

ANALIZA WYBRANYCH PARAMETRÓW PRACY OCZYSZCZALNI W TECHNOLOGII „LEMNA” NA PRZYKŁADZIE GMINNEJ OCZYSZCZALNI ŚCIEKÓW W CHMIELNIKU (WOJ. PODKARPACKIE)

Łukasz Jurczyk¹, Justyna Koc-Jurczyk¹, Katarzyna Winiarska¹

¹ Uniwersytet Rzeszowski, Wydział Biologiczno-Rolniczy, Katedra Biologicznych Podstaw Rolnictwa i Edukacji Środowiskowej, ul. Ćwiklińskiej 1a, 35-601 Rzeszów, e-mail: jjurczyk@ur.edu.pl

STRESZCZENIE

W pracy przedstawiono analizę pracy gminnej oczyszczalni ścieków typu „Lemna”, a badaniami objęto okres siedmiu lat (2009–2015). Badano sprawność usuwania takich wskaźników jak BZT₅, ChZT oraz zawiesiny ogólnej. Pomimo bardzo wysokiej zmienności stężeń w ściekach dopływających, we wszystkich przypadkach stwierdzono wysoką skuteczność i niezawodność działania instalacji. Średnia efektywność usuwania zanieczyszczeń organicznych i zawiesiny ogólnej wyniosła 94,23% BZT₅, 82,55% ChZT oraz 76% zawiesiny ogólnej i była dodatnio skorelowana z obciążeniem tymi parametrami ścieków surowych.

Słowa kluczowe: ścieki komunalne, Lemna, oczyszczanie ścieków, efektywność oczyszczania, wskaźnik niezawodności

ANALYSIS OF SELECTED OPERATIONAL PARAMETERS OF „LEMNA” TREATMENT PLANT, ON THE EXAMPLE OF THE MWWTP IN CHMIELNIK (POLAND, SUBCARPATHIAN PROVINCE)

ABSTRACT

In this paper the analysis of „Lemna” municipal treatment plant performance is reported, the study covered a period of seven years (2009–2015). The efficiency of removal of such indicators as BOD₅, COD and total suspended solids were examined. Despite the very high variability of concentrations in raw wastewater, high efficiency and reliability of the installation was found in all cases. The average removal efficiency of organic compounds and total solids was 94.23% for BOD₅, 82.55% for COD and 76% for total suspended solids; moreover, it was positively correlated with the load on these parameters in inflow.

Keywords: municipal wastewater, Lemna, wastewater treatment, treatment efficiency, reliability index

WSTĘP

Wraz z poprawą standardów życia obywateli naszego kraju, wzrasta problem zanieczyszczenia środowiska naturalnego, a zwłaszcza wody będącej podstawowym warunkowo odnawialnym naturalnym zasobem. Jednym z głównych czynników powodujących zanieczyszczenie wód powierzchniowych i gruntowych są ścieki, definiowane przez Hartmana [1996] jako woda, która w wyniku użycia uległa zmianom fizycznym,

chemicznym czy biologicznym i z tego powodu, nie może być już użyta do tego samego celu.

Z danych publikowanych przez Główny Urząd Statystyczny [2016] wynika, że w 2015 94,9%, ścieków komunalnych odprowadzanych do wód i gruntu na terenie kraju było uprzednio poddanych procesom oczyszczania, w województwie podkarpackim wskaźnik ten jest nieznacznie wyższy i wynosi 98,4%.

O ile problem odprowadzania i oczyszczania ścieków pochodzących z dużych miast Polski,

jest w większości kontrolowany, a występujące niekiedy nieprawidłowości usuwane stopniowo, poprzez modyfikację istniejących już, wielkoskalowych instalacji, niewielkie ciekłe wodne płynące przez tereny wiejskie są w wielu miejscach nadmiernie obciążone ładunkiem zanieczyszczeń, z powodu niedostatecznych rozwiązań gospodarki wodno-ściekowej. Spośród 2174 gmin wiejskich (stan z 31.12.2015), 89% jest obsługiwanych przez instalacje do oczyszczalni ścieków, w tym 64% przez oczyszczalnie biologiczne, a 36% z możliwością podwyższonego usuwania biogenów. Ilość ścieków oczyszczanych w ten sposób szacowana jest na 289,6 hm³, z czego 0,1% poddawanych jest tylko procesom mechanicznym, 34% biologicznym, a 65,9% podwyższonemu usuwaniu biogenów. Natomiast stan gospodarki ściekowej w gminach wiejskich województwa podkarpackiego charakteryzowały następujące dane: ze 141 spośród 144 gmin wiejskich ścieki trafiały do oczyszczalni, których 71% było opartych o procesy biologiczne, a 29% z podwyższonym usuwaniem biogenów. Z sieci kanalizacyjnej o łącznej długości ponad 16 tys. km zebrano 58,3 hm³, a z przeznaczonych do oczyszczenia 20,3 hm³, z czego 59,5% procesowano biologicznie. Do fizjograficznych problemów, z jakimi mierzy się gospodarka wodno-ściekowa tego regionu należą; o ile część północna charakteryzuje się relatywnie dużym zagęszczeniem ludności i płaską rzeźbą tereni, o tyle w południowej, rosną różnice w wysokościach względnych i rozproszenie zabudowy. Problemem o naturze hydrologicznej jest też konieczność wykorzystania, jako odborników ścieków oczyszczonych, niewielkich cieków z bardzo silnie zróżnicowanymi przepływami średnimi dobowymi, w których deficyty wody stały się w ostatnich latach regułą, a więc bardzo czułych, z punktu widzenia biocenoz, na przekroczenia dostarczonych ładunków zanieczyszczeń.

W teorii wyróżniamy trzy podstawowe metody oczyszczania ścieków komunalnych, z których w procesie projektowania, istnieje możliwość tworzenia wielostopniowych układów oczyszczania: oczyszczanie fizyczne (często zamiennie stosowane określenie „oczyszczanie mechaniczne” nie oddaje w pełni charakteru wykorzystywanych procesów jednostkowych), oczyszczanie chemiczne oraz oczyszczanie biologiczne [Gołąb et al. 2017]. Zastosowane w praktyce rozwiązania i stopień ich zaawansowania technicznego, zależą w głównej mierze od wielkości instalacji, ponieważ koszty jednostkowe spadają wraz ze wzro-

stem skali. W warunkach dużych aglomeracji miejskich, technologie i urządzenia podnoszące wydajność układów oczyszczania, są konieczne również w celu ograniczenia cennej powierzchni zajmowanej przez instalację, ten problem ma mniejsze znaczenie na terenach wiejskich.

W celu skutecznego i efektywnego oczyszczania ścieków niezbędne jest opracowanie rozwiązań technicznych, które będą odpowiadać lokalnym wymaganiom oraz umożliwią znalezienie odpowiednich rozwiązań ekonomicznych. Jednym z mniej popularnych są oczyszczalnie hydrobotaniczne, zwane również hydrofitowym, w których procesy biologicznego oczyszczania ścieków zachodzą przy udziale zarówno mikroorganizmów heterotroficznych, jak i wyższych roślin wodnych lub ziemno-wodnych (bagiennych). Systemy te często eliminują problem usuwania osadów ściekowych, a wiele z nich może działać nawet kilkadziesiąt lat, bez konieczności ich usuwania z obiektów technologicznych. Zamiast tego uzyskiwana z roślin biomasa może być wykorzystywana bezpośrednio przez lokalne gospodarstwa rolne i hodowlane, redukując koszty i sprzyjając ekologizacji rolnictwa, a także zasilać lokalne biogazownie rolnicze [Ge et al. 2012, Adhikari et al. 2015, Iatrou et al. 2015, Gołąb et al. 2017].

Roślinami najczęściej stosowanymi w praktyce inżynierskiej są: trzcina pospolita (*Phragmites australis* [Cav.] Trin. ex Steudel), pałka szerokolistna (*Typha latifolia* L.), manna mielec (*Glyceria axima* (Hartm.) Holmb.), kosaniec żółty (*Iris pseudacorus* L.), wierzba wiciowa (*Salix iminalis* L.) czy rzęsa drobna (*Lemna minor* L.) [Gajewska et al. 2010, Vymazal 2011]. Jedną z istotnych zalet tego rodzaju technologii jest możliwość oczyszczania ścieków pochodzących z niewielkich zbiorowisk ludzkich: małych wsi, osiedli a nawet pojedynczych gospodarstw [Verma and Suthar 2015]. Systemy hydrofitowe mogą być również wykorzystywane do oczyszczania lub stabilizacji ścieków jako kolejny stopień wstępnym mechanicznym lub biologicznym etapie [Gajewska et al. 2010]. Za pierwszych, którzy wdrożyli technologię oczyszczania ścieków metodą „Lemna” uważa się zespół amerykański, który w roku 1985 opatentował sposób oczyszczania ścieków z wykorzystaniem rzęsy wodnej. Oczyszczalnia tego typu jest projektowana zazwyczaj jako trójstopniowa; składa się z części mechanicznej, stawu napowietrzanego oraz stawu roślinnego (zasadniczego, doczyszczającego-

go), pomiędzy którymi projektuje się niekiedy nityfikatory sprzężony z dozownikiem koagulantu. Podstawowymi zaletami takich instalacji, oprócz wymienionych wyżej, są niskie koszty i nieskomplikowana eksploatacja, a gatunki rodzaju Lemna, charakteryzujące się wysokim tempem rozmnażania wegetatywnego (krótkim czasem wzrostu biomasy), jako nitrofile dobrze znoszą kontakt ze ściekami komunalnymi, ich biomasa można usuwać mechanicznie z okrębu zbiornika i jest szybko rozkładalna na drodze biologicznej. Oczyszczalnie hydrobotaniczne są specyficznym sposobem wykorzystania OZE w inżynierii środowiska – tam gdzie dla utrzymania osadu czynnego niezbędny jest istotny wydatek energii, w oczyszczalni hydrobotanicznej zanieczyszczenia są absorbowane przy bezpośrednim wykorzystaniu energii słonecznej.

Podstawową wadą jest relatywnie wysoka, w stosunku do objętości przerabianych ścieków, powierzchnia obiektu. W ostatnich latach pojawiły się również doniesienia o niskiej efektywności niektórych instalacji tego typu. Dlatego w pracy poddano analizie funkcjonowanie mechaniczno-biologicznej oczyszczalni ścieków typu „Lemna” w Chmielniku (woj. Podkarpackie), opierając się na ocenie stężeń wybranych wskaźników zanieczyszczeń: BZT₅, ChZT oraz zawiesiny ogólnej w latach 2009–2015.

MATERIAŁY I METODY

Charakterystyka obiektu

Analizowana oczyszczalnia położona jest w miejscowości Chmielnik w powiecie rzeszowskim w województwie podkarpackim. Została uruchomiona w 1996 roku i zajmuje powierzchnię 5,44 ha. W analizowanym okresie czasu na oczyszczalnię nie były doprowadzane ścieki przemysłowe, ani wody opadowo-roztopowe, a zarówno ścieki transportowane gminnym kolektorem sanitarnym, jak i dowożone na oczysz-

czalnię taborem asenizacyjnym stanowiły typowe ścieki sanitarno-bytowe wytwarzane przez gospodarstwa domowe i instytucje użyteczności publicznej. Obecny stan formalno-prawny w zakresie wprowadzania oczyszczonych ścieków do wód odbiornika uregulowany został pozwoleniem wodno-prawnym udzielonym Gminie Chmielnik decyzją Starosty Rzeszowskiego z dnia 20 maja 2003 roku (Oś 6223–3/5/03) z późniejszym uaktualnieniem w 2013 roku. Dopuszczalne ilości oraz koncentracje parametrów, jakimi powinny charakteryzować się oczyszczone ścieki przed wprowadzeniem ich do wód potoku Chmielnik przedstawiono w tabeli 1.

Zalecenia ogólnie mówią, aby odprowadzane do odbiornika ścieki oczyszczone nie zawierały odpadów stałych oraz ciał pływających, ścieki nie powodowały w wodach odbiornika zmian w naturalnej charakterystycznej dla niego biocenozie, zmian jego naturalnej mętności, barwy, zapachu oraz powstawania piany czy osadu.

Analiza wyników

W próbkach ścieków surowych i oczyszczonych, pobieranych zgodnie z normą (PN-ISO 5667–10:1997) raz na kwartał, analizowano stężenia substancji organicznych wyrażonych jako: pięciodobowe biochemiczne zapotrzebowanie na tlen (BZT₅, oznaczone metodą respirometryczną zgodnie z normą DIN EN 1899–1/EN 1899–2), chemiczne zapotrzebowanie na tlen (ChZT, oznaczone metodą kolorymetryczną zgodnie z normą PN-ISO 6060:2006) oraz zawiesinę ogólną (Z_{og}, oznaczoną metodą wagową po wysuszeniu w 103–105°C).

Na podstawie tak uzyskanych danych obliczono podstawowe statystyki opisowe [Statistica 10.] i dokonano analizy efektywności usuwania zanieczyszczeń zgodnie ze wzorem:

$$E = ((\mu_y - \mu_x) / \mu_y) * 100 \quad (1)$$

Tabela 1. Dopuszczalne wartości parametrów ilościowych i jakościowych dla ścieków oczyszczonych
Table 1. Acceptable values of quantitative and qualitative parameters in the effluent

Parametry ilościowe		Parametry jakościowe		
			normatywne	awaryjne
Q _{śr.d} [m ³ /d]	850	BZT ₅ [mg/l]	≤ 25	37,5
Q _{max,h} [m ³ /h]	55,25	ChZT [mg/l]	≤ 125	187,5
Q _{max,r} [m ³ /rok]	372,30	Z _{og} [mg/l]	≤ 35	52,5



Rys. 1. Oczyszczalnia typu Lemna w Chmielniku: P- piaskownik, N- stawy napowietrzane, R- stawy roślinne; widoczne charakterystyczne profile z tworzywa sztucznego, utrzymujące roślinność i ułatwiające jej zbieranie (źródło: geoportal). Po prawej widok na staw roślinny (fot. K.Winiarska)

Fig. 1. Lemna WWTP in Chmielnik: P- sand separator, N- aerated ponds, R- lemna pond; characteristic plastic profiles are visible, that help in maintaining the vegetation and facilitating its collection. View on lemna pond on the right (photo K.Winiarska)

Obliczono również współczynnik niezawodności działania instalacji zgodnie ze wzorem [Wałęga 2009]:

$$W_N = \mu_x / X_{dop} \quad (2)$$

gdzie: μ_y – wartość średnia wskaźnika zanieczyszczeń w ściekach surowych [mg/dm^3]

μ_x – wartość średnia wskaźnika zanieczyszczeń w ściekach oczyszczonych [mg/dm^3]

X_{dop} – wartość dopuszczalna danego wskaźnika zanieczyszczeń w ściekach oczyszczonych [mg/dm^3]

WYNIKI I DISKUSJA

Idea działania oczyszczalni hydrofitowych polega na przepływie ścieków zawierających substancje organiczne zarówno w fazie ciekłej (w postaci rozpuszczonej) oraz w fazie stałej (w zawieszynie), pod powierzchnią złoża porośniętego roślinnością hydrofitową, co powoduje eliminację zanieczyszczeń w wyniku procesów sorpcji, reakcji utleniająco-redukcyjnych oraz biologicznej aktywności mikroorganizmów i roślin. Rośliny hydrofitowe wpływają przede wszystkim na przebieg reakcji nityfikacji i denityfikacji, w wyniku której azot amonowy ulega przekształceniu

do formy cząsteczkowej [Bugajski 2006], ale ich zadaniem jest również utrzymanie przewodności hydraulicznej, zwiększeniu powierzchni sorpcji i błony biologicznej. Ilość pierwiastków, które mogą pobrać i zakumulować rośliny w swych tkankach zależy w głównej mierze od gatunku rośliny, tempa wzrostu jej biomasy, zakresu tolerancji ekologicznej oraz kondycji. Szybkość oraz stopień eliminacji zanieczyszczeń w systemach gruntowo-roślinnych zależy przede wszystkim od dostępności tlenu, który warunkuje prawidłowy przebieg procesu mineralizacji. W instalacjach hydrofitowych substancja organiczna może ulec mineralizacji przez błonę biologiczną, która powstaje na korzeniach roślin oraz na cząstkach wypełnienia złoża. Taki rodzaj oczyszczania zapewnia wysoki stopień redukcji wskaźników BZT_5 , ChZT oraz zawiesiny ogólnej.

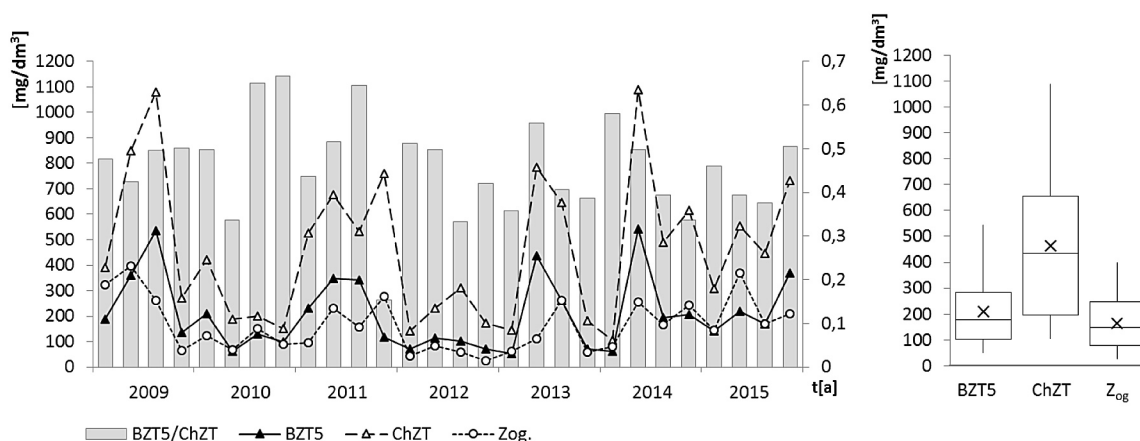
W analizowanym okresie, jakość ścieków surowych, dopływających do oczyszczalni, charakteryzowała się zróżnicowaniem sezonowym, charakterystycznym dla ścieków komunalnych (tab. 2, rys. 2).

Z danych obejmujących cały analizowany okres pracy oczyszczalni wynika, że w ściekach surowych, stężenia substancji organicznych wyrażonych jako BZT_5 ulegało znacznym wahaniom w zakresie $496 \text{ mg}/\text{dm}^3$ przy średniej wartości $208 \text{ mg}/\text{dm}^3$; maksymalne wartości stwierdzono w II kwartale 2014 ($543 \text{ mg}/\text{dm}^3$), a minimalne ($51,6 \text{ mg}/\text{dm}^3$) w I kwartale 2013). We wszystkich

Tabela 2. Zestawienie statystyk opisowych wartości wskaźników zanieczyszczeń w ściekach surowych i oczyszczonych dla oczyszczalni w Chmielniku w latach 2009–2015

Table 2. Values of descriptive statistics parameters in raw wastewater and effluent from WWTP in Chmielnik during years 2009–2015

Miara	BZT ₅ [mg/dm ³]		E [%] WN	ChZT [mg/dm ³]		E [%] WN	Z _{og} [mg/dm ³]		E [%] WN	BZT/ChZT	
	surowe	oczyszczzone		surowe	oczyszczzone		surowe	oczyszczzone		surowe	oczyszczzone
Średnia	208,9	7,2	94,1 0,3	464,1	53,9	81,5 0,4	163,4	9,2	90,7 0,3	0,5	0,1
Min.	51,6	1,7	77,0 0,1	105,0	30,0	24,8 0,2	25,0	2,0	55,2 0,1	0,2	0,0
Precentyl 25	102,3	4,4		197,0	45,3		78,0	4,7			
Mediana	177,5	5,6	96,2 0,2	433,5	50,0	87,0 0,4	147,0	8,6	94,0 0,2	0,5	0,1
Percentyl 75	283,0	9,3		654,5	57,8		247,0	12,0			
Max	543,0	16,6	99,5 0,7	1089	106,0	96,0 0,8	398,0	24,7	98,9 0,7	0,7	0,3



Rys. 2. Zawartość substancji organicznych wyrażonych jako wkaźniki tlenowe BZT₅ i ChZT, zawiesiny ogólnej oraz udziału substancji biodegradowalnych w puli związków organicznych (BZT₅/ChZT) w ściekach dopływających do oczyszczalni. Po prawej statystyki opisowe: rozstęp, górny i dolny kwartyl oraz mediana i średnia (x)

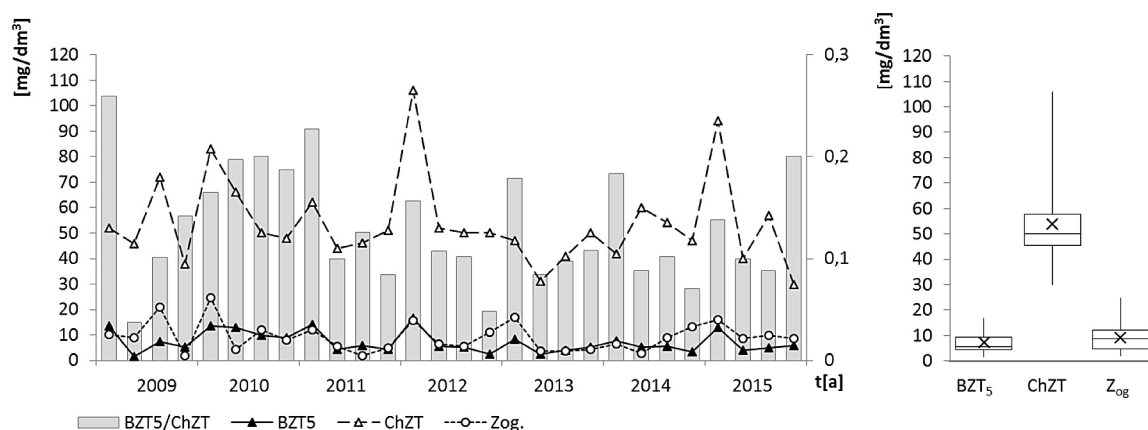
Fig. 2. The content of organic compounds expressed as BOD₅ and COD, total suspended solids and ratio between biodegradable compounds in the pool of organic compounds (BOD₅/COD) in raw wastewater. On the right side descriptive statistics: range, upper and lower quartile, median and average value (x)

przypadkach efektywność usuwania zanieczyszczeń spełniała warunki określone w pozwoleniu wodno-prawnym i wynosiła od 79,4 do 99,53%. Najwyższe stężenie BZT₅ w ściekach oczyszczonych stwierdzono w I kwartale 2012 roku (16,6 mg/dm³), najniższe w II kwartale 2009 roku (1,7 mg/dm³). Proporcja BZT₅/ChZT w ściekach oznacza zdolność do biodegradacji substancji organicznych. W ściekach surowych wahała się znacznie od 0,153 (IV kwartał 2011) do 0,667 (IV kwartał 2010). Po oczyszczeniu wartość średnia obniżyła się z 0,5 do 0,1 (rys. 3).

Stężenie węgla organicznego wyrażonego chemicznym zapotrzebowaniem na tlen w ściekach surowych wynosiło od 150 mg/dm³ (IV

kwartał 2010 roku) do 1089 mg/dm³ (II kwartał 2014 roku), a po procesie oczyszczania od 30 mg/dm³ (IV kwartał 2015 roku) do 106 mg/dm³ (I kwartał 2012 roku) stąd efektywność oczyszczania wyniosła od jedynie 24,8% od 94,6 ale nie stwierdzono przekroczenia dopuszczalnej wartości dla ścieków oczyszczonych wynoszącej 125 mg/dm³ (rys. 3).

Trzecim analizowanym parametrem zanieczyszczeń w ściekach oczyszczonych odprowadzanych do odbiornika oznaczanym zgodnie z regulacjami zawartymi w pozwoleniu wodno-prawnym było stężenie zawiesiny ogólnej. Efektywność usuwania zawiesiny ogólnej ze ścieków w analizowanych latach zmieniała się



Rys. 3. Zawartość substancji organicznych wyrażonych jako wskaźniki tlenowe BZT₅ i ChZT, zawiesiny ogólnej oraz udziału substancji biodegradowalnych w puli związków organicznych (BZT₅/ChZT) w ściekach oczyszczonych. Po prawej statystyki opisowe: rozstęp, górny i dolny kwartył oraz mediana i średnia (x)

Fig. 3. The content of organic compounds expressed as BOD₅ and COD, total suspended solids and ratio between biodegradable compounds in the pool of organic compounds (BOD₅/COD) in effluent. On the right side descriptive statistics: range, upper and lower quartile, median and average value (x)

od 72,09 do 98,72%. Stężenie zawiesiny ogólnej w ściekach dopływających do oczyszczalni wynosiło od 25 mg/dm³ (IV kwartał 2012) do 398 mg/dm³ (II kwartał 2009), zaś w ściekach oczyszczonych, do 2,0 mg/dm³ (IV kwartał 2009 oraz III kwartał 2011) do 24,7 mg/dm³ (I kwartał 2010). Podobnie jak w przypadku związków organicznych nie stwierdzono przekroczeń dopuszczalnego stężenia zawiesiny ogólnej w ściekach oczyszczonych (rys. 3).

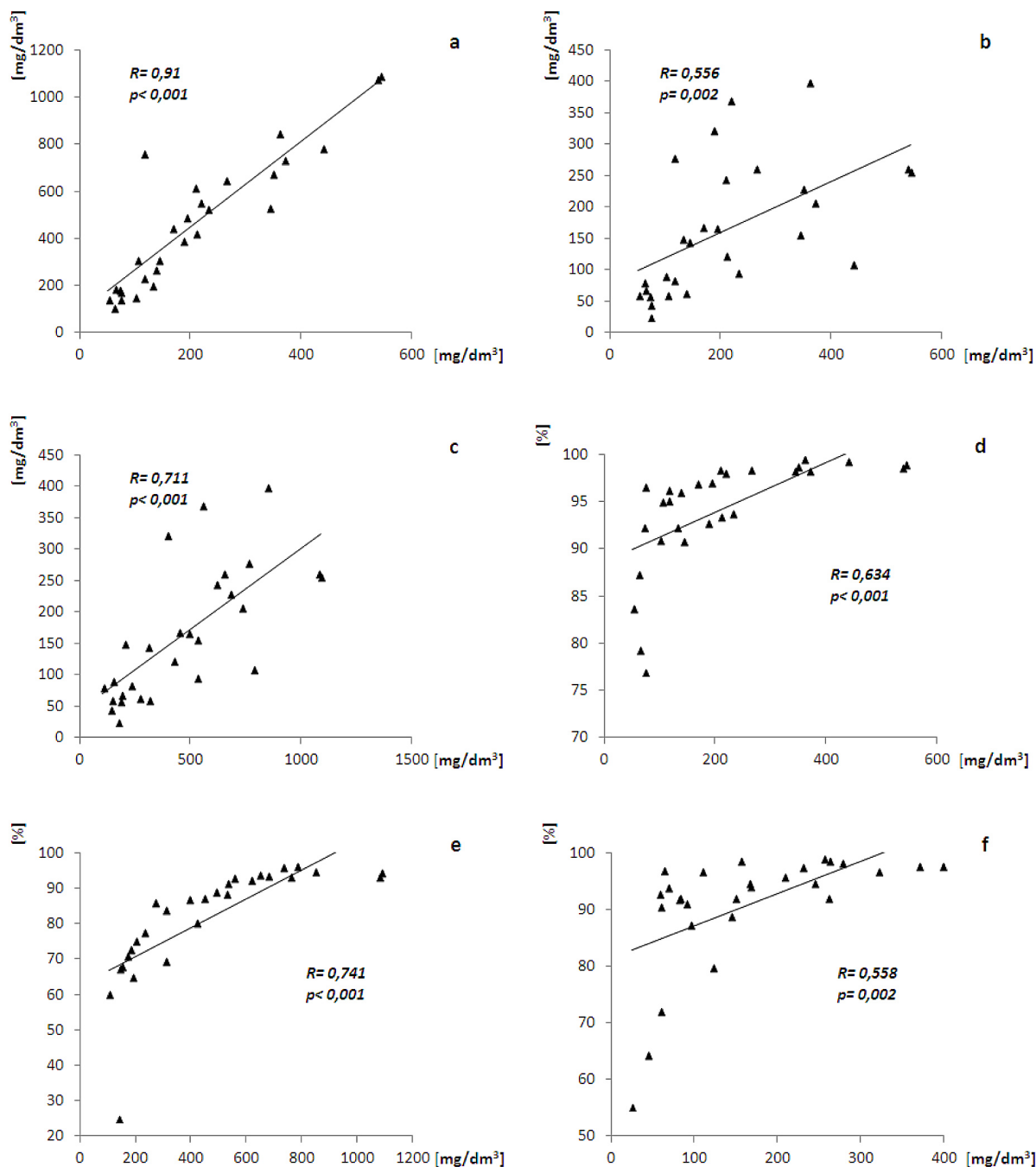
Mimo dużych różnic w wartościach parametrów w ściekach dopływających analiza trendów nie wskazuje na tendencje do zmian w składzie ścieków w całym rozpatrywanym okresie siedmiu lat ($C_{BZT5} = -0,0042d + 214,4$ i $C_{ChZT} = 0,0128d + 447,3$ $C_{Zog} = -0,0024d + 166,6$). W analizowanym okresie w ściekach surowych istniała silna (statystyka Pearsona $R=0,91$) i istotna statystycznie ($p < 0,001$) korelacja pomiędzy wartościami wskaźników BZT₅ i ChZT, oraz przeciętna korelacja pomiędzy ilością zawiesiny, a ChZT ($R=0,711$, $p < 0,001$) oraz BZT₅ ($R=0,556$, $p=0,002$). Analizowany zestaw danych wskazuje też istotny wpływ stężenia związków organicznych w ściekach dopływających na skuteczność ich usunięcia ($R=0,634$, $p < 0,001$ dla BZT i $R=0,741$, $p < 0,001$ dla ChZT) (rys. 4).

Pomocniczym kryterium oceny sprawności oczyszczania ścieków jest określenie niezawodności pracy oczyszczalni w aspekcie uzyskania wymaganej jakości ścieków oczyszczonych. Na rysunku 5 przedstawiono współczynniki efektywności usuwania badanych wskaźników zanieczyszczeń i niezawodności działania instalacji;

stwierdzono bardzo wysoką niezawodność funkcjonowania oczyszczalni w latach 2009–2015 zarówno pod względem usuwania ze ścieków zanieczyszczeń organicznych, jak i zawiesin (BZT₅ – 0,28; ChZT – 0,43; zawiesiny og. – 0,26).

WNIOSKI

Ścieki dopływające do instalacji charakteryzowały się dużą zmiennością stężeń badanych parametrów, jednak trend w okresie 7 lat nie wykazywał zmian, a wartości BZT₅ i ChZT były silnie skorelowane. W żadnej z próbek ścieków oczyszczonych odprowadzanych do potok Chmielnik pobranych w latach 2009–2015 nie stwierdzono przekroczeń wybranych parametrów jakościowych zanieczyszczeń. Średnia efektywność usuwania zanieczyszczeń organicznych i zawiesiny ogólnej wyniosła 94,23% BZT₅ i 82,55% ChZT i była dodatnio skorelowana ze wzrostem obciążenia tymi parametrami ścieków surowych. Uzyskane wyniki niezawodności pracy instalacji (BZT₅ – 0,28; ChZT – 0,43; Z_{og.} – 0,26) wskazują, że nie został jeszcze przekroczona pojemność ekologiczna układu oczyszczania. Na wysoką sprawność tego typu oczyszczalni, mogą mieć wpływ doskonałe warunki nasłonecznienia; roczny wskaźnik GHI w okolicach Rzeszowa jest jednym z najwyższych w kraju i przekracza 1200 kWh/m², dlatego w przyszłych badaniach należałoby szukać związku pomiędzy ilością energii słonecznej dostarczanej do tego typu oczyszczalni, a jej parametrami pracy.



Rys. 4. Związek pomiędzy wartością wskaźników w ściekach surowych: BZT₅ a ChZT (a), BZT₅ a Z_{og} (b) i ChZT a Z_{og} (c), oraz wartością w ściekach dopływających wskaźników: BZT5 (d), ChZT (e) i zawiesiny ogólnej (f), a skutecznością ich usunięcia

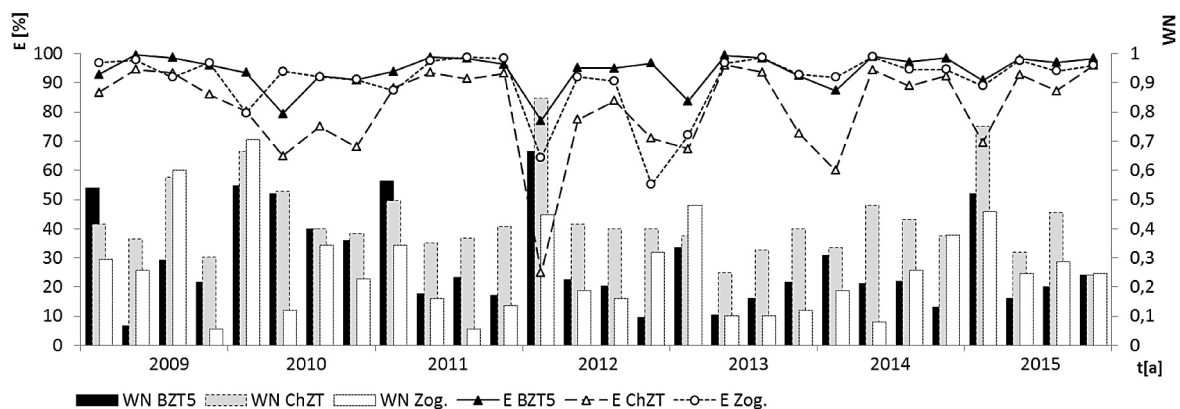
Fig. 4. The relationship between values: BOD₅ and COD (a), BOD₅ and total suspended solids (B) and COD total suspended solids (c), in raw wastewater, and between: BOD₅ (d), COD (e) and total suspended solids (f) and the removal efficiency

PIŚMIENNICTWO

1. Adhikari U., Harrigan T., Reinhold D.M. 2015. Use of duckweed-based constructed wetlands for nutrient recovery and pollutant reduction from dairy wastewater. *Ecological Engineering*, 78, 6–14.
2. Bugajski P. 2006. Hydrobotaniczne (hydrofitowe)

oczyszczanie ścieków. W: *Ochrona środowiska, walory przyrodnicze i rozwój turystyki w dolinie Sanu – materiały z III Konferencji Naukowo-Technicznej „Błękitny San”* 93–99.

3. Din en 1899–1/EN 1899–2. Oznaczanie Biochemicznego Zapotrzebowania Tlenu po N dniach (BZTN). Beuth Verlag, Berlin, Germany 1998.



Rys. 5. Wskaźniki niezawodności i efektywności usuwania substancji organicznych i zawiesiny
Fig. 5. Reliability index and treatment efficiency organic compound and total suspended solids

4. Gajewska M., Obarska-Pempkowiak H., Wojciechowska E. 2010. Hydrofitowe oczyszczanie wód i ścieków. Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN
5. Ge X., Zhang N., Phillips G.C., Xu J. 2012. Growing Lemna minor in agricultural wastewater and converting the duckweed biomass to ethanol. *Bioresource Technology*, 124, 485–488.
6. Gołąb M., Nocoń W., Michalski R. 2017. Hydrobotaniczne oczyszczalnie ścieków. *LAB*, 4, 6–10.
7. Hartman L. 1996 Biologiczne oczyszczanie ścieków. Wydawnictwo Instalator Polski. Warszawa.
8. Iatrou E.I., Stasinakis A.S., Aloupi M. 2015. Cultivating duckweed Lemna minor in urine and treated domestic wastewater for simultaneous biomass production and removal of nutrients and antimicrobials. *Ecological Engineering*, 84, 632–639.
9. Ochrona środowiska 2016. Główny Urząd Statystyczny. Warszawa
10. PN-ISO 5667–10:1997 Jakość wody -- Pobieranie próbek -- Wytyczne pobierania próbek ścieków
11. Pozwolenie wodno-prawne z dnia 20 maja 2003 roku (Oś 6223–3/5/03) z późniejszym uaktualnieniem w 2013 roku
12. Verma R., Suthar S. 2014. Synchronized urban wastewater treatment and biomass production using duckweed Lemna gibba L.. *Ecological Engineering*, 64, 337–343.
13. Vymazal J. 2011. Plants used in constructed wetlands with horizontal subsurface flow: a review. *Hydrobiologia*, 674, 133–156.
14. Wałęga A. 2009. Ocena funkcjonowania oczyszczalni ścieków metodami statycznymi, *Forum Eksploatatora*, 5, 30–34.