

*Andrzej Wałęga, Karol Plesiński, Krzysztof Chmielowski, Stefan Satora*

**MOŻLIWOŚCI ZWIĘKSZENIA EFEKTYWNOŚCI  
USUWANIA ZE ŚCIEKÓW AZOTU I FOSFORU  
W OCZYSZCZALNI W ŁOPUSZNEJ**

---

***ENHANCEMENT POSSIBILITIES OF NITROGEN  
AND PHOSPHORUS REMOVAL FROM SEWAGE  
IN THE TREATMENT PLANT IN ŁOPUSZNA***

**Streszczenie**

W pracy dokonano analizy możliwości modernizacji ciągu technologicznego oczyszczalni ścieków w Łopusznej w aspekcie zwiększenia intensywności usuwania zanieczyszczeń biogennych. Wysoka efektywność pracy badanej oczyszczalni jest ważna w aspekcie ochrony wód kaskady zbiorników retencyjnych Czorsztyn-Niedzica-Sromowce Wyżne przed nadmiernym zanieczyszczeniem. Ocenę możliwości modernizacji oczyszczalni przeprowadzono na podstawie wielu symulacji komputerowych bazujących na modelu ASIM2d. Model ten uwzględnia 21 procesów jednostkowych, które zostały podzielone na: procesy hydrolizy, procesy zachodzące z udziałem bakterii heterotroficznych  $X_H$ , procesy zachodzące z udziałem bakterii akumulujących polifosforany  $X_{PAO}$ , procesy zachodzące z udziałem bakterii nityfikujących  $X_{AUT}$  i procesy chemiczne.

Analiza wykazała, że niska efektywność usuwania biogenów na przedmiotowej oczyszczalni wynika z braku recyrkulacji osadu czynnego do komory anaerobowej, w wyniku czego nie zachodzi w wystarczającym stopniu proces biologicznej defosfatacji. Sytuacja ulegnie poprawie w przypadku korekty ciągu recyrkulacji wewnętrznej i zewnętrznej oraz włączeniu komory anaerobowej do ciągu technologicznego przedmiotowej oczyszczalni.

**Słowa kluczowe:** model ASM2d, symulacja komputerowa, osad czynny, nityfikacja, denityfikacja, biologiczna defosfatacja

### Summary

*The paper presents analysis of modernization possibilities of the technological chain in the sewage treatment plant in Łopuszna concerning removal of biogenic pollutants. High operation effectiveness of the analyzed treatment plant is important regarding the protection of water in the cascade of Czorsztyn-Niedzica-Sromowce Wyzne reservoirs against the excessive pollution. The assessment of modernization possibilities of the treatment plant was based on the number of computer simulations upon the ASIM2d model. This model includes 21 separate processes, which were divided into: hydrolysis processes, processes with heterotrophic bacteria  $X_H$ , processes with poliphosphates' accumulating bacteria  $X_{PAO}$ , processes with nitrifiers  $X_{AUT}$  and chemical processes.*

*The analysis revealed that low effectiveness of biogenic substance removal in the objective treatment plant results from the lack of activated sludge recirculation into the anaerobic chamber which causes that the biological dephosphatation process is not sufficient enough. The situation will change if the internal and external recirculation chain is corrected and the anaerobic chamber is included in the technological chain of the objective sewage treatment plant.*

**Key words:** ASIM2d model, computer simulation, activated sludge, nitrification, denitrification, biological dephosphatation

### WSTĘP

Wyjątkowo podatne na szkodliwy wpływ substancji organicznych i biogennych są zbiorniki wód stojących. Nadmierny dopływ tych związków, szczególnie biogenów, prowadzi do przyspieszenia eutrofizacji wód oraz degradacji funkcji i struktury zbiorników. Według Klimiuk i in. [1995] szacuje się, że ok. 45% azotu i 70% fosforu wprowadzanych do wód z terenu Polski jest pochodzenia ściekowego. Koniecznością zatem staje się poszukiwanie środków zaradczych, które ograniczą dopływ zanieczyszczeń do wód. Takim środkiem jest m.in. poddawanie ścieków zaawansowanym procesom oczyszczania, gdzie nacisk położony jest na usuwanie związków azotu i fosforu.

Wzrost stopnia komplikacji procesów oczyszczania ścieków powoduje, że projektowanie i modernizowanie obecnych układów biologicznych staje się coraz trudniejsze, gdyż wiele reakcji biochemicznych zachodzących w oczyszczalni odbywa się jednocześnie i są one z sobą ściśle powiązane. Dlatego odchodzi się od metod analitycznych, które w projektowaniu wysokosprawnych oczyszczalni ścieków nie gwarantują już uzyskania optymalnych rozwiązań. W zamian preferuje się używanie metod symulacyjnych, co stało się możliwe dzięki rozwojowi techniki komputerowej.

Celem pracy jest ocena możliwości modernizacji ciągu technologicznego oczyszczalni ścieków w Łopusznej w aspekcie zwiększenia intensywności usuwania ze ścieków zanieczyszczeń biogennych. Konieczność modernizacji przedmiotowej oczyszczalni wynika m.in. z faktu, że odbiornikiem ścieków jest rzeka Dunajec, która zasila kaskadę zbiorników Czorsztyn-Niedzica-Sromowce

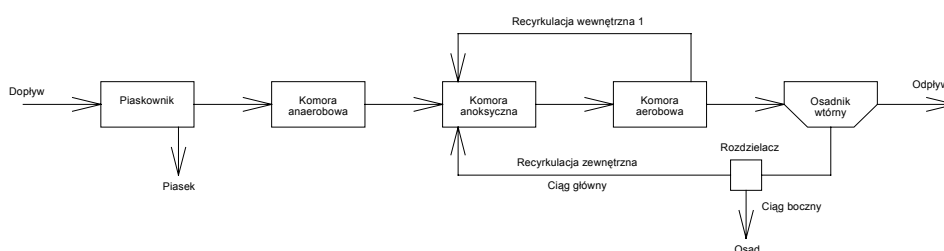
Wyżne. Stąd szczególnie ważne jest ograniczenie wielkości odprowadzanych zanieczyszczeń do Dunajca, co ma ogromne znaczenie w ochronie wód kaskady zbiorników przed eutrofizacją. Wybór optymalnego wariantu technologicznego został dokonany na podstawie wielu symulacji przeprowadzonych z wykorzystaniem modelu matematycznego ASM2d.

## OPIS OBIEKTU

Oczyszczalnia przyjmuje i oczyszcza ścieki dopływające z Łopusznej, Waksmundu, Ostrowska i Gronkowa. Do oczyszczalni dowożone są też ścieki sanitarne z przydomowych dołów bezodpływowych. Do analizowanego obiektu powinny być dowożone ścieki garbarskie, jednak obecnie nie jest to realizowane. Co więcej, zauważa się nielegalne zrzuty tych ścieków do kanalizacji sanitarnej. Ścieki odprowadzane z nieewidencjonowanych zakładów pozostają całkowicie poza kontrolą ilościową i jakościową. Jest to postępowanie karygodne, tym bardziej, że istniejące rozwiązania technologiczne w oczyszczalni pozwalają na podczyszczanie tego typu ścieków [Szalińska 2001].

Oczyszczalnię ścieków w Łopusznej oddano do eksploatacji w 1998 roku. Układ technologiczny został zaprojektowany na przepustowość  $Q_{d\dot{s}r} = 600 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ . Obecnie oczyszczalnia jest niedociążona hydraulicznie, czego powodem jest nieustannie rozbudowywana kanalizacja sanitarna. W 2008 roku przepływ średni dobowy wynosił  $Q_{d\dot{s}r} = 525,48 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ , co stanowiło 87,5% wielkości docelowej.

Oczyszczalnia ścieków zaprojektowana jest w systemie mechaniczno-biologicznym z usuwaniem związków biogenych oraz mechanicznym odwadnianiem osadów (rys. 1). W skład ciągu technologicznego wchodzi następujące urządzenia: krata gęsta, piaskownik pionowy, zbiornik uśredniający, zagęszczacz, komora defosfatacji, komora nityfikacji, komory nityfikacji (2 sztuki), osadniki wtórne (2 sztuki).



**Rysunek 1.** Układ technologiczny oczyszczalni ścieków  
**Figure 1.** Technological system of the sewage treatment plant

Zbiornik uśredniający spełnia następujące funkcje: zabezpiecza oczyszczalnię przed dużą nierównomiernością godzinową dopływu ścieków, zapewnia

jednakowe warunki pracy osadu w procesie biologicznego oczyszczania ścieków oraz pełni funkcję komory defosfatacji [BIPROWOD 1996].

## **METODYKA BADAŃ**

**Badania laboratoryjne.** Podstawą zaproponowanych rozwiązań modernizacyjnych w badanej oczyszczalni ścieków w Łopusznej były symulacje przebiegu procesów oczyszczania na podstawie modelu ASIM 2d. Z uwagi na dostępne dane odnośnie charakterystyki ścieków dopływających do oczyszczalni (niewielka ilość dostępnych analiz fizykochemicznych) przeprowadzono symulacje w warunkach ustalonych bez uwzględniania zmiennej czasowej. Podstawą przeprowadzonych symulacji były:

- średnie dobowe ilości ścieków dopływających do oczyszczalni,
- ilość i rodzaj dodawanych koagulantów,
- dokładna charakterystyka ciągu technologicznego oczyszczalni wraz z parametrami poszczególnych urządzeń,
- właściwości fizykochemiczne ścieków surowych i oczyszczonych w badanym obiekcie.

Dane te zostały udostępnione przez Oczyszczalnię Ścieków w Łopusznej oraz przez Podhalańskie Przedsiębiorstwo Komunalne Sp. z o.o., które administruje przedmiotową oczyszczalnię i pochodziły z 2007 i 2008 roku.

Monitoring jakościowy ścieków obejmował następujące wskaźniki zanieczyszczeń: BZT<sub>5</sub>, ChZT<sub>Cr</sub> i zawiesinę ogólną. Według pozwolenia wodnoprawnego [Pozwolenie 2004] przedmiotowa oczyszczalnia jest zobligowana monitorować wymienione wskaźniki zanieczyszczeń w ściekach oczyszczonych. Z uwagi na brak danych odnośnie zawartości związków biogenych wykonano kilka analiz ścieków surowych i oczyszczonych w celu określenia zawartości tych wskaźników w ściekach. Analizy obejmowały oznaczenie następujących wskaźników zanieczyszczeń: ChZT<sub>Cr</sub>, odczynu pH, zasadowości ogólnej, fosforanów ogólnych, fosforu ogólnego, azotu amonowego, azotu azotanowego i temperatury ścieków. Analizy wykonano zgodnie z zalecanymi metodykami referencyjnymi w Laboratorium Oceny Jakości Wody i Ścieków Katedry Inżynierii Sanitarnej i Gospodarki Wodnej UR w Krakowie. Wszystkie zebrane dane były wykorzystane do kalibracji modelu matematycznego, na podstawie którego dokonano symulacji procesu oczyszczania.

**Badania symulacyjne.** Na wstępie badań symulacyjnych dokonano kalibracji modelu, która polega na doprowadzeniu parametrów modelu matematycznego do zgodności z modelem rzeczywistym oczyszczalni ścieków. Po określeniu charakterystyki ścieków surowych przystąpiono do ustalenia parametrów technicznych poszczególnych urządzeń w modelu kalibrowanym. Schemat układu kalibrowanego, który jest równoważny istniejącemu, przedstawia rysunek 1. Parametry urządzeń występujących w analizowanej oczyszczalni przedstawiono w tabeli 1. Ścieki pobrane z oczyszczalni w celu analizy fizyko-chemicznej

miały temperaturę zbliżoną do 10°C, dlatego przeprowadzono kalibrację układu w tych warunkach termicznych. Zgodność wartości, obliczonych za pomocą modelu matematycznego w stosunku do wartości rzeczywistych, określono według wzoru:

$$Z = \frac{|W_{rz} - W_{obl}|}{W_{rz}} \cdot 100[\%] \quad (1)$$

gdzie:

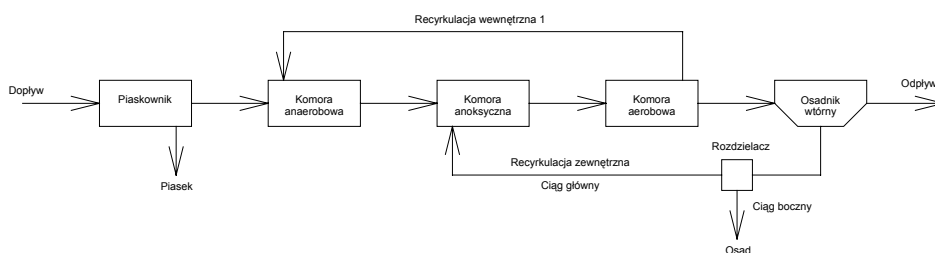
$W_{rz}$  – wartości rzeczywiste z oczyszczalni ścieków,

$W_{obl}$  – wartości obliczone za pomocą modelu matematycznego.

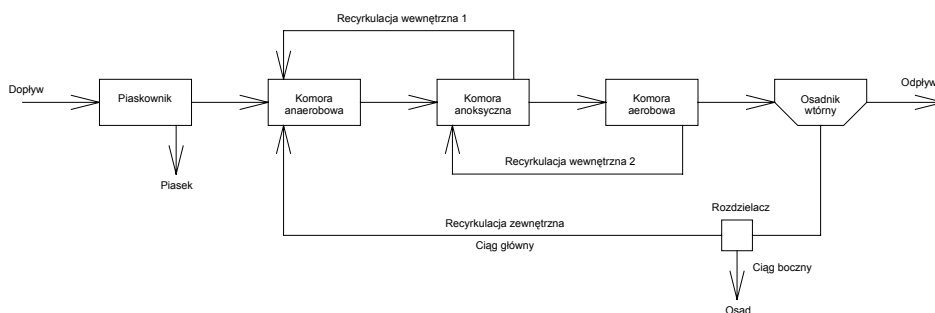
Po dokonaniu kalibracji modelu przystąpiono do wariantowej analizy pracy oczyszczalni ścieków. Badano dwa warianty modernizacji przedmiotowej oczyszczalni – rysunek 2:

- wariant I – układ z korektą recykulacji wewnętrznej i zewnętrznej,
- wariant II – układ z korektą objętości komór bioreaktora oraz dodatkową recykulacją wewnętrzną.

WARIANT I



WARIANT II



**Rysunek 2.** Schemat modelowanej oczyszczalni wg wariantu I i II  
**Figure 2.** Scheme of the modeled treatment plant according to the I and II variant

Wymiary obiektów w analizowanych wariantach przedstawia tabela 1.

**Tabela 1.** Parametry urządzeń w analizowanych ciągach technologicznych  
**Table 1.** Parameters of appliances in the analyzed technological chains

		Wariant kalibrowany	Wariant I	Wariant II
Piaskownik	Pojemność [m <sup>3</sup> ]	4,5	4,5	4,5
	Powierzchnia [m <sup>2</sup> ]	1,2	1,2	1,2
Komora anaerobowa	Pojemność [m <sup>3</sup> ]	165,0	165,0	165,0
	Powierzchnia [m <sup>2</sup> ]	30,0	30,0	30,0
	Tlen rozpuszczony [mgO <sub>2</sub> · dm <sup>-3</sup> ]	0,0	0,0	0,0
Komora anoksyliczna	Pojemność [m <sup>3</sup> ]	165,0	165,0	453,7
	Powierzchnia [m <sup>2</sup> ]	30,0	30,0	82,5
	Tlen rozpuszczony [mgO <sub>2</sub> · dm <sup>-3</sup> ]	0,5	0,5	1,0
Komora aerobowa	Pojemność [m <sup>3</sup> ]	577,5	577,5	288,6
	Powierzchnia [m <sup>2</sup> ]	105,0	105,0	52,5
	Tlen rozpuszczony [mgO <sub>2</sub> · dm <sup>-3</sup> ]	2,0	2,0	2,0
Osadnik wtórny	Pojemność [m <sup>3</sup> ]	290,0	290,0	290,0
	Powierzchnia [m <sup>2</sup> ]	50,0	50,0	50,0
	Reaktywny	Nie	Nie	Nie
Rozdzielacz	Rec. wewnętrzna 1 (stosunek B/G) [-]	2,5	2,5	1,7
	Rec. wewnętrzna 2 (stosunek B/G) [-]	brak	brak	1,8
	Rec. zewnętrzna (stosunek B/G) [-]	1,2	1,2	1,0
	Wiek osadu [doba]	13	13	13

gdzie:

- G – ciąg główny
- B – ciąg boczny

Analizy zostały przeprowadzone na podstawie modelu ASM2d. Uwzględnia on przemiany związków węgla, nityfikację, denityfikację oraz biologiczną i chemiczną defosfatację. W porównaniu do poprzedniej wersji model ASIM2 został wzbogacony w części dotyczącej mikroorganizmów akumulujących fosfor. Stwierdzono, że niektóre z bakterii fosforowych używają zmagazynowane wewnątrz komórki substancje organiczne do procesu denityfikacji oraz że mikroorganizmy te mogą wzrastać w warunkach anoksylicznych. Dlatego do modelu kinetycznego dodano procesy magazynowania polifosforanów X<sub>pp</sub> oraz wzrostu bakterii akumulujących fosfor X<sub>PAO</sub> w warunkach anoksylicznych [Henze i in. 1999; Szetela, Dymaczewski 2002]. W modelu występuje 21 procesów, które zostały podzielone na poszczególne grupy:

- procesy hydrolizy,
- procesy zachodzące z udziałem bakterii heterotroficznych XH,
- procesy zachodzące z udziałem bakterii akumulujących polifosforany XPAO,
- procesy zachodzące z udziałem bakterii nityfikujących XAUT,
- procesy chemiczne.

Wszystkie składniki występujące w modelu podzielone są pomiędzy komponenty rozpuszczalne S i nierozpuszczalne X [Dymaczewski 2008].

### ANALIZA WYNIKÓW

Skład fizykochemiczny ścieków dopływających i odpływających z przedmiotowej oczyszczalni przedstawiono w tabeli 2. Na podstawie tych danych można stwierdzić, że oczyszczalnia pracuje w trybie klasycznego usuwania substancji organicznych. W żadnej z badanych prób ścieków nie stwierdzono przekroczenia wartości dopuszczalnych BZT<sub>5</sub>, ChZT i zawiesiny ogólnej określonych w pozwoleniu wodno-prawnym. Dla przedmiotowej oczyszczalni średnia efektywność usuwania wspomnianych zanieczyszczeń wynosiła od 94% dla zawiesiny ogólnej do 98% dla BZT<sub>5</sub>. Stosunkowo niewielka jest redukcja zanieczyszczeń biogenych wynosząca średnio od zaledwie 7% dla azotu amonowego do 44% dla fosforanów.

**Tabela 2.** Właściwości fizykochemiczne ścieków surowych i oczyszczonych oraz procent redukcji poszczególnych wskaźników

**Table 2.** Physico-chemical properties of raw and treated sewage and reduction percentage of each index

Wskaźnik	Ścieki surowe	Ścieki oczyszczone	Wartość dopuszczalna wg pozwolenia	Redukcja
BZT <sub>5</sub> [mgO <sub>2</sub> · dm <sup>-3</sup> ]	290,67	4,68	25	98%
ChZT <sub>Cr</sub> [mgO <sub>2</sub> · dm <sup>-3</sup> ]	652,89	26,25	125	96%
Zawiesina ogólna [mg · dm <sup>-3</sup> ]	225,40	12,43	35	94%
Odczyn pH	7,93	9,73	brak regulacji prawnych dot. dopuszczalnych wartości	–
Zasadowość ogólna [mval · dm <sup>-3</sup> ]	13,20	15,20		–
Fosforany ogólne [mgPO <sub>4</sub> · dm <sup>-3</sup> ]	19,42	10,78		44%
Fosfor ogólny [mgP <sub>og</sub> · dm <sup>-3</sup> ]	6,33	3,81		40%
Azot amonowy [mgN-NH <sub>4</sub> · dm <sup>-3</sup> ]	39,66	36,78		7%
Azot azotanowy [mgN-NO <sub>3</sub> · dm <sup>-3</sup> ]	1,92	< 1,13		–
Temperatura ścieków [°C]	12,2	11,7		–

Wyniki przeprowadzonej kalibracji wskazują, że istnieją niewielkie różnice pomiędzy wartościami obliczonymi za pomocą modelu ASM2d a rzeczywistymi z oczyszczalni ścieków (tab. 3). Wyliczone różnice wynoszą maksymalnie

13% w przypadku zawiesiny ogólnej. Można więc stwierdzić, iż parametry modelu i urządzeń ciągu technologicznego zostały przyjęte poprawnie.

**Tabela 3.** Wynik kalibracji modelu matematycznego oczyszczalni ścieków w Łopusznej  
**Table 3.** Results of mathematical model calibration of the sewage treatment plant in Łopuszna

Wskaźnik zanieczyszczenia	Wartości rzeczywiste [mg · dm <sup>-3</sup> ]	Wartości obliczone [mg · dm <sup>-3</sup> ]	Różnica [mg · dm <sup>-3</sup> ]	Zgodność [%]
BZT <sub>5</sub>	4,65	4,70	0,05	1,0
ChZT <sub>Cr</sub>	44,80	44,63	0,17	0,4
Zawiesina ogólna	7,87	6,84	1,03	13,0
Fosfor całkowity	3,81	3,83	0,02	0,5
Azot całkowity	–	24,86	–	–

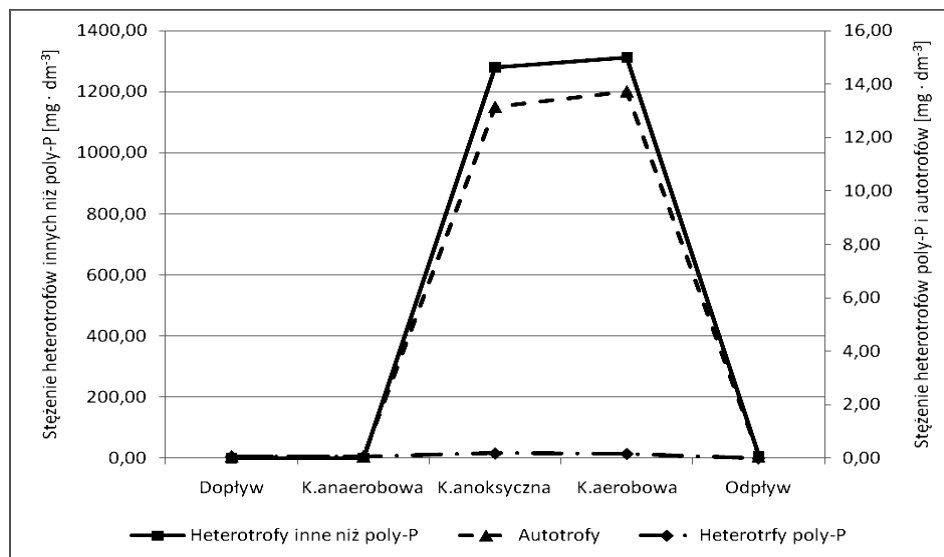
**Warianty modernizacji.** Układ kalibrowany, który został przystosowany na potrzeby symulacji komputerowej z ciągu technologicznego działającego w warunkach rzeczywistych, oczyszcza ścieki z najmniejszą efektywnością w porównaniu ze wszystkimi innymi wariantami zaproponowanymi do modernizacji. Układ charakteryzuje się efektywnym usuwaniem tylko związków organicznych i zawiesiny ogólnej, która wynosi 99,0% dla BZT<sub>5</sub>, 93,5% dla ChZT oraz 98,0% dla zawiesiny ogólnej (tab. 4).

**Tabela 4.** Zbiorcze zestawienie efektywności usuwania zanieczyszczeń w poszczególnych wariantach obliczeniowych  
**Table 4.** Comparison of the pollutants' removal effectiveness in particular variants of calculation

Wskaźnik	Układ kalibrowany			Układ z korektą recyrkulacji wewnętrznej i zewnętrznej		Układ z korektą objętości komór bioreaktora oraz dodatkową recyrkulacją wewnętrzną	
	Ścieki surowe [mg · dm <sup>-3</sup> ]	Ścieki oczyszczone [mg · dm <sup>-3</sup> ]	Redukcja [%]	Ścieki oczyszczone [mg · dm <sup>-3</sup> ]	Redukcja [%]	Ścieki oczyszczone [mg · dm <sup>-3</sup> ]	Redukcja [%]
BZT <sub>5</sub>	338,08	4,39	99,0	3,43	99,0	3,39	99,0
ChZT	686,80	44,38	93,5	44,62	93,5	43,88	93,5
Zawiesina ogólna	354,26	6,78	98,0	5,71	98,5	5,49	98,5
Azot całkowity	72,92	23,51	67,5	11,24	84,5	6,98	90,5
Azot amonowy	46,86	0,49	99,0	0,31	99,5	0,16	99,5
Azot azotanowy	1,92	19,92	–	7,94	–	3,86	–
Fosfor całkowity	16,00	3,93	75,0	0,43	97,5	0,66	96,0
Fosforany	8,00	3,76	47,0	0,20	97,5	0,44	94,5



Potwierdzeniem faktu, że kalibrowany układ pracuje jako konwencjonalna oczyszczalnia są wyniki przedstawione na rysunku 3, obrazujące stężenie organizmów heterotroficznych oraz poly-P w poszczególnych częściach oczyszczalni. Największe stężenie bakterii heterotroficznych nieakumulujących fosforanów (prowadzące mineralizację związków organicznych i denitryfikację azotanów), wynoszące 1279,95–1312,43  $\text{mg} \cdot \text{dm}^{-3}$ , występuje w komorze anoksycznej i aerobowej. W tych komorach również następuje największe stężenie bakterii autotroficznych, wynoszące 13,14–13,72  $\text{mg} \cdot \text{dm}^{-3}$ . Stężenie bakterii heterotroficznych akumulujących fosfor jest znikome. Najwyższe ich stężenie na poziomie 0,17–0,18  $\text{mg} \cdot \text{dm}^{-3}$  występuje w komorze anoksycznej i aerobowej. Znikome stężenie bakterii heterotroficznych poly-P w całym układzie potwierdzają wcześniejsze spostrzeżenia o braku dogodnych warunków do zachodzenia procesu biologicznej defosfatacji. W układzie dominują mikroorganizmy odpowiedzialne za usuwanie węgla oraz prowadzenie procesu nityfikacji i denitryfikacji.

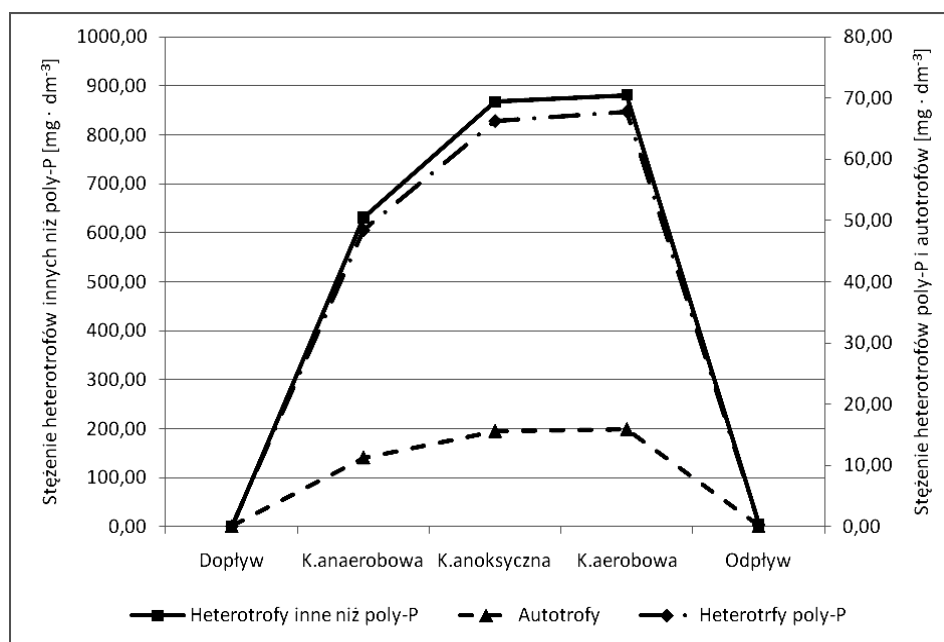


**Rysunek 3.** Zmiany stężenia mikroorganizmów heterotroficznych nieakumulujących fosforanów, heterotroficznych akumulujących fosforanów oraz autotroficznych w poszczególnych urządzeniach układu kalibrowanego

**Figure 3.** Concentration changes of heterotrophic microorganisms which do not accumulate phosphates, heterotrophic phosphates' accumulating microorganisms and autotrophic microorganisms in each appliance of the calibrated system

Układ z korektą recyrkulacji wewnętrznej i zewnętrznej charakteryzuje się znaczącą poprawą oczyszczania wszystkich form azotu. Stężenie azotu całkowitego w ściekach oczyszczonych zostało zmniejszone do 11,24  $\text{mg} \cdot \text{dm}^{-3}$ ,

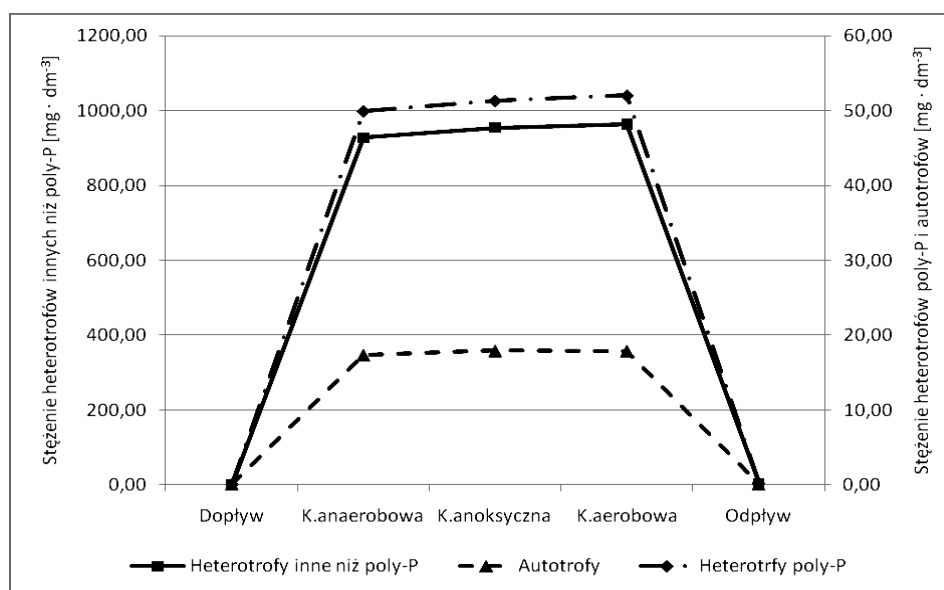
azotu amonowego do  $0,31 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$ , a azotanowego do  $7,94 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$ . Daje to odpowiednio 84,5% i 99,5% redukcję tych wskaźników. Analizowany układ oczyszcza związki fosforu również z zadowalającą efektywnością, wynoszącą 97,5%. Stężenie fosforu całkowitego w odpływie wynosi  $0,43 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$ , a fosforanów  $0,20 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$ . Wynik ten informuje nas o najlepszej efektywności usuwania wszystkich form fosforu spośród wszystkich przedstawionych rozwiązań układów technologicznych. Wpływ na ten stan rzeczy ma zmiana struktury mikroorganizmów w poszczególnych komorach oczyszczalni ścieków. W komorze anaerobowej wzrasta stężenie heterotrofów poly-P do wartości  $48,39 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$  (rys. 4), co świadczy o przebiegu procesu defosfatacji biologicznej. Stężenie bakterii heterotroficznych poly-P wzrasta w kolejnych komorach, osiągając wartości z przedziału  $66,28 - 67,82 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$ . W reaktorze występują również heterotrofy inne niż poly-P w stężeniu  $630,88 - 881,15 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$ , które są odpowiedzialne za proces denitryfikacji. Wzrost stężenia autotrofów w komorze anaerobowej ( $11,29 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$ ) jest spowodowany recyrkulacją wewnętrzną z komory aerobowej, skąd zawracana jest część omawianych mikroorganizmów.



**Rysunek 4.** Zmiany stężenia mikroorganizmów heterotroficznych nieakumulujących fosforany, heterotroficznych akumulujących fosforany oraz autotroficznych w poszczególnych urządzeniach układu w wariantie I

**Figure 4.** Concentration changes of heterotrophic microorganisms which do not accumulate phosphates, heterotrophic phosphates' accumulating microorganisms and autotrophic microorganisms in each appliance of the system in variant I

Z kolei układ z korektą objętości komór bioreaktora oraz dodatkową recyrkulacją wewnętrzną usuwał najefektywniej związki azotu spośród pozostałych układów. Redukcja azotu całkowitego na poziomie 90,5% pozwala uzyskać stężenie w ściekach oczyszczonych w wysokości  $6,98 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$ . Natomiast azot amonowy, będąc redukowany w 99,5% osiąga stężenie na poziomie  $0,16 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$ . Należy również zwrócić uwagę na niskie stężenie azotu azotanowego w odpływie, wynoszące tylko  $3,86 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$ . Niskie stężenia wszystkich form azotu w opływie oraz omówione wcześniej parametry pracy tego układu pozwalają twierdzić, iż przebieg procesów denitryfikacji i nityfikacji zachodzi prawidłowo. Również proces defosfatacji biologicznej przebiega należycie, mimo większego stężenia związków fosforu w porównaniu z układem proponowanym jako I wariant modernizacji. Uzyskana jednak efektywność na poziomie 96,0% dla fosforu całkowitego i 94,5% dla fosforanów jest zadowalająca. Stężenie tych zanieczyszczeń wynosi odpowiednio  $0,66 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$  oraz  $0,44 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$ . Oprócz najefektywniejszego usuwania związków azotu spośród pozostałych wariantów, również opisywany układ w najwyższym stopniu redukuje związki organiczne i zawiesinę ogólną. Są to jednak różnice nieznaczące.



**Rysunek 5.** Zmienność stężenia mikroorganizmów heterotroficznych nieakumulujących fosforany, heterotroficznych akumulujących fosforany oraz autotroficznych w poszczególnych urządzeniach analizowanego układu w wariantie II

**Figure 5.** Concentration changes of heterotrophic microorganisms which do not accumulate phosphates, heterotrophic phosphates' accumulating microorganisms and autotrophic microorganisms in particular appliances of the system in variant II

W wariancie II w komorze anaerobowej w największej koncentracji spośród omawianych przypadków występują bakterie heterotroficzne zdolne do akumulacji fosforanów. Jest to spowodowane zmianą ciągu recyrkulacji zewnętrznej, co w efekcie powoduje intensywny przebieg defosfatacji biologicznej.

## WNIOSKI

Na podstawie przeprowadzonych obliczeń można sformułować następujące wnioski końcowe:

1. Przedmiotowa oczyszczalnia ma niską efektywność usuwania związków biogenych ze ścieków. Związki fosforu są redukowane w 40–45%, natomiast azotu tylko w 7%. Porównując wcześniejsze dane dotyczące efektów usuwania substancji organicznych (ok. 95%), można stwierdzić, iż oczyszczalnia pracuje w trybie klasycznego usuwania substancji organicznych.

2. Niska efektywność usuwania biogenów na przedmiotowej oczyszczalni wynika z braku recyrkulacji osadu do komory anaerobowej, w wyniku czego nie zachodzi proces biologicznej defosfatacji.

3. Układ z korektą recyrkulacji wewnętrznej i zewnętrznej (I wariant obliczeniowy) pozwala na najskuteczniejsze usunięcie ze ścieków związków fosforu spośród pozostałych wariantów. Natomiast najwyższą redukcję związków azotu zaobserwowano w układzie z korektą objętości komór bioreaktora oraz dodatkową recyrkulacją wewnętrzną (II wariant).

4. W celu zwiększenia ochrony wód powierzchniowych przed zanieczyszczeniami biogenymi, a co za tym idzie procesem ich eutrofizacji konieczna jest modernizacja istniejącej oczyszczalni ścieków. Powinna ona polegać na korekcie recyrkulacji osadu czynnego i włączeniu zbiornika wyrównawczego do ciągu technologicznego. W rezultacie możliwa będzie efektywniejsza redukcja fosforu ze ścieków.

5. Model ASIM 2d jest niezwykle przydatnym narzędziem do projektowania i symulacji pracy oczyszczalni ścieków. Wynika to z faktu, iż możliwa jest w nim symulacja większości procesów zachodzących w bioreaktorze z osadem czynnym.

6. W związku z nielegalnymi, szkodliwymi zrzutami nieoczyszczonych ścieków do kanalizacji, należałoby podjąć kroki administracyjne w celu poprawy istniejącej sytuacji.

## BIBLIOGRAFIA

- BIPROWOD. Projekt koncepcji technologicznej dla oczyszczalni ścieków w Łopusznej. Warszawa 1996.
- Dymaczewski Z. *Charakterystyka frakcji organicznych ścieków miejskich pod kątem modelu osadu czynnego ASM2d*. Przemysł Chemiczny, 87/5, 2008, s. 440–442.

- Henze M., Gujer W., Takahashi M., Matsuo T., Wentzel M., Marais G., Van Loosdrecht M. *Activated Sludge Model No. 2D, ASM2D*. Water Science and Technology, 39/1, 1999, s. 165–182.
- Klimiuk E., Lossow K., Bulińska M. *Kinetyka reakcji i modelowanie reaktorów biochemicznych w procesach oczyszczania ścieków*. Wydawnictwo ART. Olsztyn 1995.
- Pozwolenie wodno-prawne. Decyzja z dn. 28.08.2004. Numer pozwolenia: OŚ-6223/24/2004. Nowy Targ 2004.
- Szalińska E. *Jakość powierzchniowych wód płynących w zlewni górnego Dunajca w latach 1995–1998*. Gospodarka Wodna, 3, 2001, s.114–118.
- Szetela R., Dymaczewski Z. *Modyfikacja obecnej postaci modelu osadu czynnego ASM2d*. Ochrona Środowiska, 1/84, 2002, s.3–8.

Dr inż. Andrzej Wałęga  
Dr inż. Krzysztof Chmielowski  
Dr hab. inż. Stefan Satora, prof. UR  
Katedra Inżynierii Sanitarnej i Gospodarki Wodnej  
Uniwersytet Rolniczy w Krakowie  
30-059 Kraków, al. Mickiewicza 24/28, Polska

Mgr inż. Karol Plesiński  
Katedra Inżynierii Wodnej i Geotechniki  
Uniwersytet Rolniczy w Krakowie  
30-059 Kraków, al. Mickiewicza 24/28, Polska

Recenzent: *Prof. dr hab. Jerzy Ratowski*