerinin daha yüksek olması beklenirken daha düşük değerlerde seyrettiği görülmüştür. Söz konusu durumun açıklamasının iki nedene bağlı olduğu düşünülmektedir. Bunlardan biri havalandırma diğeri ise yağmur suyu etkisidir. Daha önce de belirtildiği gibi havalandırmanın etkisiyle ortamdaki CO₂'in sıyrılması pH'nın yükselmesine neden olur. Ancak bu çalışmada,

reaktörler kesikli olarak havalandırılmıştır. Havalandırma, reaktörlerdeki atığın nemine ve gaz ölçümlerine göre bazen haftada bir kez bazen iki kez yapılmıştır. İki havalandırma arasındaki sürecin uzaması ortamda CO₂ birikimine neden olmakta ve ortamın pH'sının beklenen seviyeye kadar yükselememesine neden olmaktadır. Gaz ölçümleri, havalandırmalar arasındaki sürenin uzun olduğu zamanlarda ortamdaki CO₂ miktarının arttığını göstermektedir. Yağmur suyu etkisi ise reaktöre düşen yağmurun asidik olması nedeniyle gözlenmiştir. Akkoyunlu ve Tayanç, Başak ve Alagha (2004), Karahan ve diğerleri (2000) ile Sahal ve Lacasse, yaptıkları çalışmalar sonucunda İstanbul'da yağın yağmurların düşük pH değerlerine özelliğe sahip olduğunu tespit etmişlerdir. Yağmur sularının pH'sının düşük olması, sızıntı suyunun pH'sının düşmesinde etkili olduğu düşünülmektedir.

Her iki reaktörde de alkalinite azalma gözlenmiştir. R2'de başlangıçtaki 19000 mg/l olan alkalinite önce hızlı bir azalma gözlenmiş ve çalışmanın sonlarına doğru azalma hızı düşmüştür. Çalışma sonuna her iki reaktörde de alkalinite değerlerinin literatürde belirtilen optimum değerler arasında olduğu görülmektedir. Reaktörlerde çalışma süresince gözlenen pH ve alkalinite değişimi Şekil 1'de gösterilmiştir.



Şekil 1. pH ve alkalinite değişimleri

İletkenlik ve klorür

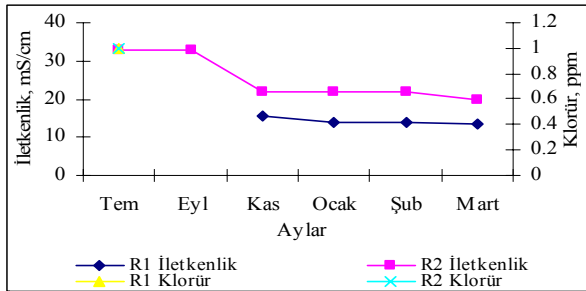
İletkenlik sızıntı suyundaki iyonların toplam konsantrasyonlarının ve bu iyonların elektrik iletkenliklerinin bir göstergesidir. Genel olarak depolama alanlarından oluşan sızıntı sularının iletkenlikleri zamanla azalma göstermektedir. İletkenliği azalmasının nedeni metaller, klorür ve sülfat gibi bazı kolay taşınabilir iyonların yı-

kanması, artan indirgen koşullarda sülfatın sülfite indirgenmesi ve sülfitin ağır metal-sülfid kompleksini oluşturarak çökmesidir (Jun vd., 2007; Erses vd., 2008).

Sızıntı suyunun geç olduğu R1'deki iletkenlik değerleri R2'ninkine göre daha düşük olmakla birlikte her iki reaktörlerde çalışma süresince azalmıştır. İletkenliğin R2'de daha yüksek olması atık boyunun daha küçük ve organik madde içeriğinin daha fazla olması ve böylelikle bozunmanın daha hızlı gerçekleşmesinden kaynaklanmaktadır.

Konvansiyonel depolama alanlarında seyrelme etkisiyle klorür konsantrasyonu zamanla azalır. Ancak geri devirli sistemlerde, uzun zamanda, sızıntı suyunun geri devrettirilmesi (oluşan sızıntı suyunun % 100 oranında geri devrettirilmesi durumunda) klorür konsantrasyonunun zamanla sabit kalmasına veya artmasına neden olur (Reinhart ve Townsend, 1998). R2'de klorür konsantrasyonu Kasım ayına kadar düşmüş (2499.23 mg/l) ve bu aydan sonra önce bir miktar yükselmiş (3943.78 mg/l) ve sonra yine azalmaya başlamıştır.

Reaktörlerde çalışma süresince gözlenen iletkenlik ve klorür konsantrasyonu değişimi Şekil 2'de gösterilmiştir.



Şekil 2. İletkenlik ve klorür değişimleri

KOİ ve BOİ

Sızıntı suyunun organik içeriğinin göstergesi olarak BOİ ve KOİ parametreleri sızıntı suyunun ihtiva ettiği organik maddelerin biyolojik olarak bozunabilirliğini ve söz konusu organik maddelerin oksijen eşdeğerini ifade etmektedir. BOİ/KOİ oranı sızıntı suyundaki organik mad-

denin bozunabilirliğinin ve depolama alanının stabilizasyonunun bir göstergesidir. Düşük BOİ/KOİ oranı sızıntı suyundaki biyolojik olarak bozunabilen organik karbonlu maddelerin miktarının düşük olduğunu ve zor bozulan organik bileşenlerin fazla olduğunu gösterir. Cossu ve diğerleri (2003), aerobik ve anaerobik reaktörler için KOİ değerlerini 120 günlük çalışma sonunda 800 ve 20000 mg/l olarak ölçmüşlerdir. Erses ve diğerleri (2008)'nin çalışmasında, % 90 oranındaki KOİ giderimi aerobik reaktörde 72, anaerobik reaktörde ise 462 günde sağlanmıştır. Borglin ve diğerleri (2004)'nin çalışmasında anaerobik reaktörlerdeki BOİ, KOİ ve BOİ/KOİ oranları sırasıyla 134 mg/l, 305 mg/l ve 0.45 iken aynı değerler aerobik reaktörlerde 4 mg /l, 159 mg/l ve 0.03 olarak belirtilmiştir. Read ve diğerleri (2001) ise havalandırma uygulamasıyla % 70 BOİ giderimi sağlandığını vurgulamışlardır. Jun ve diğerleri (2007) tarafından yapılan çalışmada, havalandırılan ve sızıntı suyu geri devirli reaktördeki KOİ gideriminin sadece sızıntı suyunun geri devrettirildiği reaktördeki KOİ gideriminden % 13.78 daha fazla olduğu belirtilmiştir. Erses ve diğerleri (2007), aerobik ve anaerobik reaktörlerde başlangıçta 0.57 ve 0.7 olan BOİ/KOİ oranının 0.03 ve 0.05'e düştüğünü belirtmişlerdir. Kjeldsen ve diğerleri (2002) tarafından asidik fazda BOİ/KOİ oranının 0.58; metanojenik fazda ise 0,06 olduğu belirtilmiştir. Borglin ve diğerleri (2004) ise aerobik ve anaerobik reaktörlerde 365 günlük çalışma sonucunda 0.03 ve 0.45 olduğu gözlenmiştir. Jun ve diğerleri (2007) sızıntı suyu geri devirli, havalandırmasız ve geri devirli havalandırılmalı reaktörlerde BOİ/KOİ oranını 0.24 ve 0.31 olarak belirlemişlerdir.

Bu çalışmada KOİ konsantrasyonu R1'de 4306 mg/l'den 2419.2 mg/l'ye, R2'de ise 64964 mg/l'den 8432 mg/l'ye düşmüştür. Buna göre KOİ giderimleri R1 ve R2'de sırasıyla % 44 ve % 87'dir. R1'de depolanan atıkların içerdiği organik madde oranı yaklaşık olarak % 58 iken bu değer R2'de yaklaşık % 66'dır ve R2'de depolanan atık miktarı diğer reaktörde depolanan atık miktarından % 36 daha fazladır. Dolayısıyla bu reaktörden oluşan sızıntı suyunun KOİ konsantrasyonu R1'den oluşandan daha yüksektir.

Ayrıca, R1'de KOİ konsantrasyonunun düşük olmasının nedeni bu reaktörde oluşan sızıntı sularının atığın biyolojik bozunmasından çok yağış suyu kaynaklı olmasıdır.

BOİ konsantrasyonları da KOİ konsantrasyonlarında olduğu gibi zamanla azalmıştır. BOİ giderim oranları R1, ve R2'de % 81 ve % 94'dir. BOİ konsantrasyonları R1'de 1050 mg/l'den 200 mg/l'ye, R2'de ise 41600 mg/l'den 2400 mg/l'ye düşmüştür. BOİ/KOİ oranları R1'de 0.24'ten 0.08'a, R2'de ise 0.64'ten 0.28'e düşmüştür.

TKN, NH₄-N ve NO₃-N

Katı atık depolama alanlarındaki azot türleri, genellikle organik maddelerin yapısında bulunan proteinlerin ve aminoasitlerin ayrışması sonucu ortaya çıkar. Evsel katı atıklar yaklaşık olarak % 4 oranında protein içermekte olup, organik azotun bozunması sonucu amonyak (NH₃-N) açığa çıkar (Price, 2003). Sızıntı sularındaki azotun önemli bir kısmını amonyum azotu oluşturmaktadır. Sızıntı sularında bulunan yüksek konsantrasyonlardaki amonyum azotu metan oluşumunu inhibe edebilmektedir (İnanç vd., 2000; Ağdağ ve Sponza, 2004). Biyolojik sistemlerde nitrifikasyon/denitrifikasyon prosesleri temel azot giderim mekanizmasıdır. Organik azot ve amonyum aerobik şartlar altında bir seri oksidasyon aşaması sonunda nitrata kadar okside olur.

R1'de çalışma başlangıcında 1826.35 mg/l olan TKN konsantrasyonu çalışma sonunda 488.7 mg/l'ye düşmüş ve % 73 giderim sağlanmıştır. R2'de çalışma başlangıcından itibaren artma eğiliminde olan TKN konsantrasyonu 166 mg/l'den 1365 mg/l'ye kadar yükselmiş ve çalışma sonunda 1031.5 mg/l'ye düşmüştür. R2'de NH₄-N konsantrasyonu başlangıçta artmış ve Kasım ayında 138,1 mg/l maksimum değerine ulaşmıştır. NH₄-N konsantrasyonundaki bu artış, katı atıklardaki organik azotlu bileşiklerin ve proteinlerin parçalanması ile açıklanır. Kasım ayından sonra her iki reaktörlerdeki NH₄-N konsantrasyonu da azalmış ve R1'de 9.285; R2'de 1.95 mg/l'ye düşmüştür. Çalışma genelinde, R2'de ölçülen NH₄-N konsantrasyonları,

R1'dekilerden daha düşüktür. Bu durumun, atığın parçalanmasının nitrifikasyon yoluyla azot gideriminde etkili olduğunu göstermektedir. NO₃-N konsantrasyonlarında her iki reaktörlerde sürekli bir azalma gözlenmiştir. Bu azalmanın nedeni, reaktörlere verilen hava ile ortamdaki NO₃-N'ün sıyırılmasıdır. Havalandırmanın ve atık boyutunun küçültülmesinin azot gideriminde etkili olduğu Ağdağ ve Sponza (2004), Jun ve diğerleri (2007), Giannis ve diğerleri (2007), He ve diğerleri (2007), Jiangou ve diğerleri (2007) tarafından da vurgulanmıştır.

Ağır ve alkali metaller

Depolama alanlarında oluşan sızıntı sularındaki metal konsantrasyonları temel olarak 4 faktöre bağlı olarak değişiklik gösterir. Bunlar, pH, redoks potansiyeli, kompleks oluşturma eğilimi ve iyonik güçlerdir. pH'nın etkisi genel olarak metallerin çökme ve sorpsiyon proseslerini etkilemektedir. Çökme ve sorpsiyon proseslerinin yüksek pH'da gerçekleşmesinden dolayı pH'nın yüksek olduğu metan fazında sızıntı suyundaki Ca konsantrasyonu, kalsiyumun kompleks oluşturma ve çökme özellikleri nedeniyle düşük olurken, Na ve K'un ise kompleks oluşturma ve çökme özellikleri daha da düşük ve çözünürlükleri ise yüksek olduğu için bu maddelerin sızıntı suyundaki konsantrasyonları zamanla azalmamaktadır. Kalsiyum, HCO₃⁻ ve çözülmüş organik bileşiklerle kompleks oluşturarak ve CaCO₃ şeklinde çökme eğilimi göstermektedir. Bu nedenle kalsiyumun çökme prosesi karbonat konsantrasyonu ile dolayısıyla alkalinite ile ilgilidir. Alkalitenin yüksek olması durumunda kalsiyum daha fazla çökeceği için sızıntı suyundaki kalsiyum konsantrasyonu düşük olacaktır. Negatif redoks potansiyelinin bulunması durumunda (Eh<-200 mV) metallerin çökmesinde etkili olan sülfidin ortamda bulunma olasılığı azalır. Düşük sülfid konsantrasyonlarında, karbonatlar ve hidroksitler metallerin çökmesinde etkili rol oynar. Ortamda sülfidin olmaması veya düşük konsantrasyonda olması durumunda Cr, Cd, Cu ve Pb sırasıyla Cr(OH)₃, CdCO₃, Cu₃(CO₃)₂, ve PbCO₃ olarak çökler. Zn ve Ni, diğer metallerle göre daha az çökme eğilimindedir ve sızıntı suyundaki taşınımı daha fazladır. Ortamda organik ve

hümik bileşiklerin yüksek miktarda olması durumunda metallerin çözünebilirliği artar. Söz konusu bileşiklerin hızlı bir şekilde bozunması ve bunun sonucunda uçucu yağ asitlerinin oluşarak ortam pH'sını düşürmesi metallerin sızıntı suyunda taşınımını arttırmaktadır (Cossu ve Serra, 1989; Bilgili, 2006; Jun vd., 2007; Qu vd., 2008; Erses vd., 2008; İnanç vd., 2007).

Kadmiyum konsantrasyonları incelendiğinde çalışma başlangıcında R1'de 0.0023 mg/l'den 0.0013 mg/l'ye düşmüştür R2'deki Cd konsantrasyonu 0.005 mg/l'den 0.05 mg/l'ye yükselmiş ve daha sonra azalarak çalışma sonunda 0,002 mg/l'ye düşmüştür. Cd giderim oranları, R1 ve R2'de % 41 ve 71'dir. Çalışma başlangıcında en yüksek krom konsantrasyonu 4.65 mg/l ile R2'de tespit edilmiş olmasına rağmen çalışma sonunda ölçülen en düşük krom konsantrasyonu R2'ye aittir (0,13 mg/l). R1'deki krom giderimi % 73 iken R1'de % 97'dir. Bakır konsantrasyonu da kromda olduğu gibi R2'de çalışma başlangıcında en yüksek (0.47 mg/l) konsantrasyonun ölçüldüğü reaktördür. Ancak çalışma sonunda Cu konsantrasyonu 0.26 mg/l'ye düşmüş ve % 46 giderim sağlanmıştır. Çalışma süresince R1'de Cu konsantrasyonunda önemli bir değişim kaydedilmemiştir. Nikel konsantrasyonları R1 ve R2'de sırasıyla 1.89 mg/l'den 0.35 mg/l'ye ve 0.47 mg/l'den 0.26 mg/l'e düşmüş ve % 81 ve % 78 oranında giderim kaydedilmiştir. Kuşun konsantrasyonu çalışma süresince R1'de, 0.025 mg/l'den 0.056 mg/l'ye yükselmişken, R2'de % 46 giderim sağlanmıştır. Çinko konsantrasyonu ise R1'de % 56 oranında azalmış ancak R2'de önemli bir değişiklik gözlenmemiştir. Ca, K ve Mg konsantrasyonları R2'de sürekli olarak artmış ancak R1'de, % 31, 32, 18 giderim olmuştur. Na konsantrasyonu ise her iki reaktörde artmıştır.

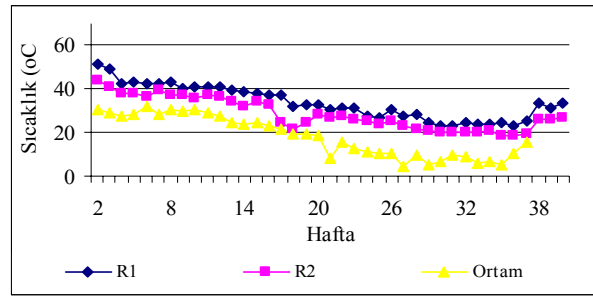
Katı atık analiz sonuçları

Sıcaklık

Atık kütlelerinin sıcaklık değişimi, katı atıkların bozunma oranının bir göstergesidir. Aerobik ve anaerobik bozunma süreçleri sonucunda açığa çıkan enerji katı atık kütlelerinin sıcaklığının artmasına neden olur (Reinhart ve Townsend, 1998; Jun vd., 2007). Atığın bozunmasında etkili biyokimyasal reaksiyonların gerçekleşmesi için

gerekli optimum sıcaklık çeşitli kaynaklarda 34-55 °C olarak belirtilmiştir (Reinhart ve Townsend, 1998; Tchobanoglous, 1993).

Sıcaklık parametresine ait veriler incelendiğinde her iki reaktörde de sıcaklığın azalma eğiliminde olduğu görülmektedir. Her iki reaktör karşılaştırıldığında sıcaklık R2'de R1'e göre daha düşüktür. R2'de depolanan atık elek altı atık olduğu için atık boyutu diğer reaktörlere göre çok daha küçüktür. Dolayısıyla atık parçaları arasında kalan boşluk hacmi daha azdır. Bu durum R2'de depolanan atığın diğer havalandırılmalı reaktörlere göre daha zor havalanmasına neden olarak sıcaklığın diğeri kadar yükselememesiyle sonuçlanmıştır. Reaktörlerde çalışma süresince gözlenen sıcaklık değişimi Şekil 3'te gösterilmiştir.



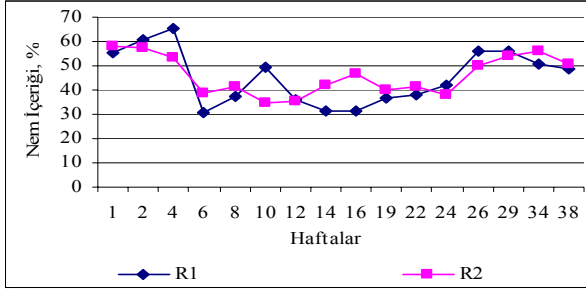
Şekil 3. Sıcaklık değişimi

Nem muhtevası

Atığın bozunmasında rol oynayan mikroorganizmaların faaliyetlerini sürdürmeleri ve biyokimyasal reaksiyonların gerçekleşmesi açısından önemli olan nem muhtevasının optimum değeri çeşitli çalışmalarda belirtilmiştir. Hudgins ve Harper (1999) nem muhtevasının % 50'nin üzerinde olması gerektiğini vurgularken bu değer USEPA (2000)'nin çalışmasında % 40, Hudgins ve Read (2001)'in çalışmasında % 70, Read ve diğerleri (2001)'nin çalışmasında % 70'in üzerinde, Warith (2002)'in çalışmasında % 45, Francois ve diğerleri (2007)'nin çalışmasında % 42 olarak belirtilmiştir.

Çalışma başlangıcında, R1'de depolanan atığın nem muhtevası % 55, R2'de depolanan elek altı atığın nem muhtevası ise % 58 olarak tespit edilmiştir. Çalışma süresince katı atığın nem muhtevasının % 20'nin altına düşmemesi amaç-

lanmış ve su/sızıntı suyu geri devri ile % 40 civarında tutulması sağlanmıştır. Reaktörlerde çalışma süresince nem muhtevastaki değişimi Şekil 4’te gösterilmiştir.



Şekil 4. Nem içeriğinin değişimi

pH

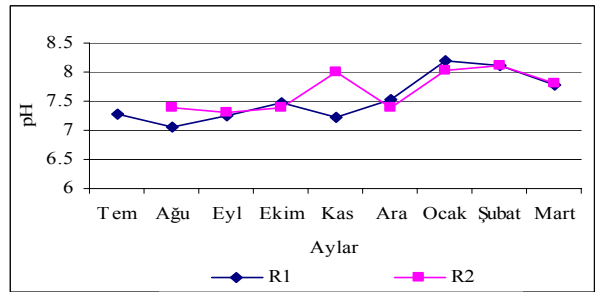
Atığın bozunma sürecinde faaliyet gösteren mikroorganizmaların faaliyetlerinin sürdürülebilmeleri için gerekli olan pH değeri 6 ile 9 arasında olmakla beraber optimum pH değeri 6.5-7.5’tir. pH’ın 4.5’in altında veya 9’un üstünde olması durumlarında zayıf asit ve bazların bozunmamış molekülleri hücre yapısına hidrojen ve hidroksit iyonlarına göre kolaylıkla girer ve böylelikle ortamın pH’ını değiştirerek, hücreye zarar verebilir ve biyolojik faaliyetlerin durmasına neden olabilir (Tchbanoglous, 1993). Aerobik ve anaerobik bozunma süreçleri karşılaştırıldığında, aerobik bozunma anaerobik bozunmaya göre daha yüksek pH değerlerinde gerçekleşmektedir. Bu durum, reaktör içinde bulunan CO₂’ın havalandırmanın etkisiyle reaktör dışına atılmasından kaynaklanmaktadır (Kim, 2005, Jun vd., 2007).

Çalışmanın başlangıcında R1’deki pH değeri 7.28 ve R2’de depolanmış olan elek altı atığın pH değeri ise 6 olarak ölçülmüştür. İlk ayda R2’nin pH değeri hızla artarak 7.4 değerine ulaşmıştır. Diğer reaktörlerdeki pH değeri R2’ninkine göre daha yavaş bir artış göstermiştir. Çalışma sonunda her iki reaktördeki pH değeri 8 civarındadır. Reaktörlerde çalışma süresince gözlenen pH değişimi Şekil 5’te gösterilmiştir.

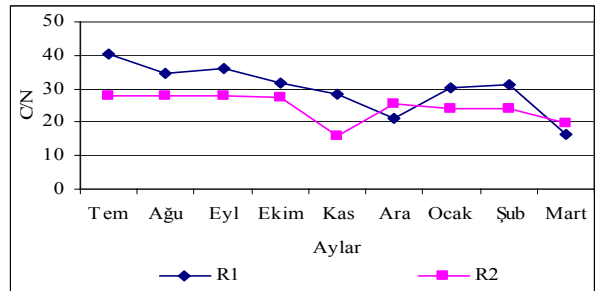
C/N oranı

Katı atıkların aerobik olarak bozunması için gerekli optimum C/N değeri 25-50 arasındadır. C/N oranının düşük olması durumunda azot çı-

kışı gözlenirken bu değer yüksek olması ise mikroorganizmalar için gerekli nütrientlerin sınırlı olduğu anlaşılır (Tchbanoglous, 1993). Bu çalışmada, katı atık numunelerindeki % C, % N, ve C/N oranları incelendiğinde, tüm reaktörlerde % C değerinin çalışma süresince azaldığı, % N değerinin arttığı görülmektedir. Karbon oranındaki azalmanın nedeni organik maddenin bozunması, azot oranının artmasının nedeni ise çalışma süresince gözlenen yağışlarla birlikte reaktörlere azot girişinin olmasıdır. C/N oranı değişimleri Şekil 6’da gösterilmiştir. Stabilizasyon göstergesi olarak (C/N) son / (C/N) başlangıç parametresi incelendiğinde R1 ve R2 için bu değer sırasıyla; 0.41 ve 0.71 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 5. Katı atıklarda pH değişimi



Şekil 6. C/N oranının değişimi

Ağır ve alkali metaller

Literatürde yer alan çalışmalar incelendiğinde genel olarak katı atıkların metal konsantrasyonlarının zamanla arttığı ve bu artışın nedeninin kütle kaybı olduğu belirtilmiştir. Geri devirli sistemlerde sızıntı suyu geri devri metallerin tekrar atık kütesine geri verilerek konsantrasyonun artmasına neden olabilmektedir. Ancak oluşan sızıntı suyunun tamamının geri devretilmemesi sonucu metallerin ortamdaki uzaklaş-

tırılması da sözkonusudur. Düşük geri devir oranlarının uygulandığı sistemlerde daha düşük metal konsantrasyonları ölçülmektedir.

Kadmiyum konsantrasyonları R1’de çalışmanın ilk aylarında artmış ancak daha sonra önemli bir değişim kaydedilmemiştir. R2’de ise % 94 giderim sağlanmıştır. Krom konsantrasyonları başlangıçta her iki reaktörde de artmış olmakla çalışma süresince R1 ve R2’de eşit oranlarda azalma olmuştur (% 78). Bakır konsantrasyonları R1 ve R2’de sırasıyla 4mg/l’den 21.6mg/l’ye ve 6.4 mg/l’den, 141 mg/l’ye yükselmiştir. Nikel konsantrasyonları her iki reaktörde de azalmış ve R1 ve R2’de % 63 ve % 70 giderim oranları kaydedilmiştir. Kurşun konsantrasyonu çalışmanın ilk aylarında artmış olmakla birlikte % 56 giderim olmuştur. R2’deki kurşun konsantrasyonunda ise önemli bir değişim olmamıştır. Çinko konsantrasyonu çalışmanın ilk aylarında 14.9 mg/l’den 37.9 mg/l’ye yükselmiş ve çalışma sonunda 13.39 mg/l’ye düşmüştür. R2’de ise önce 19.1 mg/l’den 57 mg/l’ye yükselmiş ve çalışma sonunda 8,8 mg/l düşmüştür. Kalsiyum konsantrasyonları R1 ve R2’de sırasıyla % 36, % 75 oranında azalırken magnezyum konsantrasyonlarında % 20 ve % 31 azalma olduğu görülmüştür. Potasyum konsantrasyonu R1’de artma ve azalma yönünde salınımlar göstermiş, R2’de ise 4677 mg/l’den 6107 mg/l’ye yükselmiştir. Sodyum konsantrasyonu ise R1’de 2880 mg/l’den 4638 mg/l’ye, R2’de ise 3286 mg/l’den 6520 mg/l’ye yükselmiştir.

Hacim kaybı

Depolama alanlarında depolama süresince atık hacminde azalma gözlenmektedir. Atık hacminin azalmasında rol oynayan faktörler: Atığın ağırlığıyla sıkışması ve bunun sonucunda atıklar arasındaki boşluğun azalması; biyolojik ve kimyasal aktiviteler; atık materyalin sızıntı suyunda çözünmesi; küçük parçaların geniş boşlukları doldurmasıdır. Sonoma Country’de yapılan pilot ölçekli çalışmada geri devirli test hücresinde atık yüksekliğinde % 20 azalma sağlanırken geri devirsiz hücrede bu oran % 8’de kalmıştır. Mountain View Depolama Alanında 4 yıllık çalışma sonunda geri devirli hücredeki hacim kaybı % 13-15, geri devirsiz hücredeki ise % 8-

12’dir (Reinhart ve Townsend, 1998). Read ve diğerleri (2001) tarafından yapılan pilot ölçekli çalışmada aerobik depolama yönteminin uygulanmasıyla 9 ayda % 9, 18 ayda ise % 10 hacim kaybı sağlanmıştır. Borglin ve diğerleri (2004)’nin çalışmasında aerobik ve anaerobik bioreaktör ve konvansiyonel depolama alanlarındaki hacim kaybının sırasıyla % 32, % 20 ve % 7 olduğu tespit edilmiştir. Bilgili (2006) geri devirli ve geri devirsiz aerobik reaktörlerdeki hacim kaybını % 43 ve % 34 olarak belirlemiştir.

Bu çalışmada reaktörlerdeki hacim kaybının belirlenebilmesi için atık yüksekliğindeki azalma aylık olarak ölçülmüştür. Çalışma süresince R1, R2’de atık yüksekliklerinin ve dolayısıyla da atık hacimlerinin sırasıyla % 25, ve % 15 oranlarında azaldığı belirlenmiştir. R2’de depolanan atıkların dane boyutunun küçük olması nedeniyle atık parçaları arasında kalan boşluk hacmi diğer reaktörlerdeki atık parçaları arasındaki boşluk hacminden daha küçük olması nedeniyle bu reaktörde diğer reaktörlere göre daha az hacim kaybı gözlenmiştir.

Sonuçlar

Atık stabilizasyon sürecinin hızlandırılması, depolama alanlarının olumsuz etkilerinin azaltılması açısından oldukça büyük bir öneme sahiptir. Günümüze kadar yapılmış olan çalışmalarda atık stabilizasyonunun hızlandırılması amacıyla farklı yöntemler denenmiştir. Atıkların parçalanması, sıkıştırılması, atıklara evsel çamur, enzim ve tampon ilave edilmesi ve sızıntı suyunun geri devrettirilmesi atık stabilizasyonunun hızlandırılması bu amaçla uygulanan yöntemlerdir.

Bu çalışmada, atık boyutunun ve karakterizasyonunun atık stabilizasyonunu ve sızıntı suyu kalitesi üzerindeki etkileri pilot ölçekli havalandırılmalı simüle bioreaktörlerde incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar, atık boyutunun küçültülmesinin, atığın bozunmasını hızlandırarak stabilizasyon için gerekli süreyi kısalttığını ortaya koymuşlardır. Atık boyutunun küçültülmesi, biyolojik bozunma için gerekli özgül yüzey alanının artmasını, atığın ve atık kütleesindeki nem dağılımını homojen olmasını sağlamaktadır.

Sızıntı suyu oluşumu, organik madde miktarının fazla, atık boyutunun küçük olduğu R2’de, R1’e göre daha hızlı gerçekleşmiştir. Bu durum, R2’deki bozunmanın daha hızlı gerçekleştiğini göstermektedir. R2’de çalışma süresince katı atık ve sızıntı suyu örneklerinde analizleri yapılan parametrelerin konsantrasyonları çalışma başlangıcında R1’e göre daha yüksek değerlerde ölçülmüş olmasına rağmen kirletici konsantrasyonları giderim oranları R2’de daha fazladır. Bu çalışmada atık boyutunun küçültülmesinin atık bozunmasını hızlandırdığı ve katı atık ve sızıntı suyu kalitesini arttırdığını belirlenmiştir.

Kaynaklar

- Adeleke, O.F., (2003). Bioreactor landfill, Shanghai University.
- Ağdağ, O.N., (2004). Factors affecting the treatment efficiency of municipal solid wastes in simulated landfill bioreactors, *Doktora Tezi*, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir.
- Ağdağ, O.N. ve Sponza, D.T., (2004). Katı atıkların biyoreaktörlerde ayrışmasını etkileyen faktörler: “Katı atıkların sıkıştırılması ve parçalanması”, *DEÜ Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, **6**, 83-95.
- Akkoyunlu, B.O. ve Tayanç, M., (2008). Four storms with sub-events: Sampling and analysis, *Environment International*, **34**, 606-612.
- APHA, (1998). Standard methods for the examination of water and wastewater, 21th edition, Washington, DC:APHA.
- Başak, B. ve Alagha, O., (2004). The chemical composition of rainwater over Büyükçekmece Lake, İstanbul, *Atmospheric Research*, **71**, 275-288.
- Bilgili, M.S., (2006). Katı atık düzenli depo sahalarında atıkların aerobik ve anaerobik ayrışması üzerine sızıntı suyu geri devrinin etkileri, *Doktora Tezi*, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Borglin, S.E., Hazen, T.G., Oldenburg, C.M. ve Zawislanski, P., (2004). Comparison of aerobic and anaerobic biotreatment of municipal solid waste, *Journal of Air and Waste Management*, **54**, 7, 815-822.
- Cossu, R., Serra, R., (1989). Effects of codisposal on degradation processes, sanitarylandfilling: Process, technology and environmental impact, Academic Pres, New York, 121-151.
- Cossu, R., Raga, R. ve Rossetti, D.,(2003). The PAF Model: An integrated approach for landfill sustainability, *Waste Management*, **23**, 37-44.
- Erses, S., Onay, T.T. ve Yenigün, O., (2008). Comparison of aerobic and anaerobic degradation of municipal solid waste in bioreactor landfills, *Bioresource Technology*, **99**, 5418-5426.
- Francois, V., Feuillade, G., matejka, G., Lagier, T. ve Skhiri, N., (2007). Leachate recirculation effects on waste degradation: Study on columns, *Waste Management*, **27**, 1259-1272.
- Giannis, A. Makripodis, G., Simantiraki, F., Somara, M. ve Gidarakos, E., (2007). Monitoring operational and leachate characteristics of an aerobic simulated landfill bioreactor, *Waste Management*, **28**, 1346-1354.
- He, R., Liu, X., Zhang, Z. ve Shen, D., (2007). Characteristics of the bioreactor landfill system using an anaerobic-aerobic process for nitrogen removal, *Bioresource Technology*, **98**, 2526-2532.
- Heyer, K.U., Hupe, K., Ritzkowski, M. ve Stegmann, R., (2001). Technical implementation and operation of the low pressure aeration of landfills, Proceedings Sardinia 2001, *Eight International Waste Management and Landfill Symposium*, S.Margherita di Pula, Cagliari, Italy.
- Hudgins, M. ve Harper, S., (1999). Operational characteristics of two aerobic landfill systems, Seventh International Waste Management and Landfill Symposium, Sardinia, Italy.
- Hudgins, M. ve Read, A., (2001). Sustainable landfill management via the use of aerobic bioreactors, *Proceedings*, Eight International Waste Management and Landfill Symposium, S.Margherita di Pula, Cagliari, Italy.
- İnanç, B., Çallı, B. ve Saatçi, A., (2000). Characterization and Anaerobic treatment of the sanitary landfill leachate in İstanbul, *Water Science and Technology*, **41**, 223-230.
- İnanç, B., Inoue, Y., Yamada, M., Ono, Y. ve Nagamori, M., (2007). Heavy metal leaching from aerobic and anaerobic landfill bioreactors of co-disposal municipal solid waste incineration bottom ash and shredded low-organic residues, *Journal of Hazardous Materials*, **141**, 793-802.
- Jianguo, J., Guodong, Y., Yunfeng, H., Zhonglin, H., Xiangming, F., Shengyong, Z. ve Chaoping, Z., (2007). Pilot-scale experiment on anaerobic bioreactor landfills in China, *Waste Management*, **27**, 893-901.
- Jun, D., Yongsheng, Z., Henry, R.K. ve Mei, H., (2007). Impacts of aeration and active sludge addition on leachate recirculation bioreactor, *Journal of Hazardous Materials*, **147**, 240-248.
- Karahan, G., Öztürk, N. ve Bayülken, A., (2000). Natural radioactivity in various surface waters in İstanbul, Turkey, *Water Research*, **34**, 4367-4370.
- Kim, H., (2005). Comparative studies of aerobic and anaerobic landfills using simulated landfill

- lysimeters, *Doktora Tezi*, University of Florida, USA.
- Kjeldsen, P., Barlaz, M.A., Rooker, A.P., Baun, A., Ledin, A. ve Christensen, T.H., (2002). Present and long term composition of MSW landfill leachate: A review, *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, **32**, 297-336.
- Price, G.A., Barlaz, M.A. ve Hater, G.R., (2003). Nitrogen management in bioreactor landfills, *Waste Management*, **23**, 675-688.
- Qasim, S.R. ve Chiang, W., (1994). Sanitary landfill leachate generation, control and treatment, Technomic Publishing Company, Switzerland.
- Qu, X., He, P.J., Shao, L.M. ve Lee, D.J., (2008). Heavy metal mobility in full-scale bioreactor landfill: Initial stage, *Chemosphere*, **70**, 769-777.
- Reinhart, D.R. ve Townsend, T.G., (1998). Landfill bioreactor design and operation, CRC Press Lewis Publication, New York.
- Read, A.D., Hudgins, M. ve Phillips, P., (2001). Perpetual landfilling through aeration of the waste mass: Lesson from test cells in Georgia (USA), *Waste Management*, **21**, 617-629.
- Read, A. ve Hudgins, M., (2002). Successful demonstration of aerobic landfilling-leading towards a more sustainable solid waste management approach, *Appropriate Environmental and Solid Waste Management and Technologies for Developing Countries (ISWA)*, İstanbul, Türkiye.
- Ritzkowski, M., Heyer, K.U. ve Stegmann, R., (2006). Fundamental processes and implications during in situ aeration of old landfills, *Waste Management*, **26**, 356-372.
- Rhyner, C.R., Schwartz L.J., Wenger, R.B. ve Kohrell, M.G., (1995). Waste management and resource recovery, Lewis Publishers, USA.
- Sahal, N. ve Lacasse, M.A., (2008). Proposed method for calculating water penetration test parameters of wall assemblies as applied to Istanbul, Turkey, *Building and Environment*, **43**, 1250-1260.
- Sponza, D.T. ve Ağdağ, N.O., (2005). Effects of shredding of wastes on the treatment of Municipal Solid Wastes (MSWs) in simulated anaerobic recycled reactors, *Enzyme and Microbial Technology*, **36**, 25-33.
- Sponza, D.T. ve Ağdağ, N.O., (2004). Impact of leachate recirculation and recirculation volume on stabilization of municipal solid wastes in simulated anaerobic bioreactors, *Process Biochemistry*, **39**, 2157-2165.
- Warith, M., (2002). Bioreactor landfills: Experimental and field results, *Waste Management*, **22**, 7-17.
- Tchobanoglous, G., Theisen, H. ve Vigil, S.A., (1993). *Integrated solid waste management*, McGraw-Hill Book Co., Singapore.
- USEPA, (2000). State of the practice for bioreactor landfills workshop on bioreactor landfills Arlington, Virginia.