

ARKADIUSZ KAMIŃSKI¹, AGNIESZKA PUSZ²

¹ORLEN S.A., email: arkadiusz.kaminski@orlen.pl, ORCID:0009-0002-4865-0742; ²Wydział Inżynierii Środowiska, Politechnika Warszawska, email agnieszka.pusz@pw.edu.pl; ORCID:0000-0002-7902-9521

WODA ODZYSKANA – KIERUNKI ZASTOSOWAŃ W SEKTORZE PRZEMYSŁOWYM

Abstrakt: Deficyt zasobów wodnych, zmiany klimatyczne i rosnące zapotrzebowanie na wodę w przemyśle sprawiają, że woda odzyskana ze ścieków, w tym komunalnych, po zaawansowanym uzdatnieniu, staje się alternatywnym źródłem wody technologicznej. Artykuł omawia pojęcie wody odzyskanej oraz kierunki jej wykorzystania. W nowoczesnych systemach odzysk wody może sięgać ponad 80-98% dzięki zastosowaniu technologii RO – Reverse Osmosis, czy ZLD – Zero Liquid Discharge, które odgrywają kluczową rolę w uzdatnianiu wody i gospodarce ściekowej. Wskazano główne bariery wdrożeniowe, takie jak zmienność jakości wody, obecność zanieczyszczeń, wysokie koszty inwestycyjne i operacyjne (CAPEX/OPEX), ryzyka mikrobiologiczne, wymogi formalno-prawne oraz akceptacja społeczna. Przedstawiono możliwości zastosowania wody odzyskanej w przemyśle, m.in. w procesach chłodzenia, mycia, produkcji paliw i wodoru, próbach ciśnieniowych, a także w remediacji i rekultywacji terenów zdegradowanych. Podkreślono znaczenie technologii uzdatniania oraz rolę odbiorcy końcowego w określaniu parametrów jakościowych. Zaznaczono, że wdrożenie rozwiązań zależy od kosztów inwestycyjnych i operacyjnych oraz od oceny wpływu na środowisko, aby uniknąć pogorszenia innych jego komponentów, a integracja odzysku wody z procesami przemysłowymi stanowi kluczowy element strategii zrównoważonego rozwoju i adaptacji do zmian klimatu.

Słowa kluczowe: woda odzyskana ze ścieków, remediacja i rekultywacja terenów zdegradowanych, sektor przemysłowy

RECLAIMED WATER – APPLICATION DIRECTIONS IN THE INDUSTRIAL SECTOR

Abstract: The deficit of water resources, climate change, and the growing demand for water in industry are making reclaimed water from wastewater, including municipal wastewater, after advanced treatment, an alternative source of process water. This article discusses the concept of reclaimed water and the directions of its use. In modern systems, water recovery can reach over 80–98% thanks to the application of technologies such as RO (Reverse Osmosis) and ZLD (Zero Liquid Discharge), which play a key role in water treatment and wastewater management.

The main implementation barriers are identified as variability in water quality, the presence of contaminants, high capital and operational costs (CAPEX/OPEX), microbiological risks, formal and legal requirements, and social acceptance. The possibilities of using reclaimed

water in industry are presented, including cooling processes, washing, fuel and hydrogen production, pressure testing, as well as remediation and reclamation of degraded areas. The importance of treatment technologies and the role of the end user in defining quality parameters are emphasized. It is noted that the implementation of such solutions depends on capital and operational costs as well as on environmental impact assessment, to avoid deterioration of other environmental components. The integration of water recovery with industrial processes is a key element of sustainable development strategies and adaptation to climate change.

Keywords: reclaimed water from wastewater, remediation and reclamation of degraded areas, industrial sector

I. WSTĘP

Woda jest jednym z najcenniejszych i najbardziej deficytowych zasobów naturalnych na świecie. Jej dostępność warunkuje rozwój społeczno-gospodarczy, bezpieczeństwo żywnościowe, zdrowie publiczne oraz stabilność ekosystemów. Współczesne wyzwania, takie jak zmiany klimatyczne, wzrost populacji, urbanizacja i rozwój przemysłu, prowadzą do pogłębiania się kryzysu wodnego na wielu kontynentach. Od lat 80. XX wieku globalny popyt na wodę wzrasta średnio o około 1% rocznie, rolnictwo odpowiada za ok. 70% poborów, przemysł za około 20%, a gospodarstwa domowe za około 10–12% zużycia wody. Szacuje się, że około połowa ludności świata doświadcza poważnego niedoboru wody przez część roku, a postęp w realizacji celu zrównoważonego rozwoju SDG 6 (woda i warunki sanitarne) pozostaje niewystarczający (około 2,2 mld ludzi nie ma dostępu do bezpiecznej wody pitnej, a 3,5 mld do bezpiecznie zarządzanych usług sanitarnych) (UN, 2024). Nasilające się zjawiska ekstremalne, takie jak susze i powodzie, dodatkowo zwiększają ryzyko społeczne, środowiskowe i gospodarcze (UN, 2024).

Według danych gromadzonych przez FAO (AQUASTAT) całkowite odnawialne zasoby słodkiej wody na świecie wynoszą około 42700 km³/rok, jednak zasoby technicznie i ekonomicznie dostępne stanowią jedynie około 30–35% tej wartości. Ponad 60% globalnych zasobów odnawialnych jest skoncentrowanych w mniej niż dziesięciu krajach, co prowadzi do istotnej nierównowagi przestrzennej między podażą a popytem na wodę (FAO, 2003; FAO, 2026).

Celem pracy było określenie możliwości wykorzystania wody odzyskanej w przemyśle, identyfikacja barier wdrożeniowych oraz wskazanie czynników determinujących efektywność tych rozwiązań.

II. METODA PRACY

Opracowanie ma charakter artykułu przeglądowego, opartego na studium problemu oraz analizie wybranego piśmiennictwa naukowego, raportów międzynarodowych instytucji oraz netografii. Uwzględniono światowe polityki wodne, trendy rozwoju technologii odzysku wody oraz dane ilościowe dotyczące zasobów i zużycia wody. Przeanalizowano również przykłady wdrożeń w sektorze przemysłowym oraz kierunki transformacji w stronę gospodarki o obiegu zamkniętym. Analiza opiera się na współczesnych badaniach naukowych, wytycznych regulacyjnych oraz najnowszych praktykach przemysłowych, ukazując, w jaki sposób woda odzyskana może wspierać odporność operacyjną i transformację środowiskową przedsiębiorstw przemysłowych w obliczu globalnych wyzwań wodnych.

III. ZNACZENIE WODY W GOSPODARCE I PRZEMYŚLE

Globalne pobory wody szacuje się na około 4000 km³/rok, przy czym dominującym użytkownikiem pozostaje rolnictwo, odpowiadające za około 2 800 km³/rok (~69%). Sektor

przemysłowy, w tym energetyka, zużywa około 760 km³/rok (~19%), natomiast gospodarstwa domowe i usługi komunalne około 460 km³/rok (~12%) (FAO, 2003; FAO, 2026). Dane te wskazują, że przemysł i energetyka odpowiadają łącznie za blisko jedną piątą globalnych poborów wody, a jednocześnie generują znaczną część ścieków o wysokim potencjale do odzysku i ponownego wykorzystania.

Analiza raportów UN Water oraz World Bank wskazuje, że globalna produkcja ścieków kształtuje się na poziomie około 900–1000 km³/rok, z czego 360–380 km³/rok stanowią ścieki komunalne, a 500–600 km³/rok ścieki przemysłowe (UN-Water, 2021; World Bank, 2025).

Według raportu (UN-Water, 2021) jedynie 56% ścieków komunalnych na świecie podlega bezpiecznemu oczyszczaniu (*safe treatment*), podczas gdy pozostałe 44% trafia do środowiska w postaci nieoczyszczonej lub niedostatecznie oczyszczonej (UN-Water, 2021). Oznacza to, że około 400 km³/rok ścieków stanowi jednocześnie istotne zagrożenie środowiskowe i zdrowotne, a także niewykorzystany potencjał w zakresie odzysku wody oraz cennych składników, w tym biogenów (UN-Water, 2021; World Bank, 2025).

W Europie stres wodny dotyczy corocznie około 30% populacji Unii Europejskiej, a budowanie odporności systemów wodnych wymaga wdrażania podejścia określanego jako *water efficiency first* oraz dywersyfikacji źródeł zaopatrzenia w wodę, obejmującej m.in. ponowne wykorzystanie wody, rozwój retencji oraz odsalanie, przy jednoczesnym uwzględnieniu kosztów energetycznych i klimatycznych tych rozwiązań (EEA, 2024). Raport Europejskiej Agencji Środowiska wskazuje ponadto, że poprawa stanu wód powierzchniowych w Europie postępuje powoli i wymaga zarówno dalszego ograniczania presji zanieczyszczeń, jak i wdrażania bardziej efektywnego zarządzania zasobami wodnymi (EEA, 2024).

Całkowite pobory wody w krajach UE 27 wynoszą około 240 km³/rok, przy czym największym użytkownikiem jest sektor energetyczny, odpowiadający za około 44% poborów, następnie przemysł (około 24%), rolnictwo (około 20%) oraz sektor komunalny (około 12%) (EEA, 2021). Struktura ta wskazuje na dominującą rolę energetyki i przemysłu w kształtowaniu presji na zasoby wodne w Europie.

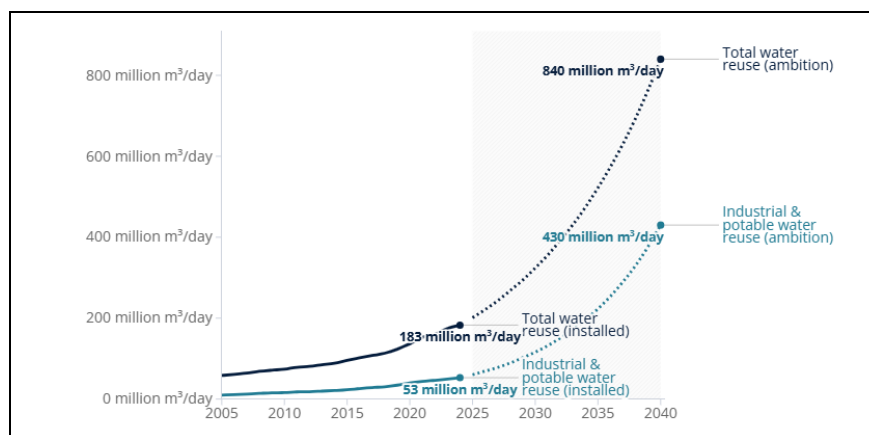
W odniesieniu do ścieków, według danych Eurostat roczna ilość ścieków komunalnych w Unii Europejskiej wynosi około 250 km³, przy czym ponad 90% ludności jest podłączone do systemów kanalizacyjnych, a ponad 80% ścieków poddawanych jest co najmniej oczyszczaniu biologicznemu (Eurostat, 2025). Mimo wysokiego poziomu rozwoju infrastruktury sanitarnej, dalsza poprawa efektywności oczyszczania oraz zwiększenie skali odzysku wody i zasobów pozostają kluczowymi wyzwaniami w kontekście realizacji celów gospodarki o obiegu zamkniętym.

W Polsce W 2023 r. pobór wody na potrzeby gospodarki narodowej i ludności wyniósł 8,3 km³ (spadek o 12% r/r; w 2022 r.: 9,4 km³). Około 65% poboru przypadało na cele produkcyjne (5,4 km³), natomiast około 78% zapotrzebowania pokrywane było z wód powierzchniowych, wody podziemne stanowiły 1,8 km³ (+1% r/r). Odnotowano również spadek poboru wody w elektroenergetyce (o 18% r/r) (GUS, 2024). Udział ludności korzystającej z oczyszczalni ścieków wynosił 76% (miasta 95%, wieś 48%), przy jednoczesnym zmniejszeniu liczby oczyszczalni (komunalne: 3249; przemysłowe: 841) (GUS, 2024). W profilu unijnym (UWWTD) Polska osiąga wysoki poziom zgodności z wymaganiami dotyczącymi oczyszczania ścieków (WISE, 2025). Dane te wskazują, że woda jest „łącznikiem” sektorów żywności, energii i przemysłu. W UE i Polsce presja na zasoby systematycznie rośnie (m.in. w wyniku susz i niedoborów), a bezpieczne ponowne wykorzystanie wody staje się kluczowym narzędziem wzmacniania bezpieczeństwa wodnego, efektywności oraz odporności operacyjnej systemów gospodarczych (UN, 2024).

Według danych ONZ, ponad 2 mld ludzi na świecie nie ma stałego dostępu do bezpiecznej wody pitnej, a około 40 % populacji doświadcza okresowego stresu wodnego (UN, 2023). Zmiany klimatu, urbanizacja i wzrost zapotrzebowania przemysłowego powodują, że deficyty wodne nasilają się także w regionach dotychczas uznawanych za zasobne w wodę (IPCC, 2022). Cel Zrównoważonego Rozwoju SDG 6 zakłada zapewnienie powszechnego dostępu do wody i usług sanitarnych oraz poprawę jakości wód poprzez redukcję zanieczyszczeń, zwiększenie recyklingu i bezpiecznego ponownego wykorzystania wody odzyskanej ze ścieków do 2030 r. (UN, 2015). W raportach UN (2015), IPCC (2022) oraz UN (2023) jednoznacznie wskazuje się, że odzysk i ponowne wykorzystanie wody stanowią jedno z najskuteczniejszych narzędzi realizacji celu SDG 6 w warunkach ograniczonych zasobów. W obliczu narastającego kryzysu wodnego i przyspieszających zmian klimatycznych, ponowne wykorzystanie wody ze ścieków (woda odzyskana) staje się kluczowym filarem polityk wodnych i strategii przemysłowych, wzmacniając realizację SDG 6 oraz wspierając bezpieczeństwo żywnościowe i energetyczne. Najnowsze raporty IPCC, WHO, FAO, UN-Water i UNESCO wskazują, że globalne niedobory wody nasilają się, a bezpieczny recykling i odzysk wody stanowią niezbędny element odporności systemów gospodarczych i środowiskowych (WHO, 2006; IPCC, 2022; UN, 2023; UN, 2024; EEA, 2024).

W skali globalnej, udział wody odzyskanej w bilansie wodnym przemysłu systematycznie rośnie. W krajach takich jak Izrael, Zjednoczone Emiraty Arabskie czy Singapur, udział ten przekracza 20–80% w wybranych sektorach. Według raportu Banku Światowego, potencjał wzrostu przemysłowego i komunalnego odzysku wody do 2040 r. jest ośmiokrotny względem obecnego poziomu, a globalna pojemność instalacji do odzysku wody rośnie o około 7% rocznie (rys. 1).

WHO określa i rekomenduje ramy zarządzania bezpieczeństwem odzysku wody, w tym zastosowań IPR/DPR (pośredni i bezpośredni odzysk wody do celów pitnych), oparte na celach zdrowotnych, ocenie ryzyka oraz podejściu wielobarierowym w procesach uzdatniania (WHO, 2017; EPA, 2026). W tym kontekście EPA oraz inicjatywy w ramach programu *Water Reuse* dostarczają narzędzi i wytycznych do projektowania i regulacji odzysku wody dla zastosowań przemysłowych i pitnych, w tym ram opartych na analizie ryzyka, takich jak *Risk Based Framework for Microbial Treatment Targets* (EPA, 2026).



Rys. 1. Potencjał ponownego wykorzystania wody do 2040 r. (mln m³/dzień) (World Bank, 2025)

Fig. 1. Potential for water reuse by 2040 (million m³/day) (World Bank, 2025)

Globalne analizy Banku Światowego wskazują, że potrzeba oraz potencjał rozwoju odzysku wody osiągnęły punkt przełomowy, a możliwy jest nawet ośmiokrotny wzrost skali ponownego wykorzystania wody do 2040 r., pod warunkiem zapewnienia spójnego wsparcia regulacyjnego i inwestycyjnego (World Bank, 2025). Woda odzyskana ze ścieków (*reclaimed / reused water*) stanowi coraz istotniejszy element zrównoważonego gospodarowania zasobami wodnymi (UN-Water, 2021).

IV. HISTORIA ODZYSKU WODY I JEGO ZNACZENIE

Odzysk i ponowne wykorzystanie wody stanowią jedne z najstarszych praktyk inżynierii środowiska, obecne w cywilizacjach starożytnych, rozwijane w miastach średniowiecznych i stopniowo instytucjonalizowane wraz z rozwojem nowoczesnej infrastruktury sanitarnej w XIX i XX wieku. Współcześnie odzysk wody uznaje się za kluczowy element zrównoważonego gospodarowania zasobami wodnymi, adaptacji do zmian klimatu oraz realizacji Celów Zrównoważonego Rozwoju, w szczególności SDG 6 (UN, 2023).

Już najstarsze cywilizacje rozwijały systemy, w których ścieki i wody zużyte kierowano do nawadniania pól lub ponownie wykorzystywane do celów gospodarczych. Najstarsze dowody ponownego wykorzystania wody pochodzą z Mezopotamii (ok. 3000 p.n.e.), gdzie systemy kanałów odprowadzały ścieki miejskie na pola uprawne, umożliwiając nawadnianie i nawożenie gleb (Angelakis i Rose, 2014). Podobne praktyki stosowano w starożytnym Egipcie, gdzie coroczne wylewy Nilu łączyły naturalny recykling wody z obiegiem substancji odżywczych (Butzer, 1976). W starożytnym Rzymie rozbudowane systemy akweduktów i kanalizacji (np. Cloaca Maxima) umożliwiały odprowadzanie ścieków do Tybru, ale jednocześnie wody odpływowe wykorzystywano również do irygacji terenów podmiejskich (Hodge, 2002). Choć nie istniała wiedza mikrobiologiczna, obserwacja korzyści rolniczych sprzyjała utrwaleniu tych praktyk.

W miastach średniowiecznych ponowne wykorzystanie wody miało charakter nieformalny. Ścieki i wody opadowe trafiały na pola i ogrody miejskie, co sprzyjało produkcji żywności, ale jednocześnie przyczyniało się do epidemii chorób zakaźnych (Gandy, 2014). W okresie nowożytnym (XVII–XVIII w.) rozwój miast i rzemiosła zwiększył zapotrzebowanie na wodę, jednak brak kontroli sanitarnej sprawiał, że odzysk wody był postrzegany bardziej jako zagrożenie niż zasób (Melosi, 2000).

Przełom nastąpił w XIX wieku wraz z rewolucją przemysłową i rozwojem epidemiologii. Odkrycia Johna Snowa oraz rozwój teorii drobnoustrojów (Pasteur, Koch) uświadomiły związek między jakością wody a zdrowiem publicznym (Snow, 1885). W tym okresie w Europie i Ameryce Północnej zaczęto stosować tzw. sewage farms (pola irygowane ściekami), czyli systemy wykorzystujące ścieki miejskie do nawadniania, stanowiące jedną z pierwszych zinstytucjonalizowanych form odzysku wody (Burian i Edwards, 2002). Systemy te łączyły oczyszczanie gleby z produkcją rolną, choć ich skuteczność sanitarna była ograniczona.

Dopiero jednak w XX i XXI wieku odzysk wody stał się w pełni świadomą strategią polityczną i technologiczną, opartą na wiedzy mikrobiologicznej, inżynierii sanitarnej oraz analizie ryzyka zdrowotnego (WHO, 2006; Gleick, 2014). Rozwój oczyszczalni ścieków (osad czynny, filtracja, dezynfekcja) umożliwił bardziej kontrolowane ponowne wykorzystanie wody. Po II wojnie światowej, szczególnie w regionach suchych (Kalifornia, Izrael), odzysk wody stał się elementem polityki państwowej (Israel Water Authority, 2015). Opracowanie Asano i in. (2007) wskazuje, że w drugiej połowie XX wieku nastąpiło przejście od „niezamierzonego” *reuse* do planowego i regulowanego ponownego wykorzystania wody.

Na przełomie XX i XXI wieku odzysk wody został jednoznacznie powiązany z ideą zrównoważonego rozwoju. Światowa Organizacja Zdrowia wprowadziła wytyczne oparte na zarządzaniu ryzykiem (QMRA), a Organizacja Narodów Zjednoczonych uznała bezpieczny odzysk wody za kluczowy element realizacji SDG 6 (WHO, 2006; UN, 2015).

V. DEFINICJE ODZYSKU WODY

Rozwój technologii oczyszczania ścieków, rosnąca presja na zasoby wodne oraz zaostrzające się wymogi regulacyjne spowodowały, że pojęcia związane z odzyskiem i ponownym wykorzystaniem wody stały się centralnym elementem współczesnej nauki o wodzie, inżynierii środowiska oraz polityk publicznych. W literaturze globalnej obserwuje się jednak znaczną niejednorodność terminologiczną. Różne instytucje, organizacje międzynarodowe, środowiska naukowe i branżowe stosują odmienne definicje, podkreślające różne aspekty procesu odzysku. Zróżnicowanie to wynika zarówno z odmiennych celów (zdrowotnych, środowiskowych, technologicznych, ekonomicznych), jak i z różnic kulturowych oraz regulacyjnych, które wyznaczają ramy ponownego wykorzystania wody w poszczególnych regionach świata.

Najbardziej wpływowe definicje pochodzą z trzech głównych źródeł: literatury naukowej i technicznej, instytucji międzynarodowych (WHO, UN Water, FAO, OECD, World Bank) oraz ram regulacyjnych (szczególnie Unii Europejskiej i Stanów Zjednoczonych). Każde z nich akcentuje inne elementy. Badacze i środowisko naukowe koncentrują się skupiają się przede wszystkim na technologii i możliwościach aplikacyjnych, organizacje międzynarodowe na bezpieczeństwie zdrowotnym i zrównoważonym rozwoju. Przykładowo, WHO definiuje ponowne wykorzystanie wody poprzez pryzmat „planowego wykorzystania oczyszczonych ścieków do celów użytkowych”, akcentując aspekty zdrowotne i ryzyka mikrobiologiczne. Z kolei literatura techniczna rozszerza zakres pojęcia, obejmując zastosowania przemysłowe, rolnicze, środowiskowe i w warunkach kontrolowanych, nawet pitne. Unia Europejska jako region posiadający szczegółowe i bezpośrednio obowiązujące przepisy w tym zakresie, definiuje wodę odzyskaną przez pryzmat źródła (ścieków komunalnych) oraz minimalnych wymagań jakościowych, a Stany Zjednoczone stosują pojęcia *water reuse* i *water recycling* w sposób bardziej operacyjny, dostosowany do praktyki wdrożeniowej.

Różnorodność definicji ma znaczenie nie tylko semantyczne, lecz także praktyczne – odmienne terminy wpływają na procesy projektowania instalacji, standardy laboratoryjne, modele oceny ryzyka, a także decyzje administracyjne i akceptację społeczną. Brak jednolitej, globalnie obowiązującej definicji powoduje, że interpretacja tak pozornie jednoznacznych pojęć jak *reclaimed water*, *reused water*, *recycled water*, *fit for purpose water*, IPR czy DPR wymaga zawsze uwzględnienia kontekstu geograficznego i regulacyjnego. Jednocześnie międzynarodowe raporty (UN-Water, 2021; World Bank, 2025) wskazują, że harmonizacja terminologii i precyzyjne definiowanie pojęcia odzysku i ponownego wykorzystania wody stanowią kluczowy warunek dalszego rozwoju gospodarki o obiegu zamkniętym oraz skalowania rozwiązań technologicznych.

Porównawcze ujęcie umożliwia zrozumienie fundamentów teoretycznych i regulacyjnych odzysku wody oraz ich wpływ na praktykę przemysłową i środowiskową w skali globalnej (tabela 1).

World Health Organization definiuje odzysk wody jako „planowe wykorzystanie oczyszczonych ścieków do celów użytkowych” (*planned use of treated wastewater for beneficial purposes*) (WHO, 2006; 2017). Podkreślane są przy tym przede wszystkim

planowość działań oraz konieczność zarządzania ryzykiem zdrowotnym, a nie wyłącznie poziom technologicznego uzdatniania wody (WHO, 2006).

W literaturze naukowej (Asano i in., 2007) definiują *water reuse* jako „the beneficial use of treated wastewater for a variety of purposes including agricultural irrigation, industrial processes, groundwater recharge and potable use”. Ujęcie to znacząco rozszerza zakres pojęcia, obejmując różnorodne sektory gospodarki, w tym, w odpowiednich warunkach, również zastosowania pitne.

Tabela 1 – Table 1

Porównanie definicji – kluczowe różnice / *Comparison of definitions – key differences*

Źródło <i>Source</i>	Akcent definicji <i>Focus of the definition</i>	Kluczowy element <i>Key element</i>
Światowa Organizacja Zdrowia <i>World Health Organization (WHO)</i>	zdrowie publiczne <i>public health</i>	zarządzanie ryzykiem <i>risk management</i>
Unia Europejska <i>European Union (UE)</i>	regulacje / <i>regulations</i>	minimalne wymagania jakości / <i>minimum quality requirements</i>
Literatura naukowa <i>Scientific literature</i>	technologia i zastosowania <i>technology and applications</i>	szeroki zakres użyc <i>wide range of applications</i>
Agencja Ochrony Środowiska Stanów Zjednoczonych <i>United States Environmental Protection Agency (US EPA)</i>	praktyka wdrożeniowa <i>implementation practice</i>	akceptacja społeczna <i>social acceptance</i>
Organizacja Współpracy Gospodarczej i Rozwoju <i>Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD)</i>	ekonomia / <i>economics</i>	efektywność zasobowa <i>resource efficiency</i>

W prawie Unii Europejskiej wodę odzyskaną definiuje się jako „urban wastewater that has been treated in accordance with the requirements of this Regulation and is intended for reuse” (Rozporządzenie (UE), 2020/741). Podejście to akcentuje źródło wody (ścieki komunalne), konieczność spełnienia określonych wymagań jakościowych oraz ścisłe powiązanie jakości z konkretnym zastosowaniem, obecnie przede wszystkim w zakresie nawadniania rolniczego.

W dokumentach Komisji Europejskiej i Europejskiej Agencji Środowiska stosuje się także definicję operacyjną: „treated wastewater that can be reused for specific purposes under controlled conditions” (European Commission, 2019), która podkreśla znaczenie kontroli ryzyka oraz podejścia *fit for purpose*, polegającego na dopasowaniu jakości wody do konkretnego zastosowania.

W literaturze naukowej wyróżnia się również nieplanowany odzysk wody (unplanned/de facto reuse), definiowany jako „the use of water downstream of wastewater discharges without explicit intent or control” (Rice i in., 2013; Angelakis i Rose, 2014), co oznacza wykorzystanie wody w sposób niezamierzony i bez formalnej kontroli procesu.

W systemach amerykańskich oraz literaturze naukowej funkcjonuje pojęcie pośredniego odzysku wody do celów pitnych (*Indirect Potable Reuse – IPR*), definiowanego jako „augmentation of drinking water supplies with reclaimed water via an environmental buffer such as a groundwater basin or surface reservoir” (NRC, 2012).

Powiązany pojęciem jest bezpośredni odzysk wody pitnej (*Direct Potable Reuse – DPR*), rozumiany jako „the introduction of reclaimed water directly into a drinking water treatment plant or distribution system without an environmental buffer” (NRC, 2012).

Istotnym ujęciem koncepcyjnym jest również podejście *fit for purpose*, definiowane przez WHO i OECD jako „matching water quality to the requirements of a specific use, avoiding unnecessary treatment” (WHO, 2006; OECD, 2015), które wskazuje na konieczność optymalizacji procesów uzdatniania poprzez dostosowanie jakości wody do wymagań konkretnego zastosowania.

W Stanach Zjednoczonych termin *water recycling* jest często stosowany zamiennie z *water reuse* i definiowany jako „the reuse of treated wastewater for beneficial purposes such as irrigation, industrial cooling and replenishing groundwater basins” (US EPA, 2017), co odzwierciedla operacyjne, wdrożeniowe podejście do zarządzania wodą.

W ujęciu ONZ i Unii Europejskiej odzysk wody stanowi element gospodarki o obiegu zamkniętym, definiowany jako „the recovery and reuse of water as a secondary resource to reduce abstraction of freshwater and environmental pressures” (European Commission, 2020; UN, 2023), co podkreśla jego znaczenie w ograniczaniu poboru wód pierwotnych oraz presji na ekosystemy wodne.

VI. MOŻLIWOŚCI ZASTOSOWANIA WODY ODZYSKANEJ W SEKTORZE PRZEMYSŁOWYM

Rosnące zapotrzebowanie na wodę w przemyśle, połączone z narastającą presją na zasoby wodne, zmianami klimatycznymi oraz koniecznością realizacji celów zrównoważonego rozwoju, sprawia, że odzysk wody ze ścieków, zarówno komunalnych, jak i przemysłowych, staje się jednym z kluczowych kierunków transformacji gospodarczej. Woda odzyskana przestaje być postrzegana jedynie jako rozwiązanie alternatywne i staje się elementem strategicznym, umożliwiającym zwiększenie odporności operacyjnej zakładów, redukcję poboru wody surowej, ograniczenie oddziaływań środowiskowych oraz stabilizację dostaw w warunkach narastającego stresu wodnego.

Przemysł należy do największych użytkowników wody na świecie, odpowiadając za około 20% globalnych poborów, a w niektórych regionach ponad 40%. Jednocześnie generuje znaczący strumień ścieków, który odpowiednio oczyszczony może stanowić stabilne źródło wody technologicznej o parametrach dopasowanych do specyficznych potrzeb procesowych. Z tego względu sektor przemysłowy jest naturalnym odbiorcą wody odzyskanej, zwłaszcza w zastosowaniach o ograniczonym kontakcie człowieka z wodą, wysokim wolumenie zużycia i zdefiniowanych kryteriach jakości. Koncepcja *fit-for-purpose water reuse*, rekomendowana przez WHO, EPA i OECD, opiera się na założeniu dostosowania jakości wody odzyskanej do wymagań konkretnej aplikacji, od chłodzenia, przez mycie, aż po procesy wysokiej czystości, takie jak elektroliza wodoru czy zasilanie układów parowych.

Współczesne technologie membranowe (UF/MF, MBR, RO), zaawansowane procesy utleniania (AOP), filtracja węglem aktywnym, odsalanie niskozasolonej wody technologicznej, a także systemy MLD/ZLD umożliwiają osiągnięcie poziomów jakości wody porównywalnych z wodą demineralizowaną lub ultraczystą, umożliwia zastosowania dotychczas niedostępne dla wody odzyskanej. Jednocześnie rozwój cyfryzacji, monitoringu w czasie rzeczywistym i zaawansowanych systemów sterowania (procesy predykcyjne, kontrola biofoulingu, optymalizacja CIP) zwiększa bezpieczeństwo operacyjne i pozwala na stabilne zarządzanie jakością wody w złożonych instalacjach przemysłowych.

Możliwości wykorzystania wody odzyskanej w przemyśle są niezwykle szerokie i obejmują m.in. systemy chłodzenia, wody gospodarcze, instalacje procesowe, zasilanie kotłów i parowni, produkcję paliw i wodoru, próby ciśnieniowe, instalacje przeciwpożarowe, a także wspieranie remediacji i rekultywacji terenów zdegradowanych.

W wielu branżach petrochemicznej, chemicznej, metalurgicznej, energetycznej, spożywczej oraz farmaceutycznej wdrożenia te przynoszą wymierne korzyści ekonomiczne i środowiskowe, obejmujące redukcję kosztów zakupu wody oraz ograniczenie ładunku odprowadzanych ścieków.

W sektorze przemysłowym wodę odzyskaną ze ścieków można stosować w:

- systemach chłodzenia (wieże chłodnicze, wymienniki ciepła). Duże wolumeny i stabilny popyt sprawiają, że chłodzenie jest najbardziej naturalnym odbiorcą wody odzyskanej; ograniczony kontakt z użytkownikiem, niższe wymagania organoleptyczne oraz wysokie wymagania chemiczne (skalowanie, korozja, biofouling) mogą być skutecznie kontrolowane na etapie projektowym;
- procesach mycia i płukania. Mycie powierzchni, płukanie urządzeń i placów oraz wykorzystanie wody do celów sanitarnych (np. spłukiwanie) i sprząkania należą do aplikacji o relatywnie niskim ryzyku kontaktu z ludźmi, wymagających jednak odpowiedniej dezynfekcji oraz kontroli parametrów estetycznych (zapach, barwa);
- liniach produkcyjnych, w tym do zasilania kotłów i układów parowych, gdzie wymagane są wysokie parametry jakościowe, takie jak niska przewodność, śladowa twardość oraz brak substancji zakłócających procesy technologiczne, a często także woda dejonizowana o bardzo wysokiej czystości;
- produkcji paliw, wodoru, biogazu oraz e paliw;
- próbach ciśnieniowych i testach instalacji, charakteryzujących się krótkotrwałym, lecz wysokim zapotrzebowaniem na wodę;
- systemach przeciwpożarowych (p poż.) - hydrantach, instalacjach tryskaczowych oraz systemach mgły wodnej (EPA, 2024; 2026).

W praktyce stosuje się kombinacje technologii, dobierane w zależności od jakości wymaganej przez odbiorcę. Procesy biologiczne, takie jak osad czynny, MBBR oraz MBR (*membrane bioreactor*), umożliwiają skuteczną redukcję zawiesin i mikroorganizmów. Membrany odwróconej osmozy (RO) stosowane są w przypadku wysokich wymagań jakościowych, np. w zaopatrzeniu przemysłu, zasilaniu kotłów czy w procesach uzupełniania wód podziemnych; zapewniają usunięcie jonów, soli i wielu mikrocząsteczek, jednocześnie generując strumień koncentratu wymagający dalszego zagospodarowania. Zaawansowane procesy utleniania (AOP), ozonowanie, filtracja na węglu aktywnym, adsorpcja oraz biofiltry odgrywają kluczową rolę w redukcji mikrocząsteczek oraz związków trudnych do usunięcia (np. farmaceutyków i substancji polarnych). Systemy naturalne (np. *reed beds*, *soil aquifer treatment* – SAT) mogą być ekonomicznie efektywne w określonych warunkach, wspierając retencję oraz częściową degradację mikroorganizmów i substancji organicznych.

Dobór układu technologicznego powinien przede wszystkim wynikać z analizy celu użycia (*fit-for-purpose*), kosztów energii, kosztów operacyjnych i zarządzania koncentratami. Koszt produkcji wody odzyskanej zależy przede wszystkim od: wymaganego poziomu jakości (*fit-for-purpose*), zastosowanych technologii (MBR+RO+AO są droższe niż konwencjonalne procesy), skali instalacji, kosztów energii, konieczności zagospodarowania koncentratu oraz kosztów transportu do miejsca wykorzystania.

W literaturze (Areosa i in., 2024; Expósito i in., 2024) wskazuje się na znaczne różnicowanie kosztów produkcji wody odzyskanej. W regionach śródziemnomorskich koszty dla zastosowań rolniczych szacuje się w szerokim zakresie od około 0,02 €/m³ do 0,83 €/m³, w zależności od zastosowanej technologii i warunków lokalnych, natomiast inne analizy wskazują wartości rzędu 0,3–1,2 USD/m³ w różnych scenariuszach. Poziom kosztowy (LCOW) zależy również od stopnia wykorzystania instalacji (*capacity factor*), przy czym wyższe wykorzystanie istotnie obniża koszty jednostkowe. Analizy ekonomiczne oraz oceny typu CBA wskazują, że opłacalność projektów odzysku wody wzrasta w warunkach stresu wodnego oraz przy uwzględnieniu korzyści pośrednich, takich jak stabilność dostaw wody czy ograniczenie zużycia innych zasobów (Giammar i in., 2021).

W kontekście rosnącej presji na zasoby wodne oraz wymagań związanych z wdrażaniem gospodarki o obiegu zamkniętym (*circular economy*), odzyskana woda ze ścieków stanowi istotne narzędzie wspierające zrównoważone zarządzanie środowiskiem w sektorze przemysłowym. Jej wykorzystanie wykracza poza klasyczne zastosowania technologiczne i obejmuje działania środowiskowe, takie jak rekultywacja terenów zdegradowanych, remediacja środowiska gruntowo-wodnego oraz zwiększanie retencji wodnej.

W procesach rekultywacji woda odzyskana może być wykorzystywana do przywracania funkcji użytkowych i przyrodniczych terenów zdegradowanych, w tym obszarów pogórnich i poprzemysłowych. Jej zastosowanie obejmuje nawadnianie gleb rekultywowanych, wspomaganie odbudowy pokrywy roślinnej oraz stabilizację warunków hydrologicznych. Szczególne znaczenie ma również w rekultywacji dolin rzecznych i ekosystemów podmokłych, gdzie umożliwia odbudowę mokradeł i torfowisk oraz zwiększenie retencji biologicznej i różnorodności biologicznej. W warunkach rolniczych odzyskana woda (po odpowiednim oczyszczeniu, np. w technologii MBR lub filtracji naturalnej) może przyczyniać się do poprawy struktury gleby, zwiększenia zawartości materii organicznej oraz zdolności retencyjnych gleb, co stanowi istotny element przeciwdziałania degradacji gleb i suszy rolniczej (Toze, 2006; Pedrero i in., 2010).

W gospodarce środowiskowej woda odzyskana znajduje również zastosowanie w procesach remediacyjnych. W bioremediacji może stymulować rozwój mikroorganizmów odpowiedzialnych za biodegradację zanieczyszczeń, dostarczając składników odżywczych i odpowiedniego środowiska wodnego. W technikach remediacji *in situ*, takich jak infiltracja czy systemy typu „pump and treat”, odzyskana woda może być wykorzystywana do przepłukiwania strefy nasyconej i nienasyconej oraz redukcji stężeń zanieczyszczeń (np. azotanów i chlorków) w środowisku gruntowo-wodnym. Dodatkowo woda odzyskana wspiera procesy fitoremediacji poprzez umożliwienie wzrostu roślin zdolnych do akumulacji metali ciężkich oraz degradacji zanieczyszczeń organicznych (Ali i in., 2013; Vymazal, 2014).

Zwiększanie retencji wodnej stanowi jeden z kluczowych kierunków adaptacji do zmian klimatu. Woda odzyskana może być wykorzystywana zarówno w retencji ekosystemowej, jak i technicznej. W skali krajobrazowej znajduje zastosowanie w zasilaniu zbiorników retencyjnych, mokradeł i cieków wodnych oraz w infiltracji do warstw wodonośnych (*Managed Aquifer Recharge – MAR*). W środowisku miejskim odzyskana woda wspiera rozwój rozwiązań opartych na przyrodzie (*Nature-Based Solutions*), takich jak ogrody deszczowe, zielone dachy czy systemy małej retencji, przyczyniając się do zwiększenia wilgotności środowiska, ograniczenia skutków suszy oraz redukcji efektu miejskiej wyspy ciepła. Technologie typu ZLD (*Zero Liquid Discharge*) stanowią zaawansowane rozwiązanie w zakresie zamkniętych obiegów wodnych w przemyśle. Zakładają one

maksymalizację odzysku wody ze ścieków oraz minimalizację lub całkowitą eliminację zrzutu ciekłych odpadów do środowiska. Integracja procesów membranowych, odparowania i krystalizacji umożliwia odzysk wody technologicznej wysokiej jakości oraz koncentrację i zagospodarowanie pozostałości stałych (Tong i Elimelech, 2016). Wdrożenie systemów ZLD wpisuje się w strategię efektywnego gospodarowania zasobami i ograniczania presji na środowisko wodne, przyczyniając się jednocześnie do poprawy bezpieczeństwa wodnego przedsiębiorstw przemysłowych.

VII. BARIERY WDROŻENIOWE, RAMY REGULACYJNE I PODEJŚCIE „FIT-FOR-PURPOSE”

Wprowadzenie wody odzyskanej do obiegu przemysłowego wymaga jednak uwzględnienia złożonych uwarunkowań technologicznych, mikrobiologicznych, chemicznych i regulacyjnych. Kluczowe elementy obejmują dobór odpowiednich technologii wstępnego i końcowego uzdatniania, kontrolę parametrów krytycznych (takich jak TDS, twardość, krzemionka, CECs/PFAS oraz obecność patogenów), zarządzanie koncentratami oraz integrację systemu zgodnie z zasadą *water efficiency first*. O powodzeniu wdrożenia decyduje również zgodność z wymaganiami odbiorcy końcowego, właściwe zarządzanie ryzykiem (*Risk Management Plan*) oraz efektywność ekonomiczna rozwiązania, oceniana z perspektywy TCO oraz LCA/LCCA.

Wśród barier we wdrażaniu działań związanych ze stosowaniem odzyskanej wody identyfikuje się szereg czynników ograniczających. Jednym z najistotniejszych jest zmienność jakości dopływu oraz obecność zanieczyszczeń chemicznych i biologicznych; wahania takich parametrów jak TDS/zasolenie, TOC/COD, zawiesiny czy krzemionka, a także obecność mikrozanieczyszczeń (np. CECs/PFAS) i mikroorganizmów (np. *E. coli*, *Legionella*) mogą destabilizować pracę instalacji membranowych i procesów dezynfekcji, prowadząc do wahań jakości oraz wzrostu kosztów operacyjnych.

Kolejnym ograniczeniem pozostaje zmienność ilościowa dostępnych strumieni ścieków, które mogą wykazywać sezonowość i zmienność dobową, co utrudnia zapewnienie stabilnej podaży wody odzyskanej. Istotnym zagadnieniem jest również bezpieczeństwo sanitarne i chemiczne wykorzystania wody, gdyż ryzyka mikrobiologiczne i chemiczne wymagają spełnienia rygorystycznych celów zdrowotnych oraz walidacji zastosowanych barier technologicznych; WHO i EPA rekomendują w tym zakresie podejście oparte na celach zdrowotnych oraz systemach wielobarierowych (WHO, 2017; EPA, 2025).

Znaczącą rolę odgrywa także konieczność stałego monitoringu i kontroli jakości, obejmującego wysoką częstotliwość pomiarów (np. SDI/NTU, przewodność, wskaźniki mikrobiologiczne), walidację skuteczności barier oraz transparentność danych, co stanowi zarówno wymóg regulacyjny, jak i społeczny (Rozporządzenie (UE), 2020/741; EPA, 2025). Dodatkowo istotnym ograniczeniem są koszty inwestycyjne i eksploatacyjne, ponieważ zastosowanie zaawansowanych technologii, takich jak RO, MBR, AOP czy szczególnie systemów MLD/ZLD, zwiększa nakłady inwestycyjne oraz często obniża efektywność energetyczną, a koszty eksploatacyjne rosną wraz z poziomem odzysku, intensywnością procesów CIP oraz zużyciem reagentów chemicznych (OECD, 2024; World Bank, 2025).

Istotne wyzwania stanowią również uwarunkowania formalno-prawne, wynikające z braku globalnie jednolitej definicji i standardów dla wody odzyskanej oraz znacznego zróżnicowania regulacji pomiędzy jurysdykcjami; w Unii Europejskiej obserwuje się harmonizację głównie w zakresie rolnictwa, natomiast w Stanach Zjednoczonych funkcjonuje system regulacji o charakterze stanowym, uzupełniany wytycznymi WHO i EPA. Nie bez znaczenia pozostają także bariery społeczne i psychologiczne, obejmujące ograniczoną akceptację społeczną oraz

brak zaufania do technologii odzysku wody; badania wskazują, że sama komunikacja informacyjna jest niewystarczająca, a kluczowe znaczenie ma budowanie zaufania do instytucji wdrażających te rozwiązania.

Obecnie promuje się podejście *fit for purpose* (dopasowanie jakości wody do konkretnego zastosowania) oraz zarządzanie ryzykiem w całym cyklu (od źródła aż do punktu wykorzystania). W tym ujęciu o wymaganej jakości wody odzyskanej decyduje odbiorca końcowy, definiując parametry w odniesieniu do konkretnej aplikacji. W konsekwencji rozwijane są ramy regulacyjne i wytyczne międzynarodowe.

Wytyczne WHO „Guidelines for the safe use of wastewater, excreta and greywater” opierają się na podejściu zarządzania ryzykiem, wykorzystaniu narzędzi QMRA oraz wdrażaniu zestawów środków kontrolnych dla rolnictwa oraz innych zastosowań. Z kolei Unia Europejska, poprzez Rozporządzenie (UE) 2020/741, ustanowiła minimalne wymagania dotyczące ponownego wykorzystania wody w rolnictwie, obejmujące obowiązek opracowania planów zarządzania ryzykiem, prowadzenia monitoringu oraz określenia roli właściwych organów, przy czym regulacja ta ma na celu ułatwienie stosowania odzysku wody tam, gdzie jest to uzasadnione środowiskowo i ekonomicznie (Rozporządzenie (UE), 2020/741).

W Stanach Zjednoczonych EPA wprowadziła National Water Reuse Action Plan (WRAP), a także kolejne inicjatywy w ramach polityki *water reuse*, ukierunkowane na wspieranie wdrożeń poprzez działania regulacyjne, instrumenty finansowe oraz rozwój badań i innowacji (R&D).

VIII. PODSUMOWANIE

Współcześnie odzysk wody jest postrzegany jako strategiczny element adaptacji do zmian klimatu, rozwoju gospodarki o obiegu zamkniętym i zwiększenia odporności systemów wodnych. Rosnące niedobory zasobów, intensyfikacja susz, konkurencja o wodę między sektorami oraz ograniczenia środowiskowe sprawiają, że woda odzyskana przestaje być wyłącznie rozwiązaniem alternatywnym i staje się niezbędnym elementem zarządzania zasobami wodnymi.

Historyczna ewolucja odzysku wody od praktyk starożytnych do zaawansowanych systemów współczesnych pokazuje, że ponowne wykorzystanie wody nie jest jedynie technologią, lecz koncepcją głęboko zakorzenioną w rozwoju cywilizacyjnym i wynikającą z konieczności adaptacji do ograniczeń środowiskowych. Analiza historii odzysku wody pozwala zrozumieć, w jaki sposób społeczeństwa adaptowały się do presji zasobowych, jakie lekcje wyciągnięto z przeszłych kryzysów sanitarnych i środowiskowych oraz dlaczego w XXI wieku odzysk wody stanowi jeden z kluczowych filarów globalnych strategii wodnych.

Rozwój technologii odzysku wody oraz regulacji prawnych tworzy nowe możliwości dla przemysłu, a integracja odzysku wody z procesami przemysłowymi stanowi istotny element zrównoważonego rozwoju i adaptacji do zmian klimatu. Jednocześnie należy podkreślić, że choć odzysk wody poprawia bilans wodny i jakość odbiorników, może on również prowadzić do wzrostu śladu energetycznego i klimatycznego oraz generować strumienie koncentratów wymagających dalszego zagospodarowania.

BIBLIOGRAFIA

- Ali H., Khan E., Sajad M.A. (2013). Phytoremediation of heavy metals. Concepts and applications. *Chemosphere*. 91(7). 869-881. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.01.075>.
- Angelakis A.N., Rose J.B. (2014). Evolution of water reuse through the millennia. *Water*. 6(5). 1093-1120. <https://doi.org/10.3390/w6051093>.

- Areosa I., Martins T.A.E., Lourinho R., Batista M., Brito A.G., Amaral L. (2024). Treated wastewater reuse for irrigation: A feasibility study in Portugal. *Science of the Total Environment*. 954. 176698. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.176698>.
- Asano T., Burton F.L., Leverenz H.L., Tsuchihashi R., Tchobanoglous, G. (2007). *Water reuse: Issues, technologies and applications*. McGraw-Hill.
- Burian S.J., Edwards F.G. (2002). Historical perspectives of urban drainage. *Water Science and Technology*. 36(8-9).
- Butzer K.W. (1976). *Early hydraulic civilization in Egypt*. University of Chicago Press.
- EEA. (2021). *Water resources across Europe - confronting water stress: an updated assessment*. EEA Report 12/2021. ISBN 978-92-9480-391-7.
- EEA. (2024). *Europe's state of water. Water scarcity conditions in Europe* [dok. elektr.: <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/indicators/use-of-freshwater-resources-in-europe-1>; data wejścia: 06.05.2026].
- EPA. (2025). U.S. Environmental Protection Agency (2025). *Risk-Based Framework for Developing Microbial Treatment Targets for Water Reuse*. EPA/600/R-25/009. January 2025.
- EPA. (2026). *National water reuse action plan*. United States Environmental Protection Agency [dok. elektr.: <https://www.epa.gov/waterreuse/national-water-reuse-action-plan-online-platform>; data wejścia: 06.05.2026].
- Expósito A., Lorenzo Lopez A.M., Berbel J. (2024). How much does reclaimed wastewater cost? A comprehensive analysis for irrigation uses in the European Mediterranean context. *Water Reuse*. 14(3). 434-447. DOI: 10.2166/wrd.2024.040.
- European Commission. European Environment Agency. EEA. (2019). *Water reuse in Europe*. Copenhagen: European Environment Agency.
- European Commission. European Environment Agency. EEA. (2020). *A new Circular Economy Action Plan: For a cleaner and more competitive Europe*. Brussels: European Commission.
- Eurostat. (2025). *Water statistics* [dok. elektr.: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Water_statistics; data wejścia: 06.05.2026].
- FAO. (2003). *Review of world water resources by country*. FAO Water Reports No. 23. Rome.
- FAO. (2026). *AQUASTAT – FAO's global information system on water and agriculture* [dok. elektr.: <https://www.fao.org/aquastat/en/>; data wejścia: 06.05.2026].
- Gandy M. (2014). *The fabric of space: water, modernity, and the urban imagination*. MIT Press.
- Giammar D.E., Greene D.M., Mishra A., Rao N., Sperling J.B., Talmadge M., Miara A., Sitterley K.A., Wilson A., Akar S., Kurup P., Stokes-Draut J.R., Coughlin K. (2021). Cost and Energy Metrics for Municipal Water Reuse. *ACS ES&T Engineering*. 2(3). 489-507. DOI: 10.1021/acsestengg.1c00351.
- Gleick P.H. (2014). *The World's Water. Volume 8: The Biennial Report on Freshwater Resources*. Island Press. Washington. DC.
- GUS. (2024). *Ochrona środowiska w 2023 r.* [dok. elektr.: <https://stat.gov.pl/obszary-tematyczne/srodowisko-energia/srodowisko/ochrona-srodowiska-w-2023-roku,12,7.html>; data wejścia: 06.05.2026].
- Hodge A.T. (2002). *Roman Aqueducts & Water Supply*. Duckworth. London.
- IPCC. (2022). *Climate change 2022: impacts, adaptation and vulnerability*. Chapter 4: water. Cambridge University Press. DOI: 10.1017/9781009325844.006.
- Israel Water Authority. (2015). *Water Reuse in Israel: Policies, Technologies and Case Studies*. Israel Water Authority. Tel Aviv.
- Melosi M.V. (2000). *The Sanitary City: Urban Infrastructure in America from Colonial Times to the Present*. Johns Hopkins University Press. Baltimore.

- National Research Council. (2012). *Water Reuse: Potential for Expanding the Nation's Water Supply*. National Academies Press, Washington, DC.
- OECD. (2015). *Water and the circular economy*. OECD Publishing, Paris.
- OECD. (2024). *Financing Water Supply, Sanitation and Flood Protection - chapter: "Costs of addressing emerging challenges in wastewater collection and treatment"*. Paris: OECD Publishing.
- Pedrero F., Kalavrouziotis I., Alarcón J.J., Koukoulakis P., Asano T. (2010). Use of treated municipal wastewater in irrigated agriculture-Review of some practices in Spain and Greece. *Agricultural Water Management*. 97(9). 1233-1241.
- Rozporządzenie (UE) 2020/741 Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 25 maja 2020 r. w sprawie minimalnych wymogów dotyczących ponownego wykorzystywania wody. Dz.U. L 177 z 05.06.2020. 32-55.
- Rice J., Bischel H.N., Luthy R.G. (2013). De facto wastewater reuse: Implications for drinking water treatment. *Water Research*. 47(4). 1211-1221.
- Snow J. (1855). *On the Mode of Communication of Cholera*. John Churchill, London.
- Tong T., Elimelech M. (2016). The Global Rise of Zero Liquid Discharge for Wastewater Management: Drivers, Technologies, and Future Directions. *Environmental Science & Technology*. 50(13). 6846-6855.
- Toze S. (2006). Reuse of effluent water-benefits and risks. *Agricultural Water Management*. 80(1-3). 147-159.
- United Nations. (2015). *Transforming our world: the 2030 agenda for sustainable development* [dok. elektr.: <https://sustainabledevelopment.un.org/post2015/transformingourworld/publication>; data wejścia: 06.05.2026].
- United Nations. (2023). *Blueprint for acceleration: sustainable development goal 6 synthesis report on water and sanitation 2023*. DOI: 10.18356/9789210026444.
- United Nations. (2024). *World water development report 2024: water for prosperity and peace*. ISBN 978-92-3-100657-9.
- UN-Water. (2021). *Progress on wastewater treatment – 2021 update. Global status and acceleration needs for SDG indicator 6.3.1*.
- US EPA (United States Environmental Protection Agency). (2017). *Water Recycling and Reuse*. Washington, DC.
- Vymazal J. (2014). Constructed wetlands for treatment of industrial wastewaters: A review. *Ecological Engineering*. 73. 724-751.
- WHO. (2006). *Guidelines for the safe use of wastewater, excreta and greywater*. Vol. 1. ISBN 92-4-154682-4.
- WHO. (2017). *Potable reuse: guidance for producing safe drinking-water*. ISBN 978-92-4-151277-0.
- WISE. (2025). *Freshwater information system for Europe* [dok. elektr.: <https://water.europa.eu/freshwater/freshwater/countries/uwwt/poland>; data wejścia: 06.05.2026].
- World Bank. (2025). *Scaling water reuse: a tipping point for municipal and industrial use*. Washington, DC. DOI: 10.1596/43326.