

Adam MASŁOŃ

Politechnika Rzeszowska im. I. Łukasiewicza, Wydział Budownictwa,
Inżynierii Środowiska i Architektury, Zakład Inżynierii i Chemii Środowiska
al. Powstańców Warszawy 6, 35-959 Rzeszów
e-mail: amaslon@prz.edu.pl

Energochłonność wybranych oczyszczalni ścieków zlokalizowanych w południowo-wschodniej Polsce

Energy Consumption of Selected Wastewater Treatment Plants Located in South-Eastern Poland

In recent years, energy efficiency is becoming increasingly important in the field of water management, which is due to the fact that wastewater treatment plants are responsible for nearly 35% of energy consumption from all municipal sources. At present, wastewater treatment plants are already the largest consumers of electrical energy. For instance, the total energy consumption of 10000 WWTPs is approx. 4400 GWh/year, which corresponds to the demand of 900 000 four-person households. Biological wastewater treatment is the most energy demanding. In activated sludge systems energy consumption of aeration bioreactors is at a level of 40÷50%, and in some cases may reach as high as 60÷80%. Therefore, the cost of the electricity consumed in wastewater treatment systems is significant. The increase in standards of wastewater treatment causes a further increase in energy demand. Therefore, it becomes reasonable to develop energy audits for wastewater treatment systems, on the basis of which it is possible to determine the energy consumption of individual treatment processes, and thus determine the energy savings in such facilities. The paper presents the electricity consumption in selected municipal wastewater treatment plants located in south-eastern Poland (Biecz, Dynów, Hyżne, Krzeczowice, Nowy Żmigród). A data-based evaluation of the energy consumption of WWTPs was performed. What is more, the basic factors of energy consumption in relation to the flow, removed pollution load and load substrate treatment were described. Energy consumption of the wastewater treatment was analyzed on the basis of monthly and quarterly data. Electricity consumption of the analyzed wastewater treatment plants in 2016 was at the level between 0.307 kWh/m³ and 3.225 kWh/m³, while the average value of electricity consumption amounted to 1.26 kWh/m³ (Biecz); 0.525 kWh/m³ (Dynów); 1.963 kWh/m³ (Hyżne); 2.021 kWh/m³ (Krzeczowice) and 1.217 kWh/m³ (Nowy Żmigród). Electricity consumption of these wastewater systems is relatively high and comparable to the amount required in other units of this type. Energy consumption of the analyzed municipal wastewater treatment plants was not harmonized with fluctuations in hydraulic load. As the amount of pollution load in the flow to the plant increases, the energy intensity of the technological object declines. The average rate of energy consumption in relation to the pollution load for plants in Biecz, Dynow, Hyżne, Krzeczowice and Nowy Żmigród reached the levels of 5.224, 3.02, 5.185, 1.46 and 4.646 kWh/kg BOD_{5 removal} respectively. The results are similar to those described in the literature data (1.1÷6.09 kWh/kg BOD_{5 removal}).

Keywords: wastewater treatment, energy consumption, electricity consumption

Wprowadzenie

Zmniejszenie ładunku zanieczyszczeń do środowiska wodnego z komunalnych oczyszczalni ścieków zgodnie z obowiązującymi wymaganiami prawnymi prowadzi do stosowania efektywnych technologii usuwania zanieczyszczeń i procesów przeróbki osadów ściekowych. Prawidłowe funkcjonowanie oczyszczalni ścieków wymaga dostarczenia znacznych ilości energii elektrycznej, niezbędnej zarówno do prowadzenia procesów technologicznych, jak i do transportu ścieków w całym układzie technologicznym.

W ostatnich latach efektywność energetyczna w branży wodno-ściekowej zyskuje coraz bardziej na znaczeniu, bowiem same oczyszczalnie ścieków odpowiedzialne są za blisko 35% zużycia energii ze wszystkich obiektów komunalnych. Obecnie oczyszczalnie ścieków są już największymi odbiorcami energii elektrycznej, a zużycie energii w procesach usuwania zanieczyszczeń ze ścieków jest większe niż np. szpitali bądź szkół. Przykładowo całkowite zużycie energii 10 tys. oczyszczalni wynosi ok. 4400 GWh/rok, co odpowiada zapotrzebowaniu 900 tys. 4-osobowych gospodarstw domowych [1].

Zapotrzebowanie na energię elektryczną w oczyszczalniach ścieków w Niemczech i Włoszech wynosi blisko 1% całkowitej krajowej konsumpcji [2, 3]. Zużycie energii elektrycznej hiszpańskich oczyszczalni ścieków kształtuje się na poziomie 2÷3% krajowego zapotrzebowania na energię [4]. Z kolei w Stanach Zjednoczonych szacuje się, że systemy uzdatniania wody i oczyszczania ścieków odpowiadają za 4% zapotrzebowania na energię elektryczną [5].

Największe zapotrzebowanie na energię elektryczną wymagane jest przede wszystkim do biologicznego oczyszczania ścieków. W systemach z osadem czynnym zużycie energii elektrycznej do napowietrzania bioreaktorów kształtuje się na poziomie 50÷60%, a w niektórych przypadkach może osiągać poziom nawet 60÷80% [6-8]. Koszty energii elektrycznej używanej w systemach oczyszczania ścieków są znaczące.

Wzrost standardów oczyszczania ścieków obserwowany w ostatnim czasie powoduje dalsze zwiększenie zapotrzebowania na energię. Wobec tego zasadne staje się opracowanie audytów energetycznych dla systemów oczyszczania ścieków, na podstawie których możliwe jest wyznaczenie energochłonności jednostkowych procesów oczyszczania, a tym samym określenie oszczędności energii w takich obiektach [9]. Ograniczenie zużycia energii elektrycznej nigdy nie będzie stanowiło nadrzędnego celu w zarządzaniu systemem oczyszczania ścieków, ale istnieje wiele możliwości zmniejszenia energochłonności bez negatywnego wpływu na jakość ścieków oczyszczonych. Optymalizacja techniczno-ekonomiczna systemów oczyszczania ścieków komunalnych prowadzi do zmniejszenia wskaźników zużycia energii elektrycznej. W czasie eksploatacji oczyszczalni ścieków celowe staje się poszukiwanie optymalnych parametrów pracy poszczególnych obiektów lub urządzeń przy zachowaniu wymagań prawnych w zakresie ścieków oczyszczonych, które mogą zapewniać zmniejszenie zużycia energii elektrycznej. Efektem takich działań będzie redukcja kosztów oczyszczania ścieków. Prosty rozwiąza-

niem może być zmiana sposobu napowietrzania lub wyposażenie komór osadu czynnego w nowoczesny, inteligentny system sterowania [10]. W przypadku dużych systemów oczyszczania ścieków, przy uwzględnieniu możliwości technicznych i ekonomicznych, racjonalne staje się wykorzystanie biogazu wytwarzanego w procesach beztlenowej przeróbki osadów ściekowych do produkcji energii elektrycznej i ciepłej [11-13].

Celem pracy była analiza zużycia energii elektrycznej w wybranych oczyszczalniach ścieków komunalnych zlokalizowanych w południowo-wschodniej Polsce.

1. Metodyka i zakres badań

W pracy przedstawiono zużycie energii elektrycznej w wybranych oczyszczalniach ścieków komunalnych, zlokalizowanych w południowo-wschodniej Polsce, na obszarach wiejskich i miejsko-wiejskich w województwach małopolskim (M) i podkarpackim (P). Zakres nominalnych przepustowości przedmiotowych obiektów kształtował się na poziomie 480÷2400 m³/d i 4000÷10 600 RLM (tab. 1).

Tabela 1. Charakterystyka analizowanych oczyszczalni ścieków

Table 1. Characteristics of WWTPs

Lokalizacja	Projektowana przepustowość	Obciążenie oczyszczalni (projektowane)	Charakterystyka	Odbiornik ścieków
Biecz (M)	1200	10600	SBR	Ropa
Dynów (P)	2400	8572	osadnik Imhoffa, osad czynny	San
Hyżne (P)	480	4000	układ hybrydowy, osad czynny + złoża biologiczne	Tatyna
Krzeczowice (P)	676	5115	osadnik Imhoffa + złoża biologiczne	Mlecza
Nowy Żmigród (P)	500	4200	SBR	Wisłoka

Mechaniczno-biologiczna oczyszczalnia ścieków w Bieczu przeznaczona jest do oczyszczania ścieków komunalnych w ilości $Q_{\text{śrd}} = 1200 \text{ m}^3/\text{d}$, $Q_{\text{maxd}} = 1440 \text{ m}^3/\text{d}$ oraz 10 600 RLM. Układ technologiczny po modernizacji przeprowadzonej w 2015 r. składa się z pompowni głównej z kratą koszową, sitopiaskownika, pompowni pośredniej i dwóch reaktorów SBR o objętości około 340 m³ każdy. Gospodarka osadowa opiera się na tlenowej stabilizacji osadu kierowanego z reaktora SBR i odwadnianiu na prasie taśmowej.

Mechaniczno-biologiczna oczyszczalnia ścieków dla miasta Dynowa została oddana do użytkowania w 1993 r. Projektowa docelowa przepustowość wynosi $Q_{\text{śrd}} = 2400 \text{ m}^3/\text{d}$, $Q_{\text{maxd}} = 3441 \text{ m}^3/\text{d}$ i 8572 RLM. W skład ciągu technologicznego oczyszczalni wchodzi: pompownia ścieków ($V = 525 \text{ m}^3$) z kratą łukową typu KŁ-400-13-20; dwa osadniki Imhoffa typu O.I.-9,0II, zunifikowane wg katalogu

Centrum Techniki Komunalnej w Warszawie; dwie komory osadu czynnego typu KNAP-9/3.0-I-A o pojemności $2 \times 216 \text{ m}^3$, wykonane wg systemu typizacyjnego „UNIKLAR-77”, dwa osadniki wtórne pionowe typ OPiK-7,5 wersja XI, wykonane wg systemu unifikacji oczyszczalni ścieków „UNIKLAR-77”, pompownia osadu recykulowanego i poletka osadowe. Obecnie, z wykonanych dwóch ciągów technologicznych oczyszczalni, eksploatowana jest naprzemiennie jedna komora osadu czynnego przez okres około 2 lat, następnie wyłączana jest do remontu.

Gminna oczyszczalnia ścieków w Hyżnem została oddana do eksploatacji w 2007 r. Projektowana przepustowość wynosi $Q_{\text{srđ}} = 480 \text{ m}^3/\text{d}$ i $Q_{\text{maxđ}} = 600 \text{ m}^3/\text{d}$ oraz 4000 RLM. Obiekt w Hyżnem jest oczyszczalnią mechaniczno-biologiczną, której technologia oparta jest na kombinacji osadu czynnego i złoża biologicznego w hybrydowym reaktorze typu BIOPAX z doczyszczaniem na lagunie hydroponicznej. W skład oczyszczalni wchodzi: komora ścieków dowożonych, przepompownia ścieków surowych, stacja oczyszczania mechanicznego (sitiopiaskownik), hybrydowy bioreaktor (osad czynny + pakiety ze złożem biologicznym), osadnik wtórny pionowy, laguna hydroponiczna z rośliną *Hydrocotyle leucocephala*, zagęszczacz grawitacyjny osadu oraz stacja odwadniania i higienizacji osadu. W lipcu 2014 r. oczyszczalnia została poddana modernizacji. Do napowietrzania bioreaktora służy system hybrydowy, składający się z dyfuzorów drobnopęcherzykowych oraz aeratorów strumieniowych dennych (ASD).

Oczyszczalnia ścieków w Krzeczowicach obsługuje miejscowości wiejskie i oczyszcza ścieki bytowo-gospodarcze. Projektowa docelowa przepustowość wynosi $Q_{\text{srđ}} = 656 \text{ m}^3/\text{d}$ i 5115 RLM. Po przeprowadzonej modernizacji w 2014 r. układ technologiczny oczyszczalni ścieków w Krzeczowicach składa się ze zbiornika uśredniającego z sitem, osadnika Imhoffa, złoża biologicznego typu BIOCLERE B-500, osadnika wtórnego. Gospodarka osadowa opiera się na odwadnianiu osadu.

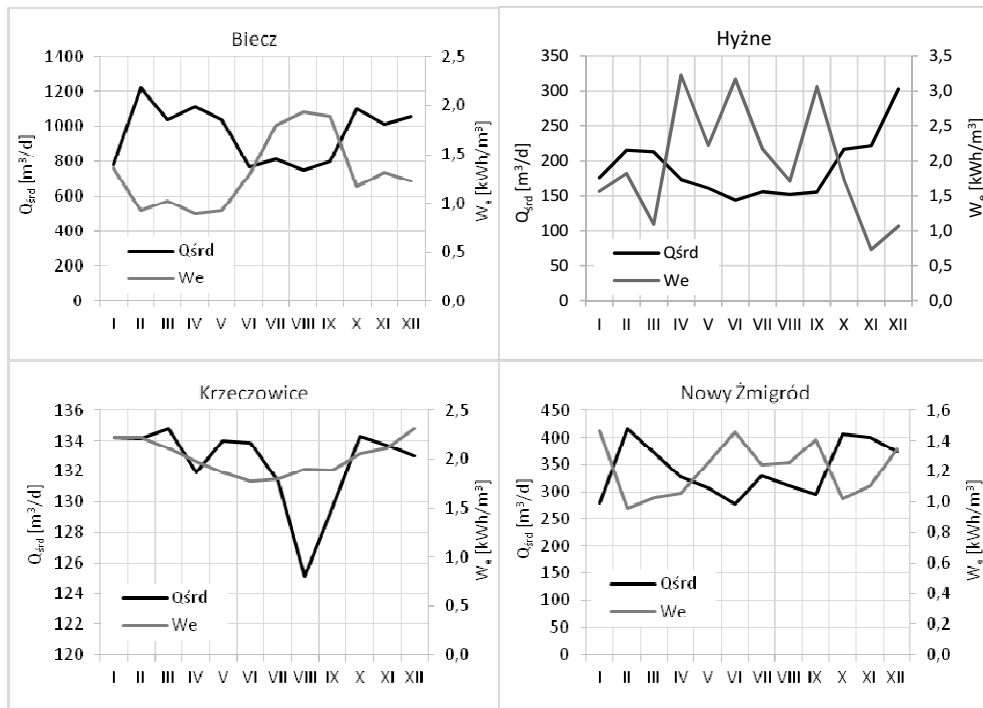
Mechaniczno-biologiczna oczyszczalnia ścieków komunalnych w Nowym Żmigrodzie została wybudowana w 2010 r. dla docelowej przepustowości $500 \text{ m}^3/\text{d}$ i 4200 RLM. Ciąg technologiczny oczyszczalni stanowią kolejno: pompownia z kratą koszową ręczną Ekoenergopol typ KPP200, piaskownik pionowy napowietrzany, zbiornik buforowy, dwa sekwencyjne reaktory porcjowe o objętości czynnej 540 m^3 każdy. Dodatkowo ciąg technologiczny przeróbki osadów ściekowych tworzy grawitacyjny zagęszczacz osadu oraz stacja odwadniania osadu z prasą filtracyjną.

Na podstawie danych eksploatacyjnych, udostępnionych przez eksploatatorów obiektów, dokonano oceny zużycia energii elektrycznej wybranych obiektów w 2016 roku. Zużycie energii elektrycznej określono w oparciu o odczyty liczników głównych energii elektrycznych w oczyszczalniach. W pracy określono podstawowe współczynniki energochłonności (wskaźniki jednostkowego zużycia energii elektrycznej) w odniesieniu do objętości oczyszczanych ścieków (W_e), obciążenia substratowego oczyszczalni ($W_{e \text{ RLM}}$) oraz usuwanego ładunku zanieczyszczeń ($W_{e \text{ BZT5}}$, $W_{e \text{ ChZT}}$, $W_{e \text{ Z}}$). Energochłonność oczyszczalni była analizowana na pod-

stawie danych miesięcznych (Biecz, Hyżne, Krzczowice i Nowy Żmigród) i kwartalnych (Dynów).

2. Wyniki badań i dyskusja

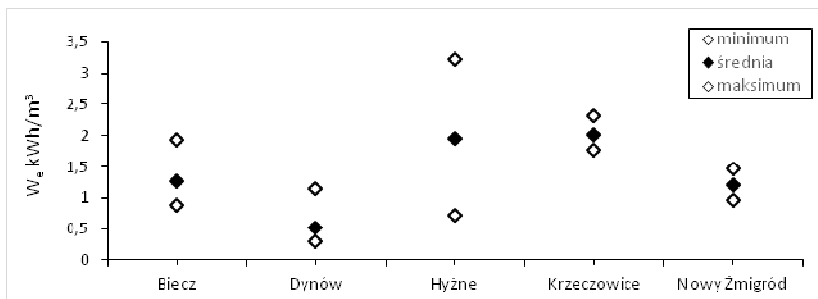
Obciążenie hydrauliczne analizowanych oczyszczalni ścieków w 2016 roku było bardzo zróżnicowane i było dużo niższe od wartości projektowanych. Średnia roczna przepustowość przedmiotowych obiektów kształtowała się na poziomie 957,7 m³/d (Biecz - B), 684,4 m³/d (Dynów - D), 190,5 m³/d (Hyżne - H), 132,5 m³/d (Krzczowice - K) i 340,9 m³/d (Nowy Żmigród - NŻ). Na rysunku 1 przedstawiono wahania przepływu ścieków w poszczególnych obiektach oraz zmienność wskaźnika jednostkowego zużycia energii elektrycznej w poszczególnych miesiącach. Największe zróżnicowanie przepływów w rozpatrywanym okresie odnotowano w oczyszczalni w Bieczu, a najmniejsze w Nowym Żmigrodzie. Energochłonność obiektów nie była zharmonizowana z wahaniami obciążenia hydraulicznego. Analiza wskazuje jednak, że w przypadku oczyszczalni ścieków typu SBR (Biecz i Nowy Żmigród) przy przepustowości nominalnej oczyszczalni ścieków notowano najniższe wskaźniki energochłonności obiektu. W przypadku pozostałych systemów podobnej zależności nie zaobserwowano.



Rys. 1. Analiza obciążenia hydraulicznego i zużycia energii elektrycznej w oczyszczalniach ścieków

Fig. 1. Change of wastewater inflow and electricity consumption at wastewater treatment plants

Energochłonność przedmiotowych oczyszczalni ścieków oscylowała w granicach od 0,307 kWh/m³ (Dynów) do 3,225 kWh/m³ (Hyżne). Średnia wartość wskaźnika zużycia energii elektrycznej kształtowała się na poziomie: 1,26 kWh/m³ (B); 0,525 kWh/m³ (D); 1,963 kWh/m³ (H); 2,021 kWh/m³ (K) i 1,217 kWh/m³ (NŻ) (rys. 2). Zużycie energii elektrycznej przedmiotowych instalacji jest stosunkowo duże i zbliżone do energochłonności oczyszczalni o podobnej przepustowości. Bodík i Kubaska [6] wykazali, że oczyszczalnie ścieków o przepustowości poniżej 300 m³/d należą do grupy o najwyższym zużyciu energii. Na podstawie badań 17 obiektów autorzy określili średni wskaźnik zużycia energii elektrycznej na poziomie 0,915 kWh/m³. Niemniej jednak kilka obiektów wykazywało energochłonność powyżej 1,5 kWh/m³, ale z drugiej strony stwierdzono również niskie wskaźniki zużycia energii poniżej 0,5 kWh/m³. Z kolei grupa obiektów o wielkości poniżej 5000 m³/d charakteryzowała się efektywnością energetyczną w granicach 0,264÷1,422 kWh/m³ przy średniej wartości równej 0,768 kWh/m³. Systemy oczyszczania o wielkości powyżej 5000 m³/d wykazują niski zakres energochłonności technologicznej (0,331÷0,414 kWh/m³) [6].



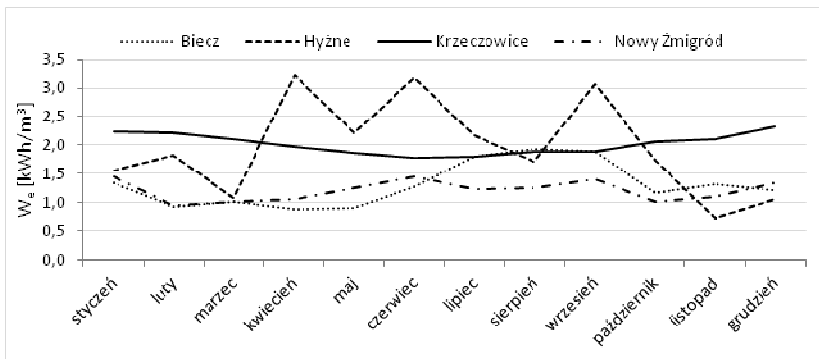
Rys. 2. Wskaźniki jednostkowego zużycie energii elektrycznej w oczyszczalniach ścieków

Fig. 2. Electricity consumption indicators at WWTPs

Analiza tematu jednoznacznie wskazuje, że wzrost przepustowości układu technologicznego determinuje jego energochłonność. Dla przykładu zużycie energii elektrycznej w oczyszczalni ścieków w Krośnie ($Q_{\text{śrd}} = 21\,000\text{ m}^3/\text{d}$, 117 000 RLM) kształtowało się na poziomie $0,37 \div 0,54\text{ kWh/m}^3$ [14]. W oczyszczalni ścieków Sheboygan (USA) przy $Q_{\text{śrd}} = 37\,854\text{ m}^3/\text{d}$ energochłonność technologiczna wyniosła $0,43\text{ kWh/m}^3$ [15], natomiast w oczyszczalni w Rzeszowie ($Q_{\text{śrd}} = 40\,000\text{ m}^3/\text{d}$) średnie zużycie energii elektrycznej wyniosło $0,541\text{ kWh/m}^3$ [13].

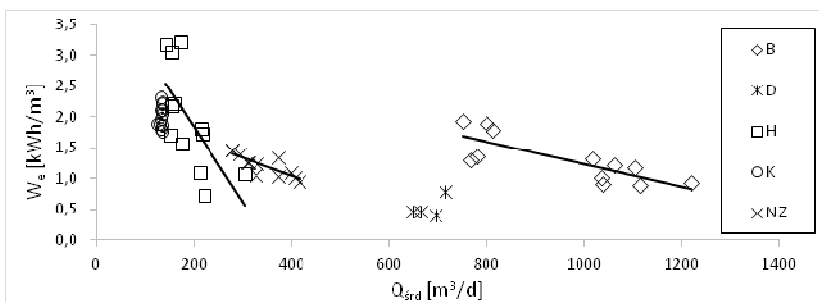
Największe wahania energochłonności systemu oczyszczania ścieków odnotowano w Hyżnem, a najmniejsze w Nowym Żmigrodzie i Krzeczowicach (rys. 3). Analiza statystyczna wykazała zależności zużycia energii elektrycznej od objętości oczyszczanych ścieków (rys. 4). Uzyskane współczynniki korelacji r dla poszczególnych obiektów były zróżnicowane. Dla oczyszczalni w Biecu i Nowym Żmigrodzie współczynniki korelacji r wyniosły odpowiednio 0,802 ($R^2 = 0,6429$) i 0,817 ($R^2 = 0,6677$), co świadczy o istotnej statystycznie zależności pomiędzy zużywaną energią a strumieniem ścieków dopływających do oczyszczalni. W przypadku

oczyszczalni w Hyżnym stwierdzono jedynie korelację umiarkowaną $r = 0,674$ ($R^2 = 0,4546$). Uzyskany dla oczyszczalni w Krzeczowicach współczynnik korelacji na poziomie $r = 0,405$ ($R^2 = 0,1638$) świadczy o słabej zależności między zużyciem energii a obciążeniem hydraulicznym obiektu.



Rys. 3. Zmienność zużycia energii elektrycznej w oczyszczalniach ścieków

Fig. 3. Change of energy consumption indicators at WWTPs



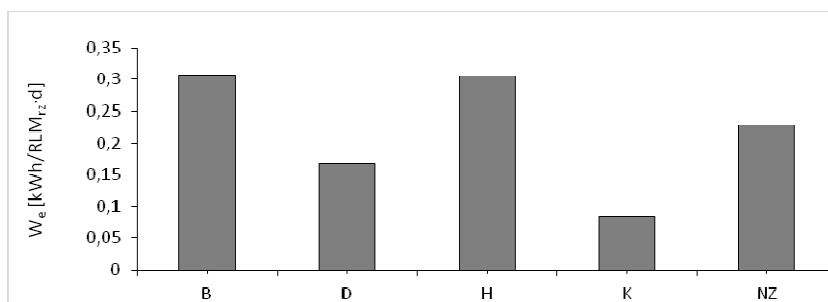
Rys. 4. Wpływ obciążenia hydraulicznego na zużycie energii elektrycznej

Fig. 4. Impact of hydraulic load of WWTP on electricity consumption

Analiza układu technologicznego wykazała, że najniższe zużycie energii elektrycznej jest dla systemu osadnik Imhoffa + komora osadu czynnego. Również niskie wartości wskaźnika W_e stwierdzono dla sekwencyjnych reaktorów porcjowych. Warto również zaznaczyć, że oczyszczalnie z reaktorami SBR charakteryzowały się najbardziej stabilnym zużyciem energii. Uzyskane wyniki W_e dla oczyszczalni SBR są zbliżone do wartości prezentowanych w literaturze. Energochłonność systemów SBR w odniesieniu do małych i średnich oczyszczalni ścieków kształtuje się bowiem na poziomie $0,8 \div 2,0 \text{ kWh/m}^3$ [16]. Analizując systemy napowietrzania osadu czynnego w rozpatrywanych obiektach, nie stwierdzono powiązania z zużyciem energii elektrycznej. Przedmiotowe oczyszczalnie ścieków z osadem czynnym charakteryzowały się różnorodnymi systemami napowietrzania, jednak dominowały systemy napowietrzania drobnopęcherzykowego. Napowietrzanie bioreaktorów charakteryzuje się wysokim zapotrzebowaniem na energię

elektryczną, wobec czego celowa staje się jej minimalizacja. Do najprostszych działań w tym zakresie należy monitoring zużycia sprężonego powietrza dostarczanego do reaktora, pomiar parametrów procesu napowietrzania (czas pracy dmuchaw, pomiar bieżącego i łącznego zużycia sprężonego powietrza, pomiar wartości i zakresu zmian ciśnienia), określenie sprawności sprężania przez dmuchawy poprzez porównanie zużycia energii elektrycznej ze strumieniem dostarczanego powietrza lub określenie profilu zużycia energii w odniesieniu do zapotrzebowania na sprężone powietrze (tlen) w różnych okresach funkcjonowania oczyszczalni. Bardziej złożone metody zmniejszenia energochłonności układu napowietrzania polegają natomiast na wyposażeniu bioreaktorów w inteligentny system sterowania pracą dmuchaw z wykorzystaniem pomiarów on-line stężenia $N-NH_4$ i $N-NO_3$.

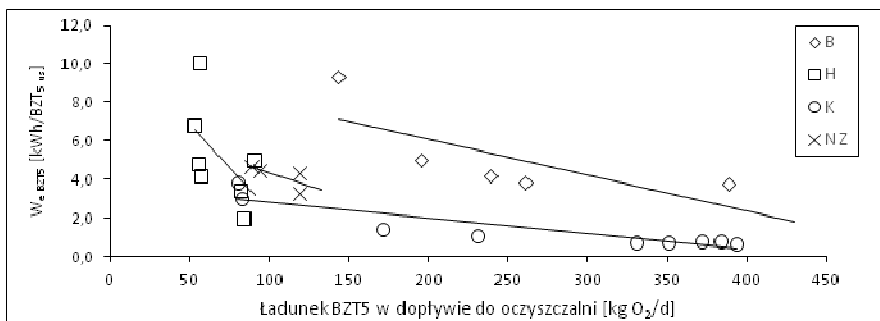
Analiza energochłonności oczyszczalni ścieków komunalnych w odniesieniu do obciążenia substratowego oczyszczalni wyrażanego w W_{eRLM} pozwala określić efektywność ekonomiczną usuwania zanieczyszczeń ze ścieków. Przedmiotowe obiekty funkcjonowały przy bardzo różnym obciążeniu substratowym, niższym od projektowanego. Obciążenie oczyszczalni ścieków wyrażone równoważną liczbą mieszkańców w 2016 roku stanowiło: 4607 RLM (B), 2307 RLM (D), 1139 RLM (H), 4437 RLM (K) i 1819 RLM (NŻ). Wskaźniki zużycia energii elektrycznej W_{eRLM} kształtowały się na poziomie $0,225 \div 0,541$ kWh/(RLM_{tz}·d), $0,110 \div 0,216$ kWh/(RLM_{tz}·d), $0,116 \div 0,594$ kWh/(RLM_{tz}·d), $0,038 \div 0,213$ kWh/(RLM_{tz}·d) i $0,179 \div 0,274$ kWh/(RLM_{tz}·d), określone odpowiednio dla oczyszczalni w Bieczu, Dynowie, Hyżnem, Krzeczowicach i Nowym Żmigrodzie. Średnie wartości wskaźników W_{eRLM} przedstawiono na rysunku 5. Najwyższe wartości notowane są dla oczyszczalni w Bieczu i Hyżnem (odpowiednio 0,307 i 0,306 kWh/(RLM_{tz}·d)), natomiast najniższe w Krzeczowicach (< 0,1 kWh/(RLM_{tz}·d)). Analiza wyników umożliwiła również obliczenie rocznego zużycia energii elektrycznej w odniesieniu do RLM: 96,16 kWh/(RLM_{tz}·a) (B), 57,03 kWh/(RLM_{tz}·a) (D), 112,3 kWh/(RLM_{tz}·a) (H), 22,10 kWh/(RLM_{tz}·a) (K), 82,21 kWh/(RLM_{tz}·a) (NŻ). Najniższe wartości wskaźników energochłonności w odniesieniu do RLM stwierdzono w przypadku systemów z osadnikiem Imhoffa w części mechanicznej, z kolei najwyższe uzyskano w oczyszczalniach w Hyżnem i Bieczu.



Rys. 5. Wskaźnik zużycia energii elektrycznej w odniesieniu do ładunku zanieczyszczeń organicznych w ściekach dopływających do oczyszczalni

Fig. 5. The electricity consumption indicator in relation to the organic pollutants load in wastewater flowing into the WWTP

Wszystkie oczyszczalnie ścieków funkcjonowały przy różnym obciążeniu substratowym w zakresie od 53,1 do 393,8 kg O₂/d. Niskie obciążenie ładunkiem związków organicznych wyrażonych BZT₅ reprezentował obiekt w Hyżnem. Z kolei oczyszczalnie w Bieczu i Krzeczowicach charakteryzowały się bardzo szerokim spektrum ładunku w dopływie. Średni ładunek BZT₅ w ściekach surowych wynosił odpowiednio: 276,4 kg O₂/d (B), 68,3 kg O₂/d (H), 266,2 kg O₂/d (K) i 109,2 kg O₂/d (NŻ). Analiza danych wskazuje, że w miarę wzrostu ładunku zanieczyszczeń w dopływie do oczyszczalni następuje obniżenie energochłonności technologicznej obiektu (rys. 6). Oznacza to, że procesy oczyszczania ścieków stają się bardziej ekonomiczne przy większym ładunku zanieczyszczeń w ściekach. Dokonano analizy zależności zużycia energii elektrycznej od dopływającego ładunku zanieczyszczeń organicznych, przy czym uzyskane współczynniki korelacji r dla poszczególnych obiektów były zróżnicowane. Dla oczyszczalni w Krzeczowicach współczynnik korelacji r osiągnął wartość równą 0,898 ($R^2 = 0,8076$), co świadczy o istotnej statystycznie zależności pomiędzy zużyciem energii a ładunkiem w ściekach dopływających do oczyszczalni. Natomiast dla oczyszczalni w Bieczu stwierdzono korelację umiarkowaną $r = 0,730$ ($R^2 = 0,5337$). Dla pozostałych obiektów nie stwierdzono istotnych statystycznie zależności.



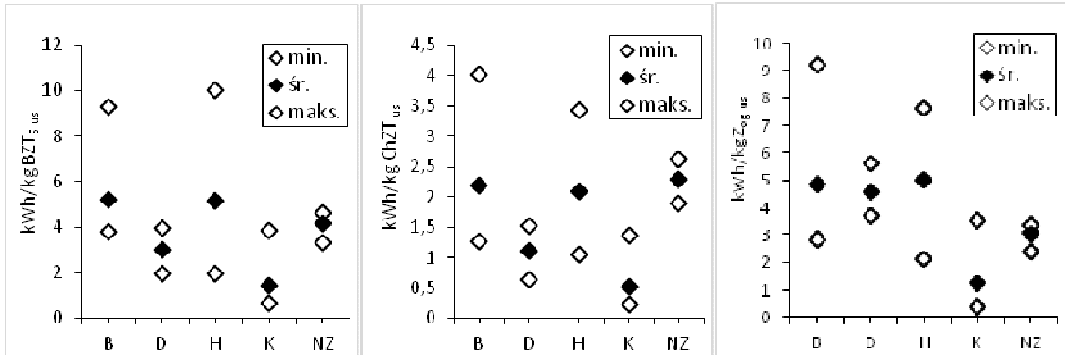
Rys. 6. Wpływ ładunku zanieczyszczeń na wskaźnik zużycia energii elektrycznej

Fig. 6. Impact of pollutant load on electricity consumption indicator

Na rysunku 7 przedstawiono zakres wskaźników zużycia energii elektrycznej w odniesieniu do usuniętego ładunku zanieczyszczeń. W każdej z rozpatrywanych oczyszczalni ścieków w roku 2016 wskaźniki te zmieniały się w dużym stopniu. Największy rozrzut wyników odnotowano w oczyszczalni w Hyżnem, natomiast najmniejszy dla obiektu w Nowym Żmigrodzie.

Średni wskaźnik $W_{e,BZT5}$ kształtował się na poziomie 5,224 kWh/kg BZT_{5 us}, 3,02 kWh/kg BZT_{5 us}, 5,185 kWh/kg BZT_{5 us}, 1,46 kWh/kg BZT_{5 us} i 4,646 kWh/kg BZT_{5 us} odpowiednio dla układu technologicznego w Bieczu, Dynowie, Hyżnem, Krzeczowicach i Nowym Żmigrodzie. Uzyskane wyniki są zbliżone do wartości przedstawionych w literaturze przedmiotu. W małych i średnich oczyszczalniach ścieków na Słowacji wskaźnik $W_{e,BZT5}$ oscylował w przedziale od 1,1 do 6,09 kWh/kg

$BZT_{5\text{ us}}$ przy średniej wartości równej 2,27 kWh/kg $BZT_{5\text{ us}}$ [6]. W przypadku obiektów o większej przepustowości wskaźnik zużycia energii maleje [6, 17]. Przykładowo w oczyszczalni ścieków w Bratysławie zużycie energii elektrycznej wyniosło 1,92 kWh/kg $BZT_{5\text{ us}}$, a w Budapeszcie-Południe już 0,95 kWh/kg $BZT_{5\text{ us}}$ [6].



Rys. 7. Wskaźniki zużycia energii elektrycznej w odniesieniu do usuwanego ładunku zanieczyszczeń ze ścieków

Fig. 7. Electricity consumption indicators for removal of pollutant load from wastewater

Średni wskaźnik $W_{e\text{ ChZT}}$ w poszczególnych obiektach wyniósł: 2,196 kWh/kg $ChZT_{\text{us}}$ (B), 1,102 kWh/kg $ChZT_{\text{us}}$ (D), 2,1 kWh/kg $ChZT_{\text{us}}$ (H), 0,528 kWh/kg $ChZT_{\text{us}}$ (K), 2,297 kWh/kg $ChZT_{\text{us}}$ (NŻ). Najwyższe wartości zaobserwowano w oczyszczalniach z SBR-ami, a najniższe z osadnikami Imhoffa. Uzyskane wskaźniki $W_{e\text{ ChZT}}$ są zbieżne z danymi literaturowymi. Longo i inni [17] wykazali, że obiekty o wielkości poniżej 2000 RLM charakteryzują się zużyciem energii elektrycznej na poziomie 3,01 kWh/kg $ChZT_{\text{us}}$, a systemy o wielkości $RLM = 2000 \div 10\,000$ wykazują już zużycie mniejsze o połowę, tj. 1,54 kWh/kg $ChZT_{\text{us}}$. W innych badaniach Saghafi i inni w oczyszczalni ścieków w Amil (Iran) o wydajności $Q_{\text{śrd}} = 1100\text{ m}^3/\text{d}$ odnotowali zużycie energii na poziomie 1,376÷1,412 kWh/kg $ChZT_{\text{us}}$ [7].

Energochłonność oczyszczalni ścieków w przeliczeniu na usunięty ładunek zawiesiny ogólnej ($W_{e\text{ z}}$) wyniosła średnio 4,857 kWh/kg Z_{og} (B), 4,591 kWh/kg Z_{og} (D), 4,99 kWh/kg Z_{og} (H), 1,266 kWh/kg Z_{og} (K) i 3,355 kWh/kg Z_{og} (NŻ). Nie stwierdzono zależności pomiędzy energochłonnością obiektu ($W_{e\text{ z}}$) a wyposażeniem oczyszczalni ścieków. Najwyższe wartości wskaźnika $W_{e\text{ z}}$ stwierdzono w oczyszczalniach w Bieczu, Dynowie i Hyżnem, z kolei najniższe w Krzeczowicach.

Wnioski

1. Zużycie energii elektrycznej przedmiotowych oczyszczalni ścieków w 2016 r. kształtowało się na poziomie od 0,307 do 3,225 kWh/m³, przy czym średnia wartość wskaźnika zużycia energii elektrycznej wyniosła: 1,26 kWh/m³ (Biecz);

- 0,525 kWh/m³ (Dynów); 1,963 kWh/m³ (Hyżne); 2,021 kWh/m³ (Krzeczowice) i 1,217 kWh/m³ (Nowy Żmigród). Zużycie energii elektrycznej przedmiotowych systemów oczyszczania ścieków jest stosunkowo duże i zbliżone do energochłonności oczyszczalni o podobnej przepustowości. Energochłonność analizowanych oczyszczalni ścieków komunalnych nie była zharmonizowana z wahaniami obciążenia hydraulicznego.
2. Najniższe zużycie energii elektrycznej odnotowano dla systemu osadnik Imhoffa + komora osadu czynnego. Również niskie wartości energochłonności stwierdzono dla sekwencyjnych reaktorów porcjowych. Oczyszczalnie ścieków z reaktorami SBR charakteryzowały się z kolei najbardziej stabilnym zużyciem energii.
 3. Analizowane obiekty charakteryzowały się niższymi wartościami RLM w stosunku do założeń projektowych. Roczne zużycie energii elektrycznej zmieniało się od 22,10 do 112,3 kWh/(RLM_{rz}·a).
 4. W miarę wzrostu ładunku zanieczyszczeń w dopływie do oczyszczalni następuje obniżenie energochłonności obiektu. Średni wskaźnik zużycia energii w odniesieniu do ładunku zanieczyszczeń kształtował się na poziomie 5,224 kWh/kg BZT_{5 us}, 3,02 kWh/kg BZT_{5 us}, 5,185 kWh/kg BZT_{5 us}, 1,46 kWh/kg BZT_{5 us} i 4,646 kWh/kg BZT_{5 us} odpowiednio dla oczyszczalni w Bieczu, Dynowie, Hyżnem, Krzeczowicach i Nowym Żmigrodzie. Uzyskane wyniki są zbliżone do wartości przedstawionych w literaturze przedmiotu (1,1÷6,09 kWh/kg BZT_{5 us}).
 5. Znajomość wskaźników energochłonności systemów oczyszczania ścieków pozwala wybrać najbardziej efektywny ekonomicznie wariant technologiczny na etapie budowy bądź modernizacji układu.

Literatura

- [1] Materiały informacyjne firmy AERZEN.
- [2] Reinders M., Greditgk-Hoffamn S., Risse H., Lange M., Solution approaches for energy optimization in the water sector, IWA World Congress on water, Climate and Energy, Dublin, Ireland, 2012 May 13-18.
- [3] Faladori P., Vaccari M., Vitali F., Energy audit in small wastewater treatment plants: methodology, energy consumption indicators and lesson learned, Water, Science and Technology 2015, 72(6), 1007-1015.
- [4] Fundación OPTI, Estudio de Prospectiva, Consumo energético en el sector del agua, 2012.
- [5] Goldstein R., Smith W., US Electricity Consumption for Water Supply & Treatment - the Next Half Century, Electric Power Research Institute, Water & Sustainability (volume 4), 2002.
- [6] Bodík I., Kubáská M., Energy and sustainability of operation of a wastewater treatment plant, Environment Protection Engineering 2013, 39(2), 15-24.
- [7] Saghafi S., Mehrdadi N., Nabi Bid Hendy G., Amini Rad H., Energy efficiency in wastewater treatment plant emphasizing on COD removal: a case study of Amol Industrial Zone, Iran, Canadian Journal of Pure and Applied Sciences 2015, 9(2), 3441-3448.
- [8] Henriques J., Catarino J., Sustainable value - An energy efficiency indicator in wastewater treatment plants, Journal of Cleaner Production 2017, 142, 323-330.
- [9] Stanowisko na temat innowacyjnego wykorzystania ścieków jako źródła energii i zasobów, Senat Rzeczypospolitej Polskiej, Komisja Środowiska, Warszawa, 17 marca 2016 r. BPS/KS/330/12/16.

- [10] Łuszczek B., Wybrane problemy dotyczące efektywności energetycznej w oczyszczalni ścieków z uwzględnieniem termicznego przekształcania osadów, Konferencja Techniczna Stabilizacja komunalnych osadów ściekowych oraz bilans energetyczny w systemach przeróbki osadów ściekowych, Warszawa 7-8 marca 2017.
- [11] De Vrieze J., Smet D., Klok J., Colsen J., Angenent L.T., Vlaemick S.E., Thermophilic sludge digestion improves Energy balance and nutrient recovery potential in full-scale municipal wastewater treatment plants, *Bioresource Technology* 2016, 2118, 1237-1245.
- [12] Bocheński D., Sadecka Z., Sieciechowicz A., Suchowska-Kieislewicz M., Płuciennik-Koropczuk E., Efektywność energetyczna oczyszczalni ścieków, *Gaz, Woda i Technika Sanitarna* 2016, 11, 403-406.
- [13] Masłoń A., Tendera K., Gospodarka osadami ściekowymi w oczyszczalni ścieków Rzeszów, *Forum Eksploatatora* 2017, 1(88), 38-45.
- [14] Trojanowicz K., Karamus L., Energetyczna utylizacja biogazu jako element gospodarki osadowej w oczyszczalni w Krośnie, *Forum Eksploatatora* 2016, 4(85), 46-53.
- [15] Wang H., Yang Y., Keller A.A., Li X., Feng S., Dong Y., Li F., Comparative analysis of energy intensity and carbon emissions in wastewater treatment in USA, Germany, China and South Africa, *Applied Energy* 2016, 184, 873-881.
- [16] Masłoń A., Tomaszek J.A., Sekwencyjne reaktory porcjowe. Podstawy technologii, zasady projektowania i przykłady zastosowań, Wydawnictwo Seidel-Przywecki, Warszawa 2017.
- [17] Longo S., d'Antoni B.M., Bongards M., Chaparro A., Cronrath A., Fatone F., Lema J.M., Mauricio-Iglesias M., Soares A., Hospido A., Monitoring and diagnosis of energy consumption in wastewater treatment plants. A state of the art. And proposals for improvement, *Applied Energy* 2016, 176, 1251-1268.

Rzeszów University of Technology, Faculty of Civil and Environmental Engineering and Architecture, Department of Environmental Engineering and Chemistry
al. Powstańców Warszawy 6, 35-959 Rzeszów
e-mail: amaslon@prz.edu.pl

Streszczenie

W ostatnich latach efektywność energetyczna w branży wodno-ściekowej zyskuje coraz bardziej na znaczeniu, bowiem same oczyszczalnie ścieków odpowiedzialne są za blisko 35% zużycia energii ze wszystkich obiektów komunalnych. Obecnie oczyszczalnie ścieków są już największymi odbiorcami energii elektrycznej. Przykładowo całkowite zużycie energii 10 tys. oczyszczalni wynosi ok. 4400 GWh/rok, co odpowiada zapotrzebowaniu 900 tys. 4-osobowych gospodarstw domowych. Największe zapotrzebowanie na energię elektryczną wymagane jest przede wszystkim do biologicznego oczyszczania ścieków. W systemach z osadem czynnym zużycie energii elektrycznej do napowietrzania bioreaktorów kształtuje się na poziomie 40÷50%, a w niektórych przypadkach może osiągać poziom nawet 60÷80%. Koszty energii elektrycznej zużywanej w systemach oczyszczania ścieków są znaczące. Wzrost standardów oczyszczania ścieków obserwowany w ostatnim czasie powoduje dalszy wzrost zapotrzebowania na energię. Wobec tego zasadne staje się opracowanie audytów energetycznych dla systemów oczyszczania ścieków, na podstawie których możliwe jest wyznaczenie energochłonności jednostkowych procesów oczyszczania, a tym samym określenie oszczędności energii w takich obiektach.

W pracy zaprezentowano zużycie energii elektrycznej w wybranych oczyszczalniach ścieków komunalnych zlokalizowanych w południowo-wschodniej Polsce - Biecz, Dynów, Hyżne, Krzeczowice i Nowy Żmigród. Na podstawie danych eksploatacyjnych dokonano oceny zużycia energii wybranych obiektów oraz określono podstawowe współczynniki energochłonności w odniesieniu do przepływu, usuwanego ładunku zanieczyszczeń i obciążenia substratowego oczyszczalni.

Słowa kluczowe: oczyszczanie ścieków, energochłonność, zużycie energii elektrycznej