Eugeniusz Klaczyński
Envirotech sp. z o.o., Poznań

Wpływ lotnych kwasów tłuszczowych na intensyfikację usuwania fosforu w reaktorach biologicznych – badania w skali laboratoryjnej

Dotychczasowe badania pokazują, że proces zintensyfikowanego uwalniania fosforu w strefie beztlenowej reaktora biologicznego połączony z magazynowaniem energii w postaci polihydroksyalkanów – (PHA) przez organizmy akumulujące polifosforany (PAOs – ang. Poly-phosphate Accumulating Organisms) jest uzależnione od ilości dostępnych lotnych kwasów tłuszczowych (LKT). Wysokie stężenie LKT prowadzi w konsekwencji do szybszego wzrostu PAOs i wzmożonego usuwania fosforu. Niewykorzystanie LKT w strefie beztlenowej i wysokie jego stężenie w strefach niedotlenionej i tlenowej obniża efektywność pobierania fosforu ze ścieków do wartości nawet bliskich zeru.

1. Wstęp

Badania Pattarkine potwierdzają, że usuwanie fosforu w strefie tlenowej zachodzi dopiero po wykorzystaniu całego LKT [1]. Zalecany stosunek LKT/P w dopływie do strefy beztlenowej wynosi według Barnarda w granicach 5-6 [1] lub nawet 6-10 [6]. Według badań Comeau i innych 8 mg łatworozkładalnego ChZT jest zużywane na usunięcie 1 mg fosforu ze ścieków (autorzy przyjęli, że 1 mg łatworozkładalnego ChZT odpowiada w przybliżeniu 1 mg kwasu octowego) [5]. W literaturze często spotyka się zależność że od 6 do 9 mg LKT w przeliczeniu na kwas octowy jest zużywane do pobierania 1 mg fosforu. Natomiast badania Gharagaha i Randalla pokazują, że dodanie 1 mg kwasu octowego powoduje usuwanie 0,37 mgP, natomiast 1 mg kwasu propionowego tylko 0,1 mgP [3].

2. Cel i zakres badań

Usuwanie fosforu ze ścieków jest procesem składającym się z serii kolejnych reakcji biochemicznych, a jego szybkość zależy od wielu czynników o charakterze fizyczno-chemicznym i technologicznym. Intensyfikacja procesu zachodzi poprzez uaktywnienie mikroorganizmów w zmieniających się kolejno warunkach: beztlenowych, anoksycznych i tlenowych. Efektywność procesu zależy od wskaźników fizyczno-chemicznych ścieków, np. ChZT, BZT_5, LKT, temperatury oraz od parametrów technologicznych, jak wiek osadu, obciążenie osadu związkami organicznymi i warunki tlenowe w reaktorze, dawki stosowanego koagulantu PIX.

Przeprowadzone badania w latach 2000–2003 na oczyszczalni ścieków w Śremie w warunkach bieżącej eksploatacji pokazały wzajemne nakładanie się oddziaływania wyżej wymienionych wskaźników na proces biologicznego usuwania fosforu [4].

Celem wyeliminowania tych zakłóceń wykonano testy na ściekach modelowanych, określając wpływ krótkołańcuchowych lotnych kwasów tłuszczowych w ściekach doprowadzonych do reaktorów biologicznych na biologiczne usuwanie fosforu ze ścieków.

Wykonano dwie serie testów laboratoryjnych, symulując warunki pracy trójfazowych reaktorów biologicznych łącznie z procesami sedymentacyjnymi zachodzącymi w osadnikach wtórnych. Analizowano wpływ wielkości wskaźnika LKT/P w ściekach modelowanych, doprowadzonych do reaktorów na proces usuwania fosforu.

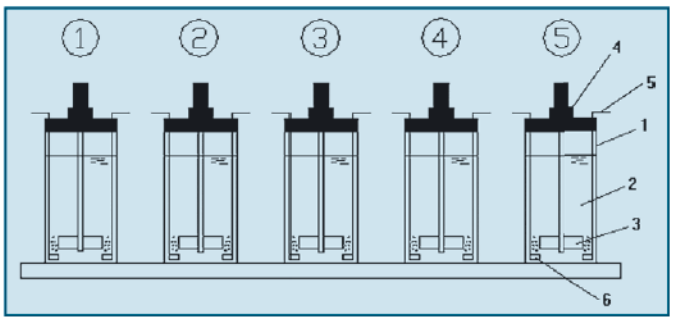
Badania obejmowały:
- analizy fizyczno-chemiczne ścieków poddawanych oczyszczaniu i ścieków oczyszczonych w reaktorach laboratoryjnych: ChZT, BZT_5, LKT, stężenie fosforu ogólnego (Pog), ortofosforanów ($P\text{-}PO_4$), zawiesiny ogólnej oraz temperatury i odczynu pH,
- wskaźniki charakteryzujące mieszaninę ścieków i osadu czynnego w reaktorach laboratoryjnych: stężenie suchej masy osadu (X) oraz obciążenie osadu ładunkiem ChZT (O_{ChZT}),
- wpływ wartości wskaźnika LKT/P w ściekach na proces defosfatacji przez:
  - pomiar stężenia ortofosforanów w ściekach podczas biologicznego oczyszczania i sedymentacji,
  - określenie szybkości uwalniania i poboru ortofosforanów podczas biologicznego oczyszczania,
  - określenie efektywności usuwania zanieczyszczeń ze ścieków oczyszczanych w reaktorach biologicznych w zakresie: ChZT, BZT_5, LKT, Pog i $P\text{-}PO_4$.

3 Opis stanowiska badawczego

Symulację warunków pracy trzystrefowych reaktorów biologicznych prowadzono w zmodyfikowanym Flocculatorze 2000 firmy Kemira, składającym się z pięciu pojemników o pojemności 2,5 l każdy, wyposażanych w mieszadła łapowe o wymiarach 5,6x3,1 cm z niezależnym napędem elektrycznym (rys. 1).

Do każdego pojemnika doprowadzona była instalacja sprężonego powietrza zakończona dwoma kamieniami rozdrabniającymi powietrze. Całość instalacji sprężonego powietrza została połączona za pomocą trójników i przepustnic z dwiema membranowymi pompkami akwarystycznymi. Zawartość tlenu była regulowana na podstawie pomiarów kontrolnych prowadzonych sondą tlenową. Po zakończonych testach w reaktorach laboratoryjnych prowadzono sedymentację w lejach Imhoffa o pojemności 1 l. Po koagulacji prowadzono sedymentację w lejach Imhoffa.

Plik udostępniony Eugeniuszowi Klaczyńskiemu przez Wydawnictwo Seidel-Przywecki Sp. z o.o.



Rys. 1. Schemat stanowiska badawczego. 1 – reaktor, 2 – mieszanina ścieków i osadu czynnego, 3 – mieszadło łapowe, 4 – statyw mieszadła z silniczkiem elektrycznym, 5 – wężyk doprowadzający powietrze, 6 – kamień rozdrabniający powietrze

4. Metodyka badań

Badania wykonano na ściekach i osadzie czynnym z oczyszczalni ścieków w Śremie. Ścieki do badań pobierano po mechanicznym oczyszczeniu (po przejściu kraty schodkowej, piaskownika i osadników wstępnych), natomiast osad czynny z rurociągu recyrkulacji zewnętrznej na wylocie do komory defosfatacji reaktora biologicznego.

Testy wykonano w dwóch seriach (seria 1. i seria 2.) na ściekach modelowanych przez dodanie do każdego reaktora innej dawki octanu sodu w celu uzyskania różnych wartości LKT/P w zakresie 1,88÷30,00 mgO_2/mgP. W reaktorach wytwarzano warunki anoksyczne przez dodanie do ścieków azotanów. Proporcje mieszaniny ścieków i osadu ustalano na podstawie pomiaru suchej masy osadu, aby osiągnąć stężenie ok. 4,0 $mg_{s.m.}/l$.

Warunki pracy trójfazowych reaktorów biologicznych modelowano w reaktorach laboratoryjnych wytwarzając kolejno:
- warunki beztlenowe (DP) – mieszanie zawartości reaktora przez dwie godziny,
- warunki anoksyczne (DN) – dodanie do każdego reaktora takiej samej dawki KNO_3 (12,00 mg $N\text{-}NO_3/l$) i mieszanie zawartości przez dwie godziny w serii 1. i przez trzy godziny w serii 2,
- warunki tlenowe (N) – włączenie napowietrzania i utrzymywanie stężenia tlenu rozpuszczonego powyżej 2,0 mgO_2/l w czasie czterech godzin w serii 1. oraz pięciu godzin w serii 2.

Następnie wykonano testy sedymentacyjne w lejach Imhoffa, które trwały przez sześć godzin w serii 1. i przez cztery godziny w serii 2. Całkowity czas procesu biologicznego oczyszczania ścieków i sedymentacji w warunkach laboratoryjnych w obu seriach trwał czternaście godzin.

Do modelowania ścieków i warunków anoksycznych w reaktorach wykorzystano następujące odczynniki:
- roztwór octanu sodowego jako źródło LKT (0,1694 molowy – 1 ml roztworu CH_3COONa odpowiada 10 mg CH_3COOH),
- roztwór azotanu potasu jako źródło azotanów (0,714 molowy – 1 ml roztworu KNO_3 zawiera 10 mg $N\text{-}NO_3$).

Wskaźnik BZT_5 oznaczano za pomocą analizatora OXI TOP® I26 firmy WTW wg DIN EN 1899-2 (H55). Ortofosforany oznaczano metodą molibdenową z chlorkiem cynowym jako reduktorem zgodnie z PN-89/C-04537/02, stężenie LKT określano przez destylację bezpośrednią ścieków [2]. Zawartość tlenu w strefie nitryfikacji reaktora i temperaturę mierzono za pomocą technicznej sondy tlenowej Zullig. Pozostałe oznaczenia wykonywano zgodnie z Polskimi Normami. Natężenie przepływu ścieków określano na podstawie odczytów z przepływomierzy, zarchiwizowanych w postaci dobowych raportów pracy oczyszczalni ścieków.

Wskaźniki charakteryzujące ścieki i efektywność procesu obliczono według następujących zależności:
- stężenie LKT w ściekach modelowanych przed zmieszaniem z osadem czynnym:

$$LKT = LKT(2) + D_{LKT} \quad [mgCH_3COOH/l] \qquad (1)$$

gdzie:
LKT(2) – stężenie LKT w ściekach mechanicznie oczyszczonych pobranych z układu technicznego w punkcie pomiarowym 2 $[mgCH_3COOH/l]$,
D_{LKT} – dawka octanu sodu jako źródła LKT dodana do reaktora laboratoryjnego $[mgCH_3COOH/l]$,
- wskaźnik LKT/P w ściekach modelowanych przed zmieszaniem z osadem czynnym:

$$\frac{LKT}{P} = \frac{LKT}{Pog_{(2)}} \quad [mgCH_3COOH/mgP] \qquad (2)$$

gdzie:
LKT – stężenie LKT w ściekach modelowanych przed zmieszaniem z osadem czynnym $[mgCH_3COOH/l]$,
$Pog_{(2)}$ – stężenie fosforu ogólnego w ściekach mechanicznie oczyszczonych pobranych z układu technicznego w punkcie pomiarowym 2 [mgP/l],
- wskaźnik $N\text{-}NO_3/P$ w mieszaninie ścieków modelowanych i osadu czynnego:

$$\frac{N\text{-}NO_3}{P} = \frac{N\text{-}NO_3}{Pog_{(2)}} \quad [mgN\text{-}NO_3/mgP] \qquad (3)$$

gdzie:
$N\text{-}NO_3$ – dawka azotanu potasu jako źródła azotanów dodana do reaktora laboratoryjnego w celu wytworzenia warunków anoksycznych $[mgN\text{-}NO_3]$,
$Pog_{(2)}$ – stężenie fosforu ogólnego w ściekach mechanicznie oczyszczonych pobranych z układu technicznego w punkcie pomiarowym 2 [mgP/l],
- efektywność usuwania zanieczyszczeń ze ścieków biologicznie oczyszczonych w reaktorach laboratoryjnych:

$$E = \frac{c_p - c_k}{c_p} \cdot 100 \quad [\%] \qquad (4)$$

gdzie:
c_p – stężenie wskaźnika zanieczyszczenia w ściekach modelowych, doprowadzonych do reaktorów [mg/l],
c_k – stężenie wskaźnika zanieczyszczenia w ściekach oczyszczonych w reaktorze biologicznym (ścieki sączone) [mg/l],

- szybkość uwalniania (-) i poboru (+) ortofosforanów została obliczona na podstawie wzoru:

$$v = \frac{(P\text{-}PO_4)_p - (P\text{-}PO_4)_k}{X \cdot t} \quad \left[\frac{mgP\text{-}PO_4}{g_{s.m.} \cdot h}\right] \qquad (5)$$

gdzie:
$(P\text{-}PO_4)_p$, $(P\text{-}PO_4)_k$ – stężenie ortofosforanów odpowiednio na początku i na końcu poszczególnych przedziałów czasowych $[mgP\text{-}PO_4/l]$,
X – stężenie suchej masy osadu $[g_{sm}/l]$,
T – czas pomiędzy pomiarami stężenia ortofosforanów [h].

5. Wyniki badań

Charakterystykę ścieków modelowanych poddawanych biologicznemu oczyszczeniu oraz mieszaniny ścieków i osadu

Plik udostępniony Eugeniuszowi Klaczyńskiemu przez Wydawnictwo Seidel-Przywecki Sp. z o.o.

czynnego doprowadzonych do reaktorów laboratoryjnych podano w tabl. 1. Ścieki w poszczególnych reaktorach zawierały różne dawki lotnych kwasów tłuszczowych, których stężenie w ściekach obliczone według wzoru 1. było w granicach 48,0÷447,0 mgCH_3COOH/l w serii 1. oraz w granicach 60,0÷958,5 mgCH_3COOH/l w serii 2.

Dodanie LKT do reaktorów spowodowało proporcjonalny wzrost ChZT, przedstawiony na rysunku 2. Ponieważ stężenie fosforu ogólnego i ortofosforanów we wszystkich reaktorach nie uległo zmianie, ze wzrostem stężenia lotnych kwasów tłuszczowych wzrastały odpowiednio wartości wskaźnika LKT/P, przyjmując wartości w zakresie 1,88÷30,00 mgCH_3COOH/mgP oraz zwiększały się wartości wskaźnika CHZT/P w zakresie 15,36÷53,91 mgO_2/mgP (rys. 3.). Wartości CHZT/P w serii 1. były ponad dwukrotnie wyższe niż w serii 2, z powodu mniejszego stężenia fosforu ogólnego w ściekach.

W trakcie badań w reaktorach laboratoryjnych oznaczano stężenie ortofosforanów i LKT w ściekach poddawanych biologicznemu oczyszczaniu i sedymentacji (tabl. 2. i 3.). Na podstawie uzyskanych wyników sporządzono profile zmian stężenia ortofosforanów (rys. 4. i 6.). Na początku prowadzenia procesu w warunkach beztlenowych (DP) obserwowano uwalnianie ortofosforanów, które zostało chwilowo zakłócone w serii 2. W strefie anoksycznej (DN) proces był mało stabilny. Przy niskich wartościach wskaźnika LKT/P ≤ 3,22 mgCH_3COOH/mgP, obserwowano zahamowanie uwalniania i początek poboru ortofosforanów ze ścieków, natomiast przy wyższych wartościach tego wskaźnika stężenie ortofosforanów wahało się, ulegając zarówno obniżaniu jak i zwiększaniu. W warunkach tlenowych (N) zachodziło pobieranie ortofosforanów ze ścieków, stabilizujące się dla wyższych wartości LKT/P dopiero po pierwszej godzinie prowadzenia procesu. Stężenie ortofosforanów w ściekach biologicznie oczyszczonych było wyższe dla większych wartości początkowych LKT/P.

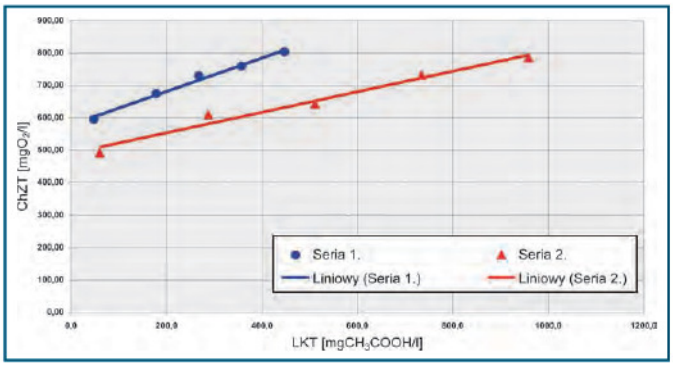
Na podstawie pomiarów stężenia ortofosforanów obliczono według wzoru 5 szybkości uwalniania (-) i poboru (+) ortofosforanów w przedziałach kontrolnych prowadzonego procesu (tab. 4). W strefie beztlenowej szybkość uwalniania ortofosforanów w serii 1. zależała od wartości wskaźnika LKT/P, początkowo wzrastała ze wzrostem wskaźnika, a następnie malała. W serii 2. obserwowano podobną zależność, jednak po półgodzinie proces załamał się. Szybkość uwalniania (-) ortofosforanów w warunkach beztlenowych zwiększała się ze wzrostem wartości wskaźnika, osiągając najwyższą wartość v = -4,639 mgP-PO_4/$mg_{s.m.}$·h dla LKT/P = 18 mgCH_3COOH/mgP. Wyższe wartości wskaźnika obniżały szybkość procesu.

W strefie anoksycznej proces był niestabilny, szczególnie w serii 2. i dopiero w strefie tlenowej stabilizował się. Zależność szybkości uwalniania (-) i poboru (+) ortofosforanów od wskaźnika LKT/P przedstawiono dla serii 1. na rys. 5. oraz dla serii 2. na rys. 7. W serii 2. pominięto strefę anoksyczną ze względu na duże zakłócenia procesu.

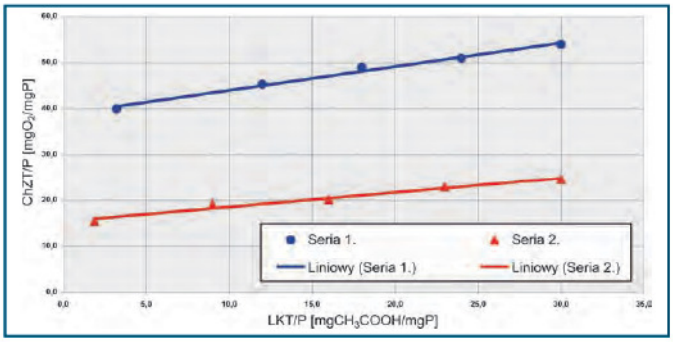
W warunkach anoksycznych przy niskich wartościach LKT/P ≤ 3,22 mgCH_3COOH/mgP wystąpił bardzo wcześnie powolny pobór (+) ortofosforanów, natomiast przy wyższych wartościach tego wskaźnika występowało zarówno uwalnianie (-), jak i pobór (+) ortofosforanów.

Większe zakłócenia w serii 2. mogły być spowodowane ponad dwukrotnie większym stężeniem ortofosforanów w ściekach dostarczonych do reaktorów w porównaniu z serią 1.

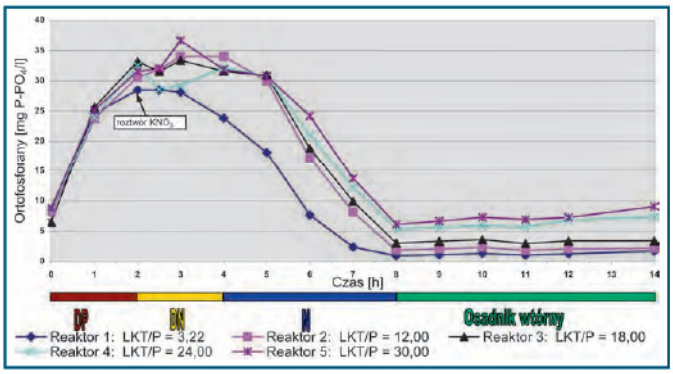
W strefie tlenowej zachodził pobór (+) ortofosforanów, przy czym szybkość procesu zależała wyraźnie od wartości wskaźnika LKT/P. Przy niskich wartościach wskaźnika wystąpiła w obu seriach duża szybkość poboru ortofosforanów już na początku warunków tlenowych, natomiast przy wyższych wartościach tego wskaźnika proces osiągał dużą szybkość dopiero po godzinie w serii 1. i po dwóch godzinach w serii 2. Ilustrują to rysunki 4–7. Szybkość procesu osiągnęła najwyższe wartość v = 3,35 mgP-PO_4/mg_{sm}·h dla LKT/P = 1,88 mgCH_3COOH/mgP w pierwszej godzinie warunków tlenowych oraz odpowiednio 2,87 i 3,054 mgP-PO_4/mg_{sm}·h dla LKT/P = 9,0 i 12,0 mgCH_3COOH/mgP w drugiej godzinie warunków tlenowych.



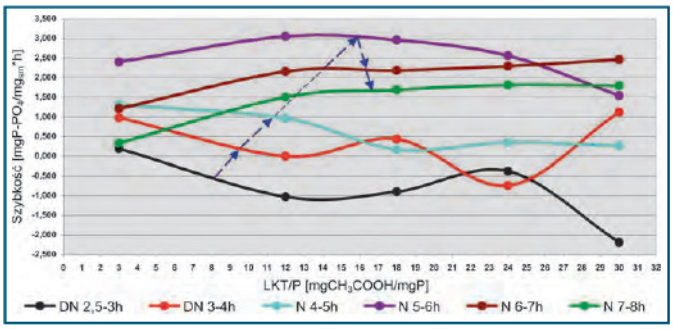
Rys. 2. Wpływ zmiany stężenia LKT na zmiany stężenia CHZT w ściekach



Rys. 3. Wpływ zmiany wartości wskaźnika LKT/P na zmiany wskaźnika CHZT/P w ściekach



Rys. 4. Wpływ LKT/P na zmiany stężenia ortofosforanów w ściekach (seria 1.)



Rys. 5. Wpływ LKT/P na szybkość uwalniania (-) i poboru (+) ortofosforanów w przedziałach kontrolnych procesu oczyszczania ścieków (seria 1.)

Plik udostępniony Eugeniuszowi Klaczyńskiemu przez Wydawnictwo Seidel-Przywecki Sp. z o.o.

Tab. 1. Charakterystyka ścieków, mieszaniny ścieków i osadu czynnego oraz dawki reagentów

Parametr	Jednostka	Seria 1.					Seria 2.				
		Nr reaktora					Nr reaktora				
		1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
Charakterystyka ścieków modelowanych – dopływ do reaktorów											
ChZT	[mgO_2/l]	595,20	674,56	729,12	758,88	803,32	490,88	608,88	641,92	731,60	784,90
BZT_5	[mgO_2/l]	455,00	465,00	606,60	693,30	593,30	378,00	450,00	475,00	540,00	580,00
LKT	[$mgCH_3COOH$/l]	48,0	178,8	268,2	357,6	447,0	60,0	287,6	511,2	734,9	958,5
Pog	[mgP/l]	14,90	14,90	14,90	14,90	14,90	31,95	31,95	31,95	31,95	31,95
$P\text{-}PO_4$	[$mgP\text{-}PO_4$/l]	12,60	12,6	12,60	12,60	12,60	30,02	30,02	30,02	30,02	30,02
Zawiesina ogólna	[mg/l]	177,0	177,0	177,0	177,0	177,0	181,0	181,0	181,0	181,0	181,0
Temperatura	[°C]	14,5	14,5	14,5	14,5	14,5	16,0	16,0	16,0	16,0	16,0
Odczyn pH	[-]	7,93	7,93	7,93	7,93	7,93	6,87	6,87	6,87	6,87	6,87
$ChZT/BZT_5$	[mgO_2/mgO_2]	1,31	1,45	1,20	1,09	1,35	1,30	1,35	1,35	1,35	1,35
ChZT/P	[mgO_2/mgP]	39,95	45,27	48,93	50,93	53,91	15,36	19,06	20,09	22,90	24,57
LKT/P	[$mgCH_3COOH$/mgP]	3,22	12,00	18,00	24,00	30,00	1,88	9,00	16,00	23,00	30,00
Charakterystyka mieszaniny ścieków i osadu czynnego w komorze beztlenowej reaktorów											
$N\text{-}NO_2$	[mg $N\text{-}NO_2$/l]	2,09	1,60	1,56	1,16	1,27	7,20	5,70	5,70	5,30	5,90
$N\text{-}NO_3$	[mg $N\text{-}NO_3$/l]	1,00	1,10	1,35	1,65	1,65	1,90	2,70	3,50	3,80	3,90
Wartości wskaźnika $N\text{-}NO_3/P$ w warunkach anoksycznych											
$N\text{-}NO_3/P$	[$mgN\text{-}NO_3$/mgP]	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81	0,38	0,38	0,38	0,38	0,38
Charakterystyka osadu czynnego w reaktorach											
X	[$mg_{s.m}$/l]	4,355	4,195	4,085	3,815	4,250	3,895	4,015	4,150	4,215	4,355
O_{ChZT}	[$mgO_2/mg_{s.m.}$]	0,068	0,080	0,089	0,099	0,095	0,063	0,076	0,077	0,087	0,090
Dawki reagentów w badaniach laboratoryjnych											
CH_3COONa	[$mgCH_3COOH$/l]	0,00	130,80	220,20	309,60	399,00	0,00	227,55	451,20	674,85	898,50
KNO_3	[$mgN\text{-}NO_3$/l]	12,00	12,00	12,00	12,00	12,00	12,00	12,00	12,00	12,00	12,00

Tab. 2. Stężenie ortofosforanów w testach laboratoryjnych [$mgP\text{-}PO_4$/l]

Seria 1.

Strefa reaktora	DP			DN			N				osadnik wtórny				
Czas [h]	0	1	2	2,5	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	14
Nr reaktora 1	8,09	24,60	28,46	28,50	28,08	23,81	18,10	7,63	2,35	0,89	1,06	1,28	0,98	1,23	1,66
Nr reaktora 2	8,20	23,72	30,57	31,84	34,00	34,01	29,98	17,17	8,12	1,81	2,02	2,27	1,79	2,03	2,13
Nr reaktora 3	6,47	25,64	33,18	31,51	33,35	31,57	30,88	18,80	9,88	2,97	3,30	3,58	2,93	3,36	3,36
Nr reaktora 4	8,70	23,97	32,47	28,55	29,27	32,10	30,77	21,01	12,26	5,33	5,62	5,86	5,64	6,81	7,33
Nr reaktora 5	8,84	25,13	31,57	31,95	36,61	31,85	30,73	24,17	13,72	6,08	6,62	7,27	6,88	7,24	9,06

Seria 2.

Strefa reaktora	DP				DN				N					osadnik wtórny			
Czas [h]	0	0,5	1	2	2,5	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Nr reaktora 1	25,93	28,82	18,74	31,59	30,71	29,29	24,94	24,15	11,10	3,92	1,68	0,95	0,20	0,61	0,93	0,87	1,09
Nr reaktora 2	25,33	28,03	22,52	30,62	29,81	35,88	32,25	34,19	28,24	16,72	7,35	2,31	1,00	1,43	1,49	1,60	2,20
Nr reaktora 3	25,00	27,84	21,87	27,92	28,95	30,67	31,95	29,87	32,28	29,74	19,30	8,57	4,09	4,88	4,62	4,86	6,28
Nr reaktora 4	22,92	31,10	27,69	25,48	28,63	28,29	29,81	30,73	30,47	30,80	23,57	12,90	6,53	7,05	6,77	7,24	7,80
Nr reaktora 5	22,64	30,13	24,06	37,40	29,55	33,43	26,78	29,85	29,57	27,15	24,64	13,05	7,26	7,69	7,63	7,80	8,21

Tab. 3. Stężenie LKT w testach laboratoryjnych [$mgCH_3COOH$/l]

Seria 1.

Strefa reaktora	DP			DN			N				osadnik wtórny
Czas [h]	0	1	2	2,5	3	4	5	6	7	8	14
Nr reaktora 1	41,0	24,0	20,0	17,0	20,0	18,0	18,0	18,0	12,0	12,0	12,0
Nr reaktora 2	106,0	54,0	46,0	43,0	37,0	30,0	23,0	18,0	14,0	12,0	12,0
Nr reaktora 3	145,0	68,0	49,0	43,0	39,0	36,0	18,0	22,0	12,0	18,0	12,0
Nr reaktora 4	164,0	109,0	86,0	57,0	49,0	42,0	24,0	21,0	18,0	12,0	12,0
Nr reaktora 5	185,0	131,0	89,0	54,0	48,0	40,0	30,0	19,0	18,0	12,0	12,0

Seria 2.

Strefa reaktora	DP				DN				N			osadnik wtórny
Czas [h]	0	0,5	1	2	2,5	3	4	5	6	7	10	14
Nr reaktora 1	54,0	36,0	30,0	24,0	24,0	18,0	18,0	18,0	12,0	12,0	12,0	12,0
Nr reaktora 2	180,0	120,0	96,0	84,0	72,0	60,0	48,0	42,0	24,0	18,0	12,0	12,0
Nr reaktora 3	360,0	180,0	132,0	120,0	108,0	96,0	66,0	42,0	30,0	24,0	12,0	12,0
Nr reaktora 4	420,0	300,0	192,0	132,0	114,0	90,0	66,0	48,0	42,0	30,0	12,0	12,0
Nr reaktora 5	480,0	360,0	258,0	168,0	156,0	138,0	90,0	66,0	60,0	42,0	12,0	12,0

Plik udostępniony Eugeniuszowi Klaczyńskiemu przez Wydawnictwo Seidel-Przywecki Sp. z o.o.

Tab. 4. Szybkość uwalniania (-) i poboru (+) ortofosforanów w procesie biologicznego oczyszczania ścieków [mgP-PO_4/mg_{sm}·h]

Seria 1.															
Strefa reaktora		DP		DN			N				osadnik wtórny				
Czas [h]		1	2	2,5	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	14
Nr reaktora	1	−3,791	−0,886	−0,018	0,096	0,980	1,311	2,404	1,212	0,335	−0,039	−0,051	0,069	−0,057	−0,049
	2	−3,700	−1,633	−0,605	−0,515	−0,002	0,961	3,054	2,157	1,504	−0,050	−0,060	0,114	−0,057	−0,012
	3	−4,693	−1,846	0,818	−0,450	0,436	0,169	2,957	2,184	1,692	−0,081	−0,069	0,159	−0,105	0,000
	4	−4,003	−2,228	2,055	−0,189	−0,742	0,349	2,558	2,294	1,817	−0,076	−0,063	0,058	−0,307	−0,068
	5	−3,833	−1,515	−0,179	−1,096	1,120	0,264	1,544	2,459	1,798	−0,127	−0,153	0,092	−0,085	−0,214

Seria 2.																	
Strefa reaktora		DP			DN				N					osadnik wtórny			
Czas [h]		0,5	1	2	2,5	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Nr reaktora	1	−1,484	2,588	−3,299	0,452	0,365	1,117	0,203	3,350	1,843	0,575	0,187	0,193	−0,105	−0,082	0,015	−0,056
	2	−1,345	1,372	−2,017	0,403	−1,512	0,904	−0,483	1,482	2,869	2,334	1,255	0,326	−0,107	−0,015	−0,027	−0,149
	3	−1,369	1,439	−1,458	−0,496	−0,414	−0,308	0,501	−0,581	0,612	2,516	2,586	1,080	−0,190	0,063	−0,058	−0,342
	4	−3,881	0,809	0,524	−1,495	0,081	−0,361	−0,218	0,062	−0,078	1,715	2,531	1,511	−0,123	0,066	−0,112	−0,133
	5	−3,440	1,394	−3,063	3,605	−0,891	1,527	−0,705	0,064	0,556	0,576	2,661	1,330	−0,099	0,014	−0,039	−0,094

Tab. 5. Wpływ LKT/P w ściekach na średnią szybkość procesu w okresie intensywnego poboru ortofosforanów

Seria 1. + 2.									
Nr serii	Nr reaktora	LKT/P	Okres intensywnego poboru P-PO_4 między godzinami		Czas trwania intensywnego poboru P-PO_4	Stężenie P-PO_4		Stężenie s.m. osadu	Szybkość procesu
			początek	koniec	t	początkowe	końcowe	X	v
		[mgCH_3COOH/mgP]	[h]	[h]	[h]	[mgP/l]	[mgP/l]	[mg/l]	[mgP-PO_4/mg_{sm}·h]
1	1	3,00	3	7	4	28,08	2,35	4,355	1,477
	2	12,00	4	8	4	34,01	1,81	4,195	1,919
	3	18,00	5	8	3	30,88	2,97	4,085	2,277
	4	24,00	5	8	3	30,77	5,33	3,815	2,223
	5	30,00	5	8	3	30,73	6,08	4,250	1,933
2	1	1,88	2	8	6	31,59	1,68	3,895	1,280
	2	9,00	5	9	4	34,19	2,31	4,015	1,985
	3	16,00	7	10	3	29,74	4,09	4,150	2,060
	4	23,00	7	10	3	30,80	6,53	4,215	1,919
	5	30,00	8	10	2	24,64	7,26	4,355	1,995

Tab. 6. Charakterystyka ścieków po testach biologicznych i efektywność usuwania zanieczyszczeń

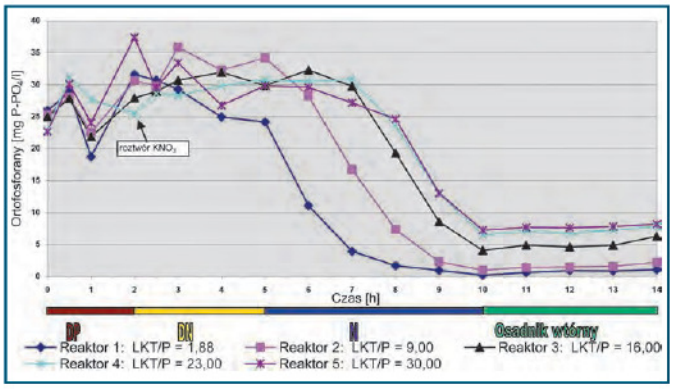
Parametr		Wskaźniki zanieczyszczeń w ściekach biologicznie oczyszczonych					Efektywność usuwania zanieczyszczeń w reaktorach biologicznych				
		ChZT	BZT_5	LKT	Pog	P-PO_4	ChZT	BZT_5	LKT	Pog	P-PO_4
Jednostka		[mgO_2/l]	[mgO_2/l]	[mgCH_3COOH/l]	[mgP/l]	[mgP-PO_4/l]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
Seria 1											
Nr reaktora	1	69,44	20,00	12,00	1,49	0,89	88,33	95,60	75,00	90,00	92,94
	2	59,52	40,00	12,00	3,19	1,81	91,18	91,40	93,29	78,59	85,63
	3	74,40	30,00	18,00	3,79	2,97	89,80	95,05	93,29	74,56	76,43
	4	54,56	30,00	12,00	5,74	5,33	92,81	95,67	96,64	61,48	57,70
	5	34,72	20,00	12,00	6,25	6,08	95,68	96,63	97,32	58,05	51,75
Seria 2											
Nr reaktora	1	61,36	45,00	12,00	1,13	0,20	87,50	88,10	80,00	96,46	99,33
	2	66,08	50,00	12,00	1,32	1,00	89,15	88,89	95,83	95,87	96,67
	3	75,52	55,00	18,00	4,47	4,09	88,24	88,42	96,48	86,01	86,38
	4	66,08	50,00	12,00	7,61	6,53	90,97	90,74	98,37	76,18	78,25
	5	51,92	40,00	12,00	7,86	7,26	93,39	93,10	98,75	75,40	75,82

Na podstawie profili stężenia ortofosforanów w trakcie badań prowadzonych w poszczególnych reaktorach wyznaczono okresy intensywnego poboru (+) ortofosforanów i obliczono dla nich średnią szybkość procesu (tabl. 5). Wpływ LKT/P w ściekach na czas rozpoczęcia intensywnego poboru (+) ortofosforanów przedstawiono na rys. 8., gdzie poziom zerowy dla skali czasu przyjęto na początku warunków tlenowych. Analiza wykazała, że wzrost wskaźnika LKT/P powodował opóźnienie intensywnego poboru (+) ortofosforanów, który dla LKT/P ≤ 9 mgCH_3COOH/mgP rozpoczynał się w strefie anoksycznej, następnie przesuwał się do strefy tlenowej i po osiągnięciu wartości LKT/P = 16 mgCH_3COOH/mgP rozpoczynał się po około dwóch godzinach warunków tlenowych.

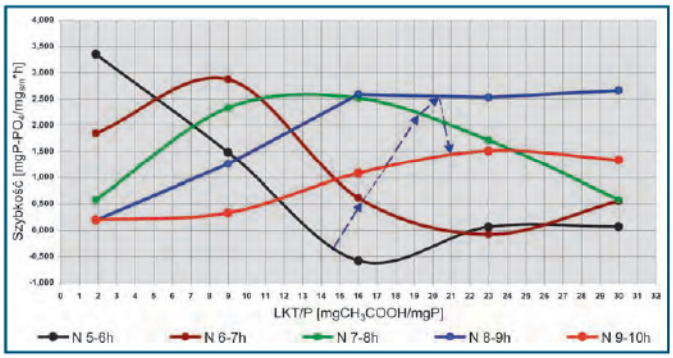
Zależność średniej szybkości procesu w okresie intensywnego poboru (+) ortofosforanów od wartości LKT/P pokazano na rys. 9. Stwierdzono, że szybkość ta rosła ze wzrostem LKT/P do wartości 9,00 mgCH_3COOH/mgP i przy dalszym wzroście tego wskaźnika stabilizowała się na poziomie około 2,0 mgP-PO_4/mg_{sm} · h.

Na podstawie charakterystyki ścieków biologicznie oczyszczonych w reaktorach laboratoryjnych obliczono efektywności usuwania zanieczyszczeń (tabl. 6.). Stwierdzono wzrost efektywności usuwania ChZT, BZT_5 wraz ze wzrostem wartości wskaźnika LKT/P. Efektywności usuwania ze ścieków fosforu ogólnego (Pog) i ortofosforanów (P-PO_4) obniżała się dla wyższych wartości wskaźnika LKT/P. Świadczy to o konieczności zwiększenia w tym przypadku czasu

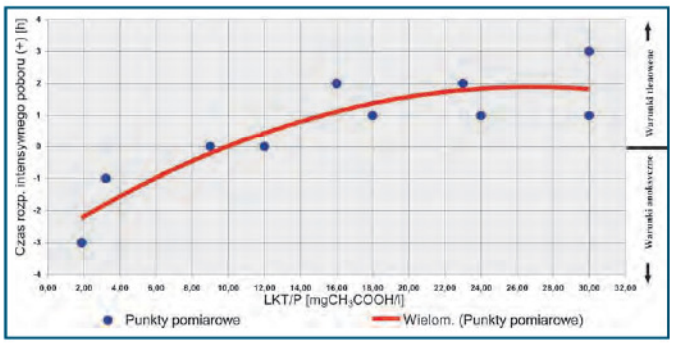
Plik udostępniony Eugeniuszowi Klaczyńskiemu przez Wydawnictwo Seidel-Przywecki Sp. z o.o.



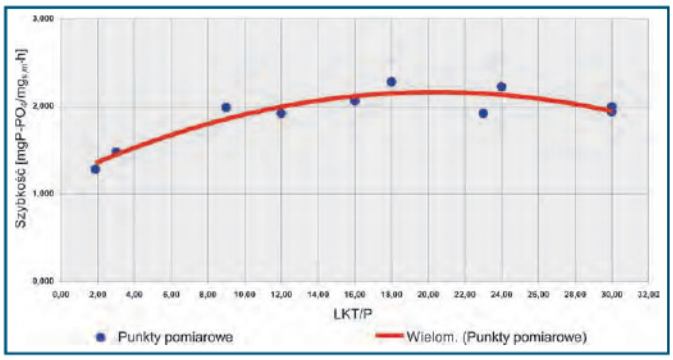
Rys. 6. Wpływ LKT/P na zmiany stężenia ortofosforanów w ściekach (seria 2.)



Rys. 7. Wpływ LKT/P na szybkość uwalniania (-) i poboru (+) ortofosforanów w przedziałach kontrolnych procesu oczyszczania ścieków (seria 2.)



Rys. 8. Wpływ LKT/P w ściekach na czas rozpoczęcia intensywnego poboru (+) ortofosforanów



Rys. 9. Wpływ LKT/P w ściekach na średnią szybkość procesu w okresie intensywnego poboru (+) ortofosforanów

trwania warunków tlenowych, co może mieć duże znaczenie w skali technicznej w trakcie optymalizacji wielkości strefy nitryfikacji reaktorów biologicznych.

Po biologicznym oczyszczeniu ścieków w reaktorach laboratoryjnych prowadzono sedymentację mieszaniny ścieków i osadu czynnego w lejach Imhoffa. Po czterech godzinach sedymentacji stwierdzono wzrost stężenia ortofosforanów w ściekach biologicznie oczyszczonych, świadczący o wtórnym uwalnianiu ortofosforanów z osadów.

6. Podsumowanie

Wpływ lotnych kwasów tłuszczowych na proces usuwania fosforu ze ścieków w trzystrefowych reaktorach biologicznych badano w zakresie wartości wskaźnika LKT/P = 1,88÷30,00 mgCH_3COOH/mgP. Wyniki badań pozwalają ustalić następujące wnioski:

W warunkach beztlenowych szybkość uwalniania (-) ortofosforanów zwiększała się ze wzrostem wartości wskaźnika, osiągając najwyższą wartość v = – 4,639 mgP-PO_4/$mg_{s.m.}$ · h dla LKT/P = 18 mgCH_3COOH/mgP. Wyższe wartości wskaźnika obniżały szybkość procesu.

W warunkach anoksycznych przy niskich wartościach wskaźnika LKT/P ≤ 3,22 mgCH_3COOH/mgP rozpoczynał się wolny, stabilny pobór ortofosforanów. Przy wyższych wartościach wskaźnika proces destabilizował się i zachodziło zarówno uwalnianie, jak i pobór ortofosforanów.

W warunkach tlenowych szybkość poboru ortofosforanów zależała od wartości wskaźnika LKT/P. Przy niskich wartościach wskaźnika uzyskano wysoką szybkość poboru bardzo wcześnie po wytworzeniu warunków tlenowych, natomiast wzrost wartości wskaźnika powodował opóźnienie procesu.

Okres intensywnego poboru ortofosforanów rozpoczynał się w warunkach anoksycznych dla LKT/P ≤ 9,00 mgCH_3COOH/mgP, natomiast przy wyższych wartościach wskaźnika intensywny pobór zachodził w strefie tlenowej. Początek tego okresu opóźniał się ze wzrostem wartości wskaźnika i rozpoczynał się po około dwóch godzinach warunków tlenowych dla LKT/P ≥ 16 mgCH_3COOH/mgP. W okresie intensywnego poboru ortofosforanów szybkość procesu rosła do wartości około v = 2,0 mgP-PO_4/$mg_{s.m.}$ · h przy wzroście wartości wskaźnika LKT/P do 9,00 mgCH_3COOH/mgP. Przy większych wartościach wskaźnika szybkość poboru była ustabilizowana na tym samym poziomie.

Ścieki o wysokim wskaźniku LKT/P wymagają dłuższego czasu przetrzymania w strefie tlenowej, gdyż proces później się rozpoczyna i dłużej trwa. Przy wartościach LKT/P ≤ 12 mgCH_3COOH/mgP i czasie przetrzymania w warunkach tlenowych cztery do pięciu godzin uzyskano stężenie ortofosforanów w ściekach biologicznie oczyszczonych ≤ 1,81 mgP-PO_4. Przy wyższych wartościach wskaźnika proces nie został zakończony i stężenie fosforu było wyższe.

Efektywność usuwania ChZT, BZT_5 i LKT rosła ze wzrostem wartości wskaźnika LKT/P.

Wzrost wartości wskaźnika LKT/P zwiększa proporcjonalnie wartość wskaźnika ChZT/P w ściekach.

Literatura:

[1] Barnard J.L., Projektowanie oczyszczalni z osadem czynnym usuwających związki biogenne, Filozofia projektowania a eksploatacja oczyszczalni ścieków. Materiały seminarium szkoleniowego, Kraków, LEM PROJEKT s.c., 28 – 29.06.2000, s. 13 – 59.

[2] Fizyczno-chemiczne badanie wody i ścieków, Praca zbiorowa pod redakcją J. Dojlido, Warszawa, Arkady, 1999.

[3] Gharagah A., Randall H.C, The effect of organic compounds on biological phosphorus removal, J. Water Sci. Tech., 1991, 23, s. 585 – 594.

[4] Klaczyński E., Wpływ czynników charakteryzujących ścieki na chemiczne i biologiczne usuwanie fosforu, Przegląd Komunalny 5 (188) 2007, s. 67 – 70.

[5] Llabres P., Pavan P., Battistioni P., Cecchi F., Mata-Alvarez J., The use of organic fraction of municipal solid waste hydrolysis products for biological nutrient removal in wastewater treatment plants, Wat. Res., 1999, 33, 1, s. 214 – 222.

[6] Malej J., Oczyszczanie ścieków z zastosowaniem cyrkulacyjnych komór osadu czynnego – wybrane zagadnienia technologiczne, Poznań, PZITS Oddział w Poznaniu, 1999.

Plik udostępniony Eugeniuszowi Klaczyńskiemu przez Wydawnictwo Seidel-Przywecki Sp. z o.o.