

Application of Partial Nitrification/Anammox Processes for Landfill Leachate Treatment

Ayben POLAT*¹

Mustafa ÖZTÜRK²

Uğur Savaş Topçu¹

Şükrü ASLAN¹

¹Cumhuriyet Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, 58140, Sivas, Türkiye

²Cumhuriyet Üniversitesi, Sivas MYO, Organik Tarım Programı, 58140, Sivas, Türkiye

Abstract

Sanitary landfill leachate, which is liquid generated from the landfills, cause serious water pollution due to high concentrations of pollutants; ammonia (100 - 5500 mg N/L) and slowly or non-biodegradable organic matter. Landfill leachate is characterized by low carbon to nitrogen (C/N) ratio, thus still requiring high energy and cost for treatment by conventional biological technologies. In recent years, a partial nitrification coupled with Anammox process have proven as a feasible technology for nitrogen removal in comparison to the conventional biological nitrogen removal processes. In the Anammox process, oxygen demand is low (50% less than classical nitrification process), organic carbon source is not used for nitrate reduction, produce less sludge amount and less CO₂ emission. There are many studies demonstrated that application of nitrification and anammox processes for leachate treatment are potential control for nitrogen removal. In this study, simultaneous partial nitrification and Anammox processes is evaluated for landfill leachate treatment.

Keywords: Anammox, landfill leachate, partial nitrification

Katı Atık Sızıntı Suyu Arıtımında Kısmi Nitrifikasyon/ Anammox Süreci Uygulaması

Ayben POLAT*¹

Mustafa ÖZTÜRK²

Uğur Savaş Topçu¹

Şükrü ASLAN¹

¹Cumhuriyet Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, 58140, Sivas, Türkiye

²Cumhuriyet Üniversitesi, Sivas MYO, Organik Tarım Programı, 58140, Sivas, Türkiye

ÖZET

Katı atık alanlarından kaynaklanan sızıntı suları, yüksek derişimde amonyum (100-5500 mg/L) ve biyolojik parçalanmayan organik madde içerikleri ile önemli su kirlenme sorununa neden olmaktadır. Sızıntı suları içeriğinde düşük karbon ve azot (C/N) oranları klasik biyolojik arıtımda yüksek enerji ve arıtma maliyetleri gerektirmektedir. Son yıllarda, kısmi nitrifikasyon ve Anammox süreçlerinin birlikte uygulanması, klasik biyolojik azot giderimine göre daha uygun bir süreç olarak değerlendirilmektedir. Anammox sürecinde klasik nitrifikasyona göre daha düşük oksijen kullanımı, nitrat indirgenmesi için organik karbon gerekmemesi, daha düşük miktarda çamur üretimi ve CO₂ emisyonu gerçekleşmektedir. Yapılan çalışmalar, nitritasyon ve Anammox sürecinin sızıntı suyu arıtımında azot giderimi için uygulanabileceğini göstermektedir. Bu çalışmada, kısmi nitrifikasyon ve Anammox süreçlerinin sızıntı suyu arıtımında uygulanması değerlendirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Anammox, kısmi nitrifikasyon, sızıntı suyu

2. Katı Atık Sızıntı Suyu

Katı atıkların muhtevasından kaynaklanan çok sayıda kirletici parametreyi içeren sızıntı suyu, katı atıkların içinden süzülerek bir takım fiziksel, kimyasal ve biyolojik olaylara maruz kalma sonucu oluşmaktadır. Sızıntı suyunun iki önemli kaynağı vardır. Bunlardan birisi depolanan atıktaki su muhtevası diğeri ise dışarıdan depoya giren su miktarıdır. Dışarıdan depolama sahasına giren su, yağmur sularının depo üzerinden sızması ve yüzeysel suların depoya girmesiyle oluşmaktadır [7]. Yağmur suyu, yüzeysel akış, evaporasyon ve evapotranspirasyon, nihai örtüden sızma, katı atığın su tutma kapasitesi ve gaz üretiminde tüketilen su miktarı (içsel tüketim) sızıntı suyu miktarında etkili olan parametrelerdir. Sızıntı suyu miktarı, literatürde 2-5 m³/ha/gün, fiili durumda 15-35 m³/ha/gün olarak belirtilmektedir [8]. Kentsel çöp sızıntı suyu özellikleri büyük ölçüde mevsimsel hava değişimi, atık cins ve bileşimine ve depolama yaşı gibi faktörlere bağlı olarak değişim gösterir [5]. Genellikle sızıntı suyunun kirletici konsantrasyonlarını tanımlamak için kullanılan başlıca parametreler şunlardır; a) Kimyasal Oksijen İhtiyacı (KOİ), b) Amonyum Azotu (NH₄⁺-N), c) Çözünmüş Katılar, d) Askıda Katı Madde, e) Ksenobiyotik Organik Bileşikler (XOCs), f) Ağır Metaller ve g) Tuzlardır [9]. Deponi alanlarında oluşan sızıntı sularının kimyasal içeriği Tablo 1.'de verilmiştir.

Tablo 1. Katı atık depolarında sızıntı suyu kimyasal kompozisyonu [10]

Parametre	Değer Aralığı	Parametre	Değer Aralığı
KOİ (mg/L)	150 - 100000	SO ₄ (mg/L)	10 - 1200
BOİ ₅ (mg/L)	100 - 90000	Cl (mg/L)	30 - 4000
pH	5,3 - 8,5	Fe (mg/L)	0,4 - 2200
Alkanite	300 - 11500	Zn (mg/L)	0,05 - 170
Sertlik (mgCaCO ₃ /L)	500 - 8900	Mn (mg/L)	0,4 - 50
NH ₄ (mg/L)	1 - 1500	CN (mg/L)	0,04 - 90
N _{org} (mg/L)	1 - 2000	AOX (ug Cl/L)	320 - 3 500
N _{top} (mg/L)	50 - 5000	Fenol (mg/L)	0,04 - 44
NO ₃ (mg/L)	0,1 - 50	As (ug/L)	5 - 1 600
NO ₂ (mg/L)	0 - 25	Cd (ug/L)	0,5 - 140
P _{top} (mg/L)	0,1 - 30	Co (ug/L)	4 - 950
PO ₄ (mg/L)	0,3 - 25	Ni (ug/L)	20 - 2050
Ca (mg/L)	10 - 2500	Pb (ug/L)	8 - 1020
Mg (mg/L)	50 - 1150	Cr(ug/L)	30 - 1600
Na (mg/L)	50 - 4000	Cu (ug/L)	4 - 1400
K (mg/L)	10 - 2500	Hg (ug/L)	0,2 - 50

Genellikle depolama yaşı, toplanan sızıntı suyu kalitesinde önemli bir rol oynar [11]. Depo yaşı arttıkça biyolojik ayrışma tamamlandığından kolay ayrışabilen organik maddelerin oranı düşer. Bu sebeple, genç depo alanlarındaki sızıntı sularında BOİ/KOİ >0,5 iken yaşlı depo alanlarındaki sızıntı sularında BOİ/KOİ <0,2'dir. 2-3 yıllık depolama alanlarında özellikle organik maddeler, mikroorganizma türleri ve organik kirlilik yükleri maksimuma ulaşır [12]. Nispeten yüksek karboksil ve aromatik hidroksil grubu yoğunluğuna sahip fulvik bileşiklerinin artan depolama

yaşıyla birlikte organik bileşiklerde en stabil grup olduğu görülmüştür [13]. Sızıntı suyunun deponi yaşıyla değişimi Tablo 2.'de gösterilmiştir.

Tablo 2. Sızıntı suyu özelliklerinin depo yaşı ile değişimi [12]

Parametre	1 yıl	5 yıl	16 yıl ve üzeri
pH*	5,2-6,4	5,0-6,6	5,6-6,1
KOİ	10000-40000	8000	400
BOİ ₅	7500-28000	4000	80
TOK	7300-16350	83-9150	108-3080
NH ₃ -N	56-482	36	10
Toplam P	25-35	12	8
Toplam katılar	10000-33000	718-18400	1920-5350
Toplam uçucu katılar	5350-20330	124-10300	770-3300
Alkalinite*	600-800	1330	70
Klorür	620-1880	5,3-730	115-193
Cd	-	<0,05	<0,05
Mn	75-125	0,0	0,06
Cu	-	<0,5	<0,5
Fe	210-325	6,3	0,6
Pb	-	0,5	1
SO ₄	400-650	2	2
Zn	10-30	0,4	0,1

*:Alkalinite ve pH dışındaki tüm parametrelerin birimi mg/L'dir.

Sızıntı suyu bileşimlerini deponi alanındaki atık türü, konumu ve yerel iklim koşulları [11], depo yaşı, sıcaklık, pH, redoks potansiyeli, stabilizasyon derecesi, depolama alanı işletme koşulları ve hidrojeolojik yapısı [14] gibi faktörler belirler.

Türkiye'de geçmiş yıllarda yapılmış olan sızıntı suyu çalışmalarında aynı parametrelerin illere göre farklılık gösterdiği Tablo 3.'de görülmektedir.

Anaerobik amonyum oksidasyonu (anammox) süreci yüksek azot yükü ve düşük biyolojik olarak parçalanabilir organik madde içeren atıksuların arıtımı için daha uygulanabilir bir alternatiftir [5].

Tablo 3. Türkiye'nin bazı illerinde sızıntı suyu karakterizasyonu

Parametreler	İstanbul (Kemerburgaz)	Kütahya	Diyarbakır	Bursa (Hamitler)	Sivas	Samsun (Yılanlıdere)	Çorlu
BOI ₅	-	15000	5700-10800	3877	-	6400	95.84
KOI	10370	20400	8500-19200	8042	2350	11000	14447
Toplam çözünmüş katı	15400	-	-	-	-	-	688
Tolam uçucu katı	3143	-	-	-	-	-	201
AKM	-	400	-	607	-	-	-
Toplam sertlik	2500	-	-	-	-	-	-
Alkalinite*	22300	16500	-	-	-	-	7505
pH*	7,6	7,3	6,5-7,5	7,71	8,36	7,95	8,31-8,47
SO ₄	270	-	-	-	-	2279	1450
Cl ⁻	2700	-	-	2549	5484	1092	-
TKN	2200	2950	-	-	-	-	1262
NO ₃	7,2	-	5-47	13	-	21,10	-
NH ₄	2500	2700	1100-2150	1681	310	-	-
Ca ²⁺	385	-	-	-	-	-	-
Mg	660	680	-	-	-	-	-
Na	2152	-	-	-	-	-	-
K	1450	-	-	-	-	-	-
Fe	13,5	-	600-720	-	-	1,44	2,46
Toplam fosfor	26	-	17-24	-	-	-	-
Toplam fosfat	-	43	8-18	-	10,25	23,37	-
Mn	542	-	-	-	-	-	2,64
Cu	62,5	-	-	-	-	-	0,147
Cr	7,65	-	-	-	-	-	0,63
Ni	3,6	-	-	-	-	-	0,138
Hg	5,4	-	-	-	-	-	-
Kaynak	[15]	[14]	[14]	[14]	[14]	[14]	[16]

*:Alkalinite ve pH dışındaki tüm parametrelerin birimi mg/L'dir.

3. Kısmi Nitrifikasyon/Anammox Süreci

Anammox sürecinde, anaerobik koşullar altında amonyum, ototrofik olarak azot gazına oksitlenirken nitrit elektron alıcısı olarak kullanılır. Böylelikle havalandırma ile harici karbon kaynağına ihtiyaç kalmaz [17]. Kısmi nitrifikasyon-Anammox sürecinde, amonyumun yaklaşık yarısı oksijen ile nitrite (kısmi nitrifikasyon) ve ardından da Eşitlik (1)'de görüldüğü gibi [18] kalan amonyum ile oluşan nitrit, azot gazı ile az miktarda da nitrata oksitlenir [19].



Anammox süreci, yüksek azot ve düşük biyolojik olarak parçalanabilir organik madde içeren atıksular için daha sürdürülebilir bir alternatiftir. Anammox süreci, 1,32 NO₂⁻ / NH₄⁺ molar oranını sağlamak için öncesinde bir kısmi nitrifikasyon gerektirir. Kısmi nitrifikasyon sürecinin amacı nitrit oksitleyen bakterilerin (NOB) aktivitelerini engellemek ve amonyum oksitleyen bakteriler (AOB) ile nitrit birikimini gerçekleştirmektir [5]. Tipik atıksularda nitrit, nadiren bulunduğu için, Anammox süreci ile atıksulardan amonyak gideriminde Anammox bakterileri

için elektron alıcısı olan nitrit, yeterli miktarda sağlanmalıdır [20]. Kısmi nitrifikasyon süreci, Anammox sürecinin ihtiyacı olan amonyumu sağlamak için amonyumun sadece % 50' sini nitrite dönüştürmede kullanılır [21]. NOB aktivitesini ortadan kaldırmak ve nitrit birikimini gerçekleştirmek için kısa katı alıkonma süresi (SRT), yüksek pH, düşük çözünmüş oksijen (DO), serbest amonyak (SA) ya da serbest nitroz asit inhibisyonu (SNA) ve sıcaklık gibi kontrol faktörleri uygulanabilir. Kısmi nitrifikasyon reaktörleri, 30-35 °C aralığındaki sıcaklıklarda AOB' lerin büyüme hızı NOB' lerden daha yüksek olduğu için bu sıcaklık aralıklarında işletilir. Ancak sıcaklık, amonyum-serbest amonyak (SA) ve nitrit-serbest nitroz asit (SNA) kimyasal dengesini etkilediği için kısmi nitrifikasyon üzerinde önemli bir role sahiptir. Yüksek SA ve SNA derişimleri sıcaklıktan etkilenir ve sadece NOB aktivitesi değil aynı zamanda AOB aktivitesi de azalabilir ve hatta inhibe olabilir [5].

Kısmi nitrifikasyon-Anammox süreçlerinin birlikte uygulanması, amonyumca zengin atıksulardan azot gideriminde klasik nitrifikasyon-denitrifikasyon süreçlerinden daha yüksek yükleme oranlarının üstesinden gelmesi, daha düşük oksijen gereksinimi ve daha düşük çamur üretimi gibi avantajlara sahiptir. Bu birleşik sistemin, ister iki aşamalı olsun ister tek reaktörde olsun yüksek azot içeren atıksuların arıtımı için klasik nitrifikasyon-denitrifikasyon sistemlerinden genellikle daha sürdürülebilir olduğu düşünülmektedir [22].

Kısmi nitrifikasyon-Anammox süreçleri hem iki aşamalı hem de tek reaktör sistemlerinde hayvan gübresi, çürütücü sıvısı, tuvalet atıksuları gibi yüksek azot ve düşük biyolojik olarak parçalanabilir madde içeren dirençli atıksulardan azot giderimi için cazip ve sürdürülebilir görülmektedir [23]. Son yıllarda katı atık sızıntı sularının kısmi nitrifikasyon-Anammox süreçleri ile arıtımı çeşitli araştırmacıların ilgisini çekmiştir [2, 24, 25, 26].

4. Kısmi Nitrifikasyon/Anammox Süreci ile Katı Atık Sızıntı Suyu Arıtımı

Kısmi nitrifikasyon-Anammox sürecinin özellikle seyreltilmiş ya da düşük derişimli katı atık sızıntı sularının arıtımında uygulanabilir olduğu kanıtlanmıştır. Kentsel katı atık sızıntı suları genellikle, yüksek amonyum derişimleri ve düşük organik madde içeriği ile karakterize edilir. Bu nedenle sızıntı sularının klasik nitrifikasyon-denitrifikasyon süreçleri ile arıtımı yüksek oksijen ihtiyacı ve harici karbon kaynağı gereksiniminden dolayı ekonomik değildir. Daha düşük, havalandırma gereksinimi ve harici organik karbon dozlamasından dolayı anammox süreci, bu tür atıksular için daha uygulanabilir bir alternatiftir [6]. Aynı zamanda önceki çalışmalar, biyolojik olarak parçalanabilir organik maddelerin varlığının anammox sürecine olumsuz etki yaptığını da göstermektedir [23].

Affruns ve diğ. (2013) ardışık olarak işletilen kısmi nitrifikasyon-anammox süreçlerinde katı atık sızıntı suyu arıtımını inceledikleri çalışmada giriş amonyum azotunun (2000 mg/L) yaklaşık % 50' si nitrit azotuna (933 mg/L) dönüştürülerek $0,95 \pm 0,11 \text{ NO}_2^-:\text{NH}_4^+$ molar oranı sağlanmıştır. Kısmi nitrifikasyon reaktörü çıkışında sırasıyla toplam azot ve KOI giderim verimlerinin % 5 ve % 15 olduğu, anammox reaktörü çıkışında ise toplam azot ve KOI giderim verimlerinin % 84 ile % 24 olduğu belirlenmiştir. Wang ve diğ. (2010), katı atık sızıntı suyu arıtma tesisinde gerçek ölçekli olarak uyguladıkları çalışmada, en yüksek toplam azot (TN) ve $\text{NH}_4\text{-N}$ giderme verimlerinin sırasıyla ortalama % 76 ve % 80 olduğunu, % 76' lık TN gideriminin ise % 68' inin

kısmi nitrifikasyon ve Anammox süreçleri ile, geri kalan % 8' inin ise heteretrofik denitrifikasyon ile giderildiğini belirtmektedir. Heteretrofik denitrifikasyonla KOI gideriminin ise % 23, ancak toplam KOI gideriminin % 28 olduğu, aradaki % 5' lik farkın ise ortamdaki diğer heteretrofik organizmalar tarafından tüketilmiş olabileceği ifade edilmiştir. Nhat ve diğ. (2014) kısmi nitrifikasyon-anammox sistemlerinde yaşlı katı atık sızıntı suyu arıtımını incelemişlerdir. İki aşamalı gerçekleştirilen çalışmada başlangıç amonyum derişimini birinci ve ikinci aşamada sırasıyla 500 mg/L ve 1000 mg/L olarak belirlemişlerdir. Atıksu önce kısmi nitrifikasyon reaktörüne verilmiştir ve burada birinci ve ikinci aşama için sırasıyla 1,22 ve 1,02 NO₂-N:NH₄-N molar oranları sağlandıktan sonra atıksu Anammox reaktörüne verilmiştir. Birinci aşama için amonyak giderme verimini % 99±1 olarak bulmuşlardır ve bunun da % 61,8' inin kısmi nitrifikasyonda gerçekleştiğini ifade etmişlerdir. İkinci aşamada ise % 91±3 amonyak giderme verimi belirlenmiş ve bunun da % 49,6' sının kısmi nitrifikasyonla gerçekleştiği tespit edilmiştir. En yüksek toplam azot giderme verimlerinin ise birinci ve ikinci aşamada sırasıyla % 85±7 ve % 81±1 olduğu ve ikinci aşamanın çıkış derişimlerinin deşarj standartlarını sağlamadığı ifade edilmiştir. Miao vd. (2014) üç aşamalı ardışık kesikli reaktörde katı atık sızıntı suyunun arıtımını çalışmışlardır. İlk aşama ön arıtma aşamasıdır ve bu aşamada anammox sürecine olumsuz etki yapacak organik bileşikleri gidermişlerdir. Sonraki aşamalarda uygulanan kısmi nitrifikasyon ve anammox ile % 90 azot giderme verimine ulaşmışlardır.

5. Sonuçlar

Katı atık sızıntı sularının çeşitli fiziko-kimyasal, biyolojik ve ileri arıtma yöntemleri ile arıtılabildiği bilinmektedir. Özellikle düşük C/N oranına sahip katı atık sızıntı sularının arıtımında biyolojik arıtma süreçleri tercih edilmektedir. Nitrifikasyon-denitrifikasyon en yaygın kullanılan biyolojik arıtma süreci olmasına rağmen düşük C/N oranına sahip atıksularda, havalandırma ve harici karbon kaynağı gereksiniminden dolayı ekonomik şekilde uygulanması mümkün değildir. Bu durumda, havalandırma ve harici karbon kaynağı ihtiyacını ortadan kaldıran, kısmi nitrifikasyon-anammox süreçleri düşük C/N oranına sahip katı atık sızıntı suların arıtımında daha uygulanabilir görülmektedir.

Kaynaklar

- [1] Zhang H, Wang Z, Liu C, Guo Y, Shan N, Meng C, Sun L. Removal of COD from landfill leachate by an electro/Fe²⁺/peroxydisulfate process. *Chemical Engineering Journal* 2014;250:76-82.
- [2] Anfruns A, Gabarró J, Gonzalez-Olmos R, Puig S, Balaguer MD, Colprim J. Coupling anammox and advanced oxidation-based technologies for mature landfill leachate treatment. *Journal of Hazardous Materials* 2013;258-259:27-34.
- [3] Liang Z, Liu J. Landfill leachate treatment with a novel process: Anaerobic ammonium oxidation (anammox) combined with soil infiltration system. *Journal of Hazardous Materials* 2008;151: 202–212.
- [4] Renoua S, Givaudan JG, Poulain S, Dirassouyan F, Moulin P. Landfill leachate treatment: Review and opportunity. *Journal of Hazardous Materials* 2008;150:468–493.

- [5] Gabarró J, Ganigué R, Gich F, Rusalleda M, Balaguer MD, Colprim J. Effect of temperature on AOB activity of a partial nitrification SBR treating landfill leachate with extremely high nitrogen concentration. *Bioresource Technology* 2012;126:283–289.
- [6] Ganiqué R, Gabarró J, Sánchez-Melsió A, Rusalleda M, López H, Vila X, Colprim J, Balaguer MD. Long-term operation of a partial nitrification pilot plant treating leachate with extremely high ammonium concentration prior to an anammox process. *Bioresouce Technology* 2009;100:2624-2632.
- [7] Yıldız Ş, Ölmez E, Ataselim F. Odayeri katı atık düzenli depolama sahası depo gövdesindeki su muhtevasının doğal potansiyel ve elektrik özdirenç yöntemleri kullanılarak tespiti. *Türkiye' de Katı Atık Yönetimi Sempozyumu* 2009:1-5.
- [8] T.C. Çevre ve Orman Bakanlığı Çevre Yönetimi Genel Müdürlüğü, Düzenli Depolama ve Tıbbi Atık Bertaraf Tesisleri İşletme ve Kontrol Kılavuzları, Nisan 2010.
- [9] Ziyang L, Youcai Z, Tao Y, Yu S, Huili C, Nanwen Z, Renhua H. Natural attenuation and characterization of contaminants composition in landfill leachate under different disposing ages. *Science of the Total Environment* 2009;407:3385–3391.
- [10] Yılmaz G. Katı atık depolarında oluşan çöp sızıntı sularının kil şiltelerin geçirimsizliğine etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi, Erzurum, 2007; 79s.
- [11] Ghazi M, Lastra AA, Watts JM. Hydroxyl Radical ($\cdot\text{OH}$) scavenging in young and mature landfill leachates. *Water research* 2014;56, 148 -155.
- [12] Öztürk F. Katı atık sızıntı suyu miktarını azaltıcı yöntem stratejileri. Yüksek lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul 2011; 103s.
- [13] Shalini SS, Joseph K. Nitrogen management in landfill leachate: Application of sharon, anammox and combined sharon–anammox process. *Waste Management* 2012;32:2385–2400.
- [14] Yazıcı S., Elektrodializ bipolar membran proseslerin tıkanma mekanizması ve önleme çalışmalarının analizi: sızıntı suyu örneği. Yüksek lisans tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul 2012; 167s.
- [15] Oztoprak S, Pisirici B. Effects of micro structure changes on the macro behaviour of Istanbul (Turkey) clays exposed to landfill leachate. *Engineering Geology* 2011;121:110–122.
- [16] Tınmaz E, Demir İ. Research on solid waste management system: To improve existing situation in Çorlu town of Turkey. *Waste Management* 2006;26:307–314.
- [17] Chamchoi N, Nitorisavut S, Schmidt JE. Inactivation of ANAMMOX communities under concurrent operation of anaerobic ammonium oxidation (ANNAMMOX) and denitrification. *Bioresource Technology* 2008;99:1331-1336.
- [18] Strous M, Heijnen JJ, Kuenen JG, Jetten MSM. The sequencing batch reactor as a powerful tool for the study of slowly growing anaerobic ammonium-oxidizing microorganisms. *Appl Microbiol Biotechnol* 1998; 50: 589-596.
- [19] Desloover J, Clippeleir HD, Boeckx P, Laing GD, Colsen J, Verstraete W, Vlaeminck SE. Floc-based sequential partial nitrification and anammox at full scale with constraining N_2O emission. *Water Resource* 2011;45:2811-2821.
- [20] Cho S, Fujii N, Lee T, Okabe S. Development of a simultaneous partial nitrification and anaerobic ammonia oxidation process in a single reactor. *Bioresource Technology* 2011;102: 652-659.

- [21] Wei D, Xue X, Yan L, Sun M, Zhang G, Shi L, Du B. Effect of influent ammonium concentration on the shift of full nitrification to partial nitrification in a sequencing batch reactor at ambient temperature. *Chemical Engineering Journal* 2014;235:19-26.
- [22] Li H, Zhou S, Huang G, Xu B. Partial nitrification of landfill leachate with varying influent composition under intermittent aeration conditions. *Process Safety and Environmental Protection* 2013;91:285-294.
- [23] Li H, Zhou S, Ma W, Huang P, Huang G, Qin Y, Xu B, Ouyang H. Long-term performance and microbial ecology of a two-stage PN-ANAMMOX process treating mature landfill leachate. *Bioresouece Techonology* 2014;159:404-411.
- [24] Wang C, Lee P, Kumar M, Huang Y, Sung S, Lin J. Simultaneous partial nitrification, anaerobic oxidation and denitrification (SNAD) in a full-scale landfill-leachate treatment plant. *Journal of Hazardous Materials* 2010;175:622-628.
- [25] Nhat PD, Biec HN, Mai NTT, Thanh BX, Dan NP. Application of partial nitrification and anammox system for the old landfill leachate treatment. *International Biodeterioration & Biodegradation* 2014;95:144-150.
- [26] Miao L, Wang K, Wang S, Zhu R, Li B, Peng Y, Weng D. Advenced nitrogen removal from landfill leachate using real-time controlled three stage sequence batch reactor (SBR) system. *Bioresouece Techonology*, 159, 258-265, 2014.