

ANAEROBIC AMMONIUM OXIDATION (ANAMMOX) PADA PENYISIHAN NITROGEN DALAM AIR LIMBAH DOMESTIK

I Made Wahyu Wijaya^{1*)}, Putu Eka Dharma Putra²⁾

¹⁾Program Studi Perencanaan Pembangunan Wilayah dan Pengelolaan Lingkungan, Program Pascasarjana, Universitas Mahasaraswati Denpasar, Denpasar, Bali

²⁾Program Studi Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, Jawa Timur

*Email: wijaya@unmas.ac.id

ABSTRACT

Domestic wastewater effluent is the main contributor to diverse water pollution problems. The contaminants contained in the wastewater lead the low quality of water. The presence of ammonium and nitrate along with phosphorus are potentially cause eutrophication and endanger aquatic life. It increases the growth rate of algae and pressing down the dissolved oxygen which is highly corresponding to the death of aquatic animal due to anaerobic condition. Excess nutrients, mostly N and P is main cause of eutrophication which is result in oxygen depletion, biodiversity reduction, fish kills, odor and increased toxicity. An advance biological nitrogen removal process called anammox is a sustainable and cost effective alternative to the basic method of nitrogen removal, such as nitrification and denitrification. Many research have been conducted through anammox and resulted promisingly way to remove nitrogen. In this process, ammonium will be oxidized with nitrite as electron acceptor to produce nitrogen gas and low nitrate in anoxic condition. Anammox requires less oxygen demand, no needs external carbon source and low operational cost. Based on its advantages, anammox is possible to apply in domestic wastewater treatment with many further studies.

Keywords : *anammox, domestic wastewater, eutrophication, nitrogen*

1. PENDAHULUAN

Target pemerintah dalam program 100-0-100, salah satunya mencapai 100% akses sanitasi layak untuk air limbah. Sebesar 10% akses sanitasi air limbah merupakan sistem pengelolaan air limbah domestik (RPJMN 2015-2019). Berdasarkan PermenPUPR No. 4 Tahun 2017, sistem pengelolaan air limbah domestik (SPALD) merupakan serangkaian kegiatan pengelolaan air limbah domestik dalam satu kesatuan dengan prasarana dan sarana pengelolaan air limbah domestik. Zat pencemar yang terkandung dalam air limbah domestik dapat menyebabkan penurunan kualitas air di badan air, salah satunya adalah amonium (NH_4^+). Amonia berasal dari sisa makanan, kegiatan dapur, sisa mandi, tinja, urin dan penggunaan pupuk (Krishna *et al.*, 2009).

Berdasarkan Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan No. 68 Tahun 2016, kadar maksimum untuk amonia pada air limbah domestik sebesar 10 mg/L. Dengan demikian, amonia menjadi salah satu parameter penting dalam pengolahan air limbah domestik. Konsentrasi amonium yang tinggi menjadi salah satu penyebab terjadinya eutrofikasi pada badan air. Saat terjadinya eutrofikasi, konsentrasi oksigen terlarut (OT) akan menurun dan terjadi kompetisi antara biota air dan mikroorganisme untuk menggunakan oksigen. Konsentrasi oksigen terlarut hingga kurang dari 2 mg/L dapat menyebabkan kematian pada hewan air, seperti ikan, udang, remis dan sebagainya (Bwapwa, 2012; van Rijn et al., 2006). Menurut penelitian Yang *et al.* (2008), total N sebesar 1-2 mg/L dan total P sebesar 0,03-0,1 mg/L akan menyebabkan eutrofikasi.

Efluen pengolahan air limbah domestik pada umumnya masih mengandung nutrien dalam bentuk amonium, nitrit, nitrat dan fosfat (Kim *et al.*, 2010). Menurut Chen *et al.* (2014), penyisihan senyawa nitrogen secara sempurna adalah dengan mengubah nitrat menjadi gas nitrogen oksida (N₂O) dan gas dinitrogen (N₂). Salah satu metode yang dapat digunakan untuk menyisihkan nitrogen adalah *anaerobic ammonium oxidation* (Anammox). Anammox merupakan proses transformasi amonium secara biologis menjadi gas nitrogen (N₂) dengan nitrit sebagai penerima elektron. Proses anammox dilakukan oleh bakteri autotrof seperti halnya proses nitrifikasi, sehingga dalam prosesnya sedikit diperlukan sumber karbon (Ali dan Okabe, 2015; Chatterjee *et al.*, 2016; Hauck *et al.*, 2016; Ma *et al.*, 2016; Zhang dan Liu, 2014). Keunggulan proses anammox adalah rendahnya konsumsi oksigen, tidak dibutuhkannya sumber organik, dan produksi lumpur yang rendah (Malamis *et al.*, 2013).

Kandungan amonium dan nitrat pada air limbah dapat menimbulkan terjadinya eutrofikasi pada badan air. Pengolahan air limbah domestik yang masih belum efektif dalam menurunkan kandungan nitrogen (amonium dan nitrat) dapat berpotensi mencemari badan air jika konsentrasi ammonium melebihi baku mutu. Anammox merupakan salah satu proses yang dapat meningkatkan penyisihan nitrogen pada air limbah yang telah banyak dikembangkan. Kajian ini terfokus pada perkembangan proses *anaerobic ammonium oxidation* (anammox) dalam pengolahan air limbah dan keunggulan proses tersebut.

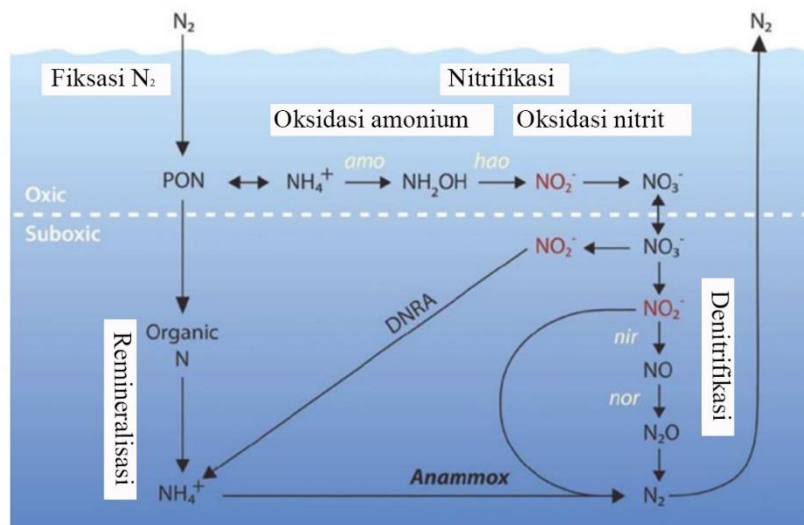
2. METODOLOGI

Metode yang digunakan dalam studi ini adalah studi literatur dengan menitikberatkan pada proses penyisihan nitrogen pada pengolahan air limbah domestik. Literatur yang digunakan berupa karya ilmiah populer dengan rentang 10 tahun terakhir. Analisis yang digunakan adalah analisis deskriptif, yakni penguraian secara teratur data yang telah diperoleh, kemudian diberikan pemahaman dan penjelasan agar dapat dipahami dengan baik.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Penyisihan Nitrogen secara Biologis dalam Air Limbah

Penyisihan nitrogen secara biologis pada umumnya terjadi dalam dua tahapan, yakni nitrifikasi dan denitrifikasi. Kedua proses tersebut dibantu oleh mikroorganisme *Ammonium Oxidizing Bacteria* (AOB) untuk nitrifikasi dan *Nitrite Oxidizing Bacteria* (NOB) untuk denitrifikasi. Proses anammox pada siklus nitrogen di alam dapat dilihat pada Gambar 1. Pada penyisihan ammonium melalui proses nitrifikasi, terdapat 2 kelompok bakteri yang berperan, yakni *ammonium oxidizing bacteria* (AOB) dan *nitrite oxidizing bacteria* (NOB). AOB merupakan bakteri yang mampu mengoksidasi amonium menjadi nitrit, sedangkan NOB mampu mengoksidasi nitrit menjadi nitrat. AOB maupun NOB membutuhkan sejumlah oksigen dalam mensintesis amonium ataupun nitrit. Pada proses anammox, NOB merupakan salah satu inhibitor bakteri anammox dalam memperoleh nitrit. Salah satu cara untuk meningkatkan aktivitas anammox adalah dengan menghambat aktivitas NOB. Sistem aerasi intermiten merupakan salah satu strategi untuk menghambat pertumbuhan NOB pada reaktor nitrifikasi parsial-anammox (Yang *et al.*, 2015; Miao *et al.*, 2016; Miao *et al.*, 2017; Wang *et al.*, 2015; Wu *et al.*, 2015).



Gambar 1. Proses anammox pada siklus nitrogen di dalam air (Shehzad *et al.*, 2016)

Pada kondisi oksigen terlarut (OT) rendah, aktivitas AOB lebih tinggi dibandingkan NOB, karena konstanta setengah jenuh (K_o) AOB lebih rendah. Nitrifikasi parsial dapat terjadi dengan baik pada sistem aerasi periodik dengan konsentrasi OT tinggi, yakni 1.8 ± 0.32 mg/L (Bao *et al.*, 2016). Miao *et al.* (2016) melakukan penelitian tentang pengaruh OT dengan konsentrasi rendah

terhadap aktivitas NOB dan bakteri anammox. Hasil penelitian menunjukkan pada konsentrasi OT $0,17 \pm 0,08$ mg/L tidak dapat menghambat aktivitas NOB atau meningkatkan aktivitas bakteri anammox. Namun, penambahan oksigen secara intermiten dapat menghambat aktivitas NOB dengan waktu 7 menit aerobik (OT $0,5 \pm 0,08$ mg/L) dan 21 menit anoksik. Penelitian (Miao *et al.*, 2017) dilanjutkan dengan menggunakan sistem nitrifikasi parsial-anammox dengan sistem aerasi intermiten. Kombinasi aerasi yang digunakan adalah 8 menit untuk aerobik dan 21 menit untuk anoksik. Hasil penelitiannya menemukan bahwa penyisihan TN yang diperoleh mencapai 70%.

Perubahan amonium menjadi nitrit dibantu oleh bakteri *Nitrosomonas*, sedangkan perubahan nitrit menjadi nitrat dibantu oleh bakteri *Nitrobacter*. Nitrifikasi hanya dapat berlangsung pada kondisi cukup oksigen (aerob). Nitrat kemudian diubah menjadi gas nitrogen pada proses denitrifikasi pada kondisi anaerobik. Pada proses ini, bakteri denitrifikasi, seperti *Micrococcus*, *Thiobacillus*, dan *Pseudomonas* menggunakan oksigen terikat dari nitrat, sehingga nitrat akan tereduksi dan lepas sebagai gas nitrogen. Proses anammox terjadi pada kondisi anoksik dan nitrit akan berperan sebagai penerima elektron. Seperti halnya denitrifikasi, anammox juga akan menghasilkan gas nitrogen pada akhir reaksi.

3.2 Anaerobic Ammonium Oxidation (Anammox) dalam Penyisihan Nitrogen

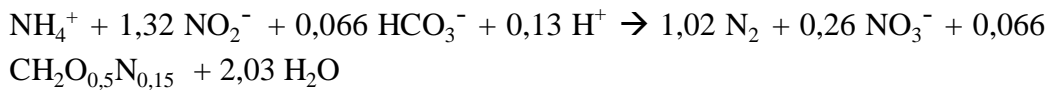
Oksidasi amonium dapat terjadi secara konvensional melalui proses nitrifikasi. Hasil oksidasi amonium secara nitrifikasi adalah nitrat yang selanjutnya akan direduksi menjadi gas nitrogen. Selain nitrifikasi, terdapat sejumlah proses yang juga dapat mengoksidasi amonium menjadi nitrat, yaitu *anaerobic ammonium oxidation* (anammox) dan *complete ammonium oxidation* (comammox). Pada proses anammox, amonium akan dioksidasi pada kondisi anaerobik dengan nitrit sebagai penerima elektron. Sedangkan, pada proses comammox, ammonium dioksidasi menjadi nitrit dan nitrat sekaligus pada satu spesies bakteri.

Anaerobic ammonium oxidation (anammox) merupakan proses penyisihan nitrogen dengan menggunakan nitrit sebagai penerima elektron pada kondisi anaerobik. Proses anammox terdiri dari dua tahap, yakni nitrifikasi secara parsial dan oksidasi amonium dan nitrit secara anaerobik. Bakteri autotrof berperan dalam proses anammox ini, sehingga kebutuhan karbon organik sangat rendah. Selain itu, kebutuhan oksigen juga rendah karena hanya sebagian amonium yang dioksidasi menjadi nitrit.

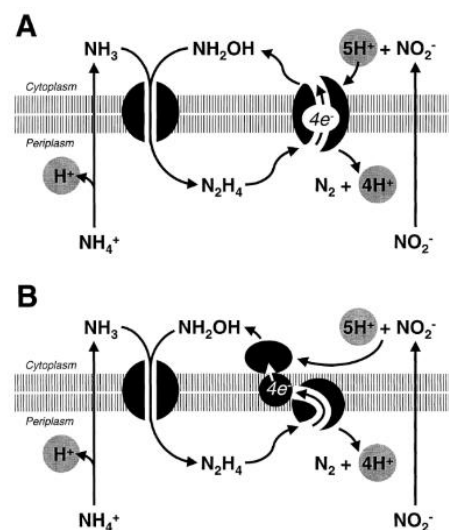
Proses anammox bekerja optimal pada suhu medium, yakni 30^0 - 35^0 C dan pada konsentrasi amonium tinggi. *Anaerobic Ammonium Oxidation* (Anammox) merupakan salah satu alternatif proses penyisihan senyawa nitrogen dalam pengolahan air limbah. Proses anammox telah banyak dikembangkan di beberapa

negara maju untuk mengolah air limbah dengan kandungan nitrogen tinggi (Niu *et al.*, 2016; Loosdrecht 2004; Ma *et al.*, 2013; Miao *et al.*, 2016; Guillén *et al.*, 2015; Wang *et al.*, 2015). Dalam proses Anammox, ion amonium dioksidasi dengan nitrit sebagai elektron aseptor menjadi gas nitrogen (Niu *et al.*, 2016; Lotti *et al.*, 2015).

Proses anammox diawali dengan reduksi nitrit oleh enzim nitrit reductase menjadi hidroksilamin (NH₂OH). Kemudian hidroksilamin dan amonium mengalami kondensasi membentuk hidrazin (N₂H₄) dan dilanjutkan dengan oksidasi hidrazin menjadi gas nitrogen (N₂). Proses Anammox terjadi pada kondisi anoksik. Stoikiometri proses anammox dapat dilihat pada reaksi di bawah ini (Chen *et al.*, 2016; Miao *et al.*, 2016).



Bakteri anammox akan mensintesis nitrit selama kondisi anoksik, sehingga ketika kondisi aerobik NOB tidak memperoleh nitrit. Ketika aerasi dihentikan sebelum aktivitas NOB aktif kembali, maka nitrit akan terkumpul pada akhir tahap aerasi dan dikonsumsi oleh bakteri anammox. Hou *et al.* (2017) menggunakan sistem aerasi intermiten pada *constructed wetland* untuk meningkatkan kinerja proses *short-cut* nitrifikasi dan denitrifikasi. Pada penelitiannya, digunakan variasi dengan aerasi selama 20 menit dan tanpa aerasi selama 100 menit. Hasil yang diperoleh adalah penyisihan amonium sebesar 94,6% dan penyisihan total nitrogen sebesar 82,6%. Penelitian serupa dilakukan oleh Wu *et al.*, (2015), dan menghasilkan penyisihan amonium sebesar 98% dan total nitrogen sebesar 85%. reaksi anammox yang mungkin terjadi dalam sel bakteri anammox berdasarkan jenis transfer elektron dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Mekanisme proses Anammox di dalam sel bakteri (Jetten *et al.*, 1999)

Berdasarkan skema reaksi proses anammox pada sel bakteri (Gambar 2), terdapat 2 mekanisme terjadinya anammox. Pada skema A, amonium dan hidroksilamin diubah menjadi hidrazin oleh enzim kompleks. Selanjutnya hidrazin dioksidasi di dalam periplasma menjadi gas nitrogen. Nitrit direduksi menjadi hidroksilamin oleh bagian enzim kompleks yang terdapat di dalam sitoplasma. Enzim tersebut merupakan enzim yang sama digunakan untuk oksidasi hidrazin dengan transportasi elektron internal. Sedangkan pada skema B, amonium dan hidroksilamin diubah menjadi hidrazin oleh enzim kompleks, kemudian hidrazin dioksidasi di dalam periplasma menjadi gas nitrogen. Elektron yang terbentuk ditransfer melalui rantai transport elektron ke enzim pereduksi nitrit pada sitoplasma. Konversi hidrazin menjadi gas nitrogen merupakan reaksi pembentukan elektron yang ekuivalen untuk reduksi nitrit menjadi hidroksilamin (Jetten *et al.*, 1999).

Proses Anammox memiliki beberapa keuntungan dalam mereduksi nitrogen secara biologis, diantaranya kebutuhan oksigen rendah, biaya operasional rendah, dan tidak membutuhkan sumber karbon tambahan (Hauck *et al.*, 2016). Penggunaan proses anammox dapat menurunkan konsumsi aerasi hingga 64%, kebutuhan karbon sebagai elektron donor hingga 100% serta produksi lumpur hingga 90% (Hu *et al.*, 2016). Proses anammox mampu mengolah air limbah dengan konsentrasi amonia 0,5 – 20 g N per liter per hari. Nitrifikasi secara parsial pada proses anammox dapat menurunkan kebutuhan oksigen hingga 25% (Chatterjee *et al.*, 2016).

Bakteri anammox tersebar di berbagai lingkungan dan didistribusikan secara luas dalam ekosistem termasuk permukaan dan subsistem air tawar dan laut bawah permukaan lahan basah alami dan system instalasi pengolahan air limbah buatan. Hal tersebut kemampuan beradaptasi dan evolusi dari awal untuk membentuk N₂ mungkin telah menggunakan N anorganik konsentrasi rendah yang tersedia dan kemudian berkembang menjadi yang mampu beradaptasi pada konsentrasi N anorganik yang lebih tinggi serta asimilasi asam organik dengan berat molekul rendah. Lima genera bakteri anammox yang diketahui perbedaan filogenik yang sangat jelas, karena genus *Scalindua* tampaknya jauh terkait dengan empat genera lainnya. Hubungan ini juga berkorelasi dengan kerentanan atau kemampuan adaptasi terhadap N anorganik yang tersedia dalam media kultur, di mana *Scalindua* lebih suka konsentrasi rendah N anorganik, misalnya lautan terbuka (Awata *et al.*, 2012) dan lahan basah air tawar tanpa pengaruh antropogenik, sementara empat lainnya aktif tumbuh di pabrik pengolahan air limbah dan lahan basah pesisir dan sungai di mana polusi air limbah dan limpasan terlihat (Oshiki *et al.*, 2013).

3.3 Perkembangan *Anaerobic Ammonium Oxidation (Anammox)* dalam Pengolahan Air Limbah

Sistem reaktor merupakan hal yang penting dari setiap pengembangan bioproses, termasuk proses anammox. Hal tersebut merupakan faktor kunci yang menentukan operasi awal dan kestabilan dari proses anammox. Laju pertumbuhan yang sangat lambat dan produksi biomassa yang rendah dari bakteri anammox menjadi penyebab dari tahap awal yang panjang dari proses anammox. Sebagai contoh, reaktor anammox pertama di Rotterdam, Belanda, membutuhkan waktu lebih dari 3 tahun untuk memulai, hal yang tentunya tidak diharapkan untuk aplikasi dari proses anammox. Beberapa reaktor, seperti *Sequencing Batch Reactor (SBR)*, *Up-flow Biofilter (UBF)*, *Up-Flow Anaerobic Sludge Blanket (UASB)*, *membrane Bioreactor (MBR)*, dan *Rotating Biological Contactor (RBC)* telah digunakan untuk pengembangan proses anammox. SBR, UASB dan UBF merupakan tiga reaktor yang paling banyak digunakan dan paling efisien untuk mengembangkan bakteri anammox (Kumar et al., 2016a). Aplikasi dan kinerja reaktor yang menerapkan proses anammox dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Aplikasi proses anammox skala laboratorium yang telah digunakan dalam pengolahan air limbah sejak tahun 2004

Proses	Tahapan penyisihan nitrogen	Jenis air limbah	Jenis reaktor	Volume reaktor (L)	Penyisihan amonium (%)
Anammox	Pertama	Air lindi	UASB	4,46	82
PN-anammox	Kedua	Air limbah peternakan	UASB	3	79,2
PN-Anammox-Oil infiltration system	Kedua	Air lindi	Upflow fixed-bed biofilm reactor	36	60
Short-cut nitrification	Kedua	Air lindi	UASB	8,5	93
UASB-MBR-SHARON	Kedua	Air lindi	CSTR	2,3	78
Anammox	Pertama	Industri MSG	SBR	2,2	69-74
SNAD	Pertama	Air limbah peternakan	SBR	5	96
CANON	Pertama	Air limbah elektronik	SBR	18	98
PN-Anammox	Kedua	Air lindi	Anammox hybrid reaktor	5	>90

Sumber: Kumar *et al.*, 2016

Semakin meningkatnya minat dalam mengembangkan reaktor anammox telah muncul dalam beberapa tahun terakhir. Rancangan unit pengolahan didasarkan pada reaktor anoksik yang digabungkan dengan proses nitrifikasi parsial seperti SHARON (Kartal *et al.*, 2004) atau anammox dengan nitrifikasi parsial yang muncul secara bersamaan dalam reaktor biofilm seperti CANON/OLAND atau proses deamonifikasi aerobik (Zhang dan Liu, 2014). Pada reaktor SBR, distribusi reagen dan produk yang homogen di dalam reaktor dan cocok untuk operasi jangka panjang menjadikannya reaktor yang paling cocok untuk pengembangan proses anammox (Ding *et al.*, 2018). Reaktor UBF menggunakan media berpori seperti poliester berpori non-woven (Connan *et al.*, 2017), digunakan untuk menangkap biomassa. Implementasi anammox dalam pengolahan air limbah perkotaan akan mengarah pada peningkatan yang signifikan dalam keberlanjutan sistem ini. Tantangan bagi pengembangan proses anammox adalah laju pertumbuhan bakteri yang sangat lambat dan interaksi kompleks dalam biofilm, sehingga perlu diselidiki lebih lanjut.

4. PENUTUP

Anaerobic ammonium oxidation (anammox) menjadi salah satu alternatif penyisihan nitrogen pada air limbah domestik yang sangat potensial. Kebutuhan energi dan zat organik yang rendah, serta minimnya lumpur yang dihasilkan dalam pengolahan air limbah adalah keunggulan dari proses anammox. Berbagai modifikasi proses anammox dengan reaktor pengolahan air limbah telah dilakukan sebagai pengembangan dalam penyisihan nitrogen dalam air limbah domestik di berbagai negara. Dengan demikian, aplikasi anammox juga dapat menjadi alternatif penyisihan nitrogen pada air limbah di Indonesia, tentunya dengan penyesuaian lingkungan dan jenis bakteri anammox.

DAFTAR PUSTAKA

- Ali, M., Okabe, S., 2015. Anammox-based technologies for nitrogen removal: Advances in process start-up and remaining issues. *Chemosphere* 141, 144–153.
- Bao, P., Wang, S., Ma, B., Zhang, Q., Peng, Y., 2016. Achieving partial nitrification by inhibiting the activity of *Nitrospira*-like bacteria under high-DO conditions in an intermittent aeration reactor. *J. Environ. Sci.* 56, 4–11.
- Bwapwa, J.K., 2012. Treatment Efficiency of an Anaerobic Baffled Reactor Treating Low Biodegradable and Complex Particulate Wastewater (blackwater) in an ABR Membrane Bioreactor Unit(MBR-ABR). *Int. J. Environ. Pollut. Remediat.* 1.

- Chatterjee, P., Ghangrekar, M.M., Rao, S., 2016. Development of anammox process for removal of nitrogen from wastewater in a novel self-sustainable biofilm reactor. *Bioresour. Technol.* 218, 723–730.
- Chen, H., Chen, Q.Q., Shi, Z.J., Xu, J.J., Liu, A.N., He, L.L., Wu, Y.H., Shi, M.L., Jin, R.C., 2016. Improved anammox performance with a flow switched anaerobic baffled reactor (FSABR) modified from a common anaerobic baffled reactor (CABR). *Ecol. Eng.* 92, 229–235.
- Chen, N., Chen, Z., Wu, Y., Hu, A., 2014. Understanding gaseous nitrogen removal through direct measurement of dissolved N_2 and N_2O in a subtropical river-reservoir system. *Ecol. Eng.* 70, 56–67.
- Gopala Krishna, G.V.T., Kumar, Pramod, Kumar, Pradeep, 2009. Treatment of low-strength soluble wastewater using an anaerobic baffled reactor (ABR). *J. Environ. Manage.* 90, 166–176.
- Hauck, M., Maalcke-Luesken, F. a., Jetten, M.S.M., Huijbregts, M. a J., 2016. Removing nitrogen from wastewater with side stream anammox: What are the trade-offs between environmental impacts? *Resour. Conserv. Recycl.* 107, 212–219.
- Hou, J., Xia, L., Ma, T., Zhang, Y., Zhou, Y., He, X., 2017. Achieving short-cut nitrification and denitrification in modified intermittently aerated constructed wetland. *Bioresour. Technol.* 232, 10–17.
- Kim, J., Lingaraju, B.P., Rheume, R., Lee, J., Siddiqui, K.F., 2010. Removal of Ammonia from Wastewater Effluent by *Chlorella Vulgaris* * 15, 391–396.
- Loosdrecht, M.C.M. Van, 2004. The Anammox process for sustainable ammonium removal Van Dongen U , Jetten MSM , & Van Loosdrecht MCM . (2001). The SHARON-.
- Lotti, T., Kleerebezem, R., Abelleira-Pereira, J.M., Abbas, B., van Loosdrecht, M.C.M., 2015. Faster through training: The anammox case. *Water Res.* 81, 261–268.
- Ma, B., Peng, Y., Zhang, S., Wang, J., Gan, Y., Chang, J., Wang, Shuying, Wang, Shanyun, Zhu, G., 2013. Performance of anammox UASB reactor treating low strength wastewater under moderate and low temperatures. *Bioresour. Technol.* 129, 606–611.
- Ma, B., Wang, S., Cao, S., Miao, Y., Jia, F., Du, R., Peng, Y., 2016. Biological nitrogen removal from sewage via anammox: Recent advances. *Bioresour. Technol.* 200, 981–990.
- Malamis, S., Katsou, E., Frison, N., Fabio, S. Di, Noutsopoulos, C., Fatone, F., 2013. Bioresource Technology Start-up of the completely autotrophic nitrogen removal process using low activity anammox inoculum to treat low strength UASB effluent. *Bioresour. Technol.* 148, 467–473.
- Miao, Y., Zhang, L., Li, B., Zhang, Q., Wang, S., Peng, Y., 2017. Enhancing ammonium oxidizing bacteria activity was key to single-stage partial nitrification-anammox system treating low-strength sewage under intermittent aeration condition. *Bioresour. Technol.* 231, 36–44.
- Miao, Y., Zhang, L., Yang, Y., Peng, Y., Li, B., Wang, S., Zhang, Q., 2016. Start-up of single-stage partial nitrification-anammox process treating low-strength

- swage and its restoration from nitrate accumulation. *Bioresour. Technol.* 218, 771–779.
- Niu, Q., Zhang, Y., Ma, H., He, S., Li, Y.Y., 2016. Reactor kinetics evaluation and performance investigation of a long-term operated UASB-anammox mixed culture process. *Int. Biodeterior. Biodegrad.* 108, 24–33.
- Sánchez Guillén, J. a., Cuéllar Guardado, P.R., Lopez Vazquez, C.M., de Oliveira Cruz, L.M., Brdjanovic, D., van Lier, J.B., 2015. Anammox cultivation in a closed sponge-bed trickling filter. *Bioresour. Technol.* 186, 252–260.
- Van Rijn, J., Tal, Y., Schreier, H.J., 2006. Denitrification in recirculating systems: Theory and applications. *Aquac. Eng.* 34, 364–376.
- Wang, G., Xu, X., Gong, Z., Gao, F., Yang, F., Zhang, H., 2015. Study of simultaneous partial nitrification, ANAMMOX and denitrification (SNAD) process in an intermittent aeration membrane bioreactor. *Process Biochem.* 51, 632–641.
- Wang, S., Peng, Y., Ma, B., Wang, Shuying, Zhu, G., 2015. Anaerobic ammonium oxidation in traditional municipal wastewater treatment plants with low-strength ammonium loading: Widespread but overlooked. *Water Res.* 84, 66–75.
- Wu, H., Fan, J., Zhang, J., Ngo, H.H., Guo, W., Hu, Z., Liang, S., 2015. Decentralized domestic wastewater treatment using intermittently aerated vertical flow constructed wetlands: Impact of influent strengths. *Bioresour. Technol.* 176, 163–168.
- Yang, J., Trela, J., Zubrowska-Sudol, M., Plaza, E., 2015. Intermittent aeration in one-stage partial nitrification/anammox process. *Ecol. Eng.* 75, 413–420.
- Yang, X., Wu, X., Hao, H., He, Z., 2008. Mechanisms and assessment of water eutrophication. *J. Zhejiang Univ. Sci. B* 9, 197–209.
- Zhang, Z., Liu, S., 2014. Hot topics and application trends of the anammox biotechnology: a review by bibliometric analysis. *Springerplus* 3, 220.