

# Usuwanie związków fosforu w procesie biologicznego oczyszczania ścieków

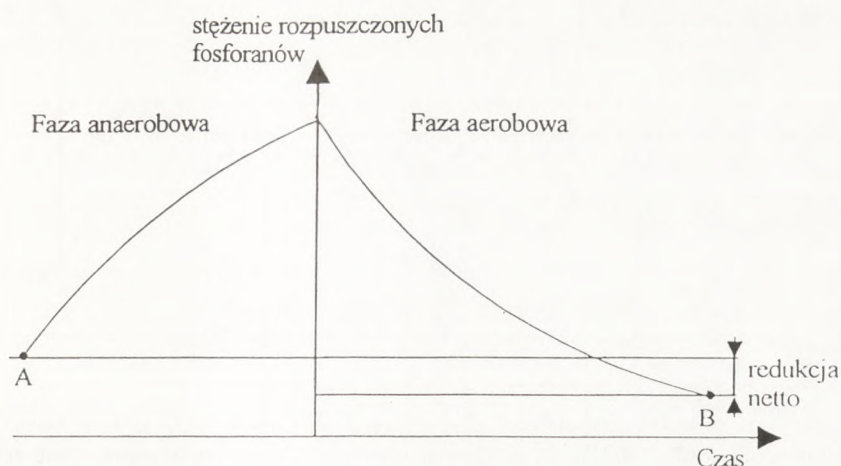
Bernadetta Czerska  
Korneliusz Miłsch  
Joanna Surmacz-Górska  
Politechnika Śląska  
Gliwice

## 1. Wprowadzenie

Eutrofizacja wód powierzchniowych, wywołana odprowadzeniem do nich nadmiernych ilości związków azotu i fosforu, jest istotnym problemem ekologicznym i gospodarczym. Ostatnio wprowadzono takie modyfikacje technologii biologicznego oczyszczania ścieków, aby możliwa była maksymalna redukcja zanieczyszczeń organicznych oraz pierwiastków biogennych — azotu i fosforu. W praktyce dość dobrze rozpoznano już i wykorzystano biologiczne procesy usuwania związków azotu, natomiast związki fosforu eliminowano do niedawna prawie wyłącznie przez chemiczne wytrącanie. Jednakże doświadczenia ostatnich lat wykazały, że skuteczny może być również biologiczny sposób usuwania fosforanów ze ścieków. Do tego celu wykorzystano fakt, że niektóre szczepy bakterii posiadają zdolność do pobierania fosforu w ilościach znacznie większych niż wymagają tego potrzeby wzrostu i rozwoju komórek (6). Fosfor gromadzony jest w komórce w skondensowanej formie polifosforanów (5,18).

Bakterie usuwają zwiększone ilości fosforu, wówczas gdy występują na przemian warunki beztlenowe i tlenowe (9). W warunkach anaerobowych fosfor wydziela się z komórek, a następnie w warunkach aerobowych jest on pobierany ze środowiska w ilości większej, niż wdzielona poprzednio (rys. 1). Fosfor, zgromadzony w komórkach, usuwany jest wraz z osadem nadmiernym i podlega dalszej utylizacji.

Początkowo przyjmowano, że jedynie bakterie rodzaju *Acinetobacter* i bardzo pokrewne posiadają zdolność nadmiernego pobierania fosforu (15). Są to gramujemne bakterie tlenowe, szeroko występujące w przyrodzie. Uprzywilejowanym substratem dla tych bakterii są krótkołańcuchowe kwasy organiczne (17). Niektóre szczepy są również zdolne do oddychania azotanowego. W mieszanej populacji mikroorganizmów typu osadu czynnego, wykorzystywanej do biologicznego usuwania związków fosforu, kształtuje się jednak bardzo zróż-



Rys. 1. Przebieg biologicznej redukcji fosforu w wyniku nadmiernego pobierania.

nicowana flora bakteryjna zdolna do magazynowania polifosforanów. Obok bakterii gramujemnych występowały także gramododatnie, zawsze jednak towarzyszyły im bakterie rodzaju *Acinetobacter* (zob. zestawienie).

#### ZESTAWIENIE

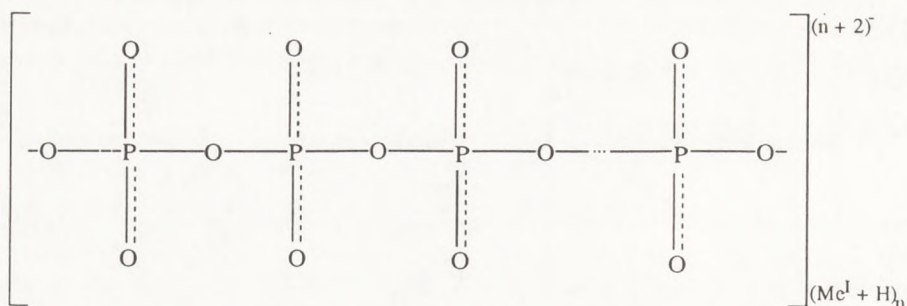
GATUNKI I RODZAJE BAKTERII POPULACJI OSADU CZYNNEGO, U KTÓRYCH ZAOBSERWOWANO GROMADZENIE POLIFOSFORANÓW W KOMÓRKACH (15)

<i>Acinetobacter calcoaceticus</i>	<i>Pseudomonas spec.</i>
<i>Klebsiella pneumonia</i>	<i>Citrobacter freundii</i>
<i>Microthrix pneumonia</i>	<i>Aeromonas spec.</i>
<i>Bacillus cereus</i>	<i>Moraxella spec.</i>

## 2. Metabolizm polifosforanów oraz enzymy uczestniczące w jego szlakach

Cząsteczki polifosforanów zbudowane są w przeważającej części z długołańcuchowych polifosforanów, którym mogą towarzyszyć jony  $Mg^{2+}$ ,  $K^+$ ,  $Ca^{2+}$  i in. (rys. 2).

Metabolizm bakterii akumulujących polifosforany przedstawia w uproszczony sposób rys. 3. W warunkach anaerobowych fakultatywne bakterie heterotroficzne metabolizują łatwo rozkładalne substancje organiczne do prostych związków organicznych. Bakterie *Acinetobacter*, jako bezwzględne tlenowce, nie wykorzystują powstałych półproduktów dla własnych potrzeb rozwoju,

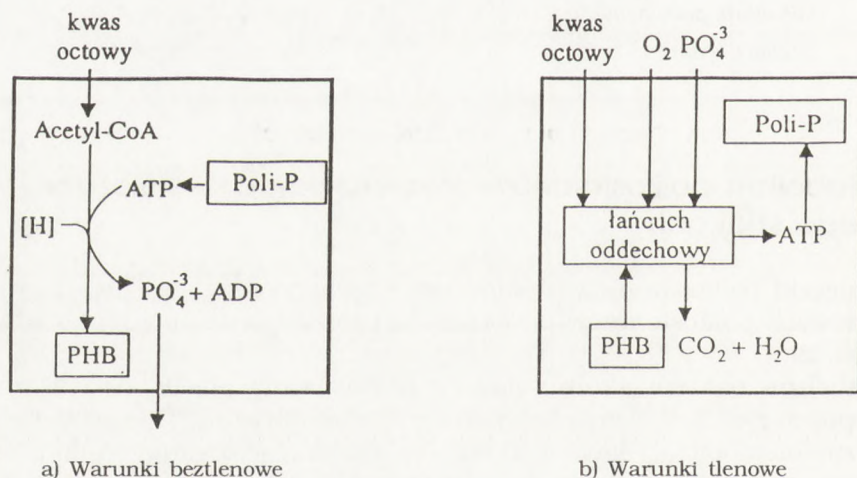
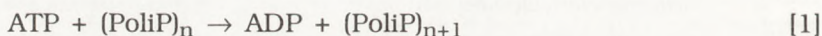


Rys. 2. Budowa cząsteczki liniowego polifosforanu  $Me^I$  — metal jednowartościowy (7).

prowadzą natomiast biosyntezę substancji zapasowych, np. kwasu poli- $\beta$ -hydroksymasłowego (PHB). Źródłem energii dla tych procesów jest ATP uzyskiwany z rozkładu polifosforanów. Jednocześnie przemianom tym towarzyszy wydzielanie do środowiska reszt fosforanowych (3,4).

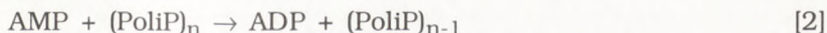
W fazie tlenowej nagromadzone w komórkach substancje zapasowe, jako endogenne, a zatem łatwo dostępne źródło węgla, są szybko wykorzystywane w procesach tlenowego oddychania i rozmnażania. Także substraty zewnętrzne ulegają w tych warunkach intensywnie biodegradacji. Nadmiar uzyskanej energii jest gromadzony w komórce w postaci polifosforanów, co powoduje ubytek fosforanów ze środowiska (11).

Metabolizm polifosforanów sterowany jest kilkoma specyficznymi enzymami. Najistotniejszym z nich dla syntezy polifosforanów jest fosfotransferaza ATP:PoliP (kinaza polifosforanowa), katalizująca reakcję [1]:



Rys. 3. Uproszczony schemat metabolizmu polifosforanów w komórce.

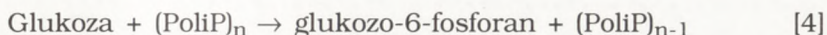
Jednym z enzymów katalizującym przemiany polifosforanów z wykorzystaniem AMP według reakcji [2] jest fosfotransferaza poliP:AMP (1).



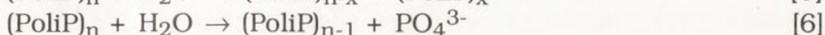
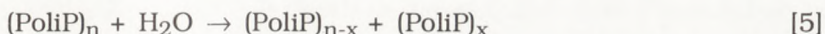
W ostatnim czasie odkryto dwa kolejne enzymy uczestniczące w przemianach polifosforanów. Pierwszy z nich przenosi grupy fosforanowe z polifosforanów na NAD [3] i określany jest jako zależna od polifosforanów NAD<sup>+</sup> — kinaza (12).



Drugim enzymem, który transportuje PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> z rozkładu polifosforanów do glukozy (4), jest fosfotransferaza PoliP:glukozowa (19).



Rozkład polifosforanów może być również prowadzony przez dwa enzymy z grupy hydrolaz: polifosfohydrolazę polifosforanu (EC.3.6.1.10) oraz fosfohydrolazę polifosforanu (EC.3.6.1.11). Pierwszy z nich rozdziela cząsteczkę polimeru wewnątrz łańcucha [5], a drugi oddziela resztę fosforanową z końca łańcucha polifosforanu [6].

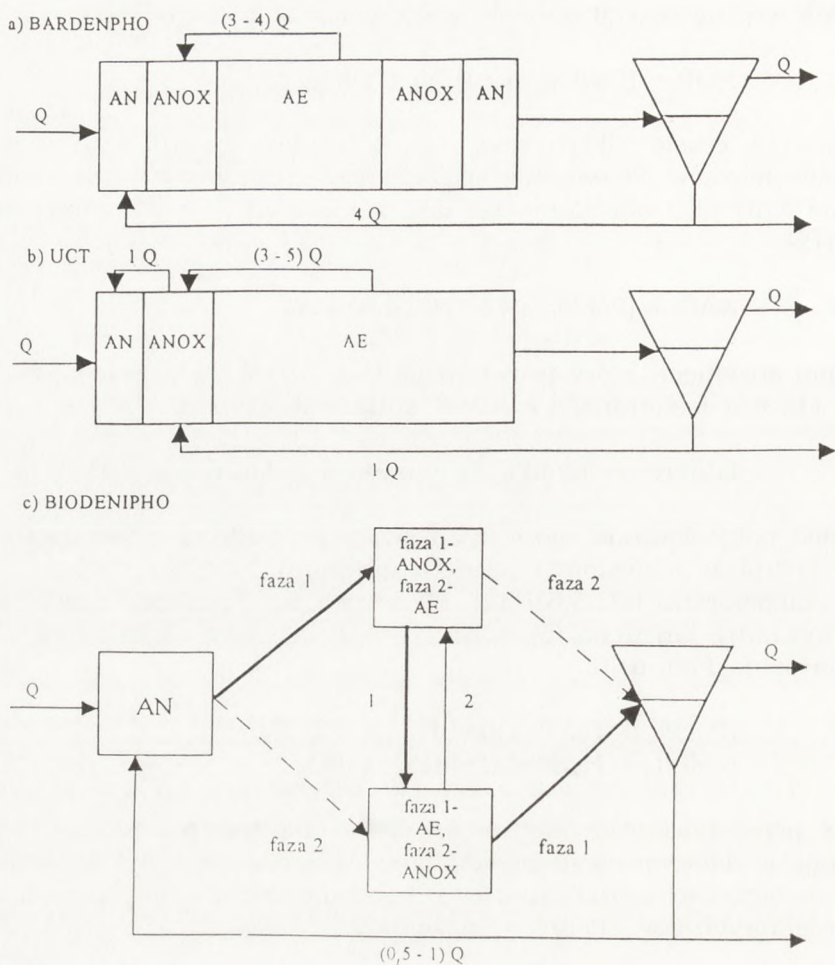


Część przedstawionych enzymów została odkryta stosunkowo niedawno i pozostaje w dalszym ciągu przedmiotem badań. Z tego być może powodu istnieją rozbieżności wśród autorów różnych opracowań dotyczących nazewnictwa niektórych tzw. „PoliP — enzymów”.

### 3. Czynniki wpływające na przemiany fosforu

#### 3.1 Wydzielanie fosforu

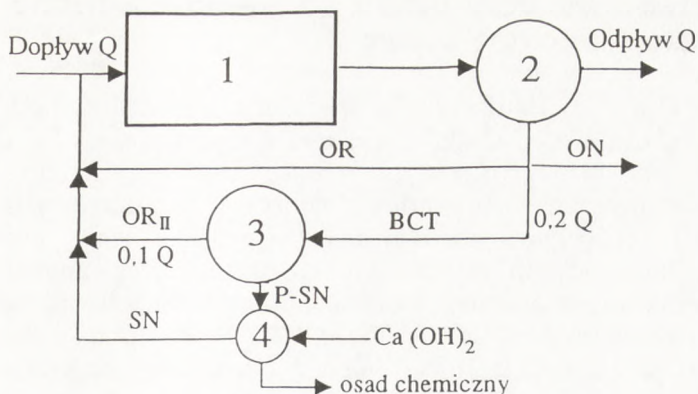
Wydzielanie fosforu z komórek zachodzi w środowisku beztlenowym oraz przy niskim potencjale redoks (21). Podane warunki nie są jednak bezwzględnie konieczne dla tego zjawiska. Obecność dużej ilości prostych kwasów organicznych, np. kwasu octowego może prowadzić do wydzielania fosforu przez mieszane populacje mikroorganizmów typu osadu czynnego, redukujące fosfor, również w warunkach anoksycznych lub aerobowych. Zmiany potencjału redoks wpływają na intensywność procesu wydzielania fosforu — przy niskim potencjale intensywność wydzielania jest większa. Wydzielony wówczas fosfor pochodzi głównie z rozpuszczalnej w kwasach frakcji komórek osadu, a je-



Rys. 4. Procesy biologicznej redukcji fosforu i azotu (2).

dynie w niewielkim stopniu z nukleotydów (21). Obecność związków organicznych łatwo rozkładalnych biologicznie jest istotnym czynnikiem zwiększającym intensywność wydzielania. Istnieje jednak graniczne ich stężenie, powyżej którego intensywność wydzielania nie ulega zmianie. Efekt ten wywołany jest prawdopodobnie ograniczonymi możliwościami tworzenia rezerw polifosforanów w komórce, związanymi również z pobieraniem prostych kwasów organicznych jako źródła węgla (3).

Istotny wpływ na przebieg procesu ma występowanie azotanów w strefie anaerobowej. Problem ten często występuje w aktywnie nityfikujących systemach, w których odbywa się również usuwanie fosforu. Dla prawidłowej



Rys. 5. Schemat procesu Phostrip z bocznym ciągiem technologicznym; 1 — reaktor aerobowy, 2 — osadnik wtórny, 3 — reaktor anaerobowy, 4 — chemiczne strącanie  $\text{PO}_4$ , OR — osad recykulowany, ON — osad nadmierny, BCT — boczny ciąg technologiczny, OR<sub>II</sub> — osad recykulowany bez  $\text{PO}_4$ , P-SN — supernatant bez  $\text{PO}_4$ , SN — supernatant.

redukcji fosforu wymagana jest pełna denitryfikacja. W przeciwnym wypadku, przy wzroście stężenia azotanów, potencjał redoks jest zbyt wysoki dla wywołania wydzielania fosforu u bakterii akumulujących polifosforany. Może być on również zbyt wysoki dla procesów tworzenia się w warunkach anaerobowych prostych kwasów organicznych, które są substratem preferowanym przez bakterie usuwające fosfor (8,21).

### 3.2 Nadmierne pobieranie fosforu

Warunkiem koniecznym, dla zwiększonego usuwania fosforu, jest stworzenie po strefie anaerobowej, środowiska aerobowego. Wówczas, po poprzedniej sytuacji stresowej, bakterie pobierają ilości fosforu wyższe, niż potrzebne do normalnej syntezy biomasy. Zjawisko to określone zostało jako *luxury uptake* — nadmierne pobieranie (6).

Wraz z pobieraniem i wydzielaniem fosforu odbywa się transport kationów metali i anionów. Stężenia  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mn}^{2+}$  i  $\text{SO}_4^{3-}$  wzrastają w warunkach anaerobowych, a zmniejszają w aerobowych. Jony metali występują w cząsteczkach polifosforanów komórek bakteryjnych redukujących fosfor. Rola tych jonów w procesie zwiększonego pobierania fosforu nie została dotychczas jednoznacznie określona (4,7).

#### 4. Współczesne procesy osadu czynnego stosowane do redukcji fosforu w ściekach

Biologiczne procesy usuwania fosforu można zasadniczo podzielić na dwie grupy: z jednym głównym ciągiem technologicznym oraz z bocznym ciągiem technologicznym. W pierwszym przypadku usunięcie fosforu odbywa się z osadem nadmiernym — z osadnika wtórnego, w końcowej fazie głównego ciągu (rys. 4). W drugim systemie, fosfor wydzielany jest z osadu czynnego w reaktorze beztlenowym w bocznym ciągu technologicznym, a następnie strącany chemicznie w postaci fosforanów (rys. 5). Do pierwszej grupy zaliczyć można procesy: Phoredox, Bardenpho, UCT i Biedenpho, a do drugiej Phostrip. Większość rozwiniętych systemów biologicznego oczyszczania ścieków pozwala na równoczesną redukcję związków organicznych oraz azotu i fosforu (2,14).

#### 5. Podsumowanie

Praktyczne zastosowanie metod biologicznego usuwania związków biogenych sprowadza się często do modyfikacji i adaptacji istniejących już oczyszczalni ścieków. Prawidłowe zaprojektowanie procesu oczyszczania z redukcją fosforu w dużej mierze zależy od zrozumienia fizjologii mikroorganizmów akumulujących polifosforany. Stan fizjologiczny osadu czynnego, aktywność metaboliczna mikroorganizmów, warunki technologiczne i techniczne procesów usuwania zanieczyszczeń organicznych oraz związków biogenych wzajemnie się uzupełniają, dlatego też powinny być kompleksowo uwzględniane przy optymalizacji i ocenie efektywności procesów biologicznej redukcji fosforu.

#### Literatura

1. Appeldorn K.J., Kortstee G.J.J., Zehnder A.J.B., (1992), *Wat. Res.*, 26, 453 – 460.
2. Arvin E., (1985), *CRC Critical Rev. in Env. Contr.*, 15, 25 – 64.
3. Buchan L., (1983), *Wat. Sci. Tech.*, 15, 87 – 103.
4. Comeau Y., Oldham W.K., Hall K.J., (1987), *Biological Phosphate Removal from wastewater*, Ed. Ramadori R., 39 – 95, Pergamon Press, Oxford.
5. Deinema M., et al., (1980), *FEMS Microbiol. Lett.*, 9, 275 – 279.
6. Fuchs G.W., Chen M., (1975), *Microbial Ecol.*, 2, 119 – 138.
7. Kulaev I.S. and Vagabov V.M., (1983), *Adv. Microb. Physiol.*, 24, 83 – 171.
8. Kuba T., Loosdrecht M., Smolders G.J., Heijne, (1992) *Netherlands Biotech. Cong.*, Ed. Neth. Biotech. Society, F15.
9. Levin G.V., Shapiro J., (1965), *J. Wat. Poll. Cont. Fed.*, 37, 800 – 821.
10. Marais G.V.R., Loeventhal R.E., Siebritz J.P., (1983), *Wat. Sci. Technol.*, 15, 15 – 41.
11. Miksch K., (1992), *Biotechnologia*, 1(16), 15 – 27.

12. Murata K., Uchida T., (1986), *Agric. Biol. Chem.*, 44, 61 – 68.
13. Nichols H.A., Osborn D.W., (1979), *J. Wat. Poll. Cont. Fed.*, 51, 557 – 569.
14. Rensink J.H., Donker H.J.G.W., (1984), *Gas und Wasserfach-Wasser/Abwasser*, 125, 238 – 245.
15. Schön G., (1987), *Veröff. des Inst. für Stadtbauwesen*, T.H. Braunschweig, 42, 343 – 348.
16. Somiya J., Tsuno H. (1988), *Wat. Res.*, 22, 1, 49 – 58.
17. Steenbergen K., Vertrachter H., (1991), *Int. Symp. Env. Biotech.*, I, Belgium.
18. Streichan M., Golecki J., Schön G., (1990), *FEMS Microb. Ecol.*, 73, 113 – 124.
19. Szymona O., Szymona M., (1979), *Acta Microbiol. Pol.*, 28, 153 – 160.
20. Toerien D.F., Gerber A., Lotter L.H., Cloete T.E., (1990), *Advances in Microbial Ecology*, Ed. Marshal K.C., Plenum Press, New York, 11, 174 – 230.
21. Tracy K.D., Flamingo A., (1987), *Biological Phosphate Removal from Wastewater*, Ed. Ramadorii R., Pergamon Press, Oxford, 15 – 26.

## Biological phosphate removal in waste water treatment

### Summary

In the sewage treatment technology biological methods are commonly used. The estimation of the process treatment effectiveness contains the rate of the reduction of organic compounds and nutrients — nitrogen and phosphorus. The phosphates removal is performed as a result of overtaking and accumulating polyphosphates in the cells of specific groups of bacteria (*Acinetobacter* and others). The basic condition for the correct course of this processes is the creation of sequences of anaerobic and aerobic conditions. Other factors which have influence on the polyphosphates metabolism include the presence of short chain organic acids, nitrate concentration and redox potential. When using biological methods for the phosphorus removal during the sewage treatment it is very helpful to know the properties of bacteria populations which are responsible for phosphorus reduction.

### Key words:

activated sludge, biological phosphate removal, phosphate, poliphosphate, waste water treatment.

### Adres dla korespondencji:

Bernadetta Czarska, Wydział Inżynierii Środowiska, Politechnika Śląska,  
ul. Konarskiego 18, 44-100 Gliwice.