

Comprehensive, waste-free wastewater treatment technology in a circular economy system

Kompleksowa, bezodpadowa technologia oczyszczania ścieków w systemie gospodarki obiegu zamkniętego



DOI: 10.15199/62.2025.10.6

A comprehensive, waste-free wastewater treatment technology within a circular economy system was designed for wastewater treatment plants. ZEZERO OP technology integrates standalone process nodes, including a biogas plant; a leachate and process-grade wastewater treatment node, enabling the selective separation of micropollutants, heavy metals, and nutrients (fertilizers); a node for the selective separation of "green" CO₂ and biomethane from biogas; a plasma gasification node for wastewater treatment residues; and a node for the energy utilization of syngas and biomethane generated during the gasification process.

Keywords: waste-free wastewater treatment technology, circular economy, wastewater treatment

Kompleksowa, bezodpadowa technologia oczyszczania ścieków w systemie gospodarki obiegu zamkniętego (GOZ) jest przeznaczona dla oczyszczalni ścieków. Technologia ZEZERO OP stanowi integrację samodzielnych węzłów technologicznych obejmujących: biogazownię, węzeł oczyszczania odcieków i ścieków oczyszczonych do poziomu wody technologicznej, umożliwiającą selektywną separację mikrozanieczyszczeń, metali ciężkich oraz substancji biogennej (nawozowych), węzeł selektywnej separacji zielonego CO₂ i biometanu z biogazu, węzeł zgazowania plazmowego pozostałości procesowych z oczyszczania ścieków oraz węzeł energetycznego wykorzystania powstałego w trakcie procesu zgazowania gazu syntezowego i biometanu. Wdrożenie w oczyszczalni ścieków technologii ZEZERO OP umożliwia wprowadzenie efektywnej ekonomicznie GOZ w procesie oczyszczania ścieków oraz spełnienie wszystkich wymagań Nowej dyrektywy ściekowej Unii Europejskiej.

Słowa kluczowe: bezodpadowa technologia oczyszczania ścieków, gospodarka obiegu zamkniętego, GOZ, oczyszczanie ścieków, Nowa dyrektywa ściekowa, UE

Współczesne społeczeństwa podejmują stale rosnącą liczbę działań, które generują odpady i ścieki. Uwalnianie ścieków komunalnych i przemysłowych do środowiska jest jednym z głównych czynników wpływających na jakość gleby, powietrza i wody^{1, 2)}. Najważniejszym zadaniem służącym poprawie jakości środowiska jest udoskonalenie procesów zbierania i oczyszczania ścieków. Zadanie to ma na celu usunięcie zanieczyszczeń ze ścieków komunal-

nych i przemysłowych w stopniu umożliwiającym dalsze wykorzystanie wody i zmniejszenie obciążenia środowiska naturalnego³⁾. Spełnienie powyższych wyzwań wiąże się z rozwojem wysokosprawnych oczyszczalni ścieków.

W takich krajach Unii Europejskiej, jak Austria, Holandia, Luksemburg i Niemcy wskaźnik ludności obsługiwanej przez oczyszczalnie ścieków wynosi ponad 95%. W Polsce udział ludności korzystającej z oczyszczalni



Prof. dr hab. inż. Wilhelm J. TIC (ORCID: 0000-0002-9071-5565) w roku 1986 ukończył studia na Wydziale Chemicznym Politechniki Śląskiej w Gliwicach. Pracuje na stanowisku profesora w Katedrze Inżynierii Procesowej i Środowiska na Wydziale Mechanicznym Politechniki Opolskiej i pełni funkcję członka zarządu w firmie WTT Innowacje sp. z o.o. sp. k. w Opolu. Specjalność – inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka.



Dr inż. Grzegorz SIEMIĄTKOWSKI (ORCID: 0000-0002-5122-7307) w roku 1997 ukończył studia na Wydziale Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Opolskiej, specjalność automatyka i metrologia. W 2011 r. uzyskał stopień naukowy doktora na Wydziale Mechanicznym tej samej uczelni, specjalność budowa i eksploatacja maszyn. Obecnie pracuje na stanowisku dyrektora ds. rozwoju w firmie WTT Innowacje sp. z o.o. sp. k. w Opolu. Specjalność – inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka.

* Adres do korespondencji:

Politechnika Opolska, ul. St. Mikołajczyka 5, 45-271 Opole, tel.: (77) 449-83-80, kom.: +48 508-499-033, e-mail: w.tic@po.edu.pl

ścieków w 2022 r. był mniejszy i wynosił średnio 76%, przy czym w miastach udział ten wynosił ok. 95%, a na wsiach 47%⁴⁾. W Polsce liczba oczyszczalni ścieków komunalnych wzrosła wprawdzie z 3136 w 2010 r. do 3260 w 2022 r., ale wzrost ten nie pokrywa wszystkich potrzeb w tym zakresie. Wśród oczyszczalni przemysłowych w 2022 r. 60% stanowiły oczyszczalnie biologiczne, a udział oczyszczalni mechanicznych wynosił 23%. Wśród oczyszczalni komunalnych 75% wykorzystywało biologiczne oczyszczalnie ścieków, a 25% oczyszczalnie umożliwiające podwyższone usuwanie biogenów⁴⁾.

W celu poprawy jakości wód, ochrony środowiska naturalnego i zdrowia publicznego, a także wspierania gospodarki o obiegu zamkniętym (GOZ) Rada UE w listopadzie 2024 r. przyjęła Nową dyrektywę ściekową⁵⁾. Dyrektywa ta rozszerza zakres regulacji na mniejsze miejscowości i wprowadza obowiązek usuwania mikrozanieczyszczeń ze ścieków. Dyrektywa nakłada rozszerzoną odpowiedzialność za produkty wprowadzane na rynek, co przekłada się na podejście „zanieczyszczający płaci”. Zgodnie z tą zasadą m.in. producenci kosmetyków, leków czy środków chemicznych będą zobowiązani wziąć na siebie część kosztów usuwania mikrozanieczyszczeń ze ścieków. Zmiany nastąpią mają do 2035 r. i nakładają odpowiedzialność finansową na producentów kosmetyków i leków. W myśl założeń dyrektywy do 2035 r. ścieki komunalne zostaną poddane wtórnemu oczyszczeniu przed wprowadzeniem ich do środowiska. Obowiązek ten dotyczy wszystkich aglomeracji o wydajności co najmniej 1000 RLM. Do 2039 r. we wszystkich oczyszczalniach ścieków o RLM od 150 tys., a do 2045 r. w oczyszczalniach powyżej 10 tys. RLM wprowadzony zostanie trzeci stopień oczyszczania ścieków obejmujący usuwanie azotu i fosforu. Dodatkowy, czwarty stopień oczyszczania mikrozanieczyszczeń będzie obowiązkowy dla wszystkich podmiotów o RLM powyżej 150 tys. (i ponad 10 tys. RLM na podstawie oceny ryzyka) do 2045 r.

Dyrektywa wprowadza ściśle monitorowane parametrów zdrowia publicznego (takie jak znane wirusy i nowe patogeny), zanieczyszczeń chemicznych, w tym tzw. wiecznych chemikaliów (substancje per- i polifluoroalkilowe, PFAS), mikroplastików oraz odporności na środki przeciwdrobnoustrojowe⁵⁾.

Spełnienie wymagań nowej dyrektywy jest ważnym wyzwaniem stawianym przed oczyszczalniami ścieków. Proces usuwania mikrozanieczyszczeń ze ścieków jest złożony i zależy od fizykochemicznego charakteru substancji, biodostępności, warunków pracy komór biologicznego oczyszczania i struktury społeczności mikroorganizmów⁶⁾. Badania pokazują, że obecnie skuteczność usuwania zanieczyszczeń w konwencjonalnych oczyszczalniach ścieków jest mała, a nawet ujemna⁷⁾. Usuwanie mikrozanieczyszczeń w konwencjonalnych układach oczyszczania ścieków może być bardziej efektywne, jednak wymaga wydłużenia czasu retencji osadu oraz zwiększenia jego napowietrzania, co generuje znaczne dodatkowe koszty⁸⁾.

Ważnym zadaniem w gospodarce ściekowej jest zagospodarowanie osadów ściekowych. W Polsce w przemysłowych i komunalnych oczyszczalniach ścieków w 2022 r. wytworzono 1012,4 tys. t s.m. osadów ściekowych. W porównaniu z 2010 r. obserwowano 15-proc. zwiększenie produkcji osadów przekształcanych termicznie, nieznaczny wzrost produkcji osadów wykorzystywanych w rolnictwie oraz 5-proc. wzrost ilości osadów stosowanych do uprawy roślin przeznaczonych do produkcji kompostu⁴⁾.

W oczyszczalniach wydzielone ze ścieków osady ściekowe poddawane są dalszej obróbce. Zagospodarowanie osadów ściekowych obejmuje różne metody, w tym suszenie, dezynfekcję, wykorzystanie w rolnictwie, termiczne przekształcanie obejmujące spalanie, pirolizę i zgazowanie oraz składowanie. Z metod termicznego przekształcania osadów ściekowych największe znaczenie mają spalanie i piroliza⁹⁾. Procesy te generują jednak duże ilości uciążliwych odgazów, które przed wprowadzeniem do powietrza wymagają oczyszczania. Mało stosowanym procesem termicznego przekształcania osadów ściekowych jest ich wysokotemperaturowe zgazowanie, w tym zgazowanie plazmowe¹⁰⁾. Proces ten może być samowystarczalny energetycznie, nie generuje niebezpiecznych odpadów i jest bezpieczny dla środowiska^{11, 12)}.

W pracy przedstawiono założenia nowej kompleksowej technologii bezodpadowego oczyszczania ścieków. Technologia ta powstała we współpracy z NCBR.

Założenia nowej bezodpadowej technologii oczyszczania ścieków

Kompleksowa, bezodpadowa technologia oczyszczania ścieków w systemie GOZ przeznaczona jest dla oczyszczalni ścieków. Nowa technologia oczyszczania ścieków ma na celu ograniczenie powstawania odpadów poprzez zawrót i ponowne wykorzystanie produktów otrzymanych w procesie technologicznym (obiegi zamknięte). Proponowane rozwiązanie zakłada przetworzenie produktów powstających w procesie oczyszczania ścieków w sposób, który umożliwi ich ponowne wykorzystanie w różnych dziedzinach życia gospodarczego, począwszy od produkcji nawozów i polepszaczy gleby, poprzez odzysk energii, a także wody i jej powtórne wykorzystanie na cele rolnicze i przemysłowe.

Technologia ta, o akronimie ZEWEOP, została opracowana w wyniku umowy z NCBR nr 92/20/PU/P88-01 na realizację przedmiotu zamówienia przedkomercyjnego w ramach przedsięwzięcia „Oczyszczalnia przyszłości”¹³⁾ i stanowi pełnoskalową, dostosowaną do potrzeb miejsca inwestycji integrację samodzielnych węzłów technologicznych obejmujących (rys. 1): (i) biogazownię, gdzie procesowi fermentacji podlega część osadów wstępnych i osadów nadmiernych oraz kosubstraty dowożone spoza oczyszczalni ścieków celem podniesienia efektywności produkcji biogazu oraz jako dodatkowe źródło przy-

chodów dla oczyszczalni ścieków z tytułu ich utylizacji, (ii) doczyszczanie ścieków oczyszczonych i/ lub odcieków do poziomu wody technologicznej, w tym selektywną separację biogenych produktów nawozowych, mikrozanieczyszczeń i metali ciężkich, oraz (iii) węzeł zgazowania plazmowego pozostałości procesowych z oczyszczania ścieków; w wyniku pracy tego węzła osady ściekowe, skratki i mikrozanieczyszczenia powstające na terenie oczyszczalni przetwarzane są na gaz syntezowy ($H_2 + CO$) oraz sztuczny bazalt (inertny środowiskowo produkt), (iv) węzeł separacji czystego zielonego ditlenku węgla z biogazu, w tym układ do napełniania butli i mobilnych pojemników CO_2 , stanowiących produkt do dalszej odsprzedaży (produkt komercyjny stanowiący istotne dodatkowe źródło przychodów dla oczyszczalni ścieków).

Wdrożenie w oczyszczalni ścieków technologii ZEZERO OP umożliwi wprowadzenie efektywnej ekonomicznie GOZ w procesie oczyszczania ścieków oraz spełnienie wszystkich wymagań Nowej dyrektywy ściekowej Unii Europejskiej³.

Kompleksowa Bezodpadowa Technologia ZEZERO® w systemie Gospodarki Obiegu Zamkniętego w procesie Oczyszczania Ścieków (ZEZERO® OP)

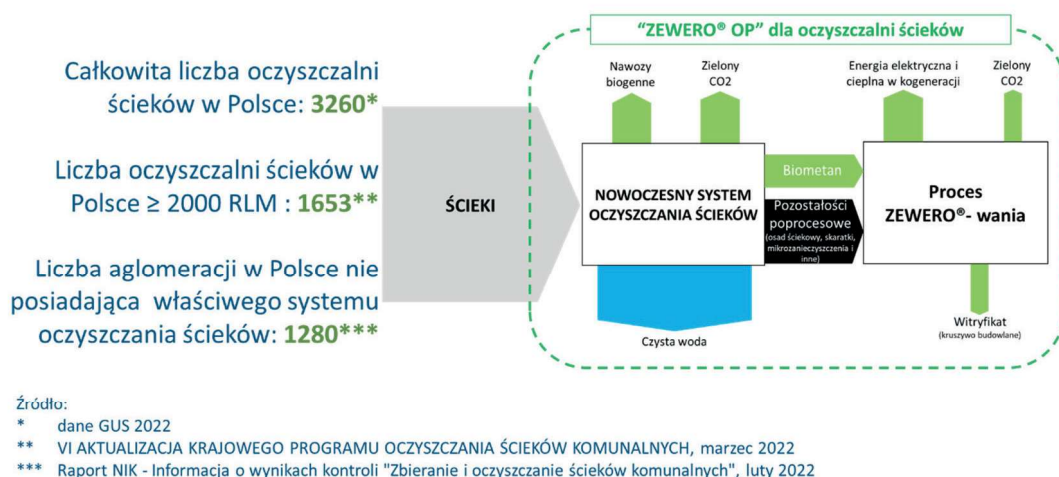


Fig. 1. Simplified diagram of the comprehensive waste-free ZEZERO OP technology

Rys. 1. Uproszczony schemat kompleksowej bezodpadowej technologii ZEZERO OP

Doczyszczanie ścieków oczyszczonych i/ lub odcieków do poziomu wody technologicznej

Pierwszy etap oczyszczania ścieków surowych stanowi część konwencjonalnej mechaniczno-biologicznej oczyszczalni ścieków. Ściek wstępnie oczyszczony (po procesie mechaniczno-biologicznym) jest doczyszczany (rys 2).

Węzeł doczyszczania ścieków umożliwia redukcję zawiesin, bakterii, wirusów i koloidów w oczyszczonej wodzie i sterylizację wody za pomocą promieniowania UV.

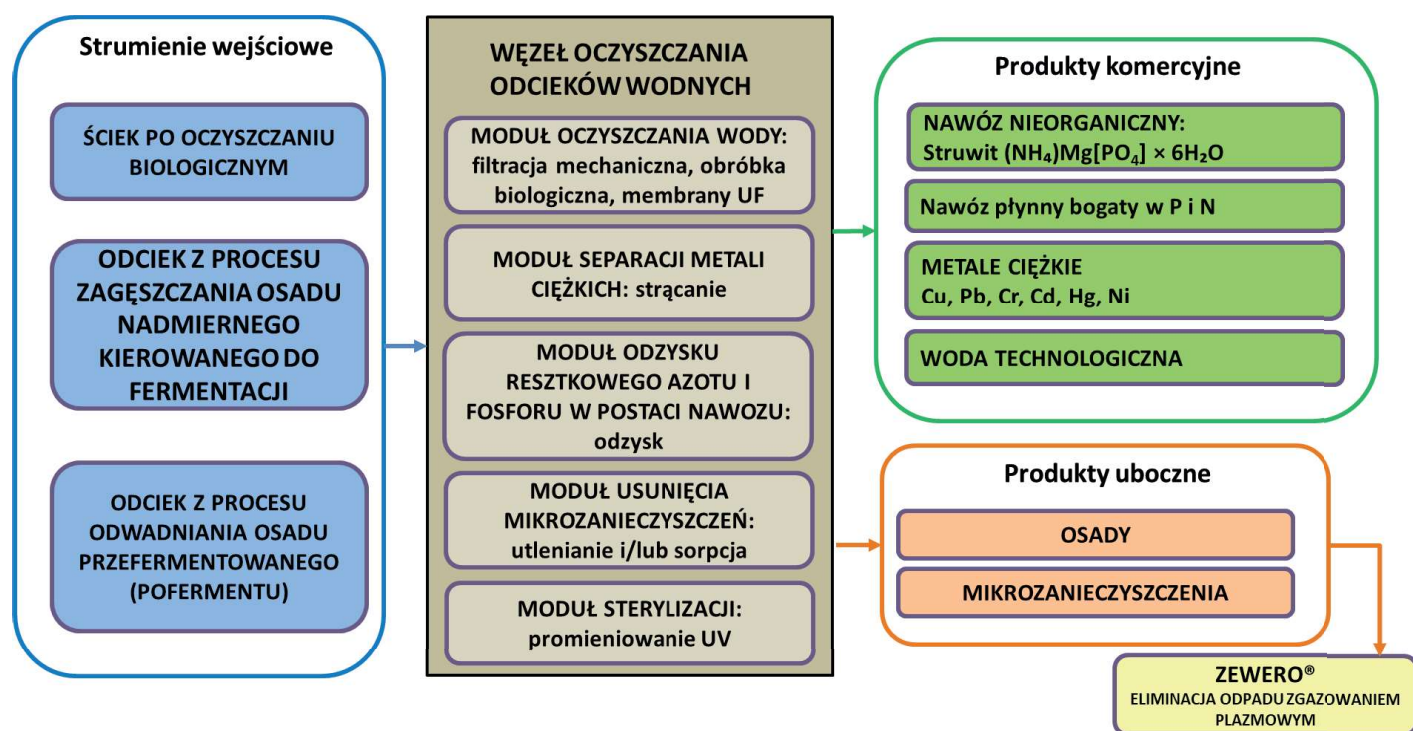


Fig. 2. Schematic diagram of the purified sewage treatment plant

Rys. 2. Schemat węzła doczyszczania ścieków oczyszczonych

Table 1. Efficiency of domestic and municipal wastewater treatment

Tabela 1. Efektywność oczyszczania ścieków bytowych i komunalnych

Parametr	Dopływ ścieków i odcieków	Ściek oczyszczony	Wymagania prawne* ¹⁴⁾	Efektywność oczyszczania, %
BZT ₅ , mg/L	541	2,00	40	99,63
ChZT, mg/L	4714	10,66	150	99,77
Zawiesina ogólna, mg/L	2580	4,03	50	99,84
Azot ogólny (N), mg/L	345	16,20	30	95,30
Fosfor (P), mg/L	169	1,75	5	98,97

* Najwyższe dopuszczalne wartości dla oczyszczalni ścieków bytowych i komunalnych dla RML poniżej 2000

Table 2. Efficiency of water purification for agricultural irrigation

Tabela 2. Efektywność oczyszczania wody do nawadniania w rolnictwie

Parametr	Dopływ ścieków i odcieków	Ściek oczyszczony	Wymagania prawne* ¹⁴⁾	Efektywność oczyszczania, %
BZT ₅ , mg/L	541	2,00	≤ 10	99,63
Zawiesina ogólna, mg/L	2580	4,03	≤ 10	99,84
Mętność, NTU	597	0,89	≤ 5	99,85

* Wymagania jakości odzyskanej wody do nawadniania w rolnictwie, Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) dla klasy jakości odzyskanej wody A

Z wstępnie oczyszczonej wody usuwane są takie zanieczyszczenia, jak mikroplastik i mikrozanieczyszczenia w postaci farmaceutyków i pestycydów. W procesie tym równocześnie następuje odzysk metali ciężkich oraz związków fosforu w postaci nawozów nieorganicznych.

W tabeli 1 przedstawiono efektywność oczyszczania ścieków wg zaproponowanej technologii. Z analizy danych wynika, że efektywność oczyszczania ścieków dla wszystkich badanych parametrów jest bardzo wysoka i umożliwia spełnienie wymagań prawnych dla tego typu ścieków.

Zgodnie z wymaganiami odzyskana woda (ściek oczyszczony) zwracana do ponownego użycia powinna być jak najlepszej jakości, spełniać parametry oraz wartości określone w rozporządzeniu¹⁴⁾. Efektywność oczyszczania wody do wymagań stosowanych w rolnictwie przedstawiono w tabeli 2.

Ściek oczyszczony spełnia wymagania jakości wody do nawadniania w rolnictwie zarówno w zakresie wartości BZT₅, zawiesiny ogólnej, jak i mętności. Dodatkowo oceniono wskaźnik mikrobiologiczny, czyli występowanie bakterii *Escherichia coli*. W badanych próbkach ścieku oczyszczonego liczba bakterii *E. coli* wynosiła poniżej 30 NPL/100 mL, co oznacza brak kolonii *E. coli* przy zastosowanej procedurze badawczej laboratorium, opierającej się na technice NPL (metoda najbardziej prawdopodobnej liczby).

Można stwierdzić, że jakość odzyskanej wody jest bardzo dobra. We wszystkich przypadkach badanych parametrów ogólnych jakości ścieków (BZT₅, zawiesina ogólna i mętność) oraz wskaźnika mikrobiologicznego (liczba bakterii *E. coli*) efektywność oczyszczania jest bardzo wysoka i spełnione zostały wymagania zarówno dla dopuszczalnych wartości dla oczyszczalni ścieków bytowych i komunalnych dla RML poniżej 2000, jak i dla womogów jakości wody do stosowania w rolnictwie.

Dla oceny jakości oczyszczonej wody przeprowadzono badania nad usuwaniem małowartościowych mikrozanieczyszczeń z całej objętości ścieku oczyszczonego zwrucanego do odbiornika oraz zwracanego do ponownego użycia, jak i powstających w procesie oczyszczania ścieków.

Mikrozanieczyszczenia trudne w usunięciu rozkładane są metodą utleniania za pomocą aktywnego tlenu. W ten sposób ulegają one rozkładowi do nieszkodliwych związków organicznych. Stopień rozkładu jest różny dla różnych mikrozanieczyszczeń, jednak oczekiwany jest 50-proc. stopień usunięcia sumy mikrozanieczyszczeń. Zastosowanie utleniania jako końcowego etapu oczyszczania i dezynfekcji wody pozwala również uniknąć dozowania środków chemicznych i wtórnego zanieczyszczenia wody (jak w przypadku pogłębionego utleniania metodą Fentona) lub wtórnego powstawania potencjalnie szkodliwych lub reaktywnych związków (jak to ma miejsce w przypadku chlorowania). Dodatkowo przewidywane jest wzbogacenie tego węzła o bardziej konwencjonalny zespół separacji w formie sorpcji mikrozanieczyszczeń na złożu odpowiednio dobranych sorbentów. Woda (oczyszczone odcieki) kierowana będzie do podzespołu sterylizacji wyposażonego w lampy UV.

W tabeli 3 przedstawiono wielkość redukcji mikrozanieczyszczeń pochodzenia farmaceutycznego i herbicydów w ściekach i odzyskanej wodzie dla wybranych związków. Zarówno hormony, jak i herbicydy były całkowicie usuwane ze ścieków. Z kolei efektywność usuwania farmaceutyków zależała od rodzaju związku. Uzyskano bardzo dobre efekty usuwania związków w zakresie wartości średnich, od 90,05% dla karbamazepiny do 100% dla innych substancji (bifenoks, izoproturon, estron, alachlor, alkonifen). W przypadku azithromycyny i metropololu efektywność oczyszczania wynosiła powyżej 90%. Wymagane jest, aby zaproponowane technologie umożliwiały usuwanie lub odzysk metali ciężkich co najmniej do stężeń określonych

Table 3. Reduction of selected pharmaceutical and herbicide micropollutants from wastewater

Tabela 3. Redukcja wybranych mikrozanieczyszczeń pochodzenia farmaceutycznego i herbicydów ze ścieków wodnych

Parametr	Dopływ ścieków i odcieków	Ściek oczyszczony	Efektywność oczyszczania, %
Azytromycyna (antybiotyk), ng/L	1,56	0,15	90,60
Metoprolol, ng/L	0,82	0,11	92,66
Bifenoks, ng/L	1,00	0,00	100,00
Karbamazepina, ng/L	1,67	0,17	90,05
Izoproturon, ng/L	0,24	0,00	100,00
Estron (hormon), ng/L	0,03	0,00	100,00
Alachlor (herbicyd), ng/L	0,22	0,00	100,00
Alkonifen (herbicyd), ng/L	0,16	0,00	100,00

nych w rozporządzeniu¹⁵⁾, przy założeniu, że ich stężenie w ściekach surowych będzie co najmniej 2-krotnie wyższe niż to wskazane w rozporządzeniu¹⁵⁾. W trakcie realizacji projektu, na podstawie badań ścieków surowych zasilających oczyszczalnię, podjęto decyzję o konieczności dodatkowego dozowania zanieczyszczeń. Przyjęto, że docelowe stężenie zanieczyszczeń w ściekach po zadozowaniu będzie na poziomie równym 3-krotności dolnej granicy oznaczalności w laboratorium.

W tabeli 4 przedstawiono efektywność usuwania ze ścieków metali ciężkich. Należy zaznaczyć, że w rozporządzeniu¹⁵⁾ dla różnych gałęzi działalności przewidziano różne wartości dopuszczalne.

Oceniając efektywność usuwania ze ścieków metali ciężkich w kontekście wymagań normatywnych, można stwierdzić, że w przypadku wszystkich metali osiągnięto dobre rezultaty. Stężenie metali ciężkich było mniejsze niż stężenie podane w rozporządzeniu¹⁵⁾, chociaż w trakcie procesu wystąpiło zjawisko uwalniania się rtęci z kłacek osadu czynnego. Jednak stężenie tego metalu w ściekach było na tyle małe, że nie wpłynęło to na końcowe rezultaty.

Wysokotemperaturowe zgazowanie osadów ściekowych

Powstające w procesie oczyszczania ścieków, jako produkt uboczny tego procesu, osady ściekowe oraz skratki są wykorzystywane do produkcji energii elektrycznej oraz ciepłej w procesie termicznego ich przetwarzania (zga-

zowania plazmowego) (rys. 3). Proces zgazowania plazmowego poprzedzony jest mechanicznym odwadnianiem osadów ściekowych do zawartości wody 80%, suszenia do zawartości s.m. 80% i dezodoryzacji gazów. Wstępnie osuszony osad ściekowy kierowany jest do zgazowania plazmowego wraz z pozostałościami z procesu oczyszczania syngazu i skratkami. Oczyszczony syngaz kierowany jest do węzła kogeneracji, gdzie jest spalany wraz z biometanem z biogazowni w celu uzyskania energii elektrycznej i ciepłej. Produkty powstające w procesie zgazowania plazmowego odpadów występują w postaci syngazu oraz bezpiecznego dla środowiska witrifikatu (sztucznego bazaltu), znajdującego zastosowanie jako kruszywo budowlane. Co jest niezmiernie istotne, proces plazmowego zgazowania odpadów jest procesem niepowodującym żadnej emisji zanieczyszczeń gazowych i pyłowych do powietrza.

Z uwagi na fakt, że w badanym procesie osady ściekowe nie są przewidziane do rolniczego wykorzystania oraz produkcji nawozów, a stanowią jedynie substrat w procesie termicznego przekształcania, uzyskane wyniki badań nie były porównywane do normatywów prawnych, czyli rozporządzeń^{16, 17)}.

W trakcie trwania testów pobrano i przebadano 8 próbek osadów ściekowych. Uśrednione wyniki charakterystyki osadów ściekowych kierowanych do zgazowania przedstawiono w tabeli 5. W wyniku procesu zgazowania wysokotemperaturowego powstaje czysty syngaz (55% H₂, 35–40% CO + resztki CO₂ i N), który jest kierowany do kogeneracji. Drugim produktem jest witrifikat, w którym

Table 4. Efficiency of heavy metal removal from wastewater

Tabela 4. Efektywność usuwania metali ciężkich ze ścieków

Parametr	Dopływ ścieków i odcieków	Ściek oczyszczony	Wymagania prawne ¹⁵⁾	Efektywność oczyszczania, %
Rtęć (Hg), mg/L	0,000267	0,000207	0,06–0,2	22,42
Ołów (Pb), mg/L	0,147	0,033	0,1–0,5	77,93
Kadm (Cd), mg/L	0,010	0,004	0,05–0,4	62,59
Chrom (Cr), mg/L	0,138	0,037	0,5–1,0	73,55
Miedź (Cu), mg/L	0,869	0,038	0,1–0,5	95,68
Nikiel (Ni), mg/L	0,125	0,022	0,1–0,5	82,75

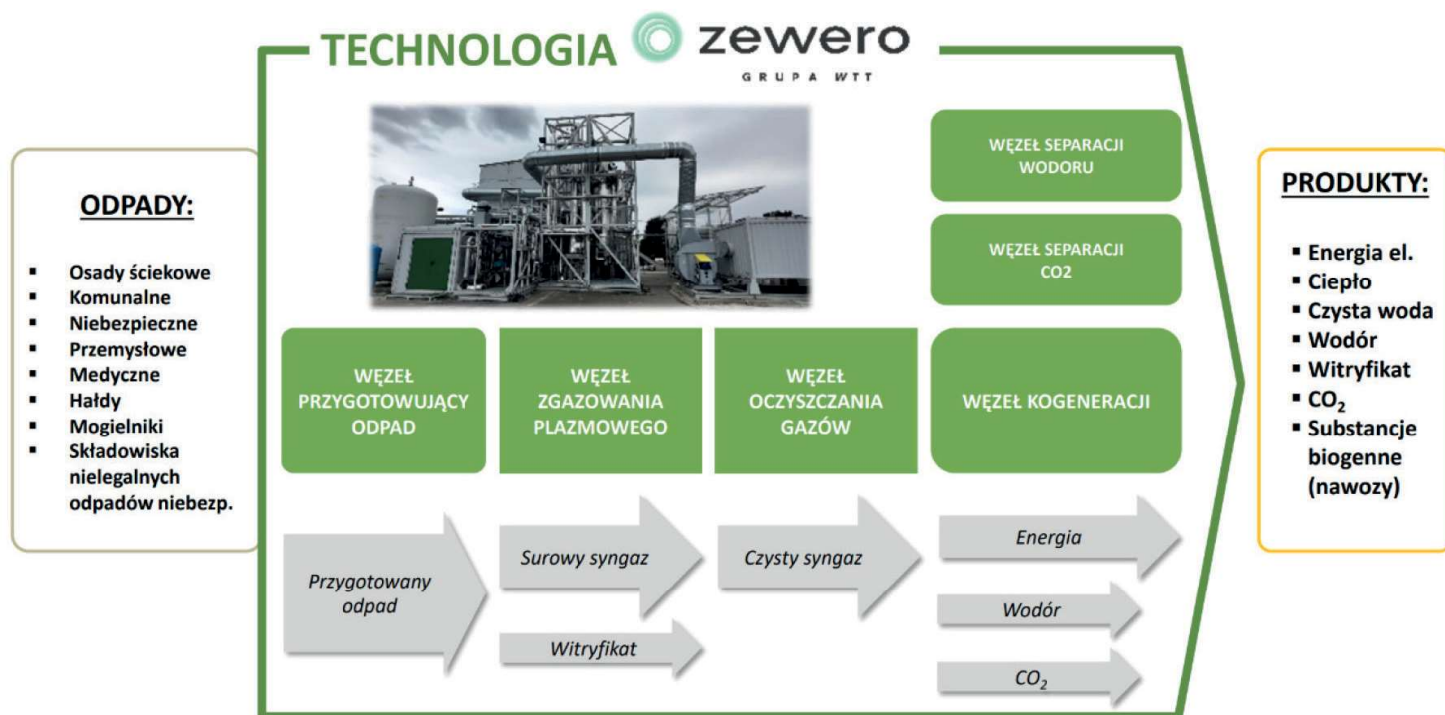


Fig. 3. Plasma gasification unit for process residues from wastewater treatment

Rys. 3. Węzeł plazmowego zgazowania pozostałości procesowych z oczyszczania ścieków

zostają zatopione niewymywalne metale ciężkie. Witryfikat jest certyfikowanym produktem do stosowania jako materiał budowlany.

Proponowana technologia ekologicznego, bezemisyjnego zgazowania plazmowego odpadów, w tym wszystkich pozostałości po oczyszczaniu ścieków, umożliwia przetworzenie powstałych odpadów w produkty. Produkty powstające w procesie zgazowania plazmowego odpadów występują w postaci syngazu oraz bezpiecznego dla środowiska witryfikatu (sztucznego bazaltu), wykorzystywanego jako kruszywo budowlane. Powstały w procesie plazmowego zgazowania odpadów syngaz, po oczyszczeniu jest wykorzystywany jako gaz zasilający silnik kogeneratora produkującego energię elektryczną i ciepłą, która w pierwszej kolejności zaspokaja potrzeby własne instalacji plazmowego zgazowania. Jako opcja tego rozwiązania, istnieje możliwość rozbudowy instalacji o moduł separacji ze spalin kogeneratora CO₂ o wysokiej czystości, który może być gospodarczo wykorzystany, np. kierowany do szklarni jako czynnik zwiększający plony w uprawie pomidorów.

Badania witryfikatu

Witryfikat powstaje w procesie plazmowego przekształcania osadów. Głównymi zanieczyszczeniami witry-

Table 5. Characteristics of sewage sludge sent to the gasification unit

Tabela 5. Charakterystyka osadów ściekowych kierowanych do węzła zgazowania

Parametr	Jednostka	Stężenie
Salmonella	obecność	nie wykryto
Liczba jaj pasożytów jelitowych	szt./kg	0,00
pH	-	7,73
Strata po prażeniu	% mas.	69,00
Sucha pozostałość	%	16,60
Azot amonowy (NH ₄ -N)	mg/kg s.m.	1,96
Azot Kjeldahla (N)	%	5,15

Table 6. Test results of the vitrified material regarding the fulfillment of standard characteristics for aggregates

Tabela 6. Wyniki badań witryfikatu w zakresie spełnienia cech standardowych dla kruszywa

Badana cecha	Badania wg normy	Badana frakcja
Skład ziarnowy	PN-EN 933-1:2012 ¹⁹⁾	+
Zawartość pyłów	PN-EN 933-1:2012 ¹⁹⁾	+
Gęstość ziaren	PN-EN 1097-6:2013 ²⁰⁾	+
Nasiąkliwość WA 24	PN-EN 1097-6:2013 ²⁰⁾	+
Siarka całkowita	PN-EN 1744-1:2013 ²¹⁾	+
Siarczany rozpuszczalne w kwasie	PN-EN 1744-1:2013 ²¹⁾	+
Skład chemiczny – skład fazowy XRD	PN-EN 932-3:1999 ²²⁾	ASA, EDS i XRD
Wymywalność metali ciężkich	metoda instrumentalna	wynik wymywalności poniżej limitu



Fig. 4. Modular installation for separation of clean green carbon dioxide from biogas and exhaust gases

Rys. 4. Modułowa instalacja separacji czystego zielonego ditlenku węgla z biogazu i gazów spalinowych

fikatu są substancje nieorganiczne, w tym głównie metale ciężkie. Mikrozanieczyszczeń organicznych w witrifikacie nie stwierdzono.

Przeprowadzono badania witrifikatu w zakresie cech standardowych dla kruszywa (tabela 6). Na podstawie wyników badań witrifikatu ze zgazowania plazmowego uzyskano pozytywną opinię co do zastosowania witrifikatu jako kruszywa sztucznego. Wyniki testów wymywalności wykazują, że wszystkie metale ciężkie konieczne do oceny przydatności witrifikatu, np. do składowania na gruncie lub jako kruszywo w budownictwie, nie są wymywane lub stopień wymywalności jest poniżej progów wskazanych w rozporządzeniu¹⁸⁾.

Badany witrifikat charakteryzuje się stopniem wymywalności metali ciężkich poniżej wymaganych limitów, a pozostałe parametry również spełniają normy dla kruszyw sztucznych.

Separacja czystego zielonego ditlenku węgla

Jako opcja, istnieje możliwość rozbudowy instalacji zgazowania osadów ściekowych o moduł separacji ze spalin kogeneratora CO₂ o wysokiej czystości, który może być gospodarczo wykorzystany np. do celów spożywczych lub kierowany do szklarni jako czynnik zwiększający plony w uprawie pomidorów.

Oferowana technologia wychwytywania CO₂ charakteryzuje się modułową budową kontenerową, która pozwala zapewnić efektywne kosztowo rozwiązanie oraz prosty i szybki montaż u klienta (rys. 4). Technologia wychwytu CO₂ obejmuje absorpcję chemiczną CO₂ z biogazu, spalin oraz gazów procesowych o szerokim zakresie stężeń CO₂ metodą aminową. Przebieg procesu wychwytywania CO₂ nie ingeruje w proces produkcji biogazu i spalania paliwa. Dla podniesienia efektywności energetycznej procesu wykorzystywana jest energia odpadowa z innych węzłów technologicznych: procesu zgazowania i kogeneracji. Wydzielanie CO₂ poprzedzone jest procesem głębokiego oczyszczania biogazu

lub spalin, co pozwala na uzyskanie CO₂ o wysokiej czystości, a w przypadku separacji z biogazu dodatkowo uzyskanie w tym samym procesie wysokiej czystości biometanu.

Proces absorpcji polega na przepuszczaniu schłodzonego i oczyszczonego biogazu lub spalin przez kolumnę absorpcyjną, gdzie dochodzi do kontaktu z rozpuszczalnikiem, który absorbuje większość CO₂. W procesie absorpcji chemicznej stosowana jest

jako rozpuszczalnik mieszanina wyselekcjonowanych amin. Bogaty w CO₂ roztwór mieszaniny amin jest przepuszczany przez desorber, gdzie uwalniany jest CO₂. Następnie CO₂ jest sprężany, a także w razie konieczności doczyszczany do określonych wymagań handlowych.

Proponowane rozwiązanie wspiera zasady GOZ poprzez wychwytywanie CO₂ po spalaniu i produkcję CO₂. Technologia wychwytywania ditlenku węgla może być zastosowana w dowolnych branżach dla dowolnych procesów, w tym: metanizacji biogazu, wychwytu CO₂ ze spalin procesu spalania paliw, pieców wapienniczych i cementowych i odgazów przemysłowych.

Podsumowanie

Najważniejszym zadaniem służącym poprawie jakości środowiska jest udoskonalenie procesów oczyszczania ścieków w stopniu umożliwiającym dalsze wykorzystanie wody i zmniejszenie obciążenia środowiska naturalnego. W pracy przedstawiono kompleksowe rozwiązanie technologii oczyszczania ścieków komunalnych w systemie GOZ. Technologia stanowi integrację samodzielnych węzłów technologicznych obejmujących biogazownię, węzeł oczyszczania odcieków i ścieków oczyszczonych (umożliwiający selektywną separację z nich mikrozanieczyszczeń, metali ciężkich oraz substancji biogennych (nawozowych)), węzeł selektywnej separacji zielonego CO₂ i biometanu z biogazu, węzeł zgazowania plazmowego pozostałości procesowych z oczyszczania ścieków oraz węzeł energetycznego wykorzystania powstałego w trakcie procesu zgazowania gazu syntezowego i biometanu. Proponowane rozwiązanie spełnia wszystkie wymagania Nowej dyrektywy ściekowej Unii Europejskiej.

Praca zrealizowana w ramach zlecenia przedkomercyjnego NCBR nr 92/20/PU/P88-01 w ramach przedsięwzięcia „Oczyszczalnia przyszłości”.

Otrzymano: 25-08-2025

Zrecenzowano: 01-09-2025

Zaakceptowano: 11-09-2025

Opublikowano: 20-10-2025

LITERATURA

- [1] A. Saravanan, P.S. Kumar, S. Jeevanantham, S. Karishma, B. Tajsabreen, P.R. Yashikaa, B. Reshma, *Chemosphere* 2021, 280, 130595.
- [2] E. Boelee, G. Geerling, B. van der Zaan, A. Blauw, A.D. Vethaak, *Acta Trop.* 2019, **193**, 217.
- [3] M.C. Villarín, S. Merel, *J. Hazard. Mater.* 2020, **390**, 122139.
- [4] GUS, *Ochrona środowiska w 2022*, Warszawa 2023.
- [5] Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) z dnia 27 listopada 2024 r. dotycząca oczyszczania ścieków komunalnych, *Dz.U. UE* 2024, poz. 3019.
- [6] T.K. Kasonga, M.A.A. Coetzee, I. Kamika i in., *J. Environ. Manag.* 2021, **277**, 111485, <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111485>.
- [7] J. Fito, S.W.H. Van Hulle, *Environ. Dev. Sustain.* 2021, **23**, 2949, <https://doi.org/10.1007/s10668-020-00732-y>.
- [8] N.A. Khan, S. Ullah Khan, S. Ahmed i in., *Trends Anal. Chem.* 2020, **122**, 115744, <https://doi.org/10.1016/j.trac.2019.115744>.
- [9] Ministerstwo Środowiska, *Strategia postępowania z komunalnymi osadami ściekowymi na lata 2019–2022*, Warszawa 2018.
- [10] A. Sobolewski, T. Iluk, T. Billig, *Nowa Energia* 2024, **5–6**, nr 96, 62.
- [11] W.J. Tic, J. Guziałowska-Tic, H. Pawlak-Kruczek, E. Woźnikowski, A. Zadorożny L. Niedźwiecki. M. Wnukowski, K. Krochmalny, M. Czerep, M. Ostrycharczyk, M. Baranowski, J. Zgóra, M. Kowal, *Energies* 2018, **11**, nr 4, 748, doi: 10.3390/en11040748.
- [12] H. Pawlak-Kruczek, M. Wnukowski, L. Niedźwiecki, M. Czerep, M. Kowal, K. Krochmalny, J. Zgóra, M. Ostrycharczyk, M. Baranowski, W.J. Tic, J. Guziałowska-Tic, *Energies* 2019, **12**, 175, doi: 10.3390/en12010175.
- [13] Zlecenia przedkomercyjne NCBR nr 92/20/PU/P88-01 w ramach przedsięwzięcia „Oczyszczalnia przyszłości”.
- [14] Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2020/741 z dnia 25 maja 2020 r. w sprawie minimalnych wymogów dotyczących ponownego wykorzystania wody w rolnictwie dla klasy jakości odzyskanej wody, *Dz.U. UE* 2020, poz. 741.
- [15] Załącznik nr 4 Rozporządzenia Ministra Gospodarki Wodnej i Żeglugi Śródlądowej z dnia 12 lipca 2019 r., *Dz.U.* 2019, poz. 1311.
- [16] Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 6 lutego 2015 r. w sprawie komunalnych osadów ściekowych, *Dz.U.* 2015, poz. 257.
- [17] Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2019/1009 z dnia 5 czerwca 2019 r. ustanawiające przepisy dotyczące udostępniania na rynku produktów nawozowych UE, *Dz.U. UE* 2019, poz. 1009.
- [18] Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 16 lipca 2015 r. w sprawie dopuszczania odpadów do składowania, *Dz.U.* 2015, poz. 1277.
- [19] PN-EN 933-1:2012, *Badania geometrycznych właściwości kruszyw. Oznaczanie składu ziarnowego. Metoda przesiewania*.
- [20] PN-EN 1097-6:2013, *Badania właściwości mechanicznych i fizycznych kruszyw. Oznaczanie gęstości ziaren i nasiąkliwości*.
- [21] PN-EN 1744-1:2013, *Zawartość chlorków w kruszywach naturalnych*.
- [22] PN-EN 932-3:1999, *Metody badań ogólnych właściwości kruszyw. Przeprowadzanie i terminologia uproszczonego opisu petrograficznego*.



Stowarzyszenie Inżynierów i Techników Przemysłu Chemicznego – Oddział Gliwice

Sekcja Ochrony Środowiska ZG SITPChem

FSNT NOT Rada Miejska w Gliwicach

23. Ogólnopolska Konferencja Naukowo-Techniczna

OCHRONA ŚRODOWISKA
Nauka i Przemysł dla ochrony Ziemi

22–24 października 2025 r. Ustroń – hotel JAWOR



- Przetwarzanie i zagospodarowanie odpadów
- Gospodarka wodno-ściekowa
- Ochrona powietrza
- Wodór nadzieją na rozwiązanie problemów energetycznych?
- Nowoczesna chemia szansą czy zagrożeniem dla środowiska?
- Współpraca nauki i przemysłu

Informacje i kontakt:

tel. 664 421 351, 664 421 349

www.gliwice.sitpchem.org.pl

PATRONAT MEDIALNY

**przemysł
chemiczny**

AURA
OCHRONA ŚRODOWISKA

**PRZEGŁAD
TECHNICZNY**
GAZETA INŻYNIERSKA

**ochrona
przed korozją**



czasopismo naukowo-techniczne science technical journal
CHEMIK
nauka • technika • rynek science • technique • market