

Paulina Śliz

Uniwersytet Ekonomiczny w Krakowie, Wydział Gospodarki i Administracji
Publicznej, Katedra Gospodarki Regionalnej, ul. Rakowicka 27, 31-510 Kraków,
slizp@uek.krakow.pl

WYKORZYSTANIE STATYSTYCZNEJ KONTROLI JAKOŚCI W OCENIE DZIAŁALNOŚCI OCZYSZCZALNI ŚCIEKÓW „KUJAWY” W KRAKOWIE

Abstract: The use of statistical quality control in the assessment of the waste water treatment plant “Kujawy” in Cracow. The aim of the research was the evaluation of wastewater management in terms of stability and efficiency of wastewater treatment, using statistical quality control. For this purpose, the analysis of the operation and operation of the “Kujawy” Sewage Treatment Plant was made, which is one of the most important and largest sewage management facilities in the city of Cracow. This assessment was done using control charts x for 59 observations. The analysed research period covered the multi-year from 2012 to 2016. Five key pollutant indicators were used to evaluate the work of the tested object: BOD_5 , COD_{Cr} , total suspension, total nitrogen and total phosphorus. In the case of the majority of them, based on the analysis of control charts, full stability of their removal was found in the tested sewage management facility. The exception was total nitrogen, for which periods of disturbed stability of its disposal processes were noted. Analysis of the effectiveness of wastewater treatment showed each time that the required efficiency of reduction of the analysed pollution indicators in the “Kujawy” Sewage Treatment Plant was achieved.

Keywords: wastewater management, efficiency of work, reliability of the purifying process, control charts, sewage treatment plant

JEL codes: R1, Q53

Wprowadzenie

Współczesne wyzwania w gospodarowaniu przestrzenią miast i regionów w zakresie właściwej gospodarki ściekowej wiążą się z obowiązkiem osiągnięcia wysokiej jakości ścieków oczyszczonych, a tym samym zapewnienia stabilności procesów technologicznych wykorzystywanych do ich unieszkodliwiania. Regulacje prawne stawiają przed eksploatatorami oczyszczalni ścieków szereg wymagań, które mają zapewnić wysoką skuteczność oczyszczania oraz niezawodność pracy tych obiektów. Według Czempińskiej-Świtalskiej i in. [1998] gospodarka ściekowa sprowadza się do ochrony środowiska przed ściekami, a każda gmina jest zobowiązana do sprawowania nadzoru i kontroli nad gospodarką ściekową na swoim terenie. Niezwykle istotna w tym kontekście staje się kontrola stabilności procesów oczyszczania ścieków, prowadzonych w tych obiektach. Według Budkowskiej i in. [2012] w przypadku zaistnienia jakiegokolwiek niesprawności w funkcjonowaniu oczyszczalni ścieków należy ustalić jej przyczyny oraz podjąć działania w celu usunięcia zakłócenia, ponieważ fakt jego wystąpienia stanowi poważne zagrożenie dla ludzi, którzy korzystają z odbiornika ścieków oczyszczonych. Konieczność osiągnięcia wysokiej jakości ścieków oczyszczonych, poprzez właściwy przebieg procesów w eksploatowanych oczyszczalniach, jest niezwykle ważna i wynika z obowiązku ochrony jakości wód odbiornika ścieków oczyszczonych, a tym samym całego ekosystemu wodnego. Według Wagner i Breil [2013], z uwagi na postępującą urbanizację, wysoką gęstość zaludnienia oraz starzejącą się infrastrukturę ekologiczną, problem zanieczyszczeń wód na terenach miejskich jest szczególnie aktualny. Co więcej, wszystkie zaburzenia hydrologiczne są niezwykle szkodliwe zarówno dla społeczeństwa, jak i środowiska, a rosnąca urbanizacja oraz zmiany klimatyczne mogą je pogłębiać [Sterk i in. 2016; Mahaut, Andrieu 2019].

Większość powszechnie stosowanych metod, służących do oceny pracy oczyszczalni ścieków, nie daje pełnego obrazu ich funkcjonowania. Nie dostarczają one informacji o zakłóceniach stabilności procesów, fakcie występowania awarii, czasie ich trwania czy też prognoz efektywności systemu oczyszczania ścieków [Wałęga 2009]. Ponadto powszechnie znane metody oceny pracy oczyszczalni ścieków uniemożliwiają szczegółowe porównanie wydajności operacyjnej obiektów gospodarki ściekowej, które różniłyby się wydajnością, stężeniem lub ładunkiem zanieczyszczeń. Zgodnie z Bugajskim i Wałęgą [2012] jedną z nowoczesnych metod analizy procesu, która umożliwia szczegółową ocenę stabilności i efektywności pracy oczyszczalni ścieków, a co za tym idzie, pozwala ustalić przyczyny tego stanu, jest metoda kart kontrolnych dla pojedynczej próby. Również według Górki [2015] użycie kart kontrolnych umożliwia dokładniejsze zbadanie procesów technologicznych

oraz pozwala w łatwy sposób wykryć wszelkiego rodzaju nieprawidłowości wraz z ustaleniem ich źródła.

Celem pracy była ocena gospodarowania ściekami w zakresie stabilności i efektywności unieszkodliwiania ścieków, na terenie miasta Krakowa z wykorzystaniem statystycznej kontroli jakości. Podjęto próbę określenia stabilności usuwania wybranych wskaźników zanieczyszczeń, tj. BZT₅ (biochemiczne zapotrzebowanie na tlen – opisuje ilość tlenu niezbędnego do utleniania substancji organicznych zawartych w ściekach, w warunkach aerobowych, w czasie pięciu dób), ChZT_{Cr} (chemiczne zapotrzebowanie na tlen – wskaźnik określający ilość tlenu zużywanego w celu utleniania związków organicznych i niektórych substancji nieorganicznych w reakcji chemicznej z dwuchromianem potasu), zawiesiny ogólnej, azotu ogólnego oraz fosforu ogólnego w analizowanym wieloleciu (od 2012 do 2016 r., na każdy badany rok przypadało ok. 12 obserwacji) wraz z analizą skuteczności oczyszczania ścieków w jednym z głównych obiektów gospodarki ściekowej Krakowa, jakim jest Oczyszczalnia Ścieków „Kujawy”. Analizy stabilności procesów oczyszczania ścieków w przedmiotowej oczyszczalni dokonano w oparciu o karty kontrolne x, które wyznaczono dla poszczególnych wskaźników zanieczyszczeń w ściekach oczyszczonych.

1. Charakterystyka obiektu badań, materiały i metoda analizy

Oczyszczalnia Ścieków „Kujawy” stanowi jeden z najważniejszych obiektów gospodarki ściekowej miasta Krakowa. Należy do oczyszczalni typu mechaniczno-biologicznego, która unieszkodliwia średnio stężone ścieki komunalne. Równoważna liczba mieszkańców – RLM – wynosi ponad 250 000 mieszkańców, maksymalna wydajność tego obiektu osiąga poziom 80 000 m³·d⁻¹ przy średnim przepływie ścieków 54 900 m³/d. Realizowane procesy oczyszczania ścieków opierają się na niskoobciążonym osadzie czynnym według technologii Bardenpho – zmodyfikowanej. Odbiornikiem ścieków dla Oczyszczalni „Kujawy” jest rzeka Wisła w km 94+000 [www.wodociagi.krakow.pl]. Zgodnie z wymogami prawnymi [Rozporządzenie... 2006, 2014], minimalny stopień redukcji poszczególnych wskaźników zanieczyszczeń, który należało osiągnąć w badanym obiekcie gospodarki ściekowej, wynosił dla BZT₅ – 90%, ChZT_{Cr} – 75%, zawiesiny ogólnej – 90%, azotu ogólnego – 70%, fosforu ogólnego – 90%.

Do analizy stabilności oraz skuteczności oczyszczania ścieków w przedmiotowym obiekcie wykorzystano wyniki badań fizykochemicznych ścieków surowych oraz ścieków oczyszczonych z okresu 2012–2016. Wskaźniki

zanieczyszczeń, które zostały objęte analizą, to: BZT₅, ChZT_{Cr}, zawiesina ogólna, azot ogólny oraz fosfor ogólny.

W celu zbadania stabilności procesów w Oczyszczalni Ścieków „Kujawy” posłużono się kartami kontrolnymi x , które zostały wyznaczone dla omawianych wskaźników zanieczyszczeń w ściekach oczyszczonych. Do weryfikacji rozkładu normalnego badanych zmiennych losowych wykorzystano test Shapiro-Wilka dla poziomu istotności $\alpha=0,05$ [Shapiro, Wilk 1965]. Z uwagi na fakt, że analizowane zmienne losowe nie odznaczały się rozkładem normalnym, dokonano ich normalizacji poprzez logarytmowanie. Granice linii pomocniczych, kontrolnych oraz linii centralnej, wyznaczono, uwzględniając regułę trzech sigm dla rozkładu normalnego $N(\mu, \sigma)$ [Krzanowski, Wałęga 2006; Krzanowski i in. 2008]:

Dolna linia kontrolna (LCL):

$$LCL = \mu - 3\sigma$$

Linia centralna (CL):

$$CL = \mu$$

Górna linia kontrolna (UCL):

$$UCL = \mu + 3\sigma$$

gdzie:

μ – wartość średnia analizowanej zmiennej [mgO_2/dm^3 , mg/dm^3],

σ – odchylenie standardowe analizowanej zmiennej [mgO_2/dm^3 , mg/dm^3].

Zgodnie z Andraką [2005], o zakłóceniu lub braku stabilności procesu oczyszczania ścieków świadczą następujące obserwacje: osiem kolejnych punktów po jednej stronie linii centralnej, jeden punkt poza granicami kontrolnymi.

Procentową skuteczność usuwania analizowanych wskaźników zanieczyszczeń w ściekach oczyszczonych obliczono zgodnie ze wzorem:

$$\eta = \frac{S_s - S_o}{S_s} \times 100\%$$

gdzie:

η – redukcja danego wskaźnika zanieczyszczeń w ściekach oczyszczonych [%],

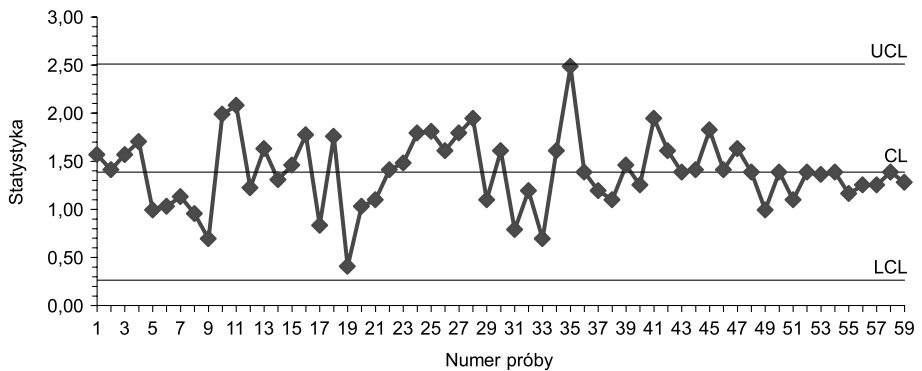
S_s – wartość wskaźnika zanieczyszczenia w ściekach surowych [mg/dm^3],

S_o – wartość wskaźnika zanieczyszczenia w ściekach oczyszczonych [mg/dm^3].

2. Wyniki i analizy

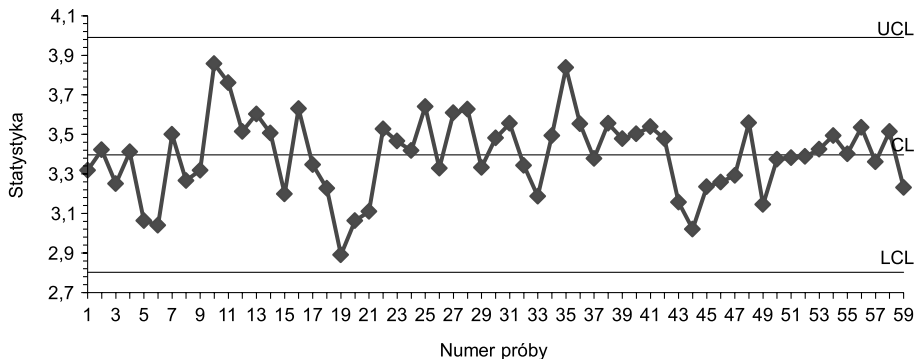
Na rycinie 1 przedstawiono kartę kontrolną \bar{x} dla wskaźnika BZT_5 w ściekach oczyszczonych, na podstawie której widać, iż w trakcie badanego wieloletnia (2012–2016) nie odnotowano przekroczeń górnej lub dolnej linii kontrolnej, jak również nie stwierdzono zjawiska grupowań się prób poniżej linii centralnej. Fakt ten świadczył o pełnej stabilności procesu usuwania BZT_5 w Oczyszczalni Ścieków „Kujawy”. Podobne wyniki, świadczące o pełnej stabilności usuwania analizowanego wskaźnika zanieczyszczeń, odnotowano w badaniach Młyńskiego i in. [2016b].

W oparciu o dane przedstawione na rycinie 2 stwierdzono pełną stabilność pracy Oczyszczalni Ścieków „Kujawy” w zakresie usuwania $ChZT_{Cr}$.



Ryc. 1. Karta kontrolna \bar{x} dla BZT_5 w ściekach oczyszczonych

Źródło: Opracowanie własne.



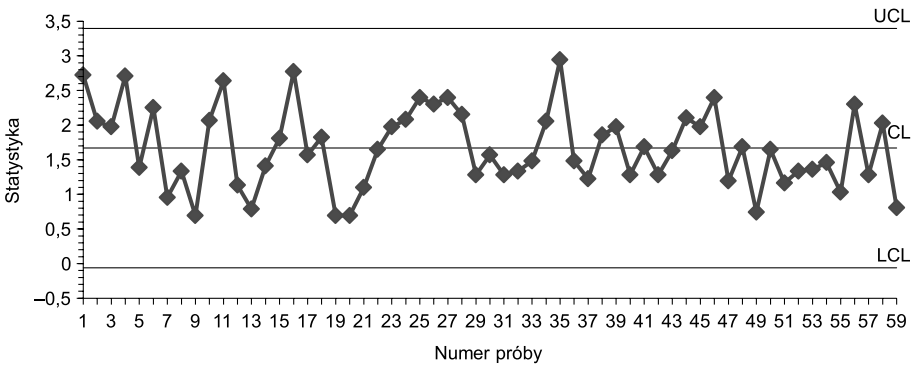
Ryc. 2. Karta kontrolna \bar{x} dla $ChZT_{Cr}$ w ściekach oczyszczonych

Źródło: Opracowanie własne.

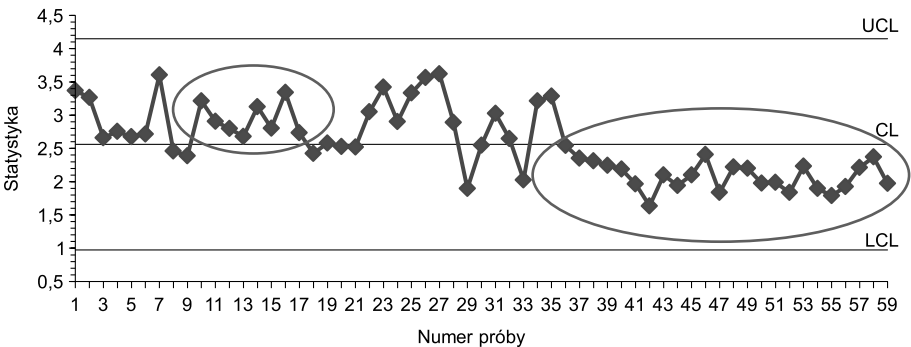
W okresie badawczym nie odnotowano przekroczeń linii kontrolnych ani występowania ośmiu kolejnych punktów po żadnej stronie linii centralnej.

Na podstawie analizy wyników, zaprezentowanych na rycinie 3, stwierdzono pełną stabilność procesu usuwania zawiesiny ogólnej w badanym obiekcie gospodarki ściekowej. Stężenia omawianego wskaźnika oscylowały wokół linii centralnej, nie przekraczając linii kontrolnych oraz nie grupując się poniżej lub powyżej linii centralnej, wskazując na brak zakłóceń w badanym okresie. Podobne wyniki przedstawione zostały w pracach Młyńskiego i in. [2016a] oraz Młyńskiego i Chmielowskiego [2017].

Analiza ryciny 4 pozwala stwierdzić brak przekroczeń linii kontrolnych przy jednoczesnym odnotowaniu grupowania się prób powyżej (8 prób) oraz poniżej linii centralnej (24 obserwacje). Zjawisko to świadczyło o występowaniu długotrwałego zakłócenia stabilności procesów usuwania azotu



Ryc. 3. Karta kontrolna \bar{x} dla zawiesiny ogólnej w ściekach oczyszczonych
 Źródło: Opracowanie własne.

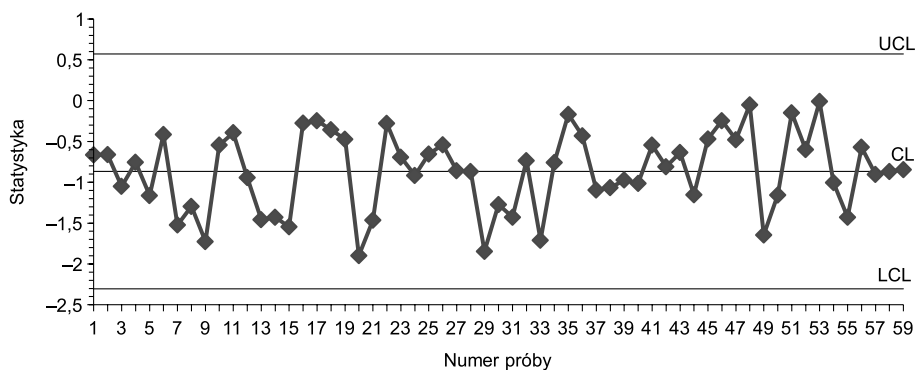


Ryc. 4. Karta kontrolna \bar{x} dla azotu ogólnego w ściekach oczyszczonych
 Źródło: Opracowanie własne.

ogólnego w badanym obiekcie. Okres niestabilności trwał od 2015 do 2016 r., w którym to, zgodnie z badaniami Śliz [2018], w Oczyszczalni Ścieków „Kujawy” odnotowano również 5 przypadków przekroczenia wartości dopuszczalnej w ściekach oczyszczonych oraz niekorzystnie wysokie wartości współczynnika niezawodności technologicznej oczyszczalni ($WN=0,86$). Niemniej jednak przypadki przekroczeń wartości dopuszczalnej tego wskaźnika na tle całego okresu badawczego miały charakter sporadyczny, nie stwarzając tym samym realnego zagrożenia eutrofizacji wód odbiornika. Występujące zakłócenia stabilności usuwania analizowanych związków azotu mogły częściowo wynikać z przeprowadzonej w 2015 r. modernizacji reaktorów biologicznych z osadem czynnym. Zgodnie z Bugajskim i in. [2015] zaburzenia procesów nityfikacji oraz denityfikacji mogą być również skutkiem dużych wahań stężeń azotu ogólnego w dopływie ścieków surowych oraz zjawiska wychładzania się ścieków w reaktorach w okresie zimowym, co negatywnie wpływa na metabolizm mikroorganizmów osadu czynnego.

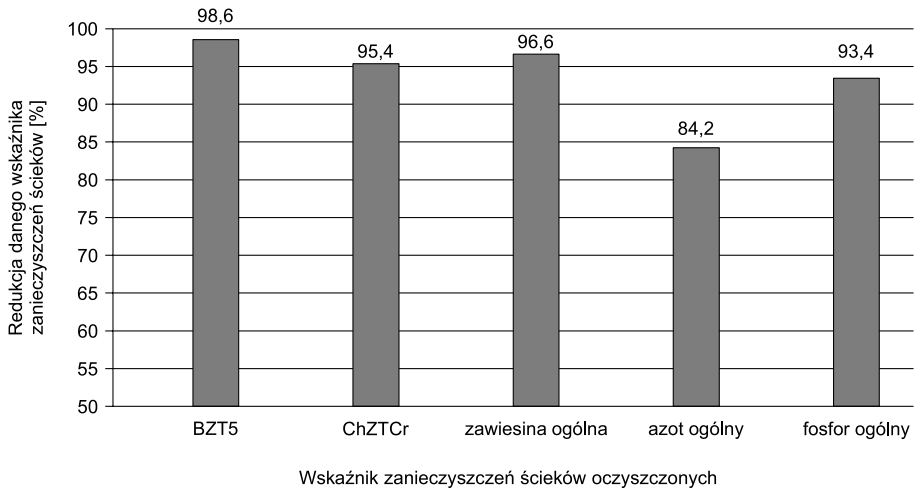
Na podstawie ryciny 5 stwierdza się brak zakłóceń w procesie usuwania fosforu ogólnego w Oczyszczalni Ścieków „Kujawy”. Wartości tego wskaźnika nie przekroczyły linii kontrolnych oraz oscylowały wokół linii centralnej, co świadczy o stabilnym procesie usuwania analizowanego wskaźnika w badanym obiekcie.

Zestawienie uzyskanych wartości skuteczności (η) oczyszczania ścieków w zakresie analizowanych wskaźników zanieczyszczeń przedstawiono na rycinie 6. Na jej podstawie stwierdzono wysoką średnią skuteczność redukcji BZT₅, zawiesiny ogólnej oraz fosforu ogólnego w ściekach oczyszczonych badanego obiektu, która kolejno kształtowała się na poziomie 98,6%, 96,6% oraz 93,4%. Wielkości te świadczyły o spełnieniu wymagań zawartych



Ryc. 5. Karta kontrolna x dla fosforu ogólnego w ściekach oczyszczonych

Źródło: Opracowanie własne.



Ryc. 6. Średnia skuteczność redukcji analizowanych wskaźników zanieczyszczeń ścieków [%] w analizowanej oczyszczalni ścieków

Źródło: Opracowanie własne.

w *Rozporządzeniach...* [2006, 2014], w których minimalna redukcja omawianych wskaźników w ściekach odprowadzanych do wód odbiornika została określona na poziomie 90,0%.

Również w przypadku wskaźnika $ChZT_{Cr}$ osiągnięto wysoką skuteczność redukcji (95,4%) przy wymogu osiągnięcia minimalnego stopnia unieszkodliwienia na poziomie 75% [*Rozporządzenie...* 2006, 2014]. Najniższą średnią redukcję uzyskano w przypadku azotu ogólnego (84,2%), niemniej jednak wartość ta pozwoliła na osiągnięcie wymaganego stopnia redukcji na poziomie od 70 do 80% [*Rozporządzenie...* 2006, 2014].

Wnioski

Właściwe gospodarowanie przestrzenią miast i regionów w kontekście należytej gospodarki ściekowej narzuca konieczność kontroli pracy i funkcjonowania eksploatowanych oczyszczalni ścieków. Niniejsza praca dotyczyła analizy gospodarki ściekowej w zakresie unieszkodliwiania ścieków, a tym samym ochrony mieszkańców oraz zasobów wodnych miasta Krakowa przed toksycznym wpływem ścieków. W tym celu analizie poddano jeden z największych krakowskich obiektów gospodarki ściekowej – Oczyszczalnię Ścieków „Kujawy”. Przedmiotem podjętej analizy była ocena stabilności procesów oczyszczania ścieków oraz skuteczności redukcji wybranych wskaźników

zanieczyszczeń. Uzyskane wyniki pozwoliły na sformułowanie następujących wniosków:

1. Analiza kart kontrolnych wykazała pełną stabilność procesu usuwania BZT_5 , $ChZT_{Cr}$, zawiesiny ogólnej oraz fosforu ogólnego. W przypadku azotu ogólnego stwierdzono okresy grupowania się prób powyżej oraz poniżej linii centralnej. Zjawiska te świadczyły o okresowym zakłóceniu stabilności procesu usuwania azotu ogólnego w badanym obiekcie. Dowodziły występowania czynników, które istotnie wpływały na kształtowanie się związków azotu w ściekach oczyszczonych. Występowanie okresu zachwianej stabilności pracy oczyszczalni nie uniemożliwiło osiągnięcia minimalnej skuteczności usuwania tego wskaźnika w badanym obiekcie.
2. W przypadku wszystkich analizowanych wskaźników zanieczyszczeń (BZT_5 , $ChZT_{Cr}$, zawiesina ogólna, azot ogólny, fosfor ogólny) osiągnięto wymaganą skuteczność redukcji zanieczyszczeń w ściekach oczyszczonych w badanym obiekcie.
3. Wykorzystanie statystycznej kontroli jakości pozwoliło stwierdzić, że jeden z najbardziej kluczowych obiektów gospodarowania ściekami w Krakowie, jakim jest Oczyszczalnia Ścieków „Kujawy”, spełnił swoją podstawową funkcję ochrony mieszkańców i środowiska naturalnego przed negatywnym wpływem ścieków komunalnych.
4. Karty kontrolne mogą stanowić dla eksploatatora oczyszczalni ścieków skuteczne narzędzie, pozwalające na wykrycie nieprawidłowości przebiegu badanego procesu oraz podjęcie odpowiedniego działania zmierzającego do ich usunięcia.

Literatura

- Andraka D., 2005, *Wykorzystanie statystycznej kontroli jakości do oceny pracy oczyszczalni ścieków*, [w:] *Problemy gospodarki wodno-ściekowej w rejonach rolniczo-przemysłowych*, Monografie Komitetu Inżynierii Środowiska PAN, 30.
- Budkowska A., Długosz J., Gawdzik J., 2012, *Validation of the operations of wastewater treatment plant in Starachowice*. Archives of Waste Management and Environmental Protection, 14.
- Bugajski P., Kaczor G., Bergel T., 2015, *Niezawodność usuwania azotu ze ścieków w zbiorczej oczyszczalni z sekwencyjnym reaktorem biologicznym*. Acta Scientiarum Polonorum, 14.
- Bugajski P., Wałęga A., 2012, *Reliability and stability of the wastewater treatment process using statistical quality control*. Gaz, Woda i Technika Sanitarna, 10.
- Czempińska-Świtalska Z., Góralczyk M., Góralczyk R., 1998, *Gospodarka wodno-ściekowa*, Wydawnictwo Prywatnej Wyższej Szkoły Ochrony Środowiska, Radom.
- Górka J., 2015, *Ocena stabilności procesu oczyszczania ścieków za pomocą kart kontrolnych*. Nauki Inżynierskie i Technologie, 3.

- Krzanowski S., Wałęga A., 2006. Wykorzystanie teorii niezawodności statystycznej kontroli jakości ścieków do oceny eksploatacyjnej wiejskich oczyszczalni ścieków. *Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich*, 3.
- Krzanowski S., Wałęga A., Paśmionka I., 2008. *Oczyszczanie ścieków z wybranych zakładów przemysłu spożywczego*. Wydawnictwo Komisji Technicznej Infrastruktury Wsi PAN, Kraków.
- Mahaut V., Andrieu H., 2019, *Relative influence of urban-development strategies and water management on mixed (separated and combined) sewer overflows in the context of climate change and population growth: A case study in Nantes*. *Sustainable Cities and Society*, 44.
- Młyński D., Chmielowski K., 2017, *Analiza funkcjonowania oczyszczalni ścieków w Przysiekach (powiat jasielski) przy wykorzystaniu wybranych metod statystycznych*, [w:] *Zrównoważona gospodarka zasobami przyrodniczymi i kulturowymi na Pogórzu Dynowskim determinantą rozwoju turystyki*, J. Krupa, K. Szpara. (red.). Wydawnictwo Związku Gmin Turystycznych Pogórza Dynowskiego, Dynów.
- Młyński D., Chmielowski K., Młyńska A., 2016a, *Ocena skuteczności oraz stabilności pracy oczyszczalni ścieków w Zabajce*. *Inżynieria Ekologiczna*, 47.
- Młyński D., Chmielowski K., Młyńska A., Miernik W., 2016b, *Ocena skuteczności pracy oczyszczalni ścieków w Jaśle*. *Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich*, 1.
- Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 24 lipca 2006r. w sprawie warunków, jakie należy spełnić przy wprowadzaniu ścieków do wód lub do ziemi, oraz w sprawie substancji szczególnie szkodliwych dla środowiska wodnego [Dz.U. 2006, nr 137, poz. 984].
- Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 18 listopada 2014 r. w sprawie warunków, jakie należy spełnić przy wprowadzaniu ścieków do wód lub do ziemi, oraz w sprawie substancji szczególnie szkodliwych dla środowiska wodnego [Dz.U. 2014, poz. 1800].
- Shapiro S.S., Wilk M.B., 1965, *An analysis of variance test for normally (complete samples)*. *Biometrika*, 52.
- Sterk A., Man H., Schijven J.F., Nijs T., Husman A.M., 2016. *Climate change impact on infection risks during bathing downstream of sewage emissions from CSOs or WWTPs*. *Water Research*, 105.
- Śliz P., 2018, *Funkcjonalność miasta w aspekcie skutecznego oczyszczania ścieków na przykładzie miasta Krakowa*, [w:] *Funkcjonalne miasto w teorii i praktyce na przykładzie Krakowa i Krakowskiego Obszaru Metropolitalnego*, T. Kudłacz, M. Musiał-Malago (red.). Wydawnictwo Uniwersytetu Ekonomicznego w Krakowie, Kraków.
- Wagner I., Breil P., 2013, *The role of ecohydrology in creating more resilient cities*. *Ecohydrology and Hydrobiology*, 13(2).
- Wałęga A., 2009, *Evaluation of sewage treatment plant operation with statistical methods*. *Forum Eksploatatora*, 5(44).
- www.wodociagi.krakow.pl/o-firmie/nasze-zaklady/oczyszczalnia-plaszow [dostęp: 15.11.2018].