

Kamil WISNIEWSKI*

MODEL OCZYSZCZALNI ŚCIEKÓW JAKO NARZĘDZIE DO OPTYMALIZACJI PROCESÓW BIOLOGICZNYCH

W artykule pokazano przykład zastosowania modelu oczyszczalni ścieków jako narzędzia do optymalizacji pracy oczyszczalni. W tym celu dla przykładowej oczyszczalni ścieków opracowano model komputerowy, który następnie poddano symulacji dynamicznej. W artykule opisano wyniki symulacji dla systemu trójfazowego w procesie Bardenpho, uzupełnionym komorą predenitryfikacji (układ zbliżony do JHB). Model komputerowy oczyszczalni ścieków opracowano w programie GPS-X 6.4 (Hydromantis, Kanada). W czasie badań symulacyjnych obserwowano zmiany stężenia azotu i fosforu w komorach biologicznych oraz w odpływie z oczyszczalni ścieków. Dodatkowo, przedstawiono wyniki optymalizacji systemu napowietrzania komór biologicznych jak również wpływ wewnętrznej recyrkulacji na zużycie energii elektrycznej. Symulacje przeprowadzono przy różnych stężeniach tlenu rozpuszczonego w fazie nityfikacji oraz przy różnych natężeniach przepływu recyrkulacji wewnętrznej z komory nityfikacyjnej do komory denitryfikacyjnej. Stężenia tlenu rozpuszczonego wynosiły od 0,5 do 2 mg/l. Natomiast zakres natężeń recyrkulacji wewnętrznej odpowiadały natężeniom przepływów równych od 50% do 300% dopływających ścieków.

1. WPROWADZENIE

Matematyczne modelowanie procesów biologicznych jest uważane jako główne narzędzie do optymalizacji oczyszczalni ścieków. Modelowanie matematyczne jest nieodłącznym elementem podczas projektowania oraz eksploatacji oczyszczalni ścieków. Poprawnie sformułowany opis matematyczny pozwala na znaczną redukcję czasu przy testowaniu nowych rozwiązań technologicznych w realnie istniejących systemach oczyszczania ścieków. Największą zaletą modelowania matematycznego jest możliwość bezpiecznego i szybkiego testowania dowolnej liczby wariantów koncepcyjnych, konstrukcyjnych i operacyjnych.

W celu ustandaryzowania modelu matematycznego procesów biochemicznych została powołana specjalna grupa robacza IAWPRC (International Association on Water Pollution Research and Control) na początku lat osiemdziesiątych. Powołana grupa

* Politechnika Gdańska, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska, ul. Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk, kamwisni@pg.gda.pl.

miała na celu opracowanie modeli mogących odwzorować procesy zachodzące podczas biologicznego oczyszczania ścieków metodą osadu czynnego ASM (Activated Sludge Model) [3]. Grupa ta rozwinęła modele opisujące najważniejsze procesy oczyszczania ścieków takich jak nityfikacja, denityfikacja oraz usuwanie fosforu [4]. Przydatnym narzędziem do symulacji procesów biochemicznych mogą być oprogramowania komputerowe m.in. GPS-X, SIMBA, WEST, BIOWIN. Dzięki programom opartym na modelu osadu czynnego może być prowadzona duża liczba wirtualnych eksperymentów w różnych warunkach eksploatacyjnych.

Na podstawie modelu ASM2d (Activated Sludge Model Number 2d) przeprowadzono dynamiczną symulację dla typowej zmienności dobowej dla oczyszczalni ścieków o wielkości ok. 200 000 RLM. Dodatkowo, przedstawiono wyniki optymalizacji systemu napowietrzania komór biologicznych jak również wpływ wewnętrznej recykulacji na zużycie energii elektrycznej. Symulacje komputerowe przeprowadzono za pomocą programu GPS-X 6.4 (Hydromantis, Kanada).

2. MODELOWANIE KOMPUTEROWE

Modelowanie matematyczne staje się nieodłącznym elementem projektowania i eksploatacji systemów oczyszczania ścieków, zwłaszcza z wykorzystaniem osadu czynnego [1]. Zastosowanie modeli matematycznych pozwala na analizę, w krótkim czasie i przy niskim nakładzie finansowym, wielu rozwiązań technologicznych oraz na symulację zdarzeń w warunkach typowych dla układu rzeczywistego [2, 4]. Biochemiczny model matematyczny ASM (Activated Sludge Model) opisuje przemiany związków organicznych, fosforowych oraz azotowych, którego równania przedstawiono za pomocą macierzy Petersena. Zapis ten umożliwia czytelne powiązanie kinetyki procesów z szybkością zmian stężenia frakcji modelowych. Model bazuje na równaniach bilansu masy oraz zależnościach stechiometrycznych i kinetycznych. Zapis procesów biologicznych w taki sposób umożliwia łatwą rozbudowę oraz modyfikację modelu, który można dostosować do procesów biochemicznych zachodzących w danym systemie.

W celu zbliżenia modelu komputerowego do warunków jakie panują w układzie technologicznym należy określić parametry lokalne w poszczególnych obiektach tj. w komorach osadu czynnego, osadnikach wstępnych i wtórnych itp. za pomocą badań laboratoryjnych i pomiarowych. Ponadto, opracowanie modelu komputerowego wymaga przeprowadzenia szczegółowej analizy układu technologicznego oczyszczalni wraz z uwzględnieniem zmiennych charakterystycznych dla poszczególnych urządzeń tj. kubatury zbiorników, rozdziału przepływów, cykli pracy jak również natężenia przepływów. Prawidłowe zdefiniowanie tych parametrów ma duży wpływ na wyniki tarowania modelu. W celu poprawności przeprowadzanych symulacji model oczysz-

W modelu komputerowym uwzględniono pojedynczy reaktor biologiczny z osadnikiem wtórnym (jeden ciąg oczyszczania). Wymiary poszczególnych elementów części biologicznej są miarodajne dla oczyszczalni o wielkości ok. 200 000 RLM. Niezależnie od recyrkulacji zewnętrznej prowadzona jest recyrkulacja wewnętrzna z końca komory nityfikacji do komory denityfikacji, gdzie zredukowane są azotany do azotu gazowego. Recyrkulacja wewnętrzna (o stałym natężeniu) może być kierowana do trzech komór anoksydacyjnych, przy czym strumień ścieków może być rozdzielany w dowolnych proporcjach. Osad recykulowany jest kierowany z dna osadnika wtórnego do komory beztlenowej. Założono, że recyrkulacja ta może przyjmować dowolne wielkości (odczytywane z pliku wejściowego). Przewidziano również możliwość wydzielenia odcieków z procesów przeróbki osadu, a także dozowania zewnętrznego źródła węgla w trzech punktach, tj. dopływach do poszczególnych komór anoksydacyjnych.

Wybrany model osadu czynnego (ASM2d) został skalibrowany w warunkach dynamicznych dla typowych zmienności dobowych. Przeprowadzono szereg symulacji komputerowych na podstawie założonych danych. Kalibrację modelu rozpoczęto w oparciu o zestaw współczynników kinetycznych zastosowany dla wcześniej modelowanych oczyszczalni ścieków. Kalibrację modelu uznano za prawidłową z uwagi na zgodność mierzonych i prognozowanych stężeń $\text{NH}_4^+\text{-N}$, $\text{NO}_3^-\text{-N}$, $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$.

4. WYNIKI SYMULACJI DYNAMICZNEJ Z WYKORZYSTANIEM MODELU KOMPUTEROWEGO

Obok wysokiej wydajności procesu oczyszczania ścieków coraz większy nacisk kładzie się na koszty energii oraz dodatkowe koszty eksploatacji. Już teraz powszechnie znanych jest wiele sposobów obniżenia kosztów energii, które mogą być stosowane we wszystkich typach oczyszczalni ścieków. Znaczącymi kosztami eksploatacyjnymi są koszty energii elektrycznej, stosowanej między innymi do napowietrzania reaktorów biologicznych jak również dla systemu tłoczenia ścieków.

Na podstawie symulacji dynamicznej bazowanej na rzeczywistych warunkach występujących w oczyszczalni ścieków dokonano energetycznej optymalizacji systemu. W tym przypadku poddano analizie:

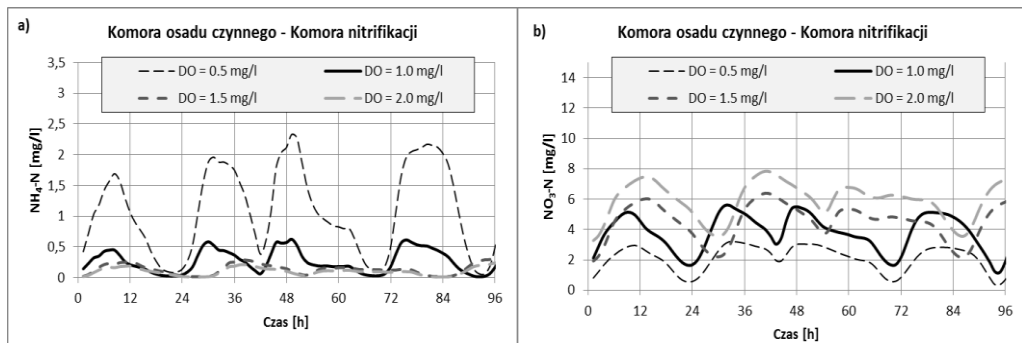
- sterowanie stężeniem tlenu rozpuszczonego w komorze nityfikacji
- zmiany natężenie recyrkulacji wewnętrznej z końca komory nityfikacji do komory denityfikacji

Przy optymalizacji energochłonności systemu głównie brano pod uwagę efektywność oczyszczania ścieków, tak aby zapewnić parametry jakości ścieków wg. Rozporządzenia Ministra Środowiska z dnia 18 listopada 2014 r. (Rozporządzenie MŚ, 2014). Dla prezentowanej oczyszczalni, której przepustowość wynosi powyżej

100000 RLM, stężenie azotu ogólnego w ściekach oczyszczonych nie powinna przekraczać 10 mg/l, a stężenie fosforu ogólnego nie powinna przekraczać 1 mg/l. Najwyższe dopuszczalne wartości dla poszczególnych frakcji azotu powinny wynosić odpowiednio 10 mg/l dla azotu amonowego NH_4^+ , 30 mg/l dla azotu azotanowego NO_3^- oraz 1 mg/l dla azotu azotynowego NO_2^- .

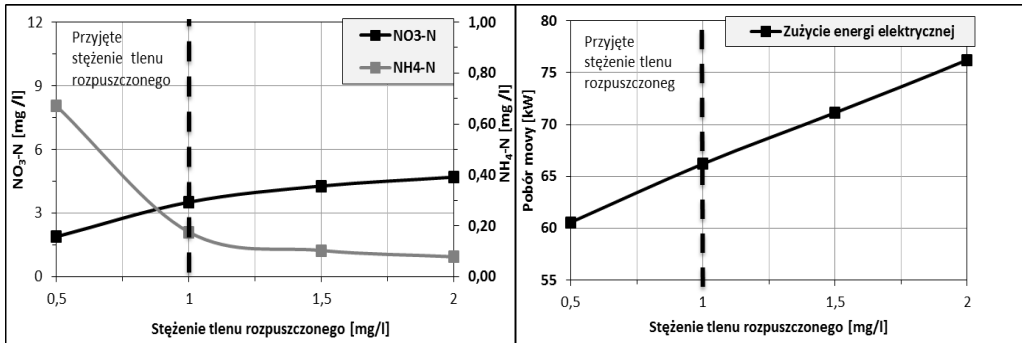
4.1. STEROWANIE STĘŻENIEM TLENU ROZPUSZCZONEGO W KOMORZE NITRYFIKACJI ORAZ NATĘŻENIEM RECYRKULACJI WEWNĘTRZNEJ

Analizie poddano zmiany stężenia tlenu rozpuszczonego w komorze nityfikacyjnej odnosząc się do poboru mocy przez urządzenie służące do natleniania. Przy prowadzeniu symulacji komputerowej założono różne stężenia tlenu rozpuszczonego w komorach osadu czynnego od stężenia 0,5 do 2 mg/l. Zmiany stężenia azotu amonowego (NH_4^+-N) i azotu azotanowego (NO_3^--N) przedstawiono na rysunku 2 (a, b).



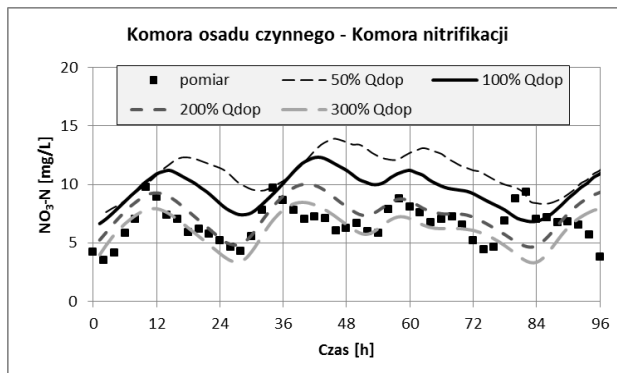
Rys. 2. Zmiany stężenia azotu amonowego (a) oraz azotu azotanowego (b) w komorze nityfikacyjnej przy różnych stężeniach tlenu rozpuszczonego

Na podstawie wyników modelowania dynamicznego stwierdzono, że zawartość tlenu rozpuszczonego w granicach 0,5 mg/l do 2 mg/l jest prawidłowy w odniesieniu do jakości odpływu ścieków. Niemniej jednak w godzinach największego dopływu ładunków zanieczyszczeń stężenie azotu amonowego znacznie się zwiększa. W celu wyznaczenia optymalnego stężenia tlenu rozpuszczonego względem energooszczędności systemu dokonano analizy, którą przedstawiono na rysunku 3. Pokazano tutaj zależność między wzrostem poboru mocy urządzenia do napowietrzania a zmianą stężenia azotu amonowego oraz azotu azotanowego w odpływie. Na podstawie analizy można stwierdzić, że najbardziej optymalne stężenie tlenu rozpuszczonego wynosi w granicach 1 mg/l przy wysokiej wydajności procesu. Zużycie energii całkowitej można zmniejszyć nawet do 14% przyjmując stężenie tlenu na poziomie 1 mg/l w odniesieniu do wartości 2 mg/l w komorze nityfikacyjnej.



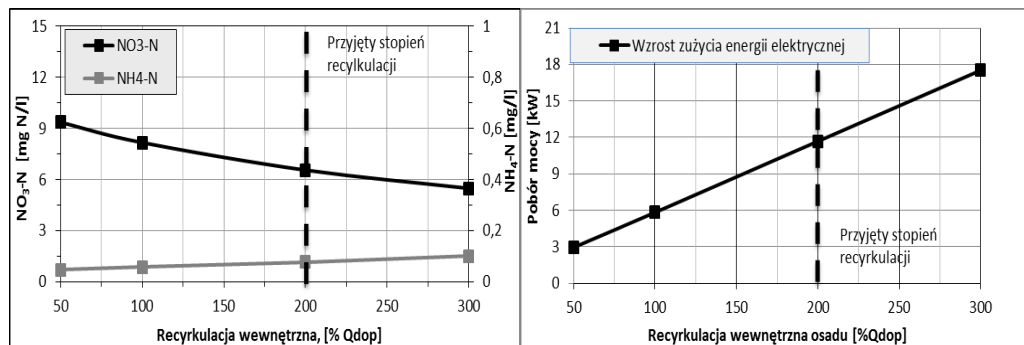
Rys. 3. Analiza wpływu stężenia tlenu rozpuszczonego na stężenie azotu amonowego oraz azotu azotanowego w odniesieniu do zużycia energii elektrycznej

Następnym krokiem optymalizacji kosztów oczyszczalni ścieków jest analiza wpływu zmiany natężenia recyrkulacji wewnętrznej z końca komory nitryfikacyjnej do komory denitryfikacyjnej. Podczas symulacji przyjęto stałe stężenie tlenu rozpuszczonego (1 mg/l). Symulacja prowadzona była przy różnych natężeniach recyrkulacji wewnętrznej od 50% do 300% dopływających ścieków. Wyniki z symulacji przedstawiono na rysunku 4.



Rys. 4. Zmiany natężenia recyrkulacji wewnętrznej z końca komory nitryfikacyjnej do komory denitryfikacyjnej przy stężeniu tlenu 1.0 mg/l oraz przy różnych natężeniach przepływu recyrkulacji wewnętrznej

Na podstawie wyników symulacji można zauważyć, że zmiany recyrkulacji znacząco wpływają na stężenie azotu azotanowego w odplywie. Obniżenie natężenia przepływu pogarsza wydajność procesu. Przy recyrkulacji 50% stężenie azotu azotanowego jest na pograniczu dopuszczalnej wartości azotu ogólnego (<10 mg/l). W celu wyznaczenia optymalnego natężenia przepływu względem energooszczędności dokonano analizy, którą przedstawiono na rysunku 5.



Rys. 5. Analiza zmiany natężenie recyrkulacji wewnętrznej na stężenie azotu azotanowego w odniesieniu do zużycia energii elektrycznej

Powszechnie przyjmowana recyrkulacja wewnętrzna na oczyszczalni ścieków wynosi ok. 300% dopływających ścieków. Zatem przyjmując recyrkulację wewnętrzną na poziomie 200% ścieków dopływających można zaoszczędzić nawet do 30% energii elektrycznej pogarszając stężenie azotu ogólnego o ok. 15% w odpływie. Niemniej jednak stężenie azotu ogólnego jest poniżej dopuszczalnego progu (<10 mg/l). Reasumując, porównując dokonane symulacje komputerowe z rzeczywistymi warunkami eksploatacyjnymi oczyszczalni ścieków można zmniejszyć koszty eksploatacyjne oczyszczalni nawet do ok. 20%. (dane wyliczone w programie GPS-X 6.4). Wyniki symulacji uzyskane z wykorzystaniem modelu komputerowego były zbliżone do wartości parametrów ścieków oczyszczonych, uzyskiwanych w warunkach eksploatacyjnych w oczyszczalniach ścieków. Nie przedstawiono stężenia fosforu ogólnego, gdyż wartość w odpływie w każdej symulacji nie przekraczała 1 mg/l.

5. PODSUMOWANIE

Głównym celem prowadzonych badań było pokazanie przykładów zastosowania modeli matematycznych służących do optymalizacji procesów oczyszczania ścieków. Na podstawie przeprowadzonych symulacji stwierdzono, że koszty eksploatacyjne oczyszczalni można zmniejszyć nawet do 20% poprzez zmianę stężenia tlenu rozpuszczonego w komorze nityfikacji jak również poprzez zmniejszenie recyrkulacji wewnętrznej z komory końcowej nityfikacji do komory denityfikacji bez znacznego pogorszenia jakości odpływających ścieków.

Modelowanie matematyczne oczyszczalni ścieków staje się nieodłącznym narzędziem w projektowaniu i obsłudze oczyszczalni ścieków, pozwala na symulację różnych rozwiązań technologicznych, aspektów środowiskowych oraz ekonomicznych.

Matematyczny model powinien być uważany jako kluczowy środek do optymalizacji strategii zarządzania ściekami.

LITERATURA

- [1] GUJER W., *Activated sludge modelling: past, present and future*, Water Science and Technology, 2006, Vol. 53, No. 3. 111–119.
- [2] HENZE M. i inni, *Oczyszczanie ścieków-procesy biologiczne i chemiczne*, Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej, Kielce 2000.
- [3] HENZE M., Grady C.P.L., JR., GUJER W., MARAIS G.V.R., MATSUO T., *Activated Sludge Model*, No. 1. IAWQ Scientific and Technical Report No. 1, IWA Publishing, London 1987.
- [4] HENZE M., GUJER W., MINO T., VAN LOOSDRECHT M., *Activated sludge models ASM1, ASM2, ASM2d and ASM3 IWA Task Group on Mathematical Modelling for Design and Operation of Biological Wastewater Treatment*, IWA Publishing London 2002.
- [5] ROZPORZĄDZENIA MINISTRA ŚRODOWISKA z dnia 18 listopada 2014 r. w sprawie warunków jakie należy spełnić przy wprowadzaniu ścieków do wód lub do ziemi, oraz w sprawie substancji szczególnie szkodliwych dla środowiska wodnego (Dz.U. 2014 poz. 1800).

MODELLING OF WASTEWATER TREATMENT PLANT AS A TOOL FOR OPTIMIZATION OF BIOLOGICAL PROCESSES

The article shows an example of application of the wastewater treatment plant model as a tool to optimize plant operation. For this purpose, the sample of wastewater treatment plant (WWTP) was modeled in a computer program which was submitted to dynamic simulation. The article describes the results of computer simulations for the three-phase Bardenpho process with pre-denitrification chamber. (System similar to JHB). The WWTP computer model was developed in the GPS-X 6.4 (Hydromantis, Canada). During the simulation it was observed the changes in the concentration of nitrogen and phosphorus in biological chambers and in the effluent from WWTP. In addition, it was also presented the optimization of the aeration system and effect of internal recirculation to the energy consumption as well. The simulations were performed with different concentrations of dissolved oxygen in the nitrification phase and at different internal recirculation flow rates from nitrification chamber to denitrification chamber. Dissolved oxygen concentrations ranged from 0.5 to 2 mg/l. Internal recirculation flow rates ranged from 50% to 300% Q incoming waste water.