

Autorska technologia regulacji napowietrzaniem komór osadu czynnego MPWiK S.A. we Wrocławiu – wstępne testy

In-house Developed Technology for Aeration Control of Activated Sludge Chambers at MPWiK S.A. Wrocław – Preliminary Tests

NATALIA CHAŁUPKA, DARIA CŁAPA, KAMIL JANIAK,
MATEUSZ MUSZYŃSKI-HUHAJŁO, STANISŁAW MIODOŃSKI

DOI 10.36119/15.2025.12.21

Zmiany w składzie i ładunku ścieków dopływających do oczyszczalni stwarzają wyzwanie dla utrzymania stabilnej pracy reaktorów biologicznych. Wrażliwym procesem jest nityfikacja, której efektywność zależy od szeregu czynników, w tym dostępności tlenu oraz stężenia azotu amonowego w ściekach surowych. Tradycyjne systemy sterowania, oparte na stałych wartościach zadanych, często nie są w stanie odpowiednio reagować na wahania ładunku azotu, co prowadzi do przeciążeń układu lub nadmiernego zużycia energii na napowietrzanie.

Rozwiązaniem jest tzw. regulacja zmiennowartościowa, która umożliwia automatyczne dostosowanie parametrów pracy systemu napowietrzania do aktualnego zapotrzebowania. Kluczowym elementem regulacji zmiennowartościowej są pomiary on-line stężenia jonów amonowych (NH_4^+) oraz opcjonalnie przepływu ścieków/ładunku azotu na wlocie i wylocie reaktora. W tej regulacji wartość zadana stężenia tlenu nie jest stała w czasie tylko jest funkcją aktualnej jakości ścieków biologicznie oczyszczonych i opcjonalnie, obciążenia bloku biologicznego. Zastosowanie regulacji zmiennowartościowej pozwala zwiększyć stabilność procesu usuwania azotu, ale również ograniczyć zużycie energii i poprawić parametry ścieków oczyszczonych.

MPWiK S.A. we Wrocławiu, prowadzi testy autorskiego systemu sterowania napowietrzaniem w oparciu o wskazania azotu amonowego, a niniejszy artykuł przedstawia wyniki wstępnych testów technologii. Aktualnie rozwiązanie to pozwala na oszczędności do 14% względem ciągu referencyjnego, w którym stosowana jest stałowartościowa regulacja stężeniem tlenu. Aktualnymi wyzwaniami są praca algorytmu przy bardzo niskich obciążeniach ładunkiem oraz utrzymanie odpowiedniego stężenia azotu ogólnego w ściekach biologicznie oczyszczonych.

Słowa kluczowe: biologiczne oczyszczanie ścieków, napowietrzanie, azot amonowy, regulacja zmiennowartościowa

Changes in the composition and load of wastewater entering treatment plants pose a challenge to maintaining stable operation of biological reactors. A particularly sensitive process is nitrification, whose efficiency depends on several factors, including oxygen availability and the concentration of ammonium nitrogen in the raw wastewater. Traditional control systems, based on fixed setpoints, often fail to respond adequately to fluctuations in nitrogen load, which can lead to reactor overloading or excessive energy consumption for aeration.

A solution is the so-called variable-setpoint control, which enables automatic adjustment of aeration system parameters to the current demand. A key component of variable-setpoint control is on-line measurement of ammonium ion (NH_4^+) concentration and, optionally, the measurement of wastewater flow/nitrogen load at the reactor inlet and outlet. In this control strategy, the oxygen concentration setpoint is not fixed over time but becomes a function of the current quality of biologically treated wastewater and, optionally, the biological reactor loading. The application of variable-setpoint control improves the stability of nitrogen removal processes while also reducing energy consumption and enhancing the quality of treated effluent.

MPWiK S.A. in Wrocław is conducting tests of a proprietary aeration control system based on ammonium nitrogen monitoring, and this article presents the results of preliminary trials of the technology. At present, this approach enables savings of up to 14% compared to a reference treatment line operating with constant oxygen concentration control. Current challenges include the algorithm's performance under very low nitrogen load conditions and maintaining an appropriate concentration of total nitrogen in the biologically treated effluent.

Keywords: biological wastewater treatment, aeration, ammonium nitrogen, variable setpoint control

Natalia Chałupka, Daria Cłapa – Politechnika Wrocławska

dr inż. Kamil Janiak <https://orcid.org/0000-0001-5021-9084> – MPWiK S.A. we Wrocławiu, Politechnika Wrocławska, kamil.janiak@mpwik.wroc.pl

dr inż. Mateusz Muszyński-Huhajło <https://orcid.org/0000-0001-6639-8320>, dr inż. Stanisław Miodoński <https://orcid.org/0000-0002-3917-3772> – Politechnika Wrocławska

Autor do korespondencji/ Corresponding author: kamil.janiak@pwr.edu.pl

Wstęp

Proces napowietrzania stanowi kluczowy element biologicznego oczyszczania ścieków, odpowiadając za około 50% całkowitego zużycia energii w oczyszczalniach ścieków komunalnych [9,10]. Tradycyjne systemy sterowania opierają się na utrzymywaniu stałego stężenia tlenu rozpuszczonego w reaktorze biologicznym [1], niezależnie od występujących naturalnie wahań w zapotrzebowaniu na tlen, spowodowanych dynamicznymi zmianami w ładunku zanieczyszczeń w dopływie do komór tlenowych. Skutkiem tego jest okresowe przewymiarowanie lub niedowymiarowanie intensywności napowietrzania [1] i wynikające z tego, niepotrzebne straty energii, jak i pogorszenie efektywności usuwania związków azotu, a w konsekwencji – obniżenie jakości ścieków oczyszczonych [8,2].

Wraz z rozwojem technologii czujnikowych i pojawieniem się akceptowalnych cenowo i wiarygodnych urządzeń pomiarowych, takich jak mierniki azotu amonowego, azotanowego powstały nowe możliwości sterowania napowietrzaniem [3].

Najkorzystniejszą alternatywą dla regulacji stałowartościowej okazała się tzw. regulacja zmiennowartościowa stężenia tlenu w oparciu o pomiary stężenia azotu amonowego w odpływie i/lub dopływie. Jej idea wynika z roli jaką pełni proces nityfikacji, która jest kluczowym procesem, warunkującym wydajność systemu napowietrzania. Proces ten realizowany jest przez bakterie nityfikacyjne (głównie *Nitrosomonas* i *Nitrobacter*), które charakteryzują się niższym powinowactwem do tlenu niż bakterie heterotroficzne. W praktyce oznacza to, że skuteczna nityfikacja wymaga wyższych stężeń tlenu rozpuszczonego, zwykle powyżej 1,5–2,0 gO₂/m³ [9,4]. Dla porównania, procesy usuwania związków organicznych zachodzą efektywnie już przy niższych stężeniach tlenu (0,5–1,0 gO₂/m³). Oznacza to, że utrzymując odpowiednie warunki dla nityfikacji, mamy pewność, że pozostałe procesy tlenowe przebiegają z maksymalną szybkością.

Dostępne doniesienia literaturowe [13, 1] wskazują na duży potencjał oszczędnościowy regulacji zmiennowartościowej w porównaniu do stałowartościowej. Użytkiwane oszczędności można oszacować na poziomie 10 – 25% [1], przy jednoczesnym zachowaniu lub nawet poprawie jakości ścieków oczyszczonych.

W niniejszej pracy podjęto próbę porównania efektywności klasycznej regulacji stałowartościowej i zaawansowanego ste-

rowania napowietrzaniem w oparciu o algorytm regulacji zmiennowartościowej w kontekście oszczędności energetycznych, stabilności procesu nityfikacji oraz jakości ścieków oczyszczonych. Testy prowadzono we Wrocławskiej Oczyszczalni Ścieków.

Metodyka

Oczyszczalnia ścieków

Badania przeprowadzono we Wrocławskiej Oczyszczalni Ścieków, której wielkość to 1 400 000 RLM i przepustowość 155 000 m³/d. Oczyszczalnia pracuje w układzie A2O i podzielona jest na dwie części: starszą i nową. Starsza część składa się z dwóch bloków technologicznych, nowsza natomiast składa się z trzech bloków, testy zostały przeprowadzone na bloku w części starszej. Każdy blok technologiczny złożony jest z dwóch ciągów, po jednej tłokowej komorze tlenowej w każdym z nich. W całym układzie znajduje się 10 tłokowych komór tlenowych. W każdej komorze tlenowej starej części znajdują się trzy sekcje dyfuzorów, sterowane oddzielnie. Testy regulacji zmiennowartościowej były prowadzone w jednym ciągu bloku biologicznego (tzw. ciąg badawczy), drugi ciąg tego bloku był ciągiem referencyjnym (rysunek 1). Ciąg referencyjny pracował z regulacją stałowartościową nastawioną na stężenie 2; 2; 0,5 gO₂/m³ kolejno w sekcjach od najbliższej do najdalszej od dopływu.

Opis algorytmu sterowania

W bloku biologicznym badawczym zastosowano regulację zmiennowartościową (nadążną), w której wartość zadana stężenia tlenu zależy od aktualnego stężenia azotu amonowego (NH₄⁺) w od-

pływie z komory tlenowej oraz/lub od ładunku azotu amonowego dopływającego do reaktora biologicznego. Takie podejście umożliwia dynamiczne dostosowanie intensywności napowietrzania do aktualnego obciążenia procesowego, co prowadzi do zwiększenia efektywności energetycznej i poprawy stabilności procesu nityfikacji oraz promuje denityfikację [7,5,4]. Algorytm w sytuacji zbyt niskiego stężenia NH₄⁺ (poniżej 2,0 gN/m³) w odpływie z komory tlenowej umożliwia zmniejszenie stężenia tlenu tak, aby doprowadzić do wzrostu stężenia NH₄⁺ w reaktorze do zadanej wartości – 2,0 gN/m³, promując tym samym denityfikację w komorze tlenowej wewnątrz kłaczek osadu, gdy stężenie tlenu zostanie obniżone do odpowiednio niskiego poziomu. Z kolei przy wyższych wartościach NH₄⁺-N w odpływie z komory tlenowej algorytm działa tak jak regulacja stałowartościowa – utrzymuje stałą, maksymalną wartość stężenia tlenu zadaną przez operatora. Algorytm ten może być doposażony w sygnal dot. obciążenia ładunkiem azotu amonowego w dopływie do komory. W ten sposób możliwa jest adaptacja warunków tlenowych w reaktorze z wyprzedzeniem, co jest kluczowe, szczególnie dla tlenowych reaktorów tłokowych.

Przetestowano trzy warianty ustawień ww regulacji. Pierwszy wariant – sterowanie napowietrzaniem w sekcjach tlenowych reaktora (sekcje 1–2 – rysunek 2) odbywa się w zależności od stężenia azotu amonowego tylko na odpływie z bloku biologicznego.

Regulator PID NH₄ wyznacza wartość zadaną stężenia tlenu, której realizacja jest kontrolowana przez regulator PID O₂,1 i PID O₂,2, przy czym uwzględniany jest minimalny przepływ powietrza wymagany

Rysunek 1. Schemat badawczy na terenie oczyszczalni ścieków
Figure 1. Research scheme at the wastewater treatment plant



dla właściwej eksploatacji dyfuzorów ceramicznych. Po osiągnięciu minimalnego przepływu dalsza redukcja przepływu jest niemożliwa, nawet jeżeli wymagają tego warunki w reaktorze.

W drugim wariancie, wartości zadane stężenia tlenu są wypracowywane tak, jak w wariancie pierwszym, ale dodatkowo gdy przepływ ścieków do ciągu przekracza wartość graniczną, wtedy wartość zadana stężenia tlenu jest dodatkowo zwiększana o wartość zdefiniowaną przez operatora (np. gdy przepływ przekroczy 1000 m³/h wtedy wartość zadana stężenia tlenu jest zwiększana o 0,2 gO₂/m³).

Trzeci wariant jest analogiczny jak drugi przy czym zamiast przepływu, brany jest pod uwagę ładunek azotu amonowego.

Warianty drugi i trzeci to warianty wykorzystujące tzw. sprzężenie w przód (ang. feedforward). Sygnał dotyczący zmian w obciążeniu bloku przepływem lub ładunkiem azotu pozwala na modyfikację wartości zadanej O₂ wypracowanej przez regulator PID NH₄ z wyprzedzeniem, co jest istotne w układach fłokowych. W systemie istnieje możliwość ręcznej korekty wartości stężeń przez operatora, która może być wykorzystana np. gdy wystąpi potrzeba zróżnicowania stężeń między sekcjami (błoczki „korekta” – rysunek 2), np. przy wypracowanej nastawie wynoszącej 1,8 gO₂/m³, operator decyduje się pracować przy nastawie 2,0 gO₂/m³ w sekcji pierwszej i 1,8 gO₂/m³ w sekcji drugiej itd.

Układ, PID O₂,3, odpowiada za minimalizację stężenia tlenu w recyrkulacji azotanów przy zachowaniu odpowiedniego zawieszenia osadu w komorze. Układ ten pracuje przy stałej wartości zadanej stężenia tlenu w komorze tlenowej wynoszącej 0,5 g O₂/m³.

Dodatkowo w układzie obecna jest pętla sterowana regulatorem PID O₂^{*}, która koryguje wartość zadaną stężenia tlenu w sekcjach 1 i 2, gdy w sekcji 3 wy-

stępuje przetlenienie tzn. reaguje w sytuacji scenariusza, w którym obciążenie ładunkiem zanieczyszczeń sekcji 3 jest tak małe, że pomimo pracy przy minimalnej wydajności, stężenie tlenu przekracza 0,5 gO₂/m³. Sytuacja ta oznacza więc, że w sekcjach 1 i 2 utleniono zbyt dużo zanieczyszczeń, niezbędna jest więc korekta wartości zadanych O₂ w dół. W trakcie testów opisywanych w niniejszym artykule, pętla ta nie była aktywna.

Wyniki

Efekty technologiczne

Warianty regulacji były testowane w trzech różnych okresach. W pierwszym okresie (05.07.2023–14.11.2023) prowadzono pracę układu bez regulacji feedforward (FF). Następnie, od 15.11.2023 do 07.03.2024, wdrożono regulację FF opartą na przepływie ścieków mechanicznie oczyszczonych zasilających ciąg (Q).

W ostatnim okresie, trwającym od 08.03.2024 do 04.06.2024, zastosowano regulację FF zależną od stężenia azotu amonowego (t_{NH₄}). Najważniejsze efekty przedstawiono w tabeli 1, a na rysunku 3 przedstawiono uzyskane oszczędności w funkcji temperatury. Wykres opracowano zestawiając dane dot. oszczędności uzyskanych w danym miesiącu eksploatacji układu z temperaturami panującymi w komorze tlenowej w okresie, dla którego wyliczono oszczędności.

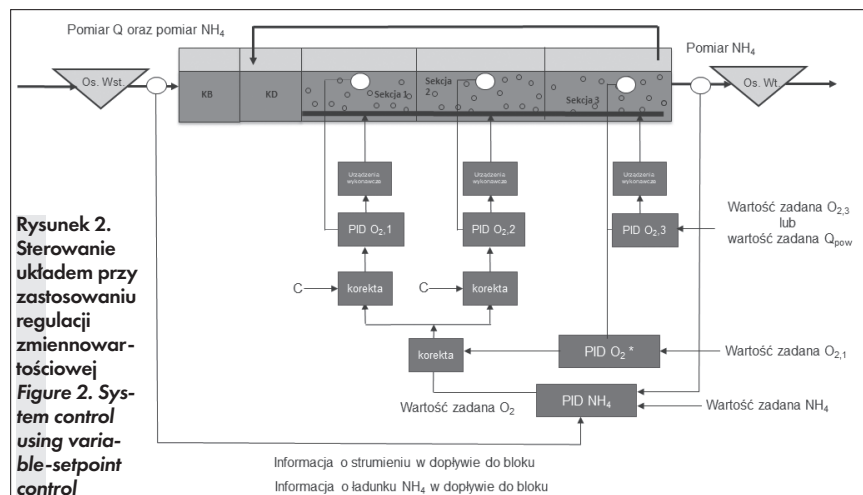
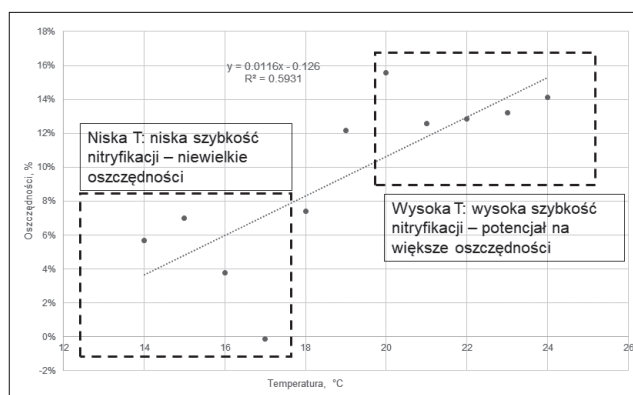
Uzyskano średnio od 4 do 14% oszczędności zużywanego powietrza (maksymalnie 16%). Efekty pracy wg algorytmu były zdecydowanie bardziej zależne od temperatury niż od obecności dodatkowych pętli regulacyjnych (tabela 1 vs rysunek 3).

W okresie testów surowej wersji algorytmu (okres I – bez FF) uzyskano najwyższe średnie oszczędności, co było bezpośrednio związane z najwyższą temperatu-

Tabela 1. Efektywność różnych sposobów regulacji w odniesieniu do trybu referencyjnego
Table 1. Efficiency of different control strategies relative to the reference mode

	Regulacja bez FF (05.07-14.11)	Regulacja FF od Q (15.11-07.03)	Regulacja FF od t _{NH4} (08.03-04.06)
Oszczędności w ilości powietrza, % względem referencji	14%	4%	9%
NH ₄ ⁺ +NO ₃ ⁻ , % względem referencji	109%	107%	113%
Średnia temperatura w reaktorze, °C	22.2	15.7	18.3

Rysunek 3. Temperatura a efektywność procesów biologicznych
Figure 3. Temperature and the efficiency of biological processes



Rysunek 2. Sterowanie układem przy zastosowaniu regulacji zmiennowartościowej
Figure 2. System control using variable-setpoint control

rą ścieków w reaktorze. Z kolei w okresie, gdy temperatura była najniższa (okres II – testy regulacji FF od Q), uzyskane efekty były dalece poniżej oczekiwań – uzyskano jedynie 4% oszczędności. Pośrednie wyniki uzyskano dla okresu III gdy testowano regulację w wariancie z FF od t_{NH₄} – 9% oszczędności.

Przyczyną tego jest wpływ, jaki temperatura wywiera na proces nitryfikacji. Im niższa temperatura tym mniejsza szybkość przyrostu bakterii nitryfikacyjnych i tym większe wymagane stężenie tlenu niezbędne do utrzymania wymaganej zdolności nitryfikacyjnej. Wobec tego, utrzymanie zadanego stężenia NH₄⁺-N wymaga utrzymania

Tabela 2. Formy azotu w odpływie z reaktora tlenowego oraz stężenia tlenu w reaktorze (pierwsza wartość to stężenie w referencji/druga to w układzie ze zmiennowartościową regulacją)
Table 2. Nitrogen forms in the reactor's effluents as well as oxygen concentrations in reactor (first value is from reference/second value from test reactor)

	Referencja/Zmiennowartościowa		
	Regulacja bez FF (okres I – 05.07-14.11)	Regulacja FF od Q (okres II – 15.11-07.03)	Regulacja FF od t_{NH_4} (okres III – 08.03-04.06)
Średnie stężenie tlenu w sekcjach 1-3, gO_2/m^3	1.49/1.08	1.49/1.21	1.59/1.39
Średnie stężenie azotu amonowego, gN/m^3	0.14/1.94	2.78/2.28	0.04/1.42
Średnie stężenie azotu azotanowego, gN/m^3	6.23/5.14	5.0/6.14	7.66/7.27
SUMA, gN/m^3	6.37/7.08	7.78/8.42	7.04/8.68

wyższych stężeń tlenu i w układzie nie ma przestrzeni na duże oszczędności.

Niezależnie od wersji algorytmu, jakość ścieków oczyszczonych była gorsza niż w układzie referencyjnym. Dokładniejsza analiza pozwala wskazać przyczynę takiej sytuacji. W tabeli 2 przedstawiono średnie stężenia form azotu w ściekach biologicznie oczyszczonych oraz średnie stężenia tlenu dla każdego z testowanych wariantów.

Zastosowanie regulacji zmiennowartościowej (ZZ), opartej na pomiarze stężenia azotu amonowego (NH_4^+), pozwoliło skutecznie obniżyć średnie stężenie tlenu rozpuszczonego w sekcjach 1–3 reaktora testowego. W każdym z analizowanych okresów stężenie O_2 było niższe przy ZZ niż w regulacji referencyjnej. Obniżenie stężenia tlenu wpłynęło na ograniczenie procesu nitrifikacji, czego bezpośrednim skutkiem był wzrost stężenia NH_4^+ oraz – w mniejszym stopniu – spadek stężenia NO_3^- .

Mikrobiologicznie, obniżenie stężenia tlenu ogranicza aktywność bakterii nitryfikacyjnych, przede wszystkim *Nitrosomonas* (utleniających NH_4^+ do NO_2^-) oraz *Nitrobacter/Nitrospira* (odpowiedzialnych za dalsze utlenianie NO_2^- do NO_3^-). Bakterie te są tlenowcami i mają różne progi minimalnego stężenia tlenu do aktywnego wzrostu – zwykle powyżej 1,0–1,5 gO_2/m^3 . W warunkach niższego stężenia O_2 , obserwowanych przy ZZ (np. 1,08 vs. 1,49 gO_2/m^3 w pierwszym okresie), szybkość nitrifikacji ulega istotnemu spowolnieniu, co powoduje akumulację NH_4^+ i ograniczoną produkcję NO_3^- . Dodatkowo, w warunkach niższego stężenia tlenu, promowana jest symultaniczna denitrifikacja wewnątrz kłaczków osadu czynnego [10].

W analizowanych danych największe efekty ZZ wystąpiły w pierwszym okresie (bez FF), gdzie NH_4^+ wzrosło z 0,14 do 1,94 gN/m^3 , a NO_3^- spadło z 6,23 do 5,14 gN/m^3 . Podobne tendencje wystąpiły w pozostałych dwóch okresach: wzrost stężenia NH_4^+ był konsekwentny, natomiast

spadek NO_3^- – mniej wyraźny, a w drugim okresie (z FF od Q) wręcz przeciwnie (wzrost z 5,0 do 6,14 gN/m^3). To może wynikać z chwilowej poprawy efektywności nitrifikacji mimo zastosowania ZZ, np. wskutek zmian w dopływie, temperaturze lub dynamice osadu czynnego.

Oszczędności finansowe

Niezależnie do ww. komplikacji, system w takiej formie pozwolił na osiągnięcie zauważalnych oszczędności ekonomicznych (rysunek 4). Oszczędności te wyliczono w następujący sposób:

1. Obliczono różnicę w ilości zużywanego powietrza w m^3/d pomiędzy ciągiem badawczym gdzie wdrożono regulację zmiennowartościową, a referencyjnym gdzie stosowano równoległą regulację stałowartościową. Przy obliczeniach uwzględniono niewielkie różnice w obciążeniu ciągów strumieniem ścieków [m^3/d] przemnażając zużycie powietrza w ciągu badawczym przez stosunek przepływu ścieków przez ciąg referencyjny do przepływu przez ciąg badawczy.
2. Oszczędzony strumień powietrza przeliczono na zużycie energii korzystając z przelicznika $E [kWh/d] = 0,0211 [kWh/m^3] \cdot Q [m^3/d]$ gdzie 0,0211 jest to zużycie energii na wpompowanie 1 m^3 powietrza obliczone na podstawie charakterystyki dmuchaw zainstalowanych w oczyszczalni.
3. Otrzymane zużycie energii przeliczono na koszty korzystając z przeliczni-

Rysunek 4. Oszczędności finansowe dla jednego ciągu badawczego w ciągu roku
Figure 4. Financial savings for a single treatment line over one year



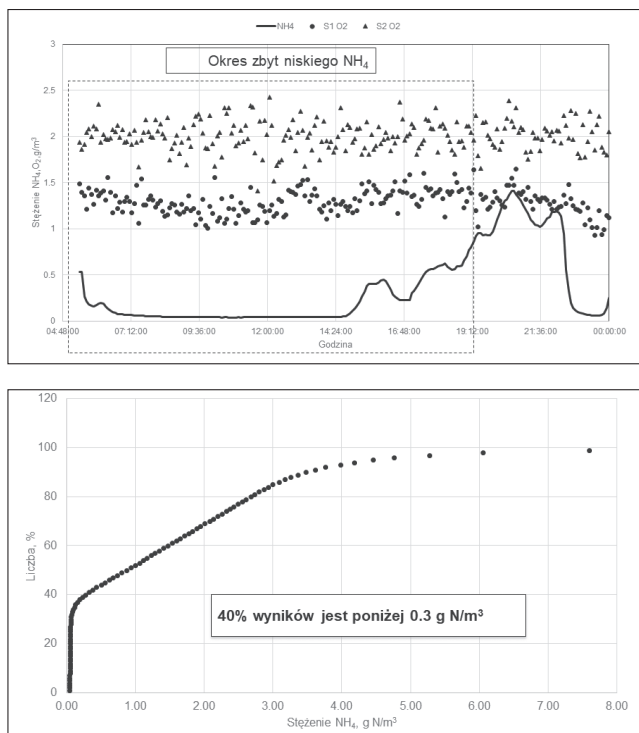
ka 1 kWh=0,8 PLN – czyli średniej ceny za kWh z okresu testów.

W całym okresie testów wstępnych (336 dni), uzyskane oszczędności wyniosły prawie 60 000 PLN. Gdyby niniejsze rozwiązanie zostało wdrożone we wszystkich ciągach technologicznych to szacowane roczne oszczędności wyniosłyby 815 000 PLN (efektywność dla całej oczyszczalni nie jest zwykłą wielokrotnością oszczędności dla jednego ciągu, ze względu na różne obciążenia ciągów ściekami). Na rysunku 4 wyraźnie widoczny jest spadek dobowych oszczędności w okresie niskich wartości temperatury (okres grudzień – marzec).

Wyzwania

Jak zaznaczono wcześniej, wstępne testy nie pozwoliły na uzyskanie wszystkich zakładanych celów. Uzyskane oszczędności nie były stabilne w czasie. Dodatkowo pogorszeniu uległa jakość ścieków oczyszczonych, chociaż skład ścieków pozostawał zgodny z normą. Częściowo, było to spowodowane niezależnymi czynnikami, takimi jak chociażby wpływ temperatury. Zidentyfikowano jednak szereg negatywnych zjawisk, których rozwiązanie jest możliwe.

Kluczowym wyzwaniem okazała się praca układu w warunkach bardzo niskich obciążeń, które występują regularnie w godzinach między 7 a 14. Przykład takiego okresu dla jednego z wybranych dni zaprezentowano na rysunku 5. Sytuacja taka powtarzała się regularnie. W godzinach tych układ sterowania tracił kontrolę nad stężeniem azotu amonowego w odpływie – wymagane przepływy powietrza pozwalające utrzymać wartość zadaną NH_4^+ , co skutkowało wymuszaniem natężeń przepływów powietrza poniżej limitu ustalonego jako bezpieczny dla dyfuzorów ceramicznych (1152, 864 i 576 $m^3 \cdot (h \cdot sekcja)^{-1}$ dyfuzorów odpowiednio dla sekcji 1,2,3). Praca poniżej ww. natężeń przepływu zwiększa ryzyko penetracji ścieków do środka dyfuzorów. Sekcje 1 i 2 pracowały więc przy zbyt wysokim stężeniu tlenu, minimalizując uzyskiwane wtedy oszczędności.



Rysunek 6.
Liczba procentowa wyników o danym stężeniu NH_4
Figure 6. Percentage of results with a given NH_4 concentration

Stan ten występował przez znaczną część czasu. Przez 40% czasu trwania testu, stężenie NH_4^+ było poniżej $0,3 \text{ g N/m}^3$ (rysunek 6), co oznacza pracę w warunkach silnego limitowania nityfikacji dostępnością azotu amonowego i zbyt wysokich stężeń tlenu.

Aktualnie (październik 2025) następuje wymiana dyfuzorów w komorach tlenowych na membranowe, co pozwoli rozwiązać problemy z przetlenieniem w okresach niskich obciążeń.

Drugim wyzwaniem były okresowe problemy z adaptacją algorytmu do wysokich obciążeń (przykład takiej sytuacji – rysunek 7). Podobnie jak problemy z niskim obciążeniem, takie incydenty występowały regularnie przez cały okres trwania eksperymentu. Stężenie azotu amonowego w odpływie z reaktora okresowo gwałtownie wzrastało. Dostrojenie regulatora PID do tych zdarzeń (a dokładniej zwiększenie wartości członu P) skutkowało przesterowaniem w okresach umiarkowanych obciążeń. Wyzwania tego nie rozwiązano w fazie wstępnej testów. Autorzy rozważają możliwość zmiany regulatora na bardziej skomplikowany (np. wykorzystujący logikę rozmytą) w kolejnych etapach testów.

Wnioski

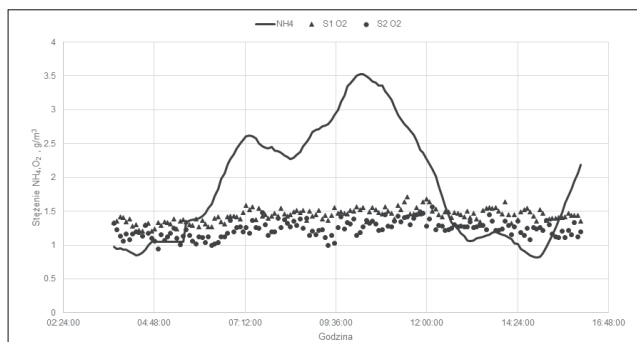
1. Zastosowanie regulacji zmienności systemu napowietrzania w oczyszczalniach ścieków może przyczynić się do istotnych oszczędności energii.

- Regulacja bez FF (05.07–14.11) pozwoliła osiągnąć oszczędności na poziomie 14%.
 - Regulacja z wykorzystaniem FF od Q (15.11–07.03) pozwoliła osiągnąć oszczędności na poziomie 4%.
 - Regulacja z zastosowaniem FF od stężenia NH_4 (08.03–04.06) pozwoliła uzyskać 9% oszczędności. Należy podkreślić, że badania prowadzone były o różnych porach roku, więc na uzyskane wyniki istotny wpływ miała temperatura.
2. Zastosowanie regulacji zmienności wpływa na zmniejszenie stężenia tlenu, nawet przy zmiennych warunkach temperatury. Układ ten dzięki dynamicznym wartościom zadany optymalizuje na bieżąco stężenie tlenu, co przekłada się na zmniejszenie zużycia energii.
3. Układ sterowania wymaga dalszej optymalizacji. Wynika ona z ograniczeń eksploatacyjnych dyfuzorów ceramicznych, które determinują minimalny dopuszczalny przepływ powietrza, a co za tym idzie utrzymania odpowiedniego poziomu azotu amonowego. W ramach planowanej rozbudowy oczyszczalni przewidziana jest wymiana dyfuzorów na membranowe, co pozwoli na wyeliminowanie tego problemu.

LITERATURA

- [1] Åmand L, Olsson G., & Carlsson B. (2013). Aeration control – a review. *Water science and technology: a journal of the International Association*

Rysunek 5.
Sterowanie układem przy niskich obciążeniach bloku biologicznego (NH_4 – stężenie azotu amonowego w ściekach biologicznie oczyszczonych, S1 O_2 – stężenie tlenu w sekcji 1, S2 O_2 – stężenie tlenu w sekcji 2)
Figure 5. Process control under low-load conditions of the biological reactor (NH_4 – ammonium nitrogen concentration in biologically treated wastewater; S1 O_2 – oxygen concentration in section 1; S2 O_2 – oxygen concentration in section 2)



Rysunek 7.
Przykładowy przebieg stężenia NH_4 i O_2 w czasie w okresie gwałtownego wzrostu obciążenia reaktora ładunkiem azotu amonowego – sekcja 2 komory tlenowej komory ciągu badawczego (NH_4 – ammonium nitrogen concentration in biologically treated wastewater; S1 O_2 – oxygen concentration in section 1; S2 O_2 – oxygen concentration in section 2)
Figure 7. Example profile of NH_4 and O_2 concentrations over time during a period of rapid increase in ammonium nitrogen loading – section 2 of the aerobic reactor chamber in the experimental line (NH_4 – ammonium nitrogen concentration in biologically treated wastewater; S1 O_2 – oxygen concentration in section 1; S2 O_2 – oxygen concentration in section 2)

- tion on Water Pollution Research, 67 11, 2374–98. <https://doi.org/10.2166/wst.2013.139>.
- [2] Copp, J. B. (2002). *The COST Simulation Benchmark: Description and Simulator Manual*.
- [3] Drewnowski, J., Remiszewska-Skwarek, A., Duda, S., & Łagód, G. (2019). Aeration Process in Bioreactors as the Main Energy Consumer in a Wastewater Treatment Plant. Review of Solutions and Methods of Process Optimization. *Processes*. <https://doi.org/10.3390/pr7050311>.
- [4] Flores-Alsina, X., et al. (2014). Benchmarking integrated control strategies for nutrient removal in wastewater treatment plants. *Water Res.* 49, 312–326.
- [5] Hauduc, H., et al. (2015). Integration of online NH_4^+ sensors into advanced aeration control strategies: Benefits and limitations. *Water Res.* 85, 229–237.
- [6] Henze, M., van Loosdrecht, M. C. M., Ekama, G. A., & Brdjanovic, D. (2008). *Biological Wastewater Treatment: Principles, Modelling and Design*. IWA Publishing.
- [7] Regmi, P., et al. (2011). Control of aeration using ammonia-based aeration control in activated sludge processes. *Proc. WEFTEC 2011*.
- [8] Regmi, P., et al. (2012). Optimizing nitrogen removal reactor configuration and aeration control using a pilot-scale BNR system. *Water Sci. Technol.* 65(6), 1156–1163.
- [9] Rieger, L., et al. (2012). Good modelling practice in activated sludge modelling. *Water Sci. Technol.* 65(5), 918–936.
- [10] Rosso, D., & Stenstrom, M. K. (2008). Energy implications of future carbon and nitrogen removal regulations for municipal wastewater treatment. *Water Environ. Res.* 80(5), 388–396.
- [11] Tchobanoglous, G., Burton, F. L., & Stensel, H. D. (2003). *Wastewater Engineering: Treatment and Reuse*. McGraw-Hill.
- [12] Oh, J., & Silverstein, J. (1999). Oxygen inhibition of activated sludge denitrification. *Water Research*, 33, 1925–1937. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(98\)00365-0](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(98)00365-0).
- [13] Yong Gu, Yu Li, Fang Yuan, Qiang Yang. Optimization and control strategies of aeration in WWTPs: A review, *Journal of Cleaner Production*, Volume 418, 2023, 138008, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.138008>. ■