

STRESZCZENIE W JĘZYKU POLSKIM

W celu poprawy efektywności energetycznej oczyszczalni ścieków, procesy nityfikacji-denitryfikacji mogą zostać zastąpione technologiami alternatywnymi opartymi o proces „beztlenowego” utleniania azotu amonowego (anammox). Nowe technologie znajdują zastosowanie przede wszystkim w oczyszczaniu ścieków o wysokich stężeniach azotu amonowego i deficycie węgla organicznego, takich jak odcieki z beztlenowych komór fermentacyjnych. Badania literaturowe wskazują, iż efektywność procesu anammox uzależniona jest w głównej mierze od parametrów pracy reaktora, takich jak obciążenie ładunkiem zanieczyszczeń ($0,02 - 6 \text{ kg N m}^{-3} \text{ d}^{-1}$), temperatura ($20 - 43^\circ\text{C}$), pH ($6,5 - 8,3$) oraz stężenie tlenu rozpuszczonego ($< 0,5 \text{ g O}_2 \text{ m}^{-3}$). Celem niniejszej rozprawy była hodowla osadu granulowanego zawierającego wzbogacone kultury bakterii anammox, jak również ocena wpływu parametrów technologicznych (obciążenia ładunkiem zanieczyszczeń, temperatury, pH i stężenia tlenu rozpuszczonego) na szybkość oraz efektywność usuwania azotu w procesie anammox.

Hodowla granulowanego osadu anammox była prowadzona w reaktorze sekwencyjnym (SBR) o pojemności 10 dm^{-3} przez okres jednego roku. Reaktor zaszczerpiono pozbawioną aktywności biomasą (zawierającą bakterie anammox) o stężeniu równym $0,57 \text{ kg m}^{-3}$, pochodzącą z oczyszczalni ścieków w Zurychu (Szwajcaria). Następnie reaktor zasilano ściekami syntetycznymi o stężeniu azotu w zakresie od $230 - 1610 \text{ g N m}^{-3} \text{ d}^{-1}$. Okres rozruchu reaktora SBR wyniósł 60 dób. W trakcie biogranulacji osadu anammox średni rozmiar granuli ($d_{0,5}$) wzrósł z $290 \pm 25 \mu\text{m}$ do $728 \pm 17 \mu\text{m}$. Drugi etap badań, obejmujący ocenę wpływu poszczególnych parametrów technologicznych na szybkość procesu anammox, prowadzony był w czterech seriach pomiarowych. W seriach tych badano odpowiednio wpływ temperatury, pH, stężenia tlenu rozpuszczonego oraz obciążenia ładunkiem zanieczyszczeń na szybkość i efektywność procesu anammox. Pierwsza seria pomiarowa obejmowała badania dotyczące krótko- i długotrwałego wpływu temperatury na szybkość procesu anammox. Pomiary były prowadzone dla zakresu temperatur $10 - 55^\circ\text{C}$ (krótkotrwały wpływ temperatury) oraz $11 - 30^\circ\text{C}$ (długotrwały wpływ temperatury). W kolejnych seriach pomiarowych wykonano testy porcjowe pozwalające określić krótkotrwały wpływ pH ($6 - 10,5$) i tlenu rozpuszczonego ($0-1,0 \text{ g O}_2 \text{ m}^{-3}$). Ponadto, w oparciu o wyniki pracy reaktora SBR przy różnych poziomach ładunku azotu doprowadzanego do reaktora ($0,03 - 2,44 \text{ kg N m}^{-3} \text{ d}^{-1}$), określono wpływ doprowadzanego ładunku azotu na szybkość i efektywność procesu anammox.

Przeprowadzone badania wykazały, iż zastosowanie granulowanego osadu anammox zapewnia wysokoefektywne oczyszczanie ścieków charakteryzujących się wysokimi stężeniami azotu amonowego oraz deficytem węgla organicznego. Najwyższy ładunek azotu pozwalający zachować efektywność usuwania azotu w procesie anammox powyżej 85% mieścił się w zakresie $1,7 - 2,2 \text{ kg N m}^{-3} \text{ d}^{-1}$. W zakresie pH $7 - 8,5$ efektywność usuwania zarówno $\text{NH}_4\text{-N}$ jak i $\text{NO}_2\text{-N}$ wynosiła ponad 67%, przy maksimum odpowiednio 78,9% i 80,7% (pH = 8,5). Skrajne wartości analizowanego przedziału pH tj. 6 i 10,5 powodowały całkowitą, ale odwracalną inhibicję bakterii anammox. W badaniach dotyczących wpływu temperatury na szybkość procesu anammox najwyższą szybkość procesu anammox ($1,19 \text{ g N (g smo}\cdot\text{d)}^{-1}$) uzyskano w temperaturze 40°C , a najwyższą efektywność usuwania azotu (83,5%) w temperaturze 30°C . Całkowitą inhibicję aktywności bakterii anammox zaobserwowano w temperaturze odpowiednio 11°C (odwracalna) i 55°C (nieodwracalna). Ponadto, wykazano możliwość adaptacji bakterii anammox do niskich temperatur (14°C), co wskazuje na możliwość zastosowania procesu anammox nie tylko do oczyszczania wód poosadowych (charakteryzujących się wysoką temperaturą, $> 30^\circ\text{C}$), ale także ścieków komunalnych (o dużo

niższej temperaturze) w głównym ciągu oczyszczalni.

Przeprowadzona analiza oddziaływania poszczególnych parametrów technologicznych na szybkość i efektywność procesu anammox, pozwoliła określić optymalne warunki pracy reaktora sekwencyjnego z granulowanym osadem anammox w odniesieniu do temperatury procesu (30°C), pH (8,0), obciążenia ładunkiem zanieczyszczeń ($1,0 - 2,2 \text{ kg N m}^{-3} \text{ d}^{-1}$) i stężenia tlenu rozpuszczonego ($0,0 \text{ g O}_2 \text{ m}^{-3}$). Ponadto, przeprowadzone badania potwierdziły inhibitujący wpływ tlenu rozpuszczonego na aktywność granulowanego osadu anammox. Jednakże zaobserwowano jednocześnie lokalny wzrost efektywności usuwania azotu przy stężeniu tlenu rozpuszczonego na poziomie $0,5 \text{ g O}_2 \text{ m}^{-3}$, związany ze wzrostem aktywności tlenowych bakterii nitryfikacyjnych utleniających amoniak (AOB).

SUMMARY

In order to improve the energy efficiency in wastewater treatment plants (WWTPs), the processes of nitrification-denitrification can be replaced with alternative technologies employing the anaerobic ammonium oxidation (anammox) process. The anammox technologies are particularly relevant for treatment of nitrogen rich liquors with low COD/N ratio, such as sludge digester liquors (reject water). In the theoretical part it was shown based on literature data that the efficiency of anammox depends mainly on the operating parameters, such as nitrogen load ($0,02 - 6 \text{ kg N m}^{-3} \text{ d}^{-1}$), temperature ($20 - 43^\circ\text{C}$), pH ($6,5 - 8,3$) and dissolved oxygen (DO) concentration ($< 0,5 \text{ g O}_2 \text{ m}^{-3}$). The aim of these study was to development and cultivate the granular anammox-enrichment sludge, as well as to assess the impact of technological parameters (nitrogen load, temperature, pH and DO concentration) on the anammox process rate and nitrogen removal efficiency.

Granulation of anammox biomass was carried out in a sequencing batch reactor (SBR) with a capacity of 10 dm^3 for a period of 330 days. The SBR was inoculated with $0,57 \text{ kg m}^{-3}$ biomass containing inactive anammox biomass originating from a WWTP in Zurich. The initial operation parameters of the biogranulation experiment were set based on literature data. The start-up period of the SBR was 60 days. During the study period, the average diameter of granules ($d_{0,5}$) increased from $290 \pm 25 \mu\text{m}$ to $728 \pm 17 \mu\text{m}$. The second stage of the study, focused on the influence of operating parameters on the anammox process rate and efficiency, consisted of four measurement series. In these series, the influence of temperature, pH, DO concentration and nitrogen load on the anammox process rate were studied. In the first measurement series, short-term and long-term effects of temperature on the anammox process rate were investigated. The short-term and long-term tests were carried out in the temperature range of $10 - 55^\circ\text{C}$ and $11 - 30^\circ\text{C}$, respectively. In the following measurement series, batch tests on the short-term effects of pH ($6 - 10,5$) and DO ($0 - 1,0 \text{ g O}_2 \text{ m}^{-3}$) were carried out. Moreover, the effect of the nitrogen load on the anammox process rate and efficiency was determined based on the results of SBR operation at different nitrogen loading rates ($0,02 - 2,44 \text{ kg N m}^{-3} \text{ d}^{-1}$).

The results of this study confirmed that the application of the anammox process ensures highly effective treatment of ammonia-rich liquors at a low COD/N ratio. The highest nitrogen load resulting in maintaining the efficiency of nitrogen removal above 85% ranged from $1,7 - 2,2 \text{ kg N m}^{-3} \text{ d}^{-1}$. In the pH range of $7 - 8,5$, the removal efficiency of both $\text{NH}_4\text{-N}$ and $\text{NO}_2\text{-N}$ was over 67% with the maximum of 78,9% and 80,7%, respectively (pH = 8,5). The extreme pH values in the analyzed range (i.e. 6 and 10,5) resulted in complete reversible inhibition of anammox bacteria. While investigating the influence of temperature on the anammox process rate, the highest anammox process rate ($1,19 \text{ g N (g VSS} \cdot \text{d)}^{-1}$) and nitrogen removal efficiency (83,5%) were obtained at 40°C and 30°C , respectively. Complete reversible and irreversible inhibition of anammox bacteria was observed at 11°C and 55°C , respectively. In addition, the possibility of adapting anammox bacteria to low process temperature (14°C) was observed. This observation indicates the potential of using the anammox process not only in side-stream treatment systems (with high temperature of reject water $> 30^\circ\text{C}$), but also for treatment of municipal wastewater in mainstream systems (with lower temperatures).

Results of these study allowed to determine the optimal operating parameters, with the maximum efficiency of nitrogen removal in the anammox process in terms of temperature (30°C), pH (8,0), nitrogen loading rate ($1,0 - 2,2 \text{ kg N m}^{-3} \text{ d}^{-1}$) and DO concentration ($0,0 \text{ g O}_2 \text{ m}^{-3}$). The study also confirmed the inhibitory effect of DO on the activity of the granular anammox sludge. However, a local increase in the nitrogen removal efficiency was observed at the DO concentration of $0,5 \text{ g O}_2 \text{ m}^{-3}$, associated with an increase of the ammonia oxidizing bacteria (AOB) activity.