

Streszczenie

Poferment posiada cenne właściwości nawozowe, a jego faza ciekła może być wykorzystana także do nawodnień. Pofermenty po współfermentacji odpadów rolniczych i odchodów zwierzęcych zawierają do kilku tysięcy mg N-NH₄⁺/l, co ogranicza ich przyrodnicze wykorzystanie. Jedną z możliwości biologicznego oczyszczania pofermentu jest wykorzystanie reaktorów z tlenowym osadem granulowanym (ang. GSBGR), ponieważ warstwowa struktura granul oraz wysoka zawartość polimerów zewnątrzkomórkowych (EPS) ograniczają skutki obciążenia biomasy wysokim ładunkiem związków azotu. W pracy określono wpływ parametrów technologicznych układu z tlenowym osadem granulowanym i filtracją membranową na efektywność oczyszczania pofermentu oraz morfologię i strukturę gatunkową granul. GSBGR-y, do których wprowadzano poferment, eksploatowano w 8-godzinny cykl pracy przy obciążeniu biomasy ładunkiem azotu 1,0 g/(l·d) oraz 3,4 g/(l·d). Przy obciążeniu 1,0 g/(l·d) obserwowano całkowite utlenienie azotu amonowego i 64% usunięcie azotu ogólnego. Przy obciążeniu 3,4 g/(l·d) efektywność usuwania azotu amonowego była na poziomie 94%, lecz efektywność usuwania azotu ogólnego obniżyła się do 30%. Wysoki ładunek zawieszin w oczyszczanym pofermencie (33 g s.m./l) skutkowało wysokim stężeniem zawieszin ogólnych w odpływie z GSBGR-ów. By zmniejszyć ładunek zawieszin w dopływie, poferment rozdzielono na fazę stałą i ciekłą i oczyszczaniu poddano fazę ciekłą pofermentu charakteryzująca się wysokim stężeniem azotu amonowego. Wydzieloną fazę ciekłą pofermentu mieszało ze ściekami komunalnymi i oczyszczano w GSBGR-ach przy długości cyklu 6 h (GSBGR6), 8 h (GSBGR8) oraz 12 h (GSBGR12). Wydłużanie cyklu pracy GSBGR-ów skutkowało wzrostem zawartości polisacharydów w strukturze granul oraz zmniejszeniem ilości rozpuszczonych białek, co powodowało zwiększenie średnic granul i poprawę efektywności usuwania ChZT. W GSBGR8 azot amonowy został utleniony po 6 godzinach. Odpływ z GSBGR8 doczyszczano z wykorzystaniem ultrafiltracji, stosując membranę o granicy rozdziału 150 kDa przy ciśnieniu transmembranowym (TMP) równym 0,3, 0,4 oraz 0,5 MPa. Zastosowanie TMP = 0,4 MPa skutkowało usunięciem azotu Kjeldahla, zawieszin ogólnych, 74% usunięciem ChZT i 50% usunięciem barwy, przy wysokim natężeniu przepływu przez membranę. W granulach oczyszczających poferment dominowały *Thauera* sp., które przeprowadzają heterotroficzną nityfikację i autotroficzną denityfikację. Mikroorganizmy autotroficzne *Nitrosomonas* sp. stanowiły 1,3% biomasy. Podczas oczyszczania fazy ciekłej pofermentu struktura gatunkowa zbiorowisk mikroorganizmów w granulach tlenowych zależała od długości cyklu pracy. W biomacie dominowały bakterie zdolne do rozkładu złożonych związków organicznych i usuwania azotu amonowego w wyniku procesów heterotroficznych oraz mikroorganizmy produkujące EPS, co wspomagało granulację. Odpływy z GSBGR-ów oczyszczających poferment i wydzieloną fazę ciekłą pofermentu zawierały wysokie stężenia utlenionych form azotu (NO_x). W badaniach określono optymalne parametry denityfikacji końcowej (P-D) biologicznie oczyszczonej fazy ciekłej pofermentu z GSBGR8. Hydrauliczny czas zatrzymania (HRT) nie miał wpływu na efektywność usuwania azotu azotanowego(III), ale miał wpływ na usuwanie azotu azotanowego(V) oraz fosforu ogólnego. Ekstrapolacja danych wskazała, że pełne usunięcie NO_x powinno nastąpić przy HRT około 96 h. Nie uzyskano pełnej denityfikacji przy stężeniu biomasy w reaktorach P-D na poziomie 6 g s.m./l. Stężenia biomasy na poziomie 10 i 14 g s.m./l umożliwiły efektywne usunięcie NO_x, jednak efektywność usuwania ChZT spadła do około 30% na skutek wysokiego stężenia związków rozpuszczonych w odpływie z reaktorów P-D. W kolejnym eksperymencie reaktor P-D eksploatowano przy HRT = 96 h, stężenie biomasy utrzymywano na poziomie 8 g s.m./l, a do reaktora dodawano glicerynę odpadową (GL) jako zewnętrzne źródło węgla, by zapewnić wysoką efektywność denityfikacji oraz usuwania fosforu i ChZT. Dodatek GL sprzyjał rozwojowi w biomacie akumulujących ortofosforany i denityfikujących mikroorganizmów *Janibacter* sp. i akumulujących kwas polihydroksymasłowy denityfikantów *Paracoccus* sp. i *Thauera* sp., co

skutkowało wysoką efektywnością usuwania biogenów. Odpływ z reaktora P-D, do którego wprowadzano GL, poddano ultrafiltracji przy TMP równym 0,3 i 0,5 MPa. Oczyszczanie ciekłej fazy pofermentu w technologii granul tlenowych (GSBR8) połączone z denitryfikacją końcową wspomaganą dodatkiem GL oraz doczyszczaniem ultrafiltracją przy TMP 0,5 MPa zapewniło 100% usunięcie azotu amonowego, 95,7% usunięcie azotu całkowitego, 76,1% usunięcie fosforu ogólnego, 90,0% usunięcie ChZT oraz ponad 90% usunięcie barwy i mętności, dzięki czemu odpływ spełniał kryteria stawiane wodzie wykorzystywanej do nawodnień. Opracowane rozwiązania technologiczne wpisują się w założenia gospodarki cyrkulacyjnej, zgodnie z którymi konieczne jest unieszkodliwianie odpadów z przemysłu rolno-spożywczego oraz rozwój technologii umożliwiających uzyskanie wysokiego stopnia oczyszczenia ścieków, które mogą być wykorzystane w różnych gałęziach przemysłu. Przeprowadzone badania mikrobiologiczne poszerzają wiedzę o strukturze mikroorganizmów w granulach tlenowych w warunkach wysokiego obciążenia biomasy ładunkiem związków węgla i azotu.

Summary

Digestate from methane fermentation has valuable fertilizing properties, and its liquid phase can also be used for irrigation. Digestates from co-fermentation of agricultural waste and animal manure contain up to several thousand milligrams of $\text{N-NH}_4^+/\text{L}$, which limits their use for agricultural purposes. One possibility for biological purification of this digestate is the use of batch reactors with aerobic granular sludge (GSBR) because the structure of the granules and the high content of extracellular polymers (EPS) limit the negative effects of the high nitrogen loads on the biomass. This study determined the effect of the operational parameters of a systems with aerobic granular sludge and membrane filtration on the efficiency of digestate purification and the morphology and microbial structure of granules. The digestate-fed GSBRs were operated with an 8-hour cycle at nitrogen loading rates of 1.0 g/(L·d) and 3.4 g/(L·d). At a load of 1.0 g/(L·d), ammonium nitrogen was completely oxidized and 64% of total nitrogen was removed. At a load of 3.4 g/(L·d), 94% of ammonium nitrogen was removed, but the efficiency of total nitrogen removal decreased to 30%. The high load of total suspended solids in the digestate (33 g TSS/L) resulted in a high concentration of TSS in the GSBR effluents. To reduce the load of TSS in the GSBR influent, the digestate was separated into solid and liquid phases, and only the liquid phase, which had a high concentration of ammonium nitrogen, was treated. The separated liquid phase of digestate was mixed with municipal sewage and purified in GSBRs at a cycle lengths of 6 h (GSBR6), 8 h (GSBR8) and 12 h (GSBR12). Lengthening the GSBR cycle increased the content of polysaccharides in the structure of the granules and reduced the amount of dissolved proteins, which resulted in increased granule diameters and improved efficiency of COD removal. In GSBR8, ammonium nitrogen was oxidized after 6 hours, which left a safety margin. The effluent from GSBR8 was then ultrafiltered using a 150 kDa cut-off membrane at transmembrane pressures (TMP) of 0.3, 0.4 and 0.5 MPa. At 0.4 MPa, all Kjeldahl nitrogen and TSS were removed, along with 74% of COD and 50% of color; and the transmembrane flow rate was high. During digestate purification, *Thauera* sp., which carry out heterotrophic nitrification and autotrophic denitrification, predominated in granules. Autotrophic *Nitrosomonas* sp. accounted for 1.3% of the biomass. During the treatment of the liquid phase of the digestate, the length of the GSBR cycle influenced the microbial structure of the aerobic granules. In the biomass, the predominant bacteria were those capable of decomposing complex organic compounds, those that can remove ammonium nitrogen via heterotrophic processes, and EPS-producing bacteria, which supported granulation. The effluents from the GSBRs purifying the digestate and the separated liquid phase of the digestate contained high concentrations of oxidized nitrogen forms (NO_x). The optimal parameters for post-denitrification (P-

D) of the biologically purified liquid phase of the digestate from GSB8 were determined. The hydraulic retention time (HRT) did not affect the efficiency of nitrites removal, but it influenced the removal of nitrates and total phosphorus. Extrapolation from the data indicated that complete NO_x removal would likely take place at an HRT of around 96 h. At a biomass concentration of 6 g MLSS/L, complete denitrification did not take place in the P-D reactors. At biomass concentrations of 10 and 14 g MLSS/L, NO_x was effectively removed, but the efficiency of COD removal decreased to about 30%, due to the high concentration of dissolved compounds in the P-D effluents. In the next experiment, the P-D reactor was operated at an HRT of 96 h and a biomass concentration of 8 g MLSS/L, and waste glycerin (GL) was added to the reactor as an external carbon source to ensure high efficiency of denitrification and removal of phosphorus and COD. GL addition favored the growth of orthophosphate-accumulating, denitrifying *Janibacter* sp., and polyhydroxybutyric-acid-accumulating, denitrifying *Paracoccus* sp. and *Thauera* sp., which resulted in a high efficiency of nutrient removal. The effluent from the GL-supported P-D reactor was ultrafiltered at TMPs of 0.3 and 0.5 MPa. With ultrafiltration at 0.5 MPa as the final step after purification with aerobic granular sludge technology (GSBR8) and P-D supported with GL, 100% of ammonium nitrogen was removed, along with 95.7% of total nitrogen, 76.1% of total phosphorus, 90.0% of COD, and over 90% of color and turbidity. The effluent that was obtained met the criteria for use in irrigation. These technological solutions are in line with the assumptions of a circular economy, according to which it is necessary to process waste from the agri-food industry and to develop technologies that allow wastewater to be highly-purified for reuse in various industries. The molecular results of this study add to knowledge about the microbial structure of aerobic granules exposed to high organic and nitrogen loads.