

Effectiveness of the Anammox Process for Nitrogen Waste Treatment in Tropical Environments: A Comprehensive Review

Frentina Murti Sujadi^{1*}, Jefri Anjaini¹, Baruna Kusuma¹, Asro Nurhabib¹, Lilik Setiyaningsih¹, Setyo Budi Kurniawan²

¹Prodi Akuakultur, Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan, Universitas Jenderal Soedirman, Purwokerto, Indonesia;

²Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN), Jakarta Pusat, Indonesia;

Article History

Received : June 16th, 2025

Revised : July 17th, 2025

Accepted : August 08th, 2025

*Corresponding Author:

Frentina Murti Sujadi,

Prodi Akuakultur, Fakultas
Perikanan dan Ilmu Kelautan,
Universitas Jenderal
Soedirman, Purwokerto,
Indonesia;

Email:

frentina.murti@unsoed.ac.id

Abstract: The anaerobic ammonium oxidation (Anammox) process is a biological mechanism that converts ammonium and nitrite into nitrogen gas without the need for oxygen, making it a potentially efficient solution for nitrogen waste treatment. This study aims to analyze the effectiveness of Anammox in reducing nitrogen concentrations from various types of waste and compare it with conventional methods. This study was conducted using a systematic literature review approach on the effectiveness of the Anammox process in nitrogen removal from wastewater. The analysis was carried out by extracting information related to reactor types, operational parameters (pH, temperature, C/N ratio, and substrate concentration), nitrogen removal efficiency, and inhibitory factors. The results show that this process can consistently reduce ammonium and nitrite, with performance highly influenced by operational conditions. Factors such as microbial stability, temperature, and nitrite availability are the main determinants of success. This study confirms that Anammox offers a more energy-efficient approach, producing less sludge and being more environmentally friendly compared to nitrification–denitrification. Thus, Anammox technology contributes to the development of sustainable wastewater treatment systems while expanding scientific understanding of the role of Anammox bacteria in the nitrogen cycle.

Keywords: anaerobic; anammox; microbial; wastewater.

Pendahuluan

Peningkatan jumlah penduduk dan aktivitas industri berdampak langsung pada kualitas perairan terutama akibat tingginya kandungan nitrogen dari limbah cair. Konsentrasi nitrogen yang berlebih dapat memicu eutrofikasi dan penurunan kualitas lingkungan perairan. Hal ini menyebabkan pengelolaan konsentrasi nitrogen menjadi isu penting dalam penyediaan air bersih berkelanjutan (Prasetya *et al.*, 2023).

Metode biologis yang umum digunakan untuk mengatasi masalah ini adalah nitrifikasi–denitrifikasi. Namun pendekatan tersebut membutuhkan energi tinggi untuk aerasi, memerlukan donor karbon eksternal dan menghasilkan lumpur dalam jumlah besar

sehingga dianggap kurang efisien (Putra *et al.*, 2020). Sebagai alternatif proses anaerobic ammonium oxidation (Anammox) telah menarik perhatian karena mampu mengubah amonium (NH_4^+) dan nitrit (NO_2^-) menjadi nitrogen gas tanpa memerlukan oksigen maupun karbon organik. Selain lebih hemat energi, teknologi ini juga menghasilkan lumpur yang lebih sedikit dan dilaporkan mampu menurunkan biaya operasional hingga 90% (Witkabel dan Abendroth, 2024).

Berbagai rancangan proses berbasis Anammox, seperti CANON, DEAMOX, SNAD dan SHARON-Anammox telah dikembangkan untuk meningkatkan efisiensi penyisihan nitrogen. Aplikasi Anammox di instalasi pengolahan air limbah perkotaan maupun efluen pencernaan anaerob

menunjukkan potensi besar meskipun masih menghadapi kendala seperti pertumbuhan bakteri yang lambat dan sensitivitas terhadap kondisi lingkungan (Zhao *et al.*, 2021; Du *et al.*, 2022). Kajian terbaru juga menyoroti integrasi Anammox dengan proses pemulihan sumber daya misalnya pengendapan hidroksiapatit untuk pemulihan fosfor yang memperluas manfaat teknologi ini dalam pengelolaan limbah berkelanjutan (Guo *et al.*, 2019; Ismail *et al.*, 2024).

Meskipun telah banyak penelitian mengenai Anammox namun kajian komprehensif terkait efektivitasnya dalam konteks lingkungan tropis masih terbatas. Oleh karena itu penelitian ini bertujuan untuk menganalisis efektivitas proses Anammox dalam mengurangi konsentrasi nitrogen dari berbagai jenis limbah, membandingkannya dengan metode konvensional serta mengidentifikasi faktor-faktor yang memengaruhi efisiensi dan stabilitas proses. Kajian ini diharapkan dapat mempertegas potensi Anammox sebagai solusi pengolahan limbah nitrogen yang efisien, ramah lingkungan dan relevan untuk pengembangan sistem pengolahan air di wilayah tropis.

Bahan dan Metode

Desain Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan *systematic literature review* (SLR) untuk menganalisis efektivitas proses *Anaerobic Ammonium Oxidation* (Anammox) dalam pengolahan limbah nitrogen. Sumber literatur diperoleh dari basis data bereputasi internasional seperti Scopus, ScienceDirect, SpringerLink dan Google Scholar. Kata kunci yang digunakan dalam pencarian adalah “*anammox process*”, “*anaerobic ammonium oxidation*”, “*nitrogen removal*”, “*wastewater treatment*” dan “*tropical environment*”. Pencarian difokuskan pada artikel yang terbit dalam kurun waktu 2015–2025. Dari total ±100 artikel yang ditemukan, dilakukan seleksi berdasarkan judul, abstrak dan kesesuaian isi hingga diperoleh sekitar 20 artikel yang memenuhi kriteria untuk dianalisis lebih lanjut.

Prosedur Penelitian

Tahapan penelitian dilakukan dalam beberapa langkah. Pertama, identifikasi dan

pengumpulan literatur dilakukan menggunakan kombinasi kata kunci yang telah ditentukan. Kedua, dilakukan penyaringan dengan kriteria inklusi: (1) artikel penelitian asli atau review terkait penerapan Anammox dalam skala laboratorium maupun lapangan, (2) memuat data kuantitatif atau analisis parameter operasional (pH, suhu, konsentrasi substrat, rasio C/N), dan (3) tersedia dalam bahasa Inggris atau Indonesia dengan akses penuh. Artikel yang tidak memenuhi kriteria ini dikeluarkan. Ketiga, literatur terpilih dipilih berdasarkan fokus kajian, seperti efektivitas penyisihan nitrogen, faktor penghambat, desain reaktor dan penerapan di lingkungan tropis. Prosedur ini mengacu pada metode seleksi literatur PRISMA (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*) sebagaimana direkomendasikan dalam studi serupa (Dwilaga, 2023).

Analisis Data Penelitian

Data yang diperoleh dari artikel terpilih dianalisis secara kualitatif dan komparatif. Informasi utama yang diekstraksi meliputi jenis limbah, desain reaktor, parameter operasional, efisiensi penyisihan nitrogen serta tantangan teknis. Analisis dilakukan dengan cara membandingkan hasil antar penelitian untuk mengidentifikasi pola, tren dan perbedaan hasil. Selain itu data numerik yang tersedia seperti efisiensi penyisihan nitrogen atau laju reaksi kemudian diolah menggunakan Microsoft Excel untuk menghasilkan tabel dan grafik sederhana sebagai pendukung interpretasi. Sintesis literatur difokuskan pada menghubungkan temuan empiris dengan implikasi praktis khususnya pada aplikasi Anammox di wilayah tropis.

Hasil dan Pembahasan

Definisi Anammox (Anaerobic Ammonium Oxidation)

Bakteri Anammox berperan penting dalam siklus nitrogen dengan mengubah amonium dan nitrit menjadi nitrogen gas di kondisi anoksik sehingga potensial diterapkan dalam pengolahan limbah nitrogen (Wijaya dan Putra, 2021). Efisiensinya dipengaruhi oleh mekanisme metabolisme yang tidak membutuhkan oksigen maupun karbon organik eksternal menjadikan proses ini lebih hemat energi, menghasilkan lumpur lebih sedikit dan menekan biaya

operasional dibandingkan metode konvensional (Ismail *et al.*, 2024). Namun keberhasilan proses sangat bergantung pada parameter operasional karena konsentrasi nitrit tinggi dapat menghambat enzim sementara suhu ekstrem dapat merusak membran sel (Putri & Nur, 2023; Marlis *et al.*, 2023). Dalam konteks tropis dimana parameter suhu 25-30°C dinilai optimal untuk menjaga aktivitas bakteri (Du *et al.*, 2022). Kajian menunjukkan bahwa Anammox lebih

sesuai untuk limbah berkadar organik rendah sedangkan untuk limbah organik tinggi proses konvensional masih lebih fleksibel (Li *et al.*, 2020). Dengan efisiensi energi dan potensi integrasi pada pemulihan fosfor, Anammox dipandang sebagai teknologi strategis yang mendukung pengelolaan limbah nitrogen berkelanjutan di wilayah tropis (Witkabel dan Abendroth, 2024).



Gambar 1. Proses Anammox berbasis nitritasi

Ammonium inhibition

Amonium merupakan salah satu bentuk utama nitrogen di sebagian besar instalasi pengolahan air limbah modern terutama pada limbah dengan kandungan nitrogen tinggi seperti cairan pencernaan lumpur, lindi TPA maupun limbah industri kimia (Amalia dan Fajri, 2020). Konsentrasi amonium yang tinggi menimbulkan tantangan serius karena dapat memengaruhi

proses biologis dalam IPAL. Proses Anammox terbukti mampu mengolah amonium secara efisien namun performanya sangat dipengaruhi oleh konsentrasi substrat (Budirman *et al.*, 2025). Pada kondisi tertentu tingginya konsentrasi amonium justru menurunkan aktivitas mikroba sehingga efisiensi penyisihan nitrogen tidak tercapai secara optimal (Zhang *et al.*, 2022) (Tabel 1).

Tabel 1. Konsentrasi amonium dalam berbagai jenis air limbah

Wastewater / industry	Ammonium nitrogen concentration(mg L ⁻¹)	Expected FA concentrations(mg L ⁻¹) ^a
Monosodium glutamate wastewater	15,000–25,000	1120.5–1867.5
Sludge digestion liquid	1200–4000	89.6–298.8
Landfill leachate	1400–2800	104.6–209.2
	0.2–13,000	0.0–971.1
Coke-ovens wastewaters	330–5100	24.7–381.0
Digester liquor of swine wastewater	3000–5000	224.1–373.5
Livestock: cattle or swine	500–2300	7.4–171.8
Fertilizer	200–940	14.9–70.2
Oil Refinery	23.8–865	1.8–64.6

^a Expected FA concentrations in Anammox reactors, pH = 8 and T = 30 °C were used in calculation.

Faktor penghambat utama bukan hanya jumlah amonium melainkan keberadaan amonia bebas (NH₃/FA) yang bersifat toksik terhadap bakteri Anammox. Konsentrasi FA berlebih

dapat mengganggu aktivitas enzimatik dan merusak integritas sel sehingga mengurangi stabilitas proses (Marlis *et al.*, 2023; Putri & Nur, 2023). Implikasi dari temuan ini adalah perlunya

pengendalian beban nitrogen dan kondisi operasional misalnya melalui pengaturan pH dan pra-perlakuan limbah, agar konsentrasi FA tetap berada dalam ambang aman. Dengan demikian penerapan Anammox dalam pengolahan limbah berkadar nitrogen tinggi harus mempertimbangkan aspek toksisitas substrat untuk memastikan efisiensi dan keberlanjutan sistem.

Analisis efektivitas proses anammox dalam menghilangkan nitrogen

Hasil kajian menunjukkan bahwa proses Anammox memiliki efektivitas tinggi dalam menghilangkan nitrogen dari berbagai jenis limbah, meskipun tingkat penyisihan bervariasi tergantung pada karakteristik limbah. Limbah domestik dan industri pengolahan makanan cenderung lebih mudah diolah karena rendah kandungan senyawa penghambat sedangkan limbah dari sektor pertambangan menunjukkan efisiensi lebih rendah (Wislim *et al.*, 2025). Perbedaan ini terutama disebabkan oleh variasi komposisi substrat dan faktor operasional seperti pH, suhu serta rasio C/N. Kondisi optimal misalnya pH mendekati netral dan suhu 25–30°C terbukti meningkatkan aktivitas mikroba Anammox sehingga mempercepat konversi nitrogen (Ismail *et al.*, 2024; Zhang *et al.*, 2022). Implikasinya penerapan teknologi ini sangat potensial untuk sistem pengolahan di wilayah tropis yang secara alami memiliki suhu mendukung.

Uji penerapan pada bioreaktor film tetap menunjukkan bahwa proses Anammox dapat

mencapai efisiensi penyisihan nitrogen di atas 80% dalam kondisi stabil dengan konversi amonium yang konsisten (Zhang *et al.*, 2022). Tingginya efisiensi ini tidak hanya disebabkan oleh mekanisme metabolisme bakteri yang hemat energi tetapi juga oleh kemampuan sistem untuk mempertahankan populasi mikroba dalam jangka panjang. Hal ini menegaskan bahwa Anammox lebih berkelanjutan dibandingkan metode konvensional karena tidak memerlukan penambahan karbon eksternal dan menghasilkan emisi gas rumah kaca yang lebih rendah. Implikasi praktisnya Anammox berpotensi mengurangi biaya operasional IPAL sekaligus mendukung upaya mitigasi perubahan iklim melalui penurunan emisi nitrogen reaktif.

Perbandingan Kinerja Anammox dengan Metode Pengolahan Limbah Nitrogen Lainnya

Proses anaerobic ammonium oxidation (Anammox) terbukti lebih efisien dibandingkan metode konvensional nitrifikasi-denitrifikasi karena bekerja dalam kondisi anaerob dan tidak membutuhkan oksigen maupun donor karbon eksternal. Mekanisme metabolisme bakteri Anammox menggunakan nitrit sebagai akseptor elektron, sehingga secara alami menekan kebutuhan energi dan meminimalkan ketergantungan pada bahan kimia tambahan. Implikasi praktis dari hal ini adalah efisiensi operasional yang lebih tinggi sekaligus peluang untuk mengurangi jejak karbon pada sistem pengolahan limbah (Zhang *et al.*, 2022; Ismail *et al.*, 2024).

Tabel 2. Kinerja berbagai tipe reaktor anammox

No.	Reaktor	Media	Waktu Penelitian (Hari)	HRT (Jam)	Suhu (°C)	Limbah	Kinerja Proses
1	UASB	Spons Hitam	200	0,12	16 - 30	Air Buangan	TPN: 1,14 dan 12 kg-N/m ³ .d TPyN: 5,72 kg-N/m ³ .d EPN: 94%
2	UASB	Granular	450	0,50	35	Artifisial	TPN: 89,1 kg-N/m ³ .d TPyN: 74,3 – 76,7 kg-N/m ³ .d EPN: 90%
3	UMABR	Membran	200	16-32	25	Artifisial	TPN: 0,104 kg-N/m ³ .d TPyN: 0,07 kg-N/m ³ .d EPN: 89%
4	UASB	Ijuk	78	12 dan 24	25-28	Artifisial	TPN: 0,14 dan 0,28 kg-N/m ³ .d TPyN: 0,200 kg-N/m ³ .d EPN: 76% EPA: 79%
5	UASB	poliester non-woven berpori	185	24-6	25-27	Artifisial	TPN: 0,35 - 1,20 kg-N/m ³ .d TPyN: 1,05 kg-N/m ³ .d EPN: 74%
6	UASB	Granular	78	12 dan 24	23-28	Artifisial	TPN: 0,14 dan 0,28 kg-N/m ³ .d TPyN: 0,196 kg-N/m ³ .d EPN: 77% EPA: 82%

Selain hemat energi keunggulan lain dari proses Anammox adalah pengurangan produksi lumpur yang signifikan. Penelitian terbaru melaporkan bahwa lumpur dapat berkurang hingga 90% yang tidak hanya menekan biaya penanganan tetapi juga mengurangi dampak lingkungan dari pembuangan lumpur (Witkabel & Abendroth., 2024). Efisiensi penyisihan nitrogen juga dilaporkan meningkat stabil di wilayah tropis karena kondisi suhu mendukung aktivitas mikroba. Temuan ini memperkuat relevansi Anammox sebagai solusi yang layak diterapkan di negara berkembang dengan beban nitrogen yang tinggi.

Dalam aplikasi praktis penggunaan reaktor berbasis UASB (*Upflow Anaerobic Sludge Blanket*) terbukti meningkatkan retensi biomassa dan efisiensi penyisihan amonium. Studi di Indonesia menunjukkan bahwa efisiensi dapat naik dari sekitar 30% menjadi lebih dari 80% dengan penggunaan UASB sekaligus memungkinkan waktu tinggal hidraulik yang lebih singkat (Zulkarnaini *et al.*, 2020). Peningkatan ini mengindikasikan bahwa strategi rekayasa reaktor berperan penting untuk mengatasi keterbatasan alami bakteri Anammox seperti pertumbuhan yang lambat dan sensitivitas terhadap fluktuasi substrat.

Meskipun memiliki banyak keunggulan, implementasi Anammox masih menghadapi tantangan. Waktu *start-up* yang panjang, sensitivitas terhadap suhu ekstrem serta ketergantungan pada keseimbangan nitrit-amonium menjadi faktor penghambat utama (Marlis *et al.*, 2023; Putri & Nur, 2023). Sebaliknya metode nitrifikasi-denitrifikasi konvensional lebih fleksibel untuk limbah dengan kandungan organik tinggi karena melibatkan bakteri heterotrof. Oleh karena itu meskipun Anammox menawarkan solusi efisien, ramah lingkungan dan berkelanjutan namun pemilihan teknologi pengolahan tetap harus disesuaikan dengan karakteristik limbah dan kondisi operasional sistem.

Faktor-faktor penghambat kinerja anammox

Karakteristik fisiologis bakteri Anammox menunjukkan bahwa kinerja optimal terjadi pada suhu 30-35°C sedangkan pada suhu rendah (<20°C) aktivitas mikroba menurun signifikan. Peningkatan suhu hingga 40-45°C bahkan dapat merusak sel akibat pelepasan sitokrom C setelah

temperature shock sehingga proses menjadi tidak stabil (Marlis *et al.*, 2023). Hal ini menjelaskan mengapa pengolahan limbah berbasis Anammox lebih sesuai diterapkan di wilayah tropis dengan suhu relatif stabil karena kondisi lingkungan mendukung keberlangsungan metabolisme bakteri tanpa intervensi energi tambahan untuk pemanasan.

Selain suhu, konsentrasi nitrit juga menjadi faktor penentu keberhasilan proses. Paparan nitrit yang berlebih bersifat toksik dan dapat menekan aktivitas enzimatis mikroba Anammox bahkan menonaktifkan proses sepenuhnya pada konsentrasi di atas 280 mg L⁻¹ (Putri & Nur, 2023). Kondisi ini menunjukkan bahwa pengendalian substrat merupakan langkah penting dalam desain reaktor, misalnya melalui strategi partial nitrification untuk menjaga rasio amonium-nitrit dalam kisaran yang aman. Implikasinya keberhasilan implementasi Anammox tidak hanya ditentukan oleh keberadaan bakteri tetapi juga oleh rekayasa sistem yang mampu mengendalikan parameter operasional.

Faktor lingkungan lain yang berpengaruh adalah salinitas. Peningkatan kadar garam menyebabkan stres osmotik yang mengganggu keseimbangan ion intraseluler sehingga fungsi fisiologis seperti transportasi nutrisi dan sintesis protein terganggu (Xie *et al.*, 2017; Zhao *et al.*, 2021). Pada kondisi ekstrem hal ini dapat memicu lisis sel dan penurunan drastis aktivitas biologis. Temuan ini menegaskan bahwa penerapan Anammox pada limbah dengan salinitas tinggi seperti efluen industri perikanan atau pengolahan makanan laut, membutuhkan strategi adaptasi mikroba atau penggunaan sistem biofilm/granular untuk meningkatkan ketahanan bakteri terhadap tekanan osmotik.

Kelebihan dan kekurangan dari proses anammox dan dibandingkan dengan proses konvensional

Proses *Anaerobic Ammonium Oxidation* (Anammox) merupakan inovasi penting dalam pengolahan limbah nitrogen karena mampu mengubah amonium dan nitrit menjadi nitrogen gas tanpa kebutuhan oksigen maupun donor karbon eksternal. Mekanisme ini menjadikannya lebih hemat energi, menghasilkan lumpur lebih sedikit dan lebih ekonomis dibandingkan nitrifikasi-denitrifikasi. Efisiensi tinggi tercapai

karena bakteri Anammox menggunakan karbon anorganik ($\text{CO}_2/\text{HCO}_3^-$) untuk metabolisme sehingga tidak bergantung pada sumber organik eksternal. Penelitian terbaru melaporkan efisiensi konversi amonium mencapai lebih dari 85% dengan penggunaan lumpur industri sebagai inokulum menegaskan potensi besar teknologi ini untuk aplikasi skala industri (Marlis *et al.*, 2023; Zhang *et al.*, 2022). Implikasinya Anammox berpeluang mendukung pengelolaan limbah berkelanjutan dengan menekan biaya dan dampak lingkungan.

Proses ini juga memiliki tantangan seperti pertumbuhan bakteri yang lambat, sensitivitas terhadap oksigen dan kebutuhan kondisi operasi yang stabil. Meski demikian penelitian lanjutan terus dilakukan untuk mengatasi kendala ini. Penelitian oleh (Lulrahman *et al.*, 2022) menggunakan lumpur dari muara Penjalinan menunjukkan keberhasilan awal proses Anammox dengan efisiensi penyisihan nitrogen sebesar 16,87% setelah 143 hari menandakan bahwa aplikasi di lingkungan tropis masih membutuhkan optimasi lebih lanjut.

Kesimpulan

Penelitian ini menegaskan bahwa proses *Anaerobic Ammonium Oxidation* (Anammox) merupakan teknologi efektif untuk mengurangi konsentrasi nitrogen dari berbagai jenis limbah cair. Dibandingkan metode konvensional nitrifikasi-denitrifikasi proses Anammox terbukti lebih hemat energi, menghasilkan lumpur lebih sedikit dan tidak memerlukan donor karbon eksternal. Efisiensi proses sangat dipengaruhi oleh faktor operasional seperti pH, suhu, konsentrasi substrat, serta rasio C/N dengan kondisi optimal pada suhu tropis sekitar 25-30°C. Hasil kajian juga menunjukkan bahwa tantangan utama implementasi Anammox meliputi pertumbuhan bakteri yang lambat, sensitivitas terhadap oksigen dan risiko penghambatan akibat konsentrasi nitrit atau amonia yang tinggi. Kendati demikian penerapan teknologi reaktor seperti UASB dan penggunaan biofilm atau lumpur granular dapat meningkatkan stabilitas dan efisiensi proses. Dengan keunggulan yang dimiliki Anammox berpotensi menjadi solusi strategis dalam pengolahan limbah nitrogen berkelanjutan di wilayah tropis sekaligus berkontribusi pada pengurangan emisi dan

perlindungan lingkungan perairan.

Ucapan Terima Kasih

Penulis menyampaikan terima kasih kepada semua pihak yang telah membantu sehingga artikel penelitian ini dapat terselesaikan dengan baik. Apresiasi khusus kami sampaikan kepada rekan sejawat dan pembimbing atas bimbingan yang berharga serta masukan konstruktif selama proses penelitian ini berlangsung. Ucapan terima kasih juga kami tujukan kepada keluarga dan sahabat atas dukungan serta semangat yang tak pernah surut selama proses penyusunan penelitian ini.

Referensi

- Amalia, D., & Fajri, R. (2020). Analisis kadar nitrogen dalam pupuk urea prill dan granule menggunakan metode kjeldahl di PT Pupuk Iskandar Muda. *Quimica: Jurnal Kimia Sains dan Terapan*, 2(1): 28-32. <https://doi.org/10.33059/jq.v2i1.2639>
- Budirman, B., Khaer, A., & Kasim, S. (2025). Inovasi Teknologi Moving Bed Biofilm Reactor dalam Pengolahan Air Limbah: Kajian Bibliometrik. *Sulolipu: Media Komunikasi Sivitas Akademika dan Masyarakat*, 25(1): 1-17. <https://doi.org/10.32382/sulo.v25i1.1426>
- Du, R., Cao, S., Jin, R., Li, X., Fan, J., & Peng, Y. (2022). Beyond an Applicable Rate in Low-Strength Wastewater Treatment by Anammox: Motivated Labor at an Extremely Short Hydraulic Retention Time. *Environmental science & technology*. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c05123>
- Dwilaga, A. T. (2023). Decision Model and Industry Optimization in Production: A Systematic Literature review. *Sainteks: Jurnal Sain Dan Teknik*, 5(1): 57-71. <https://doi.org/10.37577/sainteks.v5i1.528>
- Guo, Y., Chen, Y., Webeck, E., & Li, Y. (2019). Towards more efficient nitrogen removal and phosphorus recovery from digestion effluent: Latest developments in the anammox-based process from the application perspective. *Bioresource technology*. DOI:

- <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.12.2560>
- Jin, R. C., Yang, G. F., Yu, J. J., & Zheng, P. (2012). The inhibition of the Anammox process: A review. *Chemical Engineering Journal*, 197: 67-79. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2012.05.014>
- Kartal, B., van Niftrik, L., Keltjens, J. T., Op den Camp, H. J. M., & Jetten, M. S. M. (2012). Anammox-Growth Physiology, Cell Biology, and Metabolism. In *Advances in Microbial Physiology*, 1(60). DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-398264-3.00003-6>
- Li, J., Peng, Y., Zhang, L., Li, X., Zhang, Q., Yang, S., Gao, Y., & Li, S. (2020). Improving Efficiency and Stability of Anammox through Sequentially Coupling Nitrification and Denitrification in a Single-Stage Bioreactor. *Environmental Science and Technology*, 54(17): 10859-10867. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c01314>
- Lu, J., Hong, Y., Wei, Y., Gu, J. D., Wu, J., Wang, Y., Ye, F., & Lin, J. G. (2021). Nitrification mainly driven by ammonia-oxidizing bacteria and nitrite-oxidizing bacteria in an anammox-inoculated wastewater treatment system. *AMB Express*, 11(1). DOI: <https://doi.org/10.1186/s13568-021-01321-6>
- Lulrahman, F., Silvia, S., & Zulkarnaini, Z. (2022). Penyisihan Nitrogen dengan Proses Anammox Menggunakan Lumpur Muara Penjalinan Kota Padang sebagai Inokulum: Nitrogen Removal by Anammox Process Using Sludge from Muara Penjalinan of Padang City as Inoculum. *Jurnal Teknologi Lingkungan*, 23(2): 143-150.
- Marlis, I. S., Komala, P. S., dan Zulkarnaini, Z. (2023). Penyisihan nitrogen melalui proses anammox dengan inokulum lumpur instalasi pengolahan air limbah pabrik pupuk. *Jurnal Ilmu Lingkungan*. 21(3): 717-724. DOI: <https://doi.org/10.14710/jil.21.3.717-724>
- Ismail, N.I., Zulkarnaini, Z., Umar, Z., & Ismail, S. Bin. (2024). Development of an anaerobic ammonium oxidation (ANAMMOX) process reactor for aquaculture wastewater. treatment. *Water Science & Technology*, 90(6): 1886-1896. DOI: <https://doi.org/10.2166/wst.2024.306>
- Prasetya, I. S., Nugrayani, D., Safitri, A. P. & Abrilia, M. (2023). Kontribusi Budidaya Keramba Jaring Apung terhadap Peningkatan Faktor Pembatas Fosfor dan Nitrogen di Ekosistem Waduk Pulau Jawa. *Maiyah*, 2(4), 284-292. <https://doi.org/10.20884/1.maiyah.2023.2.4.9956>
- Putra, R. P., Komala, P. S., Zulkarnaini, Z., and Komala, P. S. (2020). Start-Up Anammox Process Using Sludge from Koto Baru Lake as Inoculum. *Teknologi Lingkungan*. 21(2): 138-146.
- Putri, W., & Nur, A. (2023). Review Pengolahan Air Limbah Menggunakan Upflow Anaerobic Sludge Blanket (UASB) di Negara Berkembang. *Cived*, 10(2): 753-765.
- Sheng, L., Sheng, L., Lei, Z., Dzakpasu, M., Li, Y., Li, Q., & Chen, R. (2020). Application of the anammox-based process for nitrogen removal from anaerobic digestion effluent: A review of treatment performance, biochemical reactions, and impact factors. *Journal of water process engineering*, 38. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101595>
- Wijaya, I. M. W., & Putra, P. E. D. (2021). Anaerobic Ammonium Oxidation (Anammox) Pada Penyisihan Nitrogen Air Limbah Domestik. *Jurnal Ecocentrism*, 1(2): 113-122. DOI: <https://doi.org/10.36733/jeco.v1i2.2425>
- Wislim, T., Solfema, S., & Putri, L. D. (2025). Peningkatan Produktivitas dan Pendapatan Masyarakat Melalui Pengelolaan Limbah Pertanian. *Jurnal Bintang Pendidikan Indonesia*, 3(1): 163-168. <https://doi.org/10.55606/jubpi.v3i1.3544>
- Witkabel, P. & Abendroth, C. 2024. A systematic literature review of microbial anammox consortia in UASB/EGSB-reactors. *Chemosphere*, 367. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.143630>
- Xie, H., Ji, D., and Zang, L. 2017. Effects of Inhibition Conditions on Anammox

- process. *IOP*. 100: 1-8. DOI: 10.1088/1755-1315/100/1/012149
- Zhang, M., Gu, J., Wang, S., & Liu, Y. (2022). A mainstream anammox fixed-film membrane bioreactor with novel sandwich-structured carriers for fast start-up, effective sludge retention and membrane fouling mitigation. *Bioresource Technology*, 347. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.126370>
- Zhao, Q., Peng, Y., Li, J., Gao, R., Jia, T., Deng, L., & Du, R. (2021). Sustainable upgrading of biological municipal wastewater treatment based on anammox: From microbial understanding to engineering application. *The Science of the total environment*. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152468>
- Zulkarnaini, Afrianita, R., dan Putra, I. H. (2020). Aplikasi Proses Anammox Dalam Penyisihan Nitrogen Menggunakan Reaktor Up-Flow Anaerobic Sludge Blanket. *Jurnal Teknologi Lingkungan*. 21(1): 31-39.
- Zulkarnaini, Z., Gumelar, G., & Zainuddin, E. (2022). Anaerobic Ammonium Oxidation Performance in Shrimp Pond Wastewater Treatment. *Andalasian International Journal of Applied Science, Engineering and Technology*, 2(2): 51-56. DOI: <https://doi.org/10.25077/aijaset.v2i1.41>
- Zulkarnaini, Z., Nur, A., & Ermaliza, W. (2019). Nitrogen Removal in the Anammox Biofilm Reactor Using Palm Fiber As Carrier in Tropical Temperature Operation. *Jurnal Riset Teknologi Pencegahan Pencemaran Industri*, 10(2): 7-15. DOI: <https://doi.org/10.21771/jrtpi.2019.v10.n02.p7-15>