

Katarzyna M. JAROMIN-GLEŃ¹, Adam PIOTROWICZ² i Grzegorz ŁAGÓD²

MODELOWANIE PRACY BIOREAKTORA TYPU SBR ZA POMOCĄ SYMULATORA GPS-X

SBR BIOREACTOR MODELLING WITH THE GPS-X SIMULATOR

Abstrakt: Najistotniejsze z punktu widzenia eksploatatorów oczyszczalni ścieków jest uzyskanie maksymalnej skuteczności oczyszczania przy jak najniższych nakładach finansowych. Współcześnie w dążeniu do takiego celu pomocne stają się programy komputerowe pracujące w oparciu o modele matematyczne odzwierciedlające kinetykę i stechiometrię procesów oczyszczania ścieków. Opracowanie modelu istniejącej w rzeczywistości oczyszczalni umożliwia wprowadzenie do pierwotnej technologii i przetestowanie różnych modyfikacji przy niewielkich nakładach finansowych i bez ryzyka wprowadzenia zaburzeń w realnie działających urządzeniach. Takie podejście do tematu pozwala zaoszczędzić czas i pieniądze, a co najważniejsze nie wpływa negatywnie na środowisko naturalne. W pracy wykorzystany został program komputerowy GPS-X firmy Hydromantis (wersja 5.0), bazowym modelem matematycznym do opisu procesów realizowanych metodą osadu czynnego był model ASM2d. W ramach opracowania przedstawiono model komputerowy wykonany w oparciu o reaktor typu SBR (Sequencing Batch Reactor), pracujący w warunkach laboratoryjnych, oraz wyniki symulacji procesów oczyszczania ścieków miejskich przeprowadzonych przy jego wykorzystaniu. Zaprezentowano także uzyskane wartości rzeczywistej i modelowanej sprawności oczyszczania ścieków miejskich w nawiązaniu do obowiązujących wymogów prawnych.

Słowa kluczowe: reaktor typu SBR, ścieki komunalne, sprawność oczyszczania ścieków, modelowanie, GPS-X

Wstęp

Współczesny stan wiedzy na temat modelowania procesów oczyszczania ścieków oraz rozpowszechnienie i dostępność programów komputerowych służących tym celom doprowadziło do opracowania wielu mechanistycznych modeli głównych procesów realizowanych w oczyszczalniach ścieków. Posługując się modelami numerycznymi, można prowadzić symulacje pracy istniejących obiektów bez obawy o bieżące koszty testowanych rozwiązań czy stan środowiska, a także symulować awarie w dowolnym czasie i miejscu bez konieczności wprowadzenia zmian w istniejącym w rzeczywistości obiekcie [1-5].

Obecnie dostępne na rynku programy komputerowe stosowane są nie tylko do symulowania procesów oczyszczania ścieków w różnego typu obiektach oczyszczalni, ale są również narzędziem współpracującym z innymi środowiskami programistycznymi, pozwalającym określić wpływ realizowanych procesów na środowisko naturalne [6-11].

Jednym z tego typu programów jest symulator GPS-X, wykorzystujący szeroką gamę modeli matematycznych (m.in. modele z grupy ASM) i umożliwiający symulacje pracy różnych układów, zarówno w systemie przepływowym, jak i porcjowym przy zastosowaniu metody osadu czynnego lub złóż biologicznych [12].

¹ Instytut Agrofizyki, Polska Akademia Nauk, ul. Doświadczalna 4, 20-290 Lublin, tel. 81 744 50 61, email: k.jaromin-glen@ipan.lublin.pl

² Wydział Inżynierii Środowiska, Politechnika Lubelska, ul. Nadbystrzycka 40B, 20-618 Lublin, tel. 81 538 43 22, email: a.piotrowicz@wis.pol.lublin.pl

^{*} Praca była prezentowana podczas konferencji ECOpole' 13, Jarnółtówek, 23-26.10.2013

W ramach niniejszego opracowania do zintegrowanego usuwania związków węgla, azotu i fosforu ze ścieków miejskich wykorzystany został bioreaktor typu SBR. Do odzwierciedlenia realizowanych procesów wybrano powszechnie stosowany i sukcesywnie rozwijany model ASM2d [13-18].

Materiał i metody

Obiektem odwzorowywanym w symulatorze GPS-X był bioreaktor pracujący w technologii SBR do oczyszczania ścieków osadem czynnym działający w skali laboratoryjnej. Materiałem wykorzystanym w trakcie badań modelowych były zestawy danych dotyczących parametrów technicznych i technologicznych bioreaktora SBR, a także zestawy danych wskaźników jakości w oczyszczanych ściekach. Prezentowane wyniki uzyskano metodą symulacji komputerowych oraz za pomocą badań laboratoryjnych jakości oczyszczanych ścieków. W symulatorze poszczególnym modułom przypisane zostały odpowiednie modele oraz nadane inne atrybuty determinujące sposób ich pracy.

Tabela 1 przedstawia dane stanowiące podstawę do budowy analizowanego modelu.

Dane użyte do budowy modelu komputerowego

Tabela 1

The data used for construction of the computer model

Table 1

Rodzaj danych	Dane wejściowe
Biblioteka	CNPLib (CarbonNitrogenPhosphorus library)
Moduły układu	Dopływ, Advanced SBR, Zbiornik, Odpływ
Modele użyte w poszczególnych modułach:	Dopływ - CODfractions Advanced SBR - ASM2d Zbiornik - Noreact (brak zachodzących reakcji) Odpływ - Default (domyślny)
Wskaźniki zanieczyszczeń w dopływie	ChZT TKN (azot Kjeldahla) Azot amonowy Azotany i azotyny Fosfor ogólny Ortofosforany
Czas trwania cyklu	12 godzin
Czas trwania faz w cyklu	Zgodnie z harmonogramem pracy reaktora SBR
Szczegółowa charakterystyka dopływu (zmiennie złożone i zmiennie stanu)	Influent Advisor - aplikacja programu GPS-X

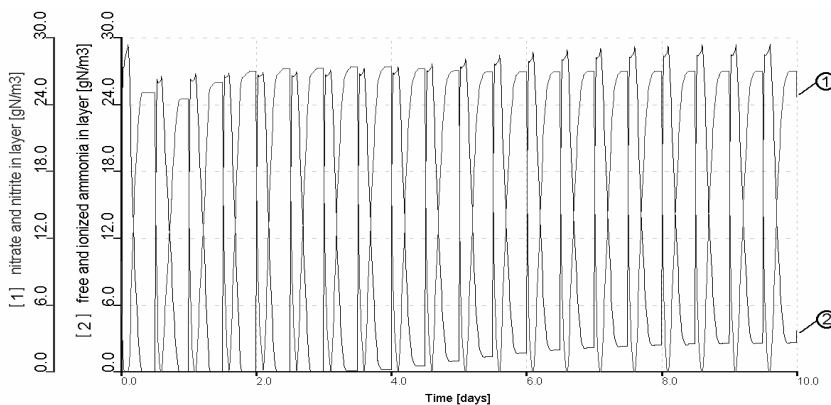
Oprócz standardowych i niezbędnych modułów, tzn. SBR, Dopływ i Odpływ, dodatkowy moduł „Zbiornik” wprowadzony został jako narzędzie pomocnicze dla interpretacji uzyskanych wyników na odpływie z reaktora. Moduł „Zbiornik” nie brał udziału w przemianach biochemicznych i nie powodował zmian wartości stężeń analizowanych wskaźników (model „noreact” oznaczający mieszanie zawartości przy braku zachodzących reakcji biochemicznych). Ułatwiał jednak gromadzenie, porządkowanie oraz dostęp do uzyskiwanych wyników symulacji, a także ich czytelną prezentację za pomocą wykresów i odpowiedniego typu zestawień.

Odwzorowywany w programie bioreaktor laboratoryjny pracował w cyklu 12-godzinnym w stabilizowanych warunkach temperaturowych $20 \pm 0,5^{\circ}\text{C}$, w związku

z czym w modelu przyjęto wartości wskaźników stechiometrycznych i kinetycznych dla temperatury 20°C [12]. Cykl pracy reaktora SBR składał się z sześciu następujących po sobie faz: I - napełniania, II - mieszania, III - napowietrzania, IV - sedimentacji, V - dekantacji oraz VI - postoju. Symulacja oparta została na analizie systemu przy założeniu niezmienności stężeń wskaźników zanieczyszczeń w dopływie ścieków podczas każdego cyklu. Proces napowietrzania (7 godzin) realizowany był przy ustalonej, stałej zawartości tlenu w komorze reaktora na poziomie 2 g O₂/m³. Stały poziom stężenia tlenu utrzymywany był dzięki regulatorowi PID, za pomocą którego program automatycznie regulował wielkość strumienia powietrza wprowadzanego do układu. Czas trwania symulacji wyniósł 10 dni, podczas których zrealizowano 20 pełnych cykli pracy reaktora SBR.

Wyniki i dyskusja

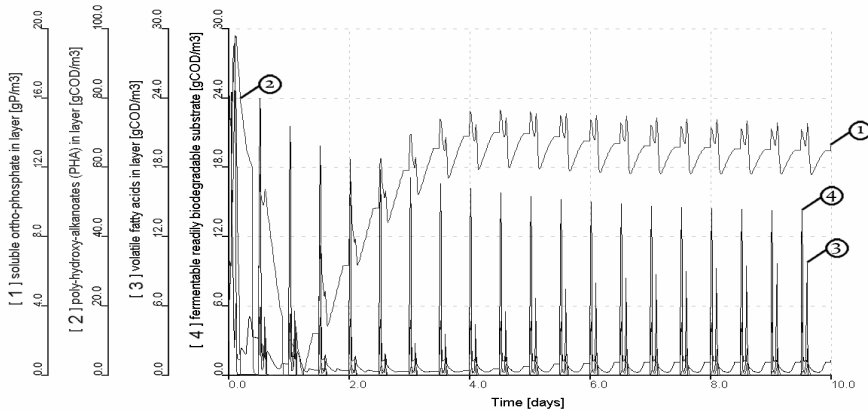
W trakcie symulacji analizowano profile stężeń następujących wskaźników zanieczyszczeń: azotany i azotyny (nitrate and nitrite); azot amonowy (free and ionized ammonia) (rys. 1); rozpuszczone ortofosforany (soluble ortho-phosphate); polihydroksyalkanolany (PHA - poly-hydroxy-alkanoates); LKT - lotne kwasy tłuszczowe (volatile fatty acids); fermentujące, łatwo biodegradowalne substraty (fermentable readily biodegradable substrate) (rys. 2).



Rys. 1. Wartości stężeń związków azotu w reaktorze SBR

Fig. 1. Nitrogen concentrations in the SBR

Rysunki 1 i 2 pozwalają zauważyć proces stabilizacji układu i wpracowanie osadu czynnego do zadanych warunków pracy. Biorąc pod uwagę związki azotu w reaktorze SBR, układ stabilizuje się po 4 cyklu pracy. Na podstawie wykresu zawierającego wybrane zmienne stanu (rozpuszczone ortofosforany, PHA, LTK, substraty fermentacji) - rysunek 2 - można zauważyć dynamikę zmian zachodzących podczas wpracowania układu. Uwzględniając wzajemne zależności występujące pomiędzy substancjami w komorze reaktora, można zaobserwować, że stabilizacja wartości analizowanych wskaźników zachodzi w różnym czasie (cykle 1-6).

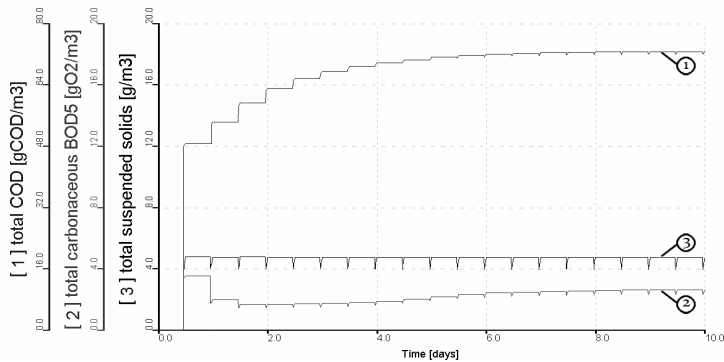


Rys. 2. Wartości analizowanych zmiennych stanu w reaktorze SBR

Fig. 2. Selected analysed parameters in the SBR

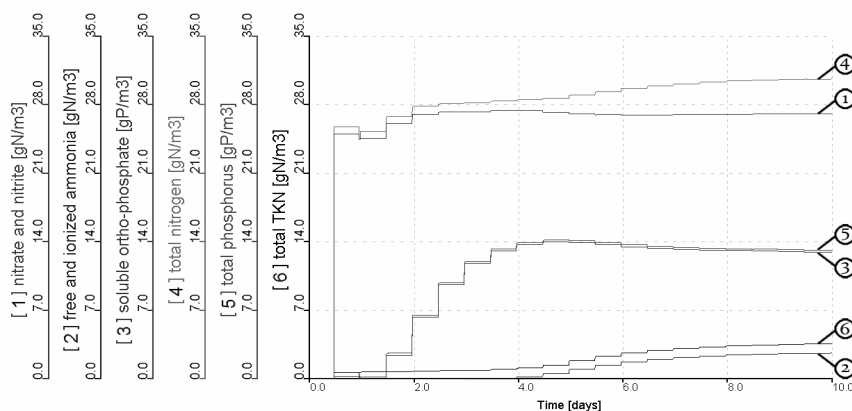
W celu określenia efektywności pracy modelu przeanalizowano podstawowe wskaźniki, takie jak: ChZT - chemiczne zapotrzebowanie na tlen (total COD), BZT₅ - biochemiczne zapotrzebowanie na tlen (total carbonaceous BOD₅), zawiesinę ogólną (TSS - total suspended solids) (rys. 3). W odpływie z układu analizowano również wskaźniki biogenne: azotany i azoty, azot amonowy, rozpuszczone ortofosforany, azot ogólny (TN - total nitrogen), fosfor ogólny (TP - total phosphorus) oraz azot Kjeldahla (total TKN) (rys. 4).

Poddając analizie wartości stężeń wskaźników zanieczyszczeń w odpływie z komory reaktora, można wnioskować, że wpracowanie układu ma bezpośredni wpływ na wyniki procesu oczyszczania. Istotną zaletą zbudowanego modelu jest stosunkowo szybkie ustabilizowanie się parametrów odpływu, które nie zawsze udaje się osiągnąć.

Rys. 3. Zmiany poziomu ChZT, BZT₅ i zaw. og. w odpływie z układuFig. 3. COD, BOD₅ and TSS concentration levels in the effluent

Rysunek 3 pozwala zaobserwować, że ustabilizowanie wartości takich parametrów, jak: ChZT, BZT₅ oraz zaw. og. następowało w różnym czasie. W przypadku zawiesiny

ogólnej stała wartość obserwowana jest praktycznie od początku symulacji, natomiast wartości wskaźników ChZT i BZT₅ stabilizują się po ok. 5 dniach.



Rys. 4. Stężenia substancji biogenych w odpływie z układu

Fig. 4. Nutrient concentrations in the effluent

Analizując związki azotu, takie jak azotany i azotyny, ustalenie ich wartości następuje po ok. 3 dobach, natomiast w przypadku azotu Kjeldahla (TKN) oraz azotu amonowego po ok. 7 dobach. Zaobserwowana po ok. 4 dobie zmiana wartości wskaźników azotowych spowodowana jest zmieniającym się poziomem stężenia azotu amonowego, który wpływa na stężenia azotu Kjeldahla, oraz azotu ogólnego (pomimo ustabilizowania się wartości azotanów i azotynów). Z kolei poziom stężeń związków fosforu, zdominowanych w odpływie przez ortofosforany, ulega stabilizacji po ok. 5 dobach (rys. 4).

Porównanie wartości sprawności analizowanego układu

Tabela 2

Comparison of efficiency values of the analyzed system

Table 2

Wskaźnik	Sprawność [%]			
	Symulacja	Badania laboratoryjne [19, 20]	Projekt [20]	Rozporządzenie MŚ [21]
Azot amonowy	97	90	90	*
Azot TKN	97	*	*	*
Azot ogólny	71	67	88	85
Fosfor ogólny	27	93	90	90
Ortofosforany	5	*	*	*
ChZT	91	93	90	75
BZT ₅	99	*	90	90
Zawiesiny ogólne	99	92	*	90

* - nie uwzględniano

W oparciu o uzyskane dane wyjściowe przeprowadzono obliczenia sprawności oczyszczania. Otrzymane za pomocą modelu dane zestawiono z wartościami sprawności

uzyskanej podczas badań laboratoryjnych, sprawności zakładanej podczas projektowania reaktora SBR oraz z wymogami prawnymi obowiązującymi dla oczyszczalni powyżej 100 000 RLM (tab. 2).

Podsumowanie

Praca na modelach odwzorowujących rzeczywiste układy oczyszczania ścieków pozwala w łatwy sposób sprawdzić możliwe efekty planowanych modyfikacji urządzeń bądź procesów, jak również przewidywać zachowanie rzeczywistego układu w stosunku do zmieniających warunków fizykochemicznych.

Wykonany model w zadowalającym stopniu odzwierciedla układ rzeczywisty w zakresie usuwania ze ścieków większości zanieczyszczeń, o czym świadczą wartości sprawności uzyskane podczas badań symulacyjnych oraz ich porównanie z wartościami rzeczywistymi osiągniętymi podczas badań laboratoryjnych. Największe rozbieżności można zaobserwować w przypadku stężenia związków fosforu - skonstruowany model pracujący w określonym harmonogramie nie zapewnił wymaganej sprawności ich usuwania. Sugeruje to, iż prawdopodobnie należałoby przeprowadzić dalszą kalibrację modelu. Modyfikacjom można również poddać panujące w reaktorze, ustalone automatycznie warunki tlenowe, stosując napowietrzanie ze zmiennym strumieniem dostarczanego powietrza lub wykorzystując przerwy w napowietrzaniu prowadzące do oscylacji stężenia tlenu rozpuszczonego wokół przyjętej wartości. Badania można poszerzyć o inne możliwe warianty pracy systemu, np. zmianę długości faz lub wprowadzenie dodatkowych faz reakcji. Wszystkie zaproponowane rozwiązania mogą umożliwić opracowanie efektywnego sposobu napowietrzania ścieków w komorze reaktora SBR.

Podziękowania

Praca naukowa finansowana ze środków budżetowych na naukę w latach 2012-2014 jako projekt badawczy w ramach programu pod nazwą „Diamantowy Grant”.

Literatura

- [1] Dürrenmatt DJ, Gujer W. Data-driven modeling approaches to support wastewater treatment plant. *Environ Modell Softw.* 2012;30:47-56. DOI: 10.1016/j.envsoft.2011.11.007.
- [2] Mannina G, Cosenza A, Viviani G. Uncertainty assessment of a model for biological nitrogen and phosphorus removal: Application to a large wastewater treatment plant. *Phys Chem Earth.* 2012;42-44:61-69. DOI: 10.1016/j.pce.2011.04.008.
- [3] Kusiak A, Zeng Y, Zhang Z. Modeling and analysis of pumps in a wastewater treatment plant: A data-mining approach. *Eng Appl Artif Intel.* 2013;26:1643-1651. DOI: 10.1016/j.engappai.2013.04.001.
- [4] Cosenza A, Mannina G, Vanrolleghem PA, Neumann MB. Global sensitivity analysis in wastewater applications: A comprehensive comparison of different methods. *Environ Modell Softw.* 2013;49:40-52. DOI: 10.1016/j.envsoft.2013.07.009.
- [5] Pomiès M, Choubert JM, Wisniewski C, Coquery M. Modelling of micropollutant removal in biological wastewater treatments: A review. *Sci Total Environ.* 2013;443:733-748. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2012.11.037.
- [6] Nuhoglu A, Keskinler B, Yildiz E. Mathematical modelling of the activated sludge process - the Erzincan case. *Process Biochem.* 2005;40:2467-2473. DOI: 10.1016/j.procbio.2004.09.011.
- [7] Devesa F, Comas J, Turon C, Freixò A, Carrasco F, Poch M. Scenario analysis for the role of sanitation infrastructures in integrated urban wastewater management. *Environ Modell Softw.* 2009;24:371-380. DOI: 10.1016/j.envsoft.2008.08.003.

- [8] Nasr MS, Moustafa MAE, Seif HAE, Kobrosy Gel. Modelling and simulation of German BIOGEST/EL-AGAMY wastewater treatment plants - Egypt using GPS-X simulator. *Alex Eng J.* 2011;50:351-357. DOI: 10.1016/j.aej.2011.05.003.
- [9] Ontiveros GA, Campanella EA. Environmental performance of biological nutrient removal processes from a life cycle perspective. *Bioresour Technol.* 2013;150:506-512. DOI: 10.1016/j.biortech.2013.08.059.
- [10] Abdel-Kader AM. Studying the efficiency of grey water treatment by using rotating biological contactors system. *J King Saud Univ - Eng Sci.* 2013;25:89-95. DOI: 10.1016/j.jksues.2012.05.003.
- [11] Zeng M, Soric A, Roche N. Calibration of hydrodynamic behavior and biokinetics for TOC removal modeling in biofilm reactors under different hydraulic conditions. *Bioresour Technol.* 2013;144:202-209. DOI: 10.1016/j.biortech.2013.06.111.
- [12] Hydromantis, 2006. GPS-X Version 5.0. Hydromantis Inc., Ontario.
- [13] Brun R, Kühni M, Siegrist H, Gujer W, Reichert P. Practical identifiability of ASM2d parameters - systematic selection and tuning of parameter subsets. *Water Res.* 2002;36:4113-4127. DOI: 10.1016/S0043-1354(02)00104-5.
- [14] Serralta J, Ferrer J, Borrás L, Seco A. An extension of ASM2d including pH calculation. *Water Res.* 2004;38:4029-4038. DOI: 10.1016/j.watres.2004.07.009.
- [15] Pai TY, Tsai YP, Chou YJ, Chang HY, Leu HG, Ouyang CF. Microbial kinetic analysis of three different types of EBNR process. *Chemosphere.* 2004;55:109-118. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2003.09.048.
- [16] García-Usach F, Ribes J, Ferrer J, Seco A. Calibration of denitrifying activity of polyphosphate accumulating organisms in an extended ASM2d model. *Water Res.* 2010;44:5284-5297. DOI: 10.1016/j.watres.2010.06.061.
- [17] Hao X, Wang Q, Cao Y, van Loosdrecht MCM. Evaluating sludge minimization caused by predation and viral infection based on the extended activated sludge model No. 2d. *Water Res.* 2011;45:5130-5140. DOI: 10.1016/j.watres.2011.07.013.
- [18] Barat R, Montoya T, Seco A, Ferrer J. Modelling biological and chemically induced precipitation of calcium phosphate in enhanced biological phosphorus removal systems. *Water Res.* 2011;45:3744-3752. DOI: 10.1016/j.watres.2011.04.028.
- [19] Jaromin-Gleń KM, Łągód G. Sprawność usuwania wybranych zanieczyszczeń ze ścieków miejskich w laboratoryjnym bioreaktorze typu SBR. *Proc ECOpole.* 2013;7(1):357-363. DOI: 10.2429/proc.2013.7(1)048.
- [20] Jaromin-Gleń KM, Łągód G. Ocena pracy laboratoryjnego reaktora typu SBR na tle założeń projektowych. *Proc ECOpole.* 2013;7(2):609-615. DOI: 10.2429/proc.2013.7(2)080.
- [21] Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 24 lipca 2006 r. w sprawie warunków, jakie należy spełnić przy wprowadzaniu ścieków do wód lub do ziemi, oraz w sprawie substancji szczególnie szkodliwych dla środowiska wodnego (DzU 2006.137.984 z późn. zm.).

SBR BIOREACTOR MODELLING WITH THE GPS-X SIMULATOR

¹ Institute of Agrophysics of the Polish Academy of Sciences

² Faculty of Environmental Engineering, Lublin University of Technology

Abstract: The most important issue from the point of view of the WWTP operator is to obtain the highest efficiency of treatment with the lowest financial outlays. At present, the achievement of such a goal can be aided by computer programs that make use of mathematical models which reflect the kinetics and the stoichiometry of wastewater treatment processes. Constructing the model of an existing WWTP makes it possible to introduce to the present technology and examine many modifications that do not require great financial costs and do not cause disturbances in the on-going processes. Such an approach allows saving both time and money, and what is more important, it does not have negative influence on the natural environment. In the research the GPS-X software package was used and for the description of the processes involving activated sludge method the ASM2d model was applied. Within the study was presented the computer model approximating the operation of the SBR type reactor together with the results of the simulation concerning municipal sewage treatment processes. The real and the modelled treatment efficiency values with reference to the mandatory legal regulations were also shown.

Keywords: SBR reactor, municipal sewage, treatment efficiency, modelling, GPS-X