

ZBIGNIEW MUCHA, JERZY MIKOSZ, AGNIESZKA GENEROWICZ*

ZASTOSOWANIE ANALIZY WIELOKRYTERIALNEJ DO WYBORU TECHNOLOGII W MAŁYCH OCZYSZCZALNIACH ŚCIEKÓW

APPLICATION OF MULTI-CRITERIA ANALYSIS FOR SELECTION OF TECHNOLOGY FOR SMALL WASTEWATER TREATMENT PLANTS

Streszczenie

W artykule przedstawiono propozycję zastosowania analizy wielokryterialnej do wyboru optymalnego rozwiązania techniczno-technologicznego małej oczyszczalni ścieków. Obliczenia wykonano z zastosowaniem metody programowania kompromisowego dla dwóch przepustowości oczyszczalni oraz dla różnych wymagań jakości ścieków oczyszczonych. Dla każdej wielkości oczyszczalni rozpatrywano po trzy rozwiązania technologiczne. Wybór najlepszego rozwiązania dla danej przepustowości oczyszczalni przeprowadzono na podstawie wcześniej zdefiniowanego zestawu kryteriów zrównoważonego rozwoju. Zaproponowana metoda może być wykorzystana do wyboru najlepszego rozwiązania technologicznego oczyszczalni na etapie planowania i projektowania systemów oczyszczania ścieków w małych miejscowościach oraz do oceny efektywności funkcjonowania istniejących obiektów z punktu widzenia zasad zrównoważonego rozwoju.

Słowa kluczowe: małe oczyszczalnie ścieków, wybór technologii, analiza wielokryterialna

Abstract

The paper presents application of multicriteria analysis for selection of the best technology of a small wastewater treatment plant. The calculations performed for two plant capacities and various effluent standards are based on compromise programming method. For each plant's capacity the three different treatment technologies are considered. The selection of the best technology is done with a define set of sustainability criteria. The proposed method can be used for selection of the best treatment technology and the technical solution at the stage of wastewater system planning and designing as well as for evaluation of already operated plants from sustainability standpoint.

Keywords: small wastewater treatment plants, technology selection, multi-criteria analysis

* Dr inż. Zbigniew Mucha, dr inż. Jerzy Mikosz, dr inż. Agnieszka Generowicz, Instytut Zaopatrzenia w Wodę i Ochrony Środowiska, Wydział Inżynierii Środowiska, Politechnika Krakowska.

1. Wstęp

Małe oczyszczalnie ścieków o przepustowości nieprzekraczającej 300 m³/d i równoważnej liczbie mieszkańców (RLM) poniżej 2000, charakteryzują się specyficznymi cechami, odróżniającymi je od większych oczyszczalni [6–8]. Wynikają one zarówno ze zwiększonej nierównomierności dopływu ścieków do oczyszczalni, jak i ze składu ścieków, który zwykle istotnie różni się od typowych ścieków miejskich oczyszczanych w średnich i dużych oczyszczalniach. Dlatego technologia oczyszczania ścieków zastosowana w małej oczyszczalni powinna być dobrana w taki sposób, aby zapewnić w tych warunkach odpowiednie efekty technologiczne przy niewielkich wymaganiach odnośnie do obsługi oczyszczalni i przy minimalnych kosztach eksploatacyjnych.

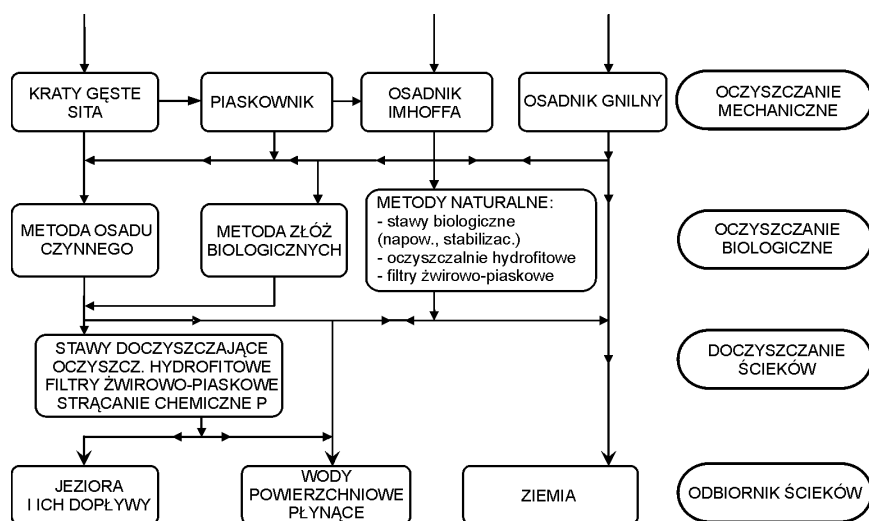
Decyzja dotycząca zastosowania konkretnego rozwiązania technologicznego małej oczyszczalni ścieków wymaga przeanalizowania wielu czynników technologicznych, środowiskowych, specyficznych uwarunkowań lokalnych oraz powinna być poprzedzona staranną analizą ekonomiczną. W praktyce w wielu przypadkach decyzja ta jest podejmowana w sposób nieracjonalny, jedynie na podstawie jak najniższych kosztów inwestycyjnych, a przy tym często pod wpływem reklamy lub zapewnień dostawcy takiego systemu o jego wysokich parametrach eksploatacyjnych. Skutkiem tego jest częste stosowanie rozwiązań technologicznych małych oczyszczalni, które nie są właściwie dostosowane do ilości i składu dopływających ścieków, kłopotliwych w eksploatacji, zawodnych i niezapewniających wymaganej efektywności oczyszczania.

W procesie wyboru rozwiązania technologicznego nawet dla małej oczyszczalni, w tym także przydomowej, konieczny jest udział doświadczonego technologa, który potrafi dokonać właściwej oceny przydatności różnych technologii oraz rozwiązań technicznych w konkretnych warunkach lokalnych. W procesie tym konieczne jest wzięcie pod uwagę wielu kryteriów obejmujących oprócz samej technologii również łatwość obsługi, niezawodność działania, aspekty ekonomiczne, wpływ na środowisko oraz estetykę obiektu [1, 2, 6]. W artykule przedstawiono sposób zastosowania analizy wielokryterialnej jako narzędzia pomocniczego do wyboru właściwej technologii dla małej oczyszczalni ścieków.

2. Technologie stosowane do oczyszczania małych ilości ścieków

Jednym z podstawowych czynników, które determinują możliwość zastosowania danej technologii do oczyszczania małej ilości ścieków, są obowiązujące przepisy prawne. Przepisy uzależniają sposób oczyszczania ścieków od ich ilości i od rodzaju odbiornika, do którego są odprowadzane ścieki oczyszczone [9]. Najłagodniejsze wymagania obowiązują w przypadku odprowadzania ścieków do ziemi w granicach gruntu stanowiącego własność wprowadzającego i pochodzących z własnego gospodarstwa domowego lub rolnego w ilości nieprzekraczającej 5 m³/d, co odpowiada równoważnej liczbie mieszkańców RLM = 33. Ograniczenie to ma istotny wpływ na wybór technologii oczyszczania ścieków w najmniejszych, przydomowych obiektach. Oznacza to, że w pozostałych przypadkach ścieki muszą podlegać co najmniej oczyszczaniu mechaniczno-biologicznemu, a przy odprowadzaniu do jezior i ich dopływów dodatkowo wymagane jest usuwanie ze ścieków azotu i fosforu.

Technologie, które umożliwiają spełnienie wymagań prawnych określonych dla ścieków odprowadzanych z małych oczyszczalni, to przede wszystkim: złoża biologiczne, osad czynny konwencjonalny lub z przedłużonym czasem napowietrzania oraz oczyszczalnie hydrofitowe wykorzystujące procesy zbliżone do występujących w naturalnym środowisku gruntowo-wodnym, a także filtry żwirowo-piaskowe [7, 8]. Stosowanie oczyszczalni ze złożami biologicznymi było do 2002 roku ograniczone ze względu na wysokie koszty dostosowania do odpowiednich wymagań z powodu powszechnego obowiązku usuwania azotu i fosforu. Oczyszczalnie z osadem czynnym stosowane są w wersjach uproszczonych albo wielofazowych (w zlewniach odbiorników chronionych przed eutrofizacją). Sprawdzone rodzajem oczyszczalni z osadem czynnym są oczyszczalnie o działaniu cyklicznym typu SBR (*Sequencing Batch Reactor*), które ze względu na elastyczność dopasowania do zmiennych warunków dopływu ścieków są godne polecenia do oczyszczania ścieków z małych jednostek osadniczych. Wszystkie te technologie są powszechnie stosowane i sprawdzone, a ich systematykę przedstawiono na rys. 1.



Rys. 1. Procesy i urządzenia do oczyszczania małej ilości ścieków (opracowanie własne)

Fig. 1. Processes and objects used for treatment of small volumes of wastewater

3. Kryteria oceny technologii i przyjęte założenia

Wybór kryteriów, które mają stanowić podstawę oceny technologii stosowanych w małych oczyszczalniach ścieków, należy traktować jako punkt wyjścia do analizy wielokryterialnej. Nie ma standardowego zestawu kryteriów stosowanych do takiej oceny i poszczególni autorzy wykorzystują je w zależności od charakterystyki systemu kanalizacyjnego i oczyszczalni ścieków, wielkości obiektu, stosowanych rozwiązań techniczno-technologicznych oraz od celu, jakemu ma służyć analiza [6–8]. Rozbudowany zestaw kryteriów, które są wykorzystywane przez różnych autorów do oceny systemów oczyszczania ścieków,

zaprezentowała m.in. Balkema [2]. Zostały one podzielone na kilka grup obejmujących kryteria ekonomiczne, środowiskowe, techniczne i społeczno-kulturowe. Najliczniejszą grupę stanowiły kryteria środowiskowe, dotyczące przede wszystkim wykorzystania zasobów naturalnych oraz emisji różnych zanieczyszczeń do poszczególnych mediów środowiska, jak też zapobiegania powstawania zanieczyszczeń, oraz kryteria techniczne [2].

Kryteria środowiskowe odnoszą się bezpośrednio do spełnienia wymagań Rozporządzenia Ministra Środowiska z 2006 r. [9]. Kryterium to traktować należy jako nadrzędne, co oznacza, że ocenie powinny podlegać tylko te oczyszczalnie, które praktycznie zapewniają uzyskanie wymaganej efektywności oczyszczania. W przypadku oczyszczalni, dla których nie wykonywano szczegółowych badań, można przyjąć, że seryjnie produkowane małe prefabrykowane oczyszczalnie, mające aprobatę techniczną Instytutu Ochrony Środowiska w Warszawie, spełniają wymagania jakości ścieków oczyszczonych. Można przyjąć również, że wymagania ekologiczne spełniają oczyszczalnie, które zostały zaprojektowane zgodnie z odpowiednimi parametrami technologicznymi, zweryfikowane przez specjalistę zajmującego się małymi oczyszczalniami. W ocenie należy uwzględnić też takie czynniki, jak występowanie nieprzyjemnych zapachów, hałasu oraz uciążliwości związanej z owadami i gryzoniami oraz estetykę obiektu, obejmującą ukrycie urządzeń w zieleni, wkomponowanie w krajobraz i ogólny wygląd oczyszczalni. Kryterium to może mieć większe znaczenie w przypadku lokalizacji oczyszczalni na terenach o wyjątkowych walorach krajobrazowych lub może stanowić podstawowe kryterium wyboru na terenach podlegających ochronie konserwatorskiej, np. na terenach parków krajobrazowych.

Kryteria techniczne są równie ważne, ponieważ zwykle oczekuje się, że małe oczyszczalnie muszą działać sprawnie bez ciągłego dozoru. Dlatego powinny być tak skonstruowane, żeby ich obsługa była ograniczona do minimum i sprowadzała się jedynie do prostych czynności konserwacyjnych. Oznacza to wymóg osiągnięcia wysokiego stopnia niezawodności oczyszczalni, co w praktyce wiąże się z automatyzacją pracy urządzeń bez zbytniego stopnia skomplikowania, wyposażenia oczyszczalni w nowoczesne i sprawdzone urządzenia oraz stosowaniem materiałów odpornych na korozję. Małe oczyszczalnie ścieków ze względu na swoją specyfikę są wrażliwe na przekroczenia zakresu warunków eksploatacyjnych i nawet przy pełnej sprawności wszystkich obiektów i urządzeń mechanicznych oczyszczalnia może wykazywać niesprawność lub sprawność częściową. Często przyczyną niesprawności technologicznej małej oczyszczalni leży w strukturze niezawodnościowej podsystemu usuwania ścieków (np. dopływ wód obcych, nagłe zrzuty substancji toksycznych).

Kryteria ekonomiczne dotyczą zarówno kosztów inwestycyjnych, jak i eksploatacyjnych. W przypadku małych oczyszczalni zwykle większą uwagę zwraca się na koszty inwestycyjne, które trzeba ponieść w krótkim czasie, a mniejszą na koszty eksploatacyjne, które nie są tak wyraźnie widoczne w chwili podejmowania decyzji o wyborze konkretnego rozwiązania technologicznego. Poszczególne rozwiązania technologiczne charakteryzują się różną strukturą kosztów, a różnice te mogą czasami być bardzo znaczące i decydować o sukcesie całej inwestycji.

W przypadku oceny małych oczyszczalni ścieków za najważniejsze należy uznać elastycznie pojmowane kryteria środowiskowe, kryteria techniczne, ze szczególnym uwzględnieniem prostoty użytkowania i aspektów niezawodnościowych, oraz kryteria ekonomiczne.

Specyfika małych oczyszczalni ścieków, położonych często w pobliżu budynków mieszkalnych, wymaga wyjątkowej dbałości o kwestie estetyki stosowanych rozwiązań. Dlatego w przeprowadzonej analizie wielokryterialnej uwzględniono następujące szczegółowe kryteria oceny małych oczyszczalni:

- łatwość obsługi, obejmującą częstotliwość i czas obsługi, prostotę wykonywanych czynności,
- niezawodność działania, obejmującą niezawodność techniczną i technologiczną oraz stabilność pracy (wpływ temperatury, wypływanie osadu, wrażliwość na nagłe zrzuty zanieczyszczeń),
- aspekty ekonomiczne, obejmujące łącznie koszty budowy i koszty eksploatacji w postaci średniego rocznego kosztu całkowitego, obliczone formułą Szelałowskiego [11],
- wpływ na środowisko, obejmujący zapachy, hałas, owady, gryzonie,
- nowoczesność rozwiązania, obejmującą monitoring i sterowanie, wyposażenie w urządzenia nowych generacji, stosowanie materiałów odpornych na korozję,
- estetykę rozwiązania, obejmującą wkomponowanie w krajobraz, ukrycie w zieleni i ogólny wygląd oczyszczalni.

Do porównawczej analizy wielokryterialnej wybrano dwa zakresy wielkości oczyszczalni o różnych rozwiązaniach techniczno-technologicznych oraz różnych wymaganiach jakości ścieków oczyszczonych ($Q = 20 \text{ m}^3/\text{d}$ i $\text{RLM} = 133$ dla wymagań podstawowych – BZT_5 , ChZT , zaw.og, oraz $Q = 100 \text{ m}^3/\text{d}$ i $\text{RLM} = 670$ dla wymagań zastrzonych z usuwaniem azotu i fosforu). W każdym zakresie wielkości analizowano po trzy rodzaje oczyszczalni, różniące się rozwiązaniami technologicznymi. W przypadku mniejszych oczyszczalni był to układ z osadnikiem gnilnym i oczyszczaniem biologicznym realizowanym jako:

- złożo biologiczne zraszane,
- osad czynny konwencjonalny,
- oczyszczalnia hydrofitowa z przepływem poziomym podpowierzchniowym.

W przypadku większych oczyszczalni stosowano zblokowane urządzenia do mechanicznego oczyszczania (osad czynny) lub osadnik gnilny (złożo biologiczne), chemiczne strącanie oraz następujące technologie oczyszczania biologicznego:

- osad czynny o działaniu cyklicznym typu SBR,
- osad czynny wielofazowy,
- złożo zanurzone cyklicznie napowietrzane.

4. Analiza wielokryterialna i wybór najkorzystniejszej technologii

Analiza wielokryterialna jest metodą matematyczną, pozwalającą na wybór najkorzystniejszego rozwiązania spośród wielu opisanych wariantów lub strategii. Warunkiem znalezienia rozwiązania jest przyjęcie zbioru kryteriów (wskaźników) oceniających poszczególne warianty. W celu obiektywnej i jak najszerzej oceny zadania, najlepiej jeżeli kryteria uwzględniają różne aspekty ocenianego wariantu, pomimo że mogą one prezentować różne, często sprzeczne cele. Na przykład poszukujemy rozwiązania najtańszego, a jednocześnie najbardziej niezawodnego. Dlatego też warianty powinny być jak najszerzej opisane i zmierzone, natomiast wybór jest wyborem kompromisowym, w zależności od ważności poszczególnych kryteriów [4, 10].

Matematyczny zapis decyzyjnego problemu matematycznego stanowi tzw. macierz decyzyjna. Jest to macierz ujmująca opis poszczególnych wariantów wraz z kryteriami opisującymi te warianty. Kryteria liczbowo zapisane z macierzy stanowią miarę realizacji założonych zadań i celów, które powinny być spełnione przez poszczególne warianty. Zapis macierzy decyzyjnej przedstawiono w tabeli 1. Wszystkie kryteria były wycenione w skali punktowej od 0 do 10 (gdzie: 0 – ocena najgorsza, 10 – ocena najlepsza).

Tabela 1

Macierz decyzyjna dla wyboru technologii małej oczyszczalni ścieków dla $Q = 20 \text{ m}^3/\text{d}$ i $RLM = 133$

Kryteria oceny technologii	Oceniane technologie stosowane w małych oczyszczalniach ścieków		
	oczyszczalnia z osadem czynnym	oczyszczalnia ze złożem zraszanym	oczyszczalnia hydrofitowa
Prostota i łatwość obsługi	7	9	10
Niezawodność działania	7	8	10
Aspekty ekonomiczne	8	9	10
Wpływ na środowisko	10	10	8
Nowoczesność rozwiązania	9	10	7
Estetyka	8	8	10

Do rozwiązania zadania decyzyjnego zastosowano metodę programowania kompromisowego [1]. Pozwala ona na szeregowanie wariantów od najbardziej do najmniej korzystnego, wykorzystując koncepcję porządkowania ich według odległości od tzw. ustalonego punktu idealnego o współrzędnych $X'(x'_1, x'_2, \dots, x'_m)$. Wszystkie współrzędne punktu idealnego są równe maksymalnej wartości przyjętej skali normalizacyjnej, tzn. zawsze przyjmują wartość najkorzystniejszą. Matematyczny zapis miary szukanej odległości badanego wariantu od punktu idealnego ma postać:

$$L_\alpha(s_n) = \sum_{m=1}^M w_m^\alpha \cdot (x'_m - r'_{NM})^\alpha \quad (1)$$

natomiast wybór najlepszej strategii odbywa się według zasady:

$$s_j = \bar{s} \Leftrightarrow L_\alpha(s_j) = \min. L_\alpha(s_n); \quad n = 1, 2, \dots, N \quad (2)$$

gdzie:

- L_α – miara rozbieżności danej strategii s_n od punktu idealnego,
- \bar{s} – wybrana strategia,
- w_m – współczynnik wagi kryterium m ,
- x'_m – m -ta współrzędna punktu idealnego,

- r'_{NM} – znormalizowana wartość kryterium,
 M – liczba kryteriów,
 α – wykładnik potęgowy mierzący odchylenie strategii od punktu idealnego X' ,
 przyjmowany w praktyce jako 1, 2 oraz ∞ .

Metoda daje możliwość nadawania wag poszczególnym kryteriom lub grupom kryteriów, tzn. istnieje możliwość uwzględnienia w obliczeniach ważności niektórych parametrów, które mają dla decydenta szczególne znaczenie. W celu zobiektywizowania obliczeń w niniejszym artykule nadawano wyższą wagę kolejno wszystkim kryteriom, co pozwalało prześledzić wyniki obliczeń.

Dodatkowo w obliczeniach uwzględniono hierarchię ważności kryteriów, określoną zgodnie z ankietą i rozmowami ze specjalistami zajmującymi się małymi oczyszczalniami, wśród których znaleźli się eksploataotorzy, projektanci, dystrybutorzy i wykonawcy, naukowcy i urzędnicy. Zasada oceny ankiet polegała na uszeregowaniu kryteriów w kolejności odpowiadającej ich ważności. Numer w kolumnie odpowiadał przyznanej kolejności w ranking. Możliwe było przyznanie kilku kryteriom tej samej pozycji w ranking. Wyniki oceny poszczególnych specjalistów w jednej grupie sumowano, przyznając od 6 pkt za 1 miejsce do 1 pkt za miejsce 6. Sumaryczna liczba punktów posłużyła do wyznaczenia kolejności kryteriów w ramach danej grupy specjalistów, a wyniki z poszczególnych grup do wyznaczenia ostatecznej kolejności kryteriów i ich wagi.

Najważniejszymi kryteriami oceny i wyboru dla małych oczyszczalni okazały się: prostota i łatwość obsługi (waga 0,25), niezawodność działania (0,25) oraz aspekty ekonomiczne (koszty inwestycyjne i eksploatacyjne) (0,2). W dalszej kolejności występują: wpływ na środowisko (0,15), nowoczesność rozwiązania (0,1) oraz estetyka (0,05). Wyniki obliczeń przedstawiono w tabeli 2. Dla czytelności obliczeń zastosowano skróty nazw poszczególnych technologii: „**oscz**” (oczyszczalnia z osadem czynnym), „**zrasz**” (oczyszczalnia ze złożem zraszanym), „**hydrofit**” (oczyszczalnia hydrofitowa).

W tabeli 2 zestawione są uszeregowania technologii od najkorzystniejszych do najmniej korzystnych, biorąc pod uwagę kryteria ocenijające z tabeli 1. Uszeregowania zapisano, stosując oznaczenie „ \rightarrow ”, natomiast oznaczenie „ \leftrightarrow ” określa technologie równoważne (tzn. równoodległe od punktu idealnego). W pierwszej kolumnie tabeli przedstawiono przyjmowaną przez autorów publikacji do obliczeń ważność kryteriów. Na przykład w pierwszym wierszu technologie są uszeregowane, przyjmując wagę wszystkich kryteriów równą 1, natomiast w kolejnym wierszu pierwsze kryterium – „prostota i łatwość obsługi” – ma nadaną wagę 2, podczas gdy wszystkie inne ważą 1. W ostatnich wierszach przyjmowano wagi kryteriów wyższe dla różnych grup kryteriów.

Metoda daje możliwość dodatkowego ważenia kryteriów przez zastosowanie we wzorze wykładnika potęgowego α . Wykładnik ten pozwala na dodatkowe zważenie każdej odchyłki od punktu idealnego, proporcjonalnie do ich wielkości. Im wartość α jest większa, tym większego znaczenia nabierają duże odchylenia strategii od punktu idealnego. Poszczególne przypadki obliczeniowe, uwzględniające różne wartości współczynnika α , są zawarte w trzech różnych kolumnach w tabeli 2.

Decydent może przyjąć pewne ograniczenia w wyborze strategii. W niniejszych obliczeniach założono takie ograniczenia jako tzw. próg akceptowalności, obliczony jako:

$$S_n^* = 0,1 \cdot L_\alpha(s_n)_{\min} \quad (3)$$

Strategie akceptowalne są zaznaczone w tabeli 2 znakiem „*” i stanowią rozwiązanie zadania decyzyjnego jako wybór strategii leżącej akceptowalnie blisko punktu idealnego.

Tabela 2

Uszeregowanie technologii stosowanych w małych oczyszczalniach ścieków dla $Q = 20 \text{ m}^3/\text{dobę}$ i $RLM = 133$ w zależności od przyjętych wag poszczególnych kryteriów

Ważność kryteriów	Uszeregowanie technologii stosowanych w małych oczyszczalniach ścieków		
	$\alpha = 1$	$\alpha = 2$	$\alpha = \infty$
1:1:1:1:1:1	hydrofit* → zrasz → oscz	zrasz* → hydrofit → oscz	hydrofit* ↔ zrasz* ↔ oscz*
2:1:1:1:1:1	hydrofit* → zrasz → oscz	zrasz* ↔ hydrofit* → zrasz	hydrofit* ↔ zrasz* ↔ oscz*
5:1:1:1:1:1	hydrofit* → zrasz → oscz	hydrofit* → zrasz → oscz	hydrofit* ↔ zrasz* ↔ oscz*
1:2:1:1:1:1	hydrofit* → zrasz → oscz	hydrofit* → zrasz → oscz	hydrofit* ↔ zrasz* ↔ oscz*
1:5:1:1:1:1	hydrofit* → zrasz → oscz	hydrofit* → zrasz → oscz	hydrofit* ↔ zrasz* ↔ oscz*
1:1:2:1:1:1	hydrofit* → zrasz → oscz	zrasz* ↔ hydrofit* → zrasz	hydrofit* ↔ zrasz* ↔ oscz*
1:1:5:1:1:1	hydrofit* → zrasz → oscz	hydrofit* → zrasz → oscz	hydrofit* ↔ zrasz* ↔ oscz*
1:1:1:2:1:1	zrasz* → hydrofit → oscz	zrasz* → hydrofit → oscz	hydrofit* ↔ zrasz* ↔ oscz*
1:1:1:5:1:1	zrasz* → oscz → hydrofit	zrasz* → oscz → hydrofit	hydrofit* ↔ zrasz* ↔ oscz*
1:1:1:1:2:1	zrasz* → hydrofit → oscz	zrasz* → oscz → hydrofit	hydrofit* ↔ zrasz* ↔ oscz*
1:1:1:1:5:1	zrasz* → oscz → hydrofit	zrasz* → oscz → hydrofit	hydrofit* ↔ zrasz* ↔ oscz*
1:1:1:1:1:2	hydrofit* → zrasz → oscz	hydrofit* → zrasz → oscz	hydrofit* ↔ zrasz* ↔ oscz*
1:1:1:1:1:5	hydrofit* → zrasz → oscz	hydrofit* → zrasz → oscz	hydrofit* ↔ zrasz* ↔ oscz*
5:5:1:1:5:5	hydrofit* → zrasz → oscz	zrasz* → hydrofit* → oscz	hydrofit* ↔ zrasz* ↔ oscz*
1:1:5:5:1:1	zrasz* → hydrofit → oscz	zrasz* → hydrofit → oscz	hydrofit* ↔ zrasz* ↔ oscz*
5:5:5:1:5:5	hydrofit* → zrasz → oscz	hydrofit* → zrasz → oscz	hydrofit* ↔ zrasz* ↔ oscz*
5:5:1:5:5:5	hydrofit* → zrasz* → oscz	zrasz* → hydrofit → oscz	hydrofit* ↔ zrasz* ↔ oscz*
5:5:4:3:2:1	hydrofit* → zrasz → oscz	hydrofit* → zrasz → oscz	hydrofit* ↔ zrasz* ↔ oscz*

* – warianty akceptowane

Oddzielnie przeprowadzono analizę wielokryterialną dla oczyszczalni o większych wydajnościach. Zapis macierzy decyzyjnej dla tego zadania przedstawiono w tabeli 3. Wszystkie kryteria były wycenione w skali punktowej od 0 do 10 (gdzie: 0 – ocena najgorsza, 10 – ocena najlepsza).

Do rozwiązania zadania decyzyjnego zastosowano również metodę programowania kompromisowego, przy założeniach jak wyżej. W ten sam sposób nadawano również wagi poszczególnym kryteriom i ich grupom. Wyniki te zamieszczono w tabeli 4. Dla czytelności obliczeń zastosowano skróty nazw poszczególnych technologii: „**SBR**” (oczyszczalnia SBR), „**znap**” (złóże zanurzone napowietrzane), „**osczw**” (osad czynny wielofazowy).

W tabeli zestawiono uszeregowania technologii od najkorzystniejszych do najmniej korzystnych. Uszeregowania zapisano, stosując oznaczenie „→”, natomiast oznaczenie „↔” określa technologie równoważne (tzn. równoodległe od punktu idealnego). W oblicze-

niach, podobnie jak w przykładzie powyżej, przyjęto ograniczenia w wyborze strategii. Próg akceptowalności obliczono jak powyżej, a strategie akceptowalne zaznaczone w tabeli 4 „*” stanowią rozwiązanie zadania decyzyjnego jako wybór strategii leżącej akceptowalnie blisko punktu idealnego.

Tabela 3

**Macierz decyzyjna dla wyboru technologii oczyszczalni ścieków
dla $Q = 100 \text{ m}^3/\text{dobę}$ i $RLM = 67$**

Kryteria oceny technologii	Oceniane technologie stosowane w oczyszczalniach ścieków dla $Q = 100 \text{ m}^3/\text{d}$ i $RLM = 670$		
	SBR	złoże zanurzone napowietrzane	osad czynny wielofazowy
Prostota i łatwość obsługi	10	9	8
Niezawodność działania	9	10	7
Aspekty ekonomiczne	8	10	9
Wpływ na środowisko	10	10	9
Nowoczesność rozwiązania	10	8	6
Estetyka	10	9	7

Tabela 4

**Uszeregowanie technologii stosowanych w małych oczyszczalniach ścieków dla $Q = 100 \text{ m}^3/\text{d}$
i $RLM = 670$ w zależności od przyjętych wag poszczególnych kryteriów**

Ważność kryteriów	Uszeregowanie technologii stosowanych w małych oczyszczalniach ścieków		
	$\alpha = 1$	$\alpha = 2$	$\alpha = \infty$
1:1:1:1:1:1	SBR* \rightarrow znap \rightarrow osczw	SBR* \rightarrow znap \rightarrow osczw	SBR* \leftrightarrow znap* \leftrightarrow osczw*
2:1:1:1:1:1	SBR* \rightarrow znap \rightarrow osczw	SBR* \rightarrow znap \rightarrow osczw	SBR* \leftrightarrow znap* \leftrightarrow osczw*
5:1:1:1:1:1	SBR* \rightarrow znap \rightarrow osczw	SBR* \rightarrow znap \rightarrow osczw	SBR* \leftrightarrow znap* \leftrightarrow osczw*
1:2:1:1:1:1	SBR* \leftrightarrow znap* \rightarrow SBR	znap* \rightarrow SBR \rightarrow osczw	SBR* \leftrightarrow znap* \leftrightarrow osczw*
1:5:1:1:1:1	znap* \rightarrow SBR \rightarrow osczw	znap* \rightarrow SBR \rightarrow osczw	SBR* \leftrightarrow znap* \leftrightarrow osczw*
1:1:2:1:1:1	znap* \rightarrow SBR \rightarrow osczw	znap* \rightarrow SBR \rightarrow osczw	SBR* \leftrightarrow znap* \leftrightarrow osczw*
1:1:5:1:1:1	znap* \rightarrow SBR \rightarrow osczw	znap* \rightarrow osczw \rightarrow SBR	SBR* \leftrightarrow znap* \leftrightarrow osczw*
1:1:1:2:1:1	SBR* \rightarrow znap \rightarrow osczw	SBR* \rightarrow znap \rightarrow osczw	SBR* \leftrightarrow znap* \leftrightarrow osczw*
1:1:1:5:1:1	SBR* \rightarrow znap \rightarrow osczw	SBR* \rightarrow znap \rightarrow osczw	SBR* \leftrightarrow znap* \leftrightarrow osczw*
1:1:1:1:2:1	SBR* \rightarrow znap \rightarrow osczw	SBR* \rightarrow znap \rightarrow osczw	SBR* \leftrightarrow znap* \leftrightarrow osczw*
1:1:1:1:1:2	SBR* \rightarrow znap \rightarrow osczw	SBR* \rightarrow znap \rightarrow osczw	SBR* \leftrightarrow znap* \leftrightarrow osczw*
1:1:1:1:1:5	SBR* \rightarrow znap \rightarrow osczw	SBR* \rightarrow znap \rightarrow osczw	SBR* \leftrightarrow znap* \leftrightarrow osczw*
5:5:1:1:5:5	SBR* \rightarrow znap \rightarrow osczw	SBR* \rightarrow znap \rightarrow osczw	SBR* \leftrightarrow znap* \leftrightarrow osczw*
1:1:5:5:1:1	znap* \rightarrow SBR \rightarrow osczw	znap* \rightarrow osczw \rightarrow SBR	SBR* \leftrightarrow znap* \leftrightarrow osczw*
5:5:5:1:5:5	SBR* \rightarrow znap \rightarrow osczw	SBR* \rightarrow znap \rightarrow osczw	SBR* \leftrightarrow znap* \leftrightarrow osczw*
5:5:1:5:5:5	SBR* \rightarrow znap \rightarrow osczw	SBR* \rightarrow znap \rightarrow osczw	SBR* \leftrightarrow znap* \leftrightarrow osczw*
5:5:4:3:2:1	znap* \rightarrow SBR \rightarrow osczw	znap* \rightarrow SBR \rightarrow osczw	SBR* \leftrightarrow znap* \leftrightarrow osczw*

* – warianty akceptowalne

5. Analiza uzyskanych wyników

Analizując wyniki uzyskane dla małych oczyszczalni ścieków ($Q = 20 \text{ m}^3/\text{d}$ i $\text{RLM} = 133$), można stwierdzić, że ze względu na wyniki analizy wielokryterialnej zbioru rozwiązań powinny być rozpatrywane w dwóch grupach: dla $\alpha = 1$ i 2 oraz dla $\alpha = \infty$. Dla $\alpha = 1$ i 2 wykonano 36 przypadków obliczeniowych, zakładając różne wagi poszczególnych kryteriów – w tych obliczeniach 21 razy jako najkorzystniejsza została wybrana technologia hydrofitowa, natomiast 15 razy technologia oparta o złoża zraszane. Dla $\alpha = \infty$ wszystkie trzy warianty technologiczne są równoodległe od punktu idealnego (ich odległość we wszystkich przypadkach wynosi 0). Wynika to najprawdopodobniej z niewielkich różnic pomiędzy wartościami kryteriów (patrz tabela 1), co pozwala stwierdzić, że technologie pod względem kryteriów oceniających są do siebie bardzo podobne. W ostatnim wierszu tabeli 2 przedstawiono wyniki obliczeń, dla których wagi poszczególnych kryteriów zostały oszacowane w grupie ekspertów w trakcie konsultacji społecznych. Wyniki tych obliczeń potwierdzają, że najkorzystniejszym rozwiązaniem dla małych oczyszczalni jest technologia hydrofitowa, a zaraz za nią złoża zraszane.

Na podstawie wyników uzyskanych dla małych oczyszczalni ścieków można stwierdzić, że oczyszczalnie hydrofitowe i oczyszczalnie ze złożami zraszanymi są porównywalnie dobrym rozwiązaniem technologicznym. Oczyszczalnie ze złożem zraszanym stanowią korzystniejsze rozwiązanie wtedy, gdy wyższa waga zostanie przyłożona do kryteriów: wpływ na środowisko i nowoczesność rozwiązania. Jednocześnie w rozpatrywanym zakresie przepustowości oczyszczalnia z osadem czynnym 26 razy została wybrana jako najbardziej niekorzystny wariant technologiczny.

W przypadku większych oczyszczalni ścieków ($Q = 100 \text{ m}^3/\text{d}$ i $\text{RLM} = 670$) można stwierdzić, podobnie jak w poprzednim przypadku, że ze względu na wyniki analizy wielokryterialnej zbioru rozwiązań są rozpatrywane w dwóch grupach: dla $\alpha = 1$ i 2 oraz dla $\alpha = \infty$. Dla $\alpha = 1$ i 2 wykonano 36 przypadków obliczeniowych, zakładając różne wagi poszczególnych kryteriów. W tych obliczeniach 25 razy jako najkorzystniejsza została wybrana technologia SBR, natomiast 11 razy technologia oparta na złożach zanurzonych napowietrzanych. Dla $\alpha = \infty$ wszystkie trzy warianty technologiczne są równoodległe od punktu idealnego (ich odległość we wszystkich przypadkach wynosi 0). Oczyszczalnia z osadem czynnym wielofazowym 31 razy została wybrana jako najbardziej niekorzystny wariant technologiczny.

Pozwala to stwierdzić, że w tym zakresie przepustowości małych oczyszczalni technologie cyklicznego osadu czynnego SBR są najkorzystniejszym rozwiązaniem technologicznym. Oczyszczalnie ze złożem zanurzonym napowietrzonym stanowią korzystniejsze rozwiązanie wtedy, gdy większa waga zostanie przyłożona do kryteriów: niezawodność działania i aspekty ekonomiczne rozwiązania. W ostatnim wierszu tabeli przedstawiono wyniki obliczeń, dla których wagi poszczególnych kryteriów zostały oszacowane w grupie ekspertów w trakcie konsultacji społecznych; w wyniku tych obliczeń jako najkorzystniejsze rozwiązanie technologiczne dla $Q = 100 \text{ m}^3/\text{d}$ i $\text{RLM} = 670$ wskazywane są złoża zanurzane cyklicznie napowietrzane.

6. Wnioski

Wybór małych oczyszczalni powinien być dokonywany na podstawie przeprowadzanej przez specjalistów wielokryterialnej analizy różnych rozwiązań technologicznych, zapewniających wymaganą efektywność oczyszczania w dostosowaniu do warunków lokalnych. W oczyszczalniach o przepustowości do RLM = 1000 i podstawowych wymaganiach powinny być stosowane złoża biologiczne ze względu na swoje zalety, tj. prostotę obsługi i niską energochłonność. Alternatywnym rozwiązaniem są oczyszczalnie hydrofitowe, których zastosowanie może być ograniczone ze względu na zajmowaną dużą powierzchnię terenu. W oczyszczalniach o większej przepustowości, a także w przypadku konieczności podwyższonego usuwania substancji biogenych, powinny być stosowane reaktory osadu czynnego o działaniu cyklicznym typu SBR. Zastosowana metoda wielokryterialnego wspomaganiania decyzji może być przydatna do oceny i wyboru najkorzystniejszej technologii w małych oczyszczalniach, co chronić będzie użytkowników przed stosowaniem rozwiązań nieudanych.

Literatura

- [1] Aragonés-Beltrána P., Mendoza-Rocab J.A., Bes-Piáa A. et al., *Application of multi-criteria decision analysis to jar-test results for chemicals selection in the physical–chemical treatment of textile wastewater*, Journal of Hazardous Materials, 164, 2009, 288-295.
- [2] Balkema A., Weijers S., Lambert F., *On Methodologies for Comparison of Wastewater Treatment Systems with Respect to Sustainability*, Konferencja WIMEK „Options for Closed Water Systems”, 11–13 marca 1998, Wageningen, Holandia.
- [3] Belton V., Stewart T., *Multiple Criteria Decision Analysis. An Integrated Approach*, Kluwer Academic Publishers, 2002.
- [4] Brechet T., Tulkens H., *Beyond BAT: Selecting optimal combinations of available techniques, with an example from the limestone industry*, Journal of Environmental Management, 90, 2009, 1790-1801.
- [5] Georgopoulou E., Hontou V., Gakis et al., *BEAsT: a decision-support tool for assessing the environmental benefits and the economic attractiveness of best available techniques in industry*, Journal of Cleaner Production, Vol. 16, No. 3, 2008.
- [6] Lundin M. et al., *A set of indicators for the assessment of temporal variations in the sustainability of sanitary systems*, Wat. Sci. Tech., vol. 39, nr 5, 1999, 235-242.
- [7] Mucha Z., Mikosz J., *Racjonalne stosowanie małych oczyszczalni ścieków zgodnie z kryteriami zrównoważonego rozwoju*, Czasopismo Techniczne, z. 2-Ś/2009, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków 2009.
- [8] Roeleveld P.J. et al., *Sustainability of municipal wastewater treatment*, Wat. Sci. Tech., vol. 35, nr 10, 1997, 221-228.
- [9] Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 24 lipca 2006 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. 06.137.984, zmiana Dz. U. 09.27.169).
- [10] Statnikova R.B., Bordetsky A., Statnikov A., *Multi-criteria analysis of real-life engineering optimisation problems: statement and solution*, Nonlinear Analysis, 63, 2005, 685-696.
- [11] Szelągowski W., *Ekonomika Gospodarki Wodnej*, Państwowe Wydawnictwo Ekonomiczne, Warszawa 1985.