



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



Politechnika Świętokrzyska
Wydział Inżynierii Środowiska, Geodezji
i Energetyki Odnawialnej

Kierunek studiów:
Inżynieria Środowiska

Katarzyna Górską
Jarosław Gawdzik

Materiały dydaktyczne do przedmiotu

ODNOWA WODY

opracowane w ramach realizacji Projektu
**„Dostosowanie kształcenia
w Politechnice Świętokrzyskiej do potrzeb
współczesnej gospodarki”**
FERS.01.05-IP.08-0234/23

Kielce, 2025



Politechnika Świętokrzyska
Kielce University of Technology

Projekt „Dostosowanie kształcenia w Politechnice Świętokrzyskiej do potrzeb współczesnej gospodarki”
nr FERS.01.05-IP.08-0234/23



Spis treści

1.	Wprowadzenie.....	2
1.1.	Stopnie oczyszczania ścieków.....	4
1.2.	Układy urządzeń w systemach odnowy wody.....	10
2.	Metody membranowe w systemach odnowy wody.....	17
3.	Odnowa wody w kosmosie	21
3.1.	Odzysk wody na ISS.....	21
4.	Obliczanie i wymiarowanie urządzeń do oczyszczania wody	25
4.1.	Komora napowietrzania	25
4.2.	Komora reakcji (osadnik)	27
4.3.	Filtry odżelaziająco - odmanganiające	29
4.4.	Przewody wodociągowe	30
4.5.	Dawka chloru	34
5.	Spis literatury	36



Materiały dydaktyczne objęte licencją Creative Commons BY 4.0.

Licencja dostępna pod adresem: <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



1. Wprowadzenie

Woda pokrywa około 71% powierzchni Ziemi, jednak tylko niewielki ułamek tej ogromnej ilości – zaledwie ok. 0,007% – to słodka woda łatwo dostępna do wykorzystania przez człowieka. Większość zasobów znajduje się w lodowcach lub głęboko pod powierzchnią ziemi, przez co ich eksploatacja jest utrudniona i kosztowna (VanLoon, 2008). Globalny kryzys wodny nasila się z każdym rokiem. Rosnące zapotrzebowanie na wodę jest związane zarówno ze zmianami klimatycznymi, jak i postępującą urbanizacją oraz rozwojem przemysłu co wymusza konieczność zmiany podejścia do gospodarowania zasobami wodnymi. Podobnie rosnąca liczba ludności (obecnie ok. 8,23 mld ludzi) oraz intensyfikacja rolnictwa prowadzą do niedoborów zasobów wodnych w wielu regionach świata. Według prognoz, do 2030 roku zapotrzebowanie na wodę może przewyższyć jej dostępność o ponad 40%. Do 2050 roku nawet połowa ludzkości może zmagać się z poważnym deficytem wody (Zawadzki, 2024).

W tym kontekście odzysk i ponowne wykorzystanie wody stają się kluczowymi działaniami w ramach zrównoważonego zarządzania zasobami. Woda odzyskana z odpowiednio oczyszczonych ścieków znajduje zastosowanie w wielu sektorach: w tym w rolnictwie oraz w przemyśle – jako woda procesowa. Odpowiednio prowadzony recykling ścieków zmniejsza presję na środowisko naturalne, ogranicza zużycie wody pitnej i pozwala na zachowanie równowagi hydrologicznej. W wielu krajach rozważa się nawet wykorzystanie odzyskanej wody do celów konsumpcyjnych, pod warunkiem spełnienia rygorystycznych norm jakości. Jednak skuteczność recyklingu wody zależy od zmiennego składu ścieków, który podlega wpływowi wielu czynników: warunków pogodowych, pory roku, wielkości aglomeracji, dopływu ścieków przemysłowych, a także awarii i konserwacji infrastruktury. Wszystkie te elementy wpływają na jakość końcowego procesu oczyszczania. W skali globalnej produkcja ścieków rośnie dynamicznie. Rocznie na świecie wytwarzanych jest już około 380 miliardów m³ ścieków, a do 2050 roku ilość ta może wzrosnąć o połowę. Mimo tego tylko niewielka ich część podlega recyklingowi. W wielu krajach (w tym w USA czy Chinach) odzyskuje się zaledwie 10% tej wody, co oznacza ogromny, niewykorzystany potencjał (Zawadzki, 2024).

W Unii Europejskiej coraz większy nacisk kładzie się na zwiększenie stopnia ponownego wykorzystania ścieków, jednak skala wdrożenia takich rozwiązań nadal pozostaje ograniczona. Zainteresowanie odzyskiem wody stale jednak rośnie, szczególnie w kontekście nowych regulacji środowiskowych oraz rozwoju technologii w sektorze wodno-ściekowym.

Współczesne oczyszczalnie ścieków coraz częściej wprowadzają zaawansowane metody oczyszczania, umożliwiające bezpieczne i efektywne ponowne



wykorzystanie wody. Jednym z najważniejszych wyzwań pozostaje jednak obecność mikrozanieczyszczeń – substancji, które w śladowych ilościach występują w ściekach i wodach naturalnych. Do tej grupy należą m.in. mikro- oraz nanoplastik, farmaceutyki, antybiotyki, hormony czy związki fluoroorganiczne. Ich skuteczne usuwanie wymaga wyjścia poza tradycyjne metody oczyszczania i wdrażanie innowacyjnych rozwiązań opartych na najnowszych osiągnięciach technologicznych.

Z podobnymi lub nawet większymi problemami borykamy się w kraju. Polska, jako kraj o jednym z najniższych zasobów wodnych w Europie (średnio ok. 1.600 m³ na mieszkańca rocznie), znajduje się w grupie państw szczególnie narażonych na deficyt wody. Według danych GUS z 2023 roku obecne zużycie wody w Polsce oscyluje wokół 7,9 km³ rocznie, przy czym struktura jej zużycia przedstawia się następująco (GUS, 2025):

- Przemysł - udział przemysłu w zużyciu wody jest bardzo wysoki, przedziale 65-72%,
- Rolnictwo - udział rolnictwa w zużyciu wody w Polsce jest relatywnie niski i znajduje się w przedziale 9-11%. Rolnictwo w Polsce, ze względu na specyfikę upraw, nie korzysta w tak znacznym stopniu z systemów nawadniających, jak w innych krajach.
- Potrzeby komunalne - sektor komunalny, w tym eksploatacja sieci wodociągowej, odpowiada za około 19-21% zużycia. W tym zużycie wody w samych gospodarstwach domowych wynosi ok. 1,3 km³

Dzięki wprowadzeniu odpowiednich opłat za pobór wody oraz intensywnemu rozwojowi technologii oszczędzających wodę, zużycie to w ostatnich dekadach stopniowo malało i obecnie uległo stabilizacji. Znaczna część wody wykorzystywanej w gospodarce komunalnej pochodzi z ujęć podziemnych (nawet 60% w niektórych regionach), co prowadzi do lokalnych obniżek poziomu wód gruntowych. Problemy te są szczególnie widoczne w centralnej i południowej Polsce, gdzie opady są nieregularne, a odpływ wód do Bałtyku w latach suchych bywa bardzo niski – niekiedy poniżej 30.000 hm³ rocznie. Kolejnym istotnym wyzwaniem jest zbyt mała pojemność zbiorników retencyjnych. Obecnie krajowa retencja wynosi zaledwie około 6.000 hm³, co nie pozwala na skuteczne wyrównywanie niedoborów w okresach suszy. Wobec tego konieczne jest wdrażanie nowoczesnych metod zarządzania wodą, takich jak:

- Oszczędzanie i racjonalizacja zużycia, zarówno w gospodarstwach domowych, jak i przemyśle.
- Zamykanie obiegów wodnych w zakładach przemysłowych i wtórne wykorzystanie wody, np. w układach miasto–przemysł–rolnictwo.
- Transfer wody między regionami, przy zachowaniu równowagi ekologicznej w dorzeczach.
- Zwiększenie retencji, zarówno powierzchniowej (budowa zbiorników zaporowych), jak i podziemnej (mała retencja krajobrazowa).

Odnowa wody z oczyszczonych ścieków to nie tylko konieczność w warunkach rosnącego deficytu wody, ale również szansa na budowę bardziej odpornego i zrównoważonego systemu gospodarowania zasobami wodnymi. Dalszy rozwój technologii oczyszczania i rosnące zainteresowanie tym tematem mogą znacząco przyczynić się do złagodzenia skutków globalnego kryzysu wodnego.

1.1. Stopnie oczyszczania ścieków

W warunkach deficytu wody coraz większą rolę odgrywa tzw. odnowa wody, czyli procesy technologiczne umożliwiające ponowne wykorzystanie ścieków po ich zaawansowanym oczyszczeniu. Zdefiniujmy najpierw pojęcie ścieków. Zgodnie z Ustawą z dnia 20 lipca 2017 r. Prawo wodne (Dz. U. 2017 poz. 1566 z późniejszymi zmianami) ścieki to: wszelkiego rodzaju zużyte wody powstające w wyniku działalności ludzkiej, zarówno w obszarach życia codziennego, jak i przemysłowego. Obejmują one wodę używaną w domach oraz w różnych procesach przemysłowych, a także płynne odpady pochodzenia zwierzęcego, z wyjątkiem gnojowicy i gnojówki stosowanych w rolnictwie. W skład ścieków zaliczają się również wody odciekowe, które pochodzą ze składowisk odpadów oraz z obiektów zajmujących się unieszkodliwianiem odpadów wydobywczych, w tym substancje uznawane za niebezpieczne, jak również te klasyfikowane jako inne lub obojętne. Ponadto, do tej kategorii należą wody wynikające z procesów chłodzenia w elektrowniach oraz elektrociepłowniach, a także wody powstałe podczas odwodnienia zakładów górniczych, z wyłączeniem tych, które włączane są z powrotem do górotworu, pod warunkiem że ich skład chemiczny nie uległ zmianie w porównaniu do pierwotnie pobranej wody. Ściekami definiuje się również wody stosowane w obiektach hodowli ryb i innych organizmów wodnych, zarówno w systemach przepływowych, jak i w stawach, jeśli ilość lub rodzaj obecnych w nich substancji przekracza uregulowań określonych w pozwoleniach wodnoprawnych. Szczególnie dotyczy to gospodarstw rybackich, w których roczna produkcja ryb lub innych organizmów wodnych przewyższa ustaloną wartość w przeliczeniu na

powierzchnię użytkową stawów. Podział ścieków można ująć w następujące kategorie:

- ścieki bytowo-gospodarcze – to odpady wodne pochodzące z budynków mieszkalnych, obiektów zamieszkania zbiorowego oraz instytucji użyteczności publicznej. Powstają one w wyniku procesów metabolicznych człowieka oraz codziennych czynności domowych. Do tej grupy zaliczają się również ścieki o podobnym składzie generowane przez wspomniane obiekty;
- ścieki komunalne – dotyczą ścieków bytowych, ich mieszanin ze ściekami przemysłowymi, jak również wód opadowych i roztopowych;
- ścieki przemysłowe – są efektem działalności związanej z przemysłem, handlem, magazynowaniem, transportem oraz świadczeniem usług.

Ustawa Prawo wodne z 2017 roku wprowadziła definicję ścieków, która wyraźnie wyłączyła z niej wody opadowe i roztopowe. Wcześniej, na podstawie starego Prawa wodnego z 2001 roku, wody opadowe i roztopowe ujęte w systemy kanalizacyjne, pochodzące z powierzchni zanieczyszczonych o trwałej nawierzchni, były traktowane jako ścieki. Wody opadowe lub roztopowe są zdefiniowane oddzielnie (art. 16 pkt 69) jako "wody będące skutkiem opadów atmosferycznych". Jednak istnieją w tym względzie pewne wyjątki, w których wody opadowe lub roztopowe mogą być traktowane jak ścieki:

- Jeżeli wody opadowe lub roztopowe zostaną zmieszane ze ściekami bytowymi, stają się częścią ścieków komunalnych. Jeżeli zostaną zmieszane ze ściekami innymi niż bytowe (np. przemysłowymi), stają się częścią ścieków przemysłowych.
- Pomimo ogólnego wyłączenia, w praktyce, wody opadowe i roztopowe pochodzące z silnie zanieczyszczonych powierzchni o trwałej nawierzchni (np. dróg, parkingów, terenów przemysłowych, baz transportowych, składowisk odpadów, itp.), zwłaszcza gdy są ujmowane w systemy kanalizacji deszczowej, wciąż podlegają opłatom za usługi wodne za odprowadzanie ich do wód lub urządzeń wodnych. Choć nie są formalnie ściekami w definicji, ich odprowadzanie wiąże się z obowiązkami wynikającymi z Prawa wodnego i przepisów wykonawczych dotyczących jakości wód. Wymagają one często podczyszczania.

Podstawowym celem oczyszczania ścieków jest zatem minimalizacja negatywnego wpływu zanieczyszczeń na środowisko naturalne, które wynikają z antropopresji zarówno w sferze codziennego życia, jak i przemysłu. Proces ten koncentruje się na



usuwaniu szkodliwych substancji oraz ochronie ekosystemów wodnych przed degradacją. Dzięki zastosowaniu zaawansowanych metod fizykochemicznych oraz biologicznych możliwe jest uzyskanie ze ścieków oczyszczonych, wody nadającej się do celów przemysłowych, rolniczych, a w niektórych przypadkach – nawet do celów komunalnych (np. do spłukiwania toalet, czy też nawadniania terenów zielonych).

Odnowa wody to szereg procesów i operacji jednostkowych które prowadzą do takiego doczyszczania ścieków, iż mogą być one wykorzystane na cele przemysłowe lub bytowo-gospodarcze. Jest często określana jako IV stopień oczyszczania ścieków, ponieważ ma na celu usunięcie zanieczyszczeń rezydualnych oraz przygotowanie wody do ponownego jej wykorzystania w założonych celach.

O stopniu oczyszczania wody w procesie odnowy decydują wymagania odbiorcy, przy czym warto odnotować, iż stosowanie soli hydrolizujących jak $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$, FeCl_3 , FeSO_4 oraz $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ do koagulacji może być ograniczone ze względu na limity zawartości chlorków i siarczanów w wodzie odnowionej. Warto w tym miejscu wspomnieć, iż według rozporządzenia Ministra Zdrowia z dnia 7 grudnia 2017 r. (Dz.U.2017 poz. 2294) w sprawie jakości wody przeznaczonej do spożycia przez ludzi wartość ta nie może przekroczyć 250 mg/l. Podobnie przewodność elektryczna oznaczana w temperaturze 298K jest limitowana do wartości 2500 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Może to prowadzić niejednokrotnie do konieczności odsalania ścieków w ramach IV stopnia ich oczyszczania. Problem ten można ograniczyć prowadząc koagulację z wykorzystaniem glinianu sodu NaAlO_2 czy lub K_2FeO_4 (Muszyńska, 2025)

Przyjrzyjmy się pierwszym trzem stopniom oczyszczania ścieków, ze szczególnym uwzględnieniem ich skuteczności (Łomotowski, 2002):

I Stopień – Oczyszczanie Mechaniczne

Celem tego procesu jest usunięcie zanieczyszczeń stałych, zawieszonych, włączonych oraz pływających ze ścieków, które mogłyby uszkodzić urządzenia oczyszczalni ścieków w dalszych etapach ich oczyszczania. Na ogół wykorzystuje się w tym celu procesy cedzenia realizowane na kratkach oraz na sitach. Zaś w piaskownikach usuwane są cięższe cząstki stałe, w tym piasek, żwir, szkło, które mogłyby osadzać się w rurociągach i reaktorach. W przypadku piaskowników napowietrzanych istnieje dodatkowo możliwość usunięcia tłuszczów i olejów. W osadnikach wstępnych zachodzi sedymentacja (grawitacyjne opadanie) zawiesin w tym zwłaszcza łatwo opadających zawiesin organicznych. Jednakże, cząstki lżejsze od wody, takie jak tłuszcze, oleje i substancje ropopochodne, gromadzą się na powierzchni ścieków w osadniku i są stamtąd usuwane za pomocą specjalnych zgarniaczy. Osadniki wstępne skutecznie eliminują znaczną część tych zanieczyszczeń, przygotowując ścieki do dalszych etapów oczyszczania oraz flotacja (wypływanie) tłuszczów i olejów. Skuteczność usuwania zawiesin ogólnych jest wysoka, zazwyczaj w granicach 40-60%, a czasem nawet do 70% w przypadku



poprawnie zaprojektowanych osadników. Redukcja BZT₅ jest umiarkowana, ponieważ usuwane są głównie związki organiczne w formie zawiesin. Oczekiwana skuteczność znajduje się zwykle w przedziale wartości 25-40%. Nie można również powiedzieć, że redukcja ChZT jest zadowalająca. Wartość w przedziale 20-35% nie będzie niczym nadzwyczajnym.

II Stopień – Oczyszczanie Biologiczne

Celem tego stopnia oczyszczania ścieków jest usunięcie rozpuszczonych i koloidalnych związków organicznych, które pozostały po oczyszczaniu mechanicznym. Wykorzystuje się w tym celu aktywność mikroorganizmów (bakterii, grzybów, pierwotniaków), które rozkładają zanieczyszczenia organiczne w warunkach o zróżnicowanej podaży tlenu. Do najczęściej spotykanych procesów możemy zaliczyć metody:

- Osad czynny - najpopularniejsza metoda. Ścieki są napowietrzane w komorach napowietrzania, co stwarza optymalne warunki dla rozwoju mikroorganizmów. Mikroorganizmy tworzą aglomeraty (kłaczkosady czynnego), które rozkładają biodegradowalne zanieczyszczenia organiczne. Następnie osad czynny jest oddzielany od ścieków oczyszczonych w osadnikach wtórnych, a jego część recyrkuluje się do komory napowietrzania celem zapewnienia optymalnej koncentracji w KOC;
- Złoża biologiczne – to technologia w której ścieki przepływają przez złoża wypełnione materiałem nośnym (np. kamienie, tworzywa sztuczne), na którym rozwija się błona biologiczna (biofilm) z mikroorganizmami. Zanieczyszczenia są adsorbowane i rozkładane przez ten biofilm.
- Alternatywne metody - biologiczne reaktory membranowe (MBR), reaktory beztlenowe (np. UASB dla specyficznych ścieków przemysłowych).

Skuteczność holistyczna w aspekcie eliminacji BZT₅, uzyskana po pierwszym i drugim stopniu oczyszczania ścieków jest często wysoka, a niejednokrotnie nawet bardzo wysoka i wynosi zazwyczaj 90-95% i więcej. Dlatego też spora część oczyszczalni osiąga stężenia BZT₅ w odpływie poniżej 15 mg O₂/dm³. Eliminacja ChZT jest nieco niższa ale wynosi zwykle solidne 75 do 90%. Na rezydualne ChZT ścieków oczyszczonych składa się głównie trudno biodegradowalna materia organiczna. Wysoka w tym układzie oczyszczania jest również skuteczność eliminacji zawiesin ogólnych, zazwyczaj w zakresie 90-95% (częściowo usuniętych już w stopniu pierwszym, podczas gdy zasadnicza część biomasy zostaje zatrzymana w tzw. osadnikach wtórnych). Osiągnięcie powyższych rezultatów nie jest niczym nadzwyczajnym, jednak pod warunkiem zachowania optymalnego indeksu osadu.



III Stopień – usuwanie związków biogenych

Trzeci stopień oczyszczania ścieków obejmuje tylko te procesy, których następstwem jest redukcja zawartości związków azotu i fosforu w ściekach. Jest to stopień kluczowy w aspekcie ochrony zbiorników wodnych przed eutrofizacją. Możliwe implementacje polegają na chemicznym strącaniu fosforu przy udziale koagulantów (soli żelaza, rzadziej glinu oraz wapna CaO), które reagują z ortofosforanami, tworząc nierozpuszczalne osady. Osady te są następnie usuwane w procesach sedymentacji. Skuteczność eliminacji związków fosforu jest w tym przypadku bardzo wysoka i wynosi 90-95%.

W ostatnich latach dokonał się znaczny postęp w zakresie biologicznego usuwania fosforu (Enhanced Biological Phosphorus Removal - EBPR). Proces ten polega na wykorzystaniu specyficznych bakterii, które w warunkach beztlenowych pobierają fosfor, a następnie w warunkach tlenowych akumulują go w nadmiernych ilościach. Pozwala to na usunięcie fosforu z osadem nadmiernym. Skuteczność metod biologicznych jest również wysoka i często osiąga 90%. Wadą tych metod jest ich nieco niższa skuteczność w warunkach zimowych.

Oprócz usuwania fosforu w tym systemie możliwa jest również skuteczna biodegradacja związków azotu. Proces zachodzi w fazie tlenowej bakterie nityfikacyjne utleniają jon amonowy (NH_4^+) do azotynów III (NO_2^-), a następnie do azotanów V (NO_3^-). Denityfikacja jest realizowana z kolei w fazie anoksycznej przez bakterie denityfikacyjne które na drodze biochemicznej redukują azotany (NO_3^-) do gazowego azotu (N_2), który ulatnia się do atmosfery. Proces denityfikacji wymaga obecności związków organicznych jako źródła węgla (dostarczanych np. pod postacią CH_3OH). Skuteczność usuwania azotu ogólnego może wynosić 70-85%, w zależności od technologii i warunków. Często stosowane do poprawy skuteczności usuwania zawiesin koloidalnych, a także niektórych barwników, metali ciężkich i trudno biodegradowalnych substancji organicznych.

IV Stopień – system odnowy wody

IV stopień ma na celu usunięcie mikrozanieczyszczeń, patogenów, pozostałości farmaceutyków, hormonów, pestycydów i innych substancji, które nie zostały całkowicie wyeliminowane w poprzednich etapach. Ma to na celu przygotowanie wody do ponownego wykorzystania (np. do celów przemysłowych, rolniczych, a w przyszłości nawet do zasilania ujęć wody pitnej). W tym celu można stosować następujące procesy:

- Filtracja membranowa (mikrofiltracja, ultrafiltracja, nanofiltracja, odwrócona osmoza): Usuwanie bardzo małych cząstek, wirusów, bakterii, a nawet rozpuszczonych soli i związków organicznych.
- Adsorpcja na węglu aktywnym (PWA lub GWA): Usuwanie szerokiego spektrum mikrozanieczyszczeń organicznych, które są adsorbowane na powierzchni węgla.
- Ozonowanie: Silne utlenianie, które rozkłada rozpuszczoną materię organiczną i dezynfekuje wodę onawianą.
- Promieniowanie UV: Skuteczna dezynfekcja wody poprzez inaktywację mikroorganizmów.
- Zaawansowane procesy utleniania (AOPs): Wykorzystanie silnych utleniaczy (np. ozon O_3 w połączeniu z H_2O_2 , odczynnik Fentona, UV) do rozkładu trudnorozkładalnych zanieczyszczeń w tym zwłaszcza związków refrakcyjnych.

Odnowa wody jak to już powiedziano wyżej, określana jest jako czwarty stopień oczyszczania, stanowi jeden z najważniejszych elementów nowoczesnych oczyszczalni ścieków. Proces ten jest realizowany po klasycznym oczyszczaniu mechanicznym, biologicznym i chemicznym, a jego głównym celem jest uzyskanie wody o jakości zbliżonej do wody pitnej lub technicznej. Czwarty stopień oczyszczania pozwala na eliminację zanieczyszczeń, których nie usuwa oczyszczanie biologiczne, takich jak związki azotu i fosforu, metale ciężkie, mikroplastiki czy mikrozanieczyszczenia. Odzysk wody nabiera szczególnego znaczenia w regionach borykających się z ograniczonymi zasobami wodnymi, gdzie każda kropla ma ogromną wartość.

Jedną z najczęściej stosowanych metod w procesie odnowy wody jest ciśnieniowa filtracja membranowa, obejmująca ultrafiltrację, nanofiltrację oraz odwróconą osmozę. Technologie membranowe skutecznie usuwają bakterie, wirusy oraz substancje rozpuszczone, zapewniając wysoką jakość oczyszczonej wody. Integralnym elementem procesu jest również dezynfekcja, najczęściej realizowana za pomocą promieniowania UV lub chlorowania. Dodatkowo, w IV stopniu oczyszczania stosuje się procesy sorpcyjne z wykorzystaniem węgla aktywnego, który efektywnie usuwa pestycydy, farmaceutyki i związki organiczne. Uzupełnieniem tych metod jest ozonowanie, które pozwala na usunięcie związków refrakcyjnych.

Zastosowanie IV stopnia oczyszczania umożliwia produkcję wody nadającej się do ponownego użycia w różnych sektorach. Odnowiona woda znajduje zastosowanie w rolnictwie do nawadniania upraw, w przemyśle – na przykład w chłodniach kominowych, a w niektórych krajach, po dodatkowej obróbce, trafia nawet do systemów wodociągowych. Technologia odzysku wody odgrywa kluczową rolę



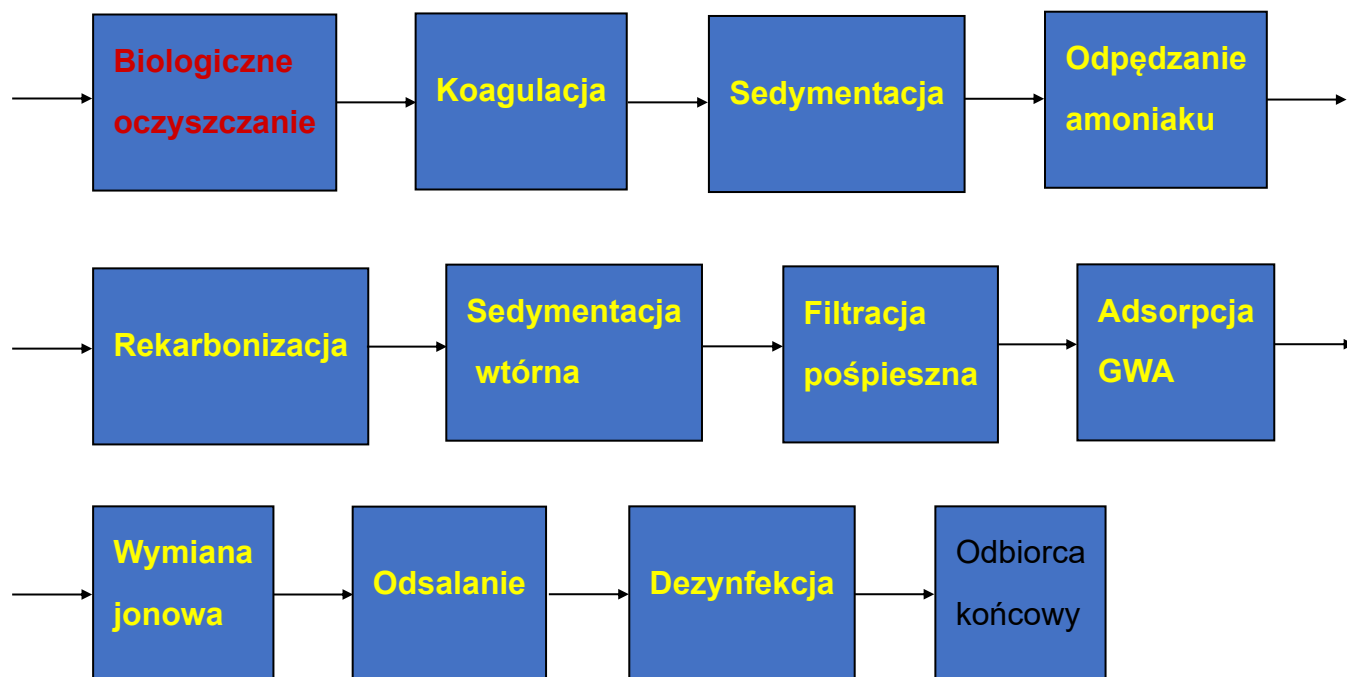
w zmniejszaniu presji na zasoby wód powierzchniowych i podziemnych, wpisując się w ideę gospodarki o obiegu zamkniętym oraz strategię zrównoważonego rozwoju.

W ostatnich latach coraz większą wagę przywiązuje się do niskoenergetycznych technologii odzysku wody oraz do monitoringu parametrów jakościowych, takich jak zawartość azotanów, metali ciężkich czy mikrozanieczyszczeń. Choć koszty instalacji i eksploatacji systemów IV stopnia są znaczące, to jednak korzyści ekologiczne i społeczne, jakie niesie za sobą odzysk wody, są nie do przecenienia. Oczyszczona woda często spełnia normy jakościowe wyznaczone przez Światową Organizację Zdrowia (WHO), a dzięki jej odzyskowi ogranicza się ilość ścieków odprowadzanych do rzek i jezior, co przyczynia się do poprawy stanu ekosystemów wodnych.

Czwarty stopień oczyszczania umożliwia także usuwanie śladowych ilości hormonów i leków, które stanowią poważne zagrożenie dla środowiska wodnego. W Europie technologie odzysku wody są szczególnie rozwijane w krajach południowych, takich jak Hiszpania, gdzie niedobór wody jest problemem systemowym. W Polsce stosowanie IV stopnia oczyszczania dopiero zyskuje na znaczeniu, jednak przepisy prawne coraz częściej wymagają dodatkowego oczyszczania ścieków przed ich odprowadzeniem do środowiska. Odnowa wody wpisuje się w globalne wyzwania związane z ochroną środowiska i racjonalnym zarządzaniem zasobami wodnymi, a rozwój technologii IV stopnia oczyszczania będzie kluczowy w kontekście narastającego problemu niedoboru wody na świecie.

1.2. Układy urządzeń w systemach odnowy wody

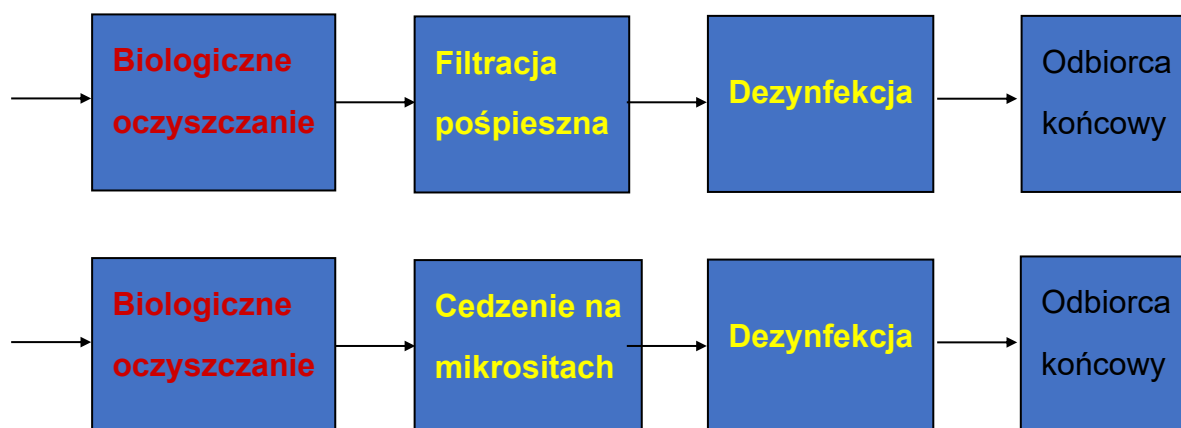
Zapotrzebowanie na jakość wody przemysłowej określa użytkownik. Dla bardzo wysokich wymagań w tym aspekcie, można przedstawić zaawansowany system odnowy wody stosowany w South Lake Tahoe w USA (rys.1).



Rys. 1. Schemat blokowy zaawansowanego systemu odnowy wody (opracowanie własne na podstawie Kowal, 1997)

[Tekst alternatywny. Schemat blokowy. Rysunek 1 przedstawia zaawansowany system odnowy wody ze ścieków komunalnych w South Lake Tahoe w USA na który składa się biologiczne oczyszczanie ścieków w procesie τ_2 oraz 10 stopniowa odnowa wody w skład której wydzielono procesy jednostkowe tj.: sedymentację wtórną, filtrację pośpieszną, adsorpcję, wymianę jonową, odsalanie oraz dezynfekcję końcową.]

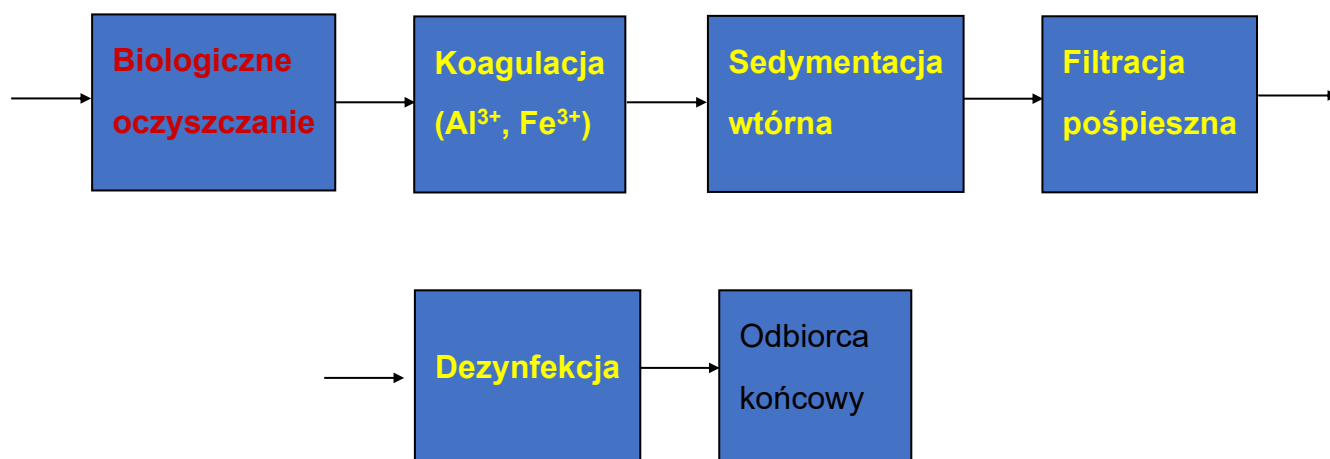
W uproszczonym systemie odnowy wody po biologicznym oczyszczaniu ścieków może być zastosowana filtracja pośpieszna bądź cedzenie na mikrositach oraz dezynfekcja. Tak opisany układ przedstawiono na rysunku 2:



Rys. 2. Schemat blokowy uproszczonego systemu odnowy wody (opracowanie własne na podstawie Kowal, 1997)

[Tekst alternatywny. Schemat blokowy. Rysunek 2 przedstawia uproszczony system odnowy wody ze ścieków na który składa się biologiczne oczyszczanie ścieków w procesie τ_2 oraz 2 stopniowa odnowa wody na którą składają się następujące procesy jednostkowe: filtracja pośpieszna oraz dezynfekcja. Opcjonalnie możliwe jest również zastąpienie filtracji pośpiesznej operacją jednostkową polegającą na cedzeniu na mikrositach.]

W wyniku skutecznie przeprowadzonej filtracji dochodzi do istotnej eliminacji zawiesin ogólnych w ściekach oczyszczonych w następstwie czego obniża się wartość BZT₅, ChZT, OWO oraz UV₂₅₄ wody odnowionej. Zawartość substancji biogennych zależy od skuteczności toru biologicznego oczyszczalni ścieków (Kowal, 1997). Podwyższenie poziomu oczyszczania w odnowie wody można uzyskać w procesie koagulacji wody solami żelaza i glinu (rys. 3)

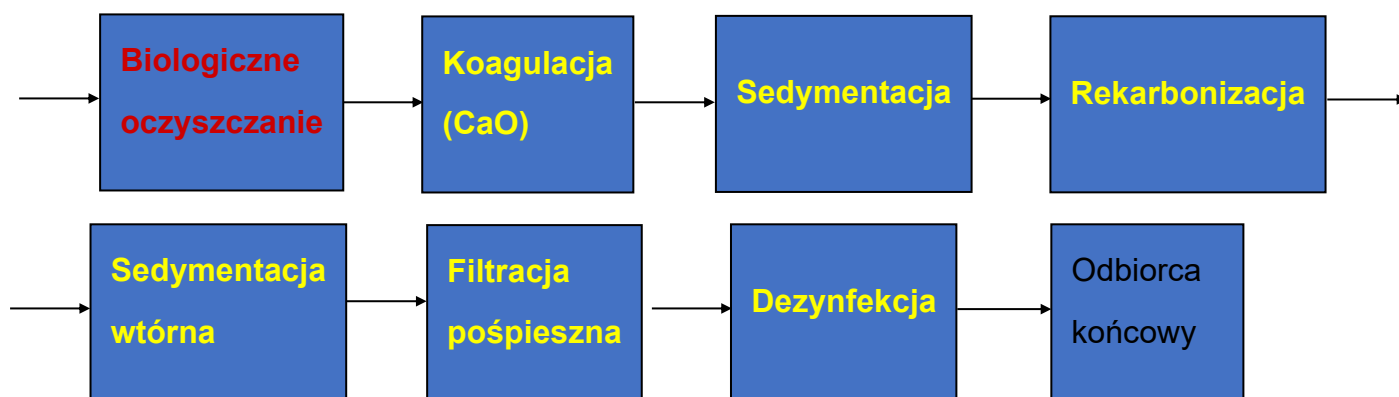


Rys. 3. Schemat blokowy uproszczonego systemu odnowy wody z koagulacją Al/Fe
(opracowanie własne na podstawie Kowal, 1997)

[Tekst alternatywny. Schemat blokowy. Rysunek 3 przedstawia uproszczony system odnowy wody ze ścieków na który składa się biologiczne oczyszczanie ścieków w procesie τ_2 oraz 4 stopniowa odnowa wody na którą składają się następujące procesy jednostkowe: koagulacja objętościowa solami żelaza lub glinu, sedymentacja wtórna, filtracja pośpieszna oraz dezynfekcja.]

W wyniku koagulacji można uzyskać nawet 70% obniżenie ChZT, OWO oraz metali ciężkich, zaś barwa wody spada do wartości poniżej 5 mgPt/dm³. Możliwa jest również częściowa eliminacja bakterii i wirusów >70%.

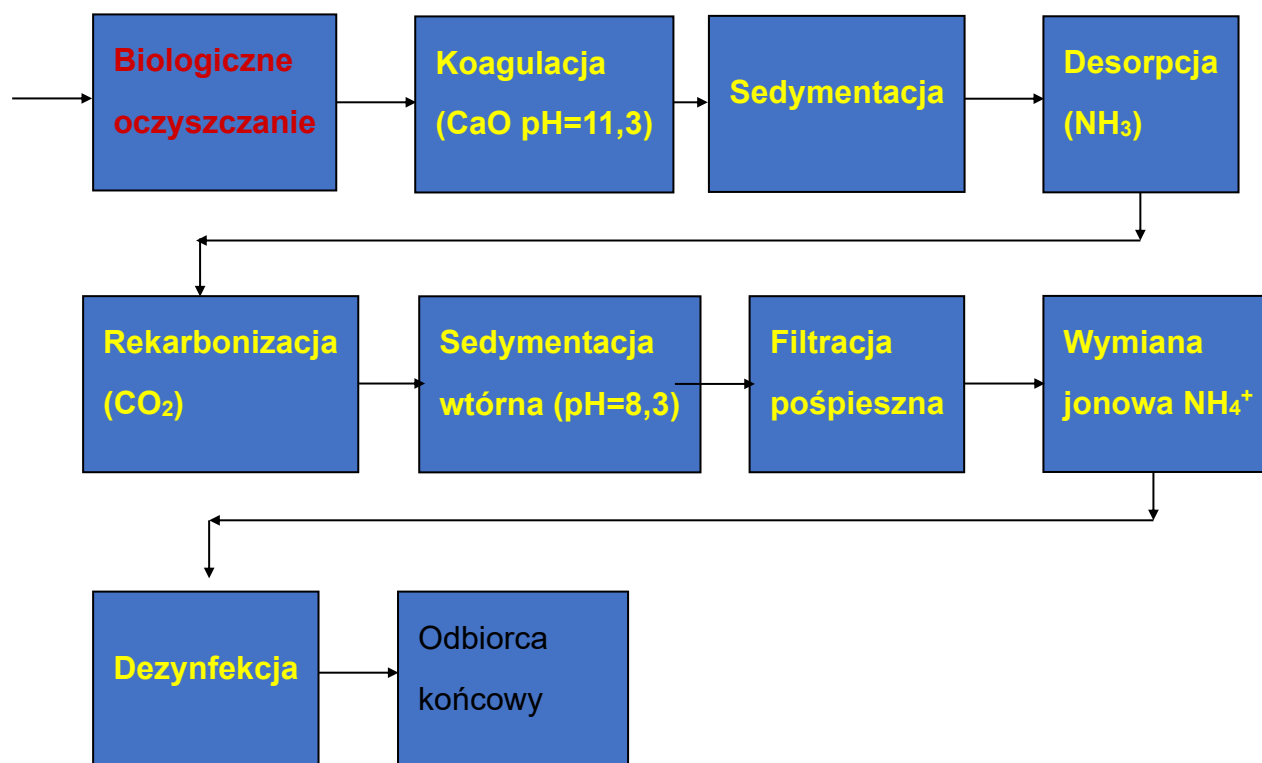
Alternatywnie prowadzona koagulacja wapnem przy wysokim odczynie niszczy bakterie i wirusy ze znacznie wyższą efektywnością, dochodzącą do 95%. (rys. 4):



Rys. 4. Schemat blokowy uproszczonego systemu odnowy wody z koagulacją CaO
(opracowanie własne na podstawie Kowal, 1997)

[Tekst alternatywny. Schemat blokowy. Rysunek 4 przedstawia uproszczony system odnowy wody ze ścieków na który składa się biologiczne oczyszczanie ścieków w procesie τ_2 oraz 6 stopniowa odnowa wody na którą składają się następujące procesy jednostkowe: koagulacja objętościowa wapnem, sedymentacja, rekarbonizacja, sedymentacja wtórna, filtracja pośpieszna oraz dezynfekcja.]

Jeżeli w procesie oczyszczania ścieków nie został usunięty azot amonowy, jak to ma miejsce w uproszczonym układzie τ_1 (Łomotowski, 2002), wówczas należy to zrobić w procesie odnowy wody. Azot amonowy może być skutecznie usuwany w procesie desorpcji strumieniem sprężonego powietrza już przy $\text{pH}=11,3$. Takie rozwiązanie musi być jednak rozszerzone o proces rekarbonizacji. Ze względu na nieco niższą efektywność desorpcji NH_3 z wody w warunkach zimowych, efekt eliminacji azotu można poprawić poprzez opcjonalną wymianę jonową na klinptylolicie (Kowal, 1997).



Rys. 5. Schemat blokowy systemu odnowy wody z koagulacją CaO oraz usuwaniem $\text{NH}_4^+/\text{NH}_3$ (opracowanie własne na podstawie Kowal A.L., 1997)

[Tekst alternatywny. Schemat blokowy. Rysunek 5 przedstawia system odnowy wody ze ścieków na który składa się biologiczne oczyszczanie ścieków w procesie τ_1 oraz 8 stopniowa odnowa wody na którą składają się następujące procesy jednostkowe: koagulacja objętościowa wapnem, sedymentacja, odpędzanie amoniaku strumieniem sprężonego powietrza, rekarbonizacja, sedymentacja wtórna, filtracja pośpieszna, wymiana jonowa na klinoptylolicie celem usunięcia rezydualnego NH_4^+ oraz dezynfekcja].

Proces odnowy wody może być uzupełniony układem odsalania wody (rys.1). Możliwe jest zastosowanie wymiany jonowej i/lub procesów membranowych. Stopień odsalania dostosowuje się do składu wody oraz wymagań odbiorcy. Woda musi zostać poddana procesowi dezynfekcji (tab.1).

Tabela 1. Porównanie metod dezynfekcji w odnowie wody (źródło: opracowanie własne na podstawie Kowal, 1997; Kowal, 2023)

Metoda	Efektywność względem patogenów	Działanie rezydualne	Uboczne produkty (UPD)*	Zalety	Wady
Chlor (Cl_2)	Wysoka dla bakterii i wirusów, niższa dla cyst)	Tak	THM, HAA	Metoda skuteczna i tania, dobrze rozpoznana	Powstają THM, Wpływ na właściwości oranoleptyczne wody tym jej smak oraz zapach, działanie korozyjne
Chloraminy	W najlepszym razie przeciętna	Tak	Nitrozoaminy, chlorowane aminy	Stabilność, niższa zawartość THM względem metody Cl_2	Niższa skuteczność niż przy metodzie z Cl_2 , specyficzny zapach
Ditlenek chloru (ClO_2)	Wysoka	Częściowo	Chlorany, Chloryny	Wysoka skuteczność wobec biofilmów, jedynie śladowa zawartość THM	Wymaga wytwarzania na miejscu, istotne ryzyko powstania chloranów
Ozon (O_3)	Bardzo wysoka	Nie	Bromiany w obecności jonów Br^-	Usuwa bakterie, wirusy oraz pasożyty, utlenia mikrozanieczyszczenia	Brak ochrony wody przed możliwością wtórnego skażenia
UV	Bardzo wysoka	Nie	Brak	Brak UPD, bardzo wysoka skuteczność dla wirusów	Brak ochrony wody przed możliwością wtórnego skażenia
Filtracja Membranowa (NF, RO)	Bardzo wysoka	Nie	Brak	Usuwa bakterie, wirusy oraz pasożyty, mikrozanieczyszczenia	Wysoki koszt, fouling membran

*Najczęściej spotykanymi UPD są trihalometany (THM), kwasy haloorganiczne (HAA), chloropikryna, haloacetonitryle (HAN), chlorofenole oraz chlorocyjan.

[Tekst alternatywny: Tabela 1 przedstawia sześć głównych metod dezynfekcji stosowanych w procesach odnowy wody, tj.: chlorowanie (Cl_2), chloraminowanie, ditlenek chloru (ClO_2), ozonowanie (O_3), promieniowanie UV oraz filtrację membranową (nanofiltracja i/lub odwrócona osmoza. Porównanie dotyczy pięciu kryteriów: efektywności względem patogenów, zdolności do działania rezydualnego

czyli dalszej ochrony w sieci wodociągowej, obecności w wodzie po-procesowej ubocznych produktów dezynfekcji (UPD), zalet oraz wad.]

Na podstawie tabeli 1 można wnioskować, iż nie istnieje uniwersalna metoda dezynfekcji wody odnowionej, bowiem każda z nich wykazuje swoisty zestaw zalet oraz ograniczeń. Dobór metody pozostaje funkcją celu: np. UV i ozon zapewniają szybką dezynfekcję, ale brak ochrony rezydualnej. W praktyce stosuje się metody łączone, np. filtracja + chlorowanie, UV + chloraminowanie wody. Bezpieczeństwo sanitarne wody odnowionej jest zatem ściśle powiązane z kontrolą powstawania ubocznych produktów dezynfekcji.

2. Metody membranowe w systemach odnowy wody

Znajdują zastosowanie przy odsalaniu wody oraz do produkcji wody ultraczystej. Przy procesach odnowy wody umożliwiają natomiast transformację ścieków w wodę (rys.1). Do procesów membranowych możemy zaliczyć (Konieczny, 2013):

- mikrofiltrację (MF)
- ultrafiltrację (UF),
- nanofiltrację (NF),
- odwróconą osmozę (RO),
- elektrodializę (ED),
- odwrócona elektrodializę (OED)

Podstawą procesów membranowych są półprzepuszczalne membrany, pełniące rolę selektywnej bariery oddzielającej zanieczyszczenia od oczyszczanego medium. Procesy te są niezwykle elastyczne – mogą być wykorzystywane zarówno do usuwania zawiesin i mikroorganizmów, jak i rozpuszczonych soli, metali ciężkich, czy substancji organicznych. Kluczowym atutem metod membranowych jest możliwość prowadzenia separacji bez potrzeby stosowania chemikaliów oraz w niskiej temperaturze, co czyni je technologią „czystą” i przyjazną środowisku. Do najważniejszych procesów ciśnieniowych należą: mikrofiltracja (MF), ultrafiltracja (UF), nanofiltracja (NF) i odwrócona osmoza (RO). Każdy z nich działa na zasadzie sita molekularnego, różniąc się wielkością zatrzymywanych cząsteczek. Dzięki temu możliwe jest zarówno klarowanie wody, jak i usuwanie bakterii, wirusów czy jonów metali (tab.2)

Tabela 2. Zestawienie podstawowych ciśnieniowych metod membranowych
(Źródło: opracowanie własne na podstawie Bodzek, 2012; Kowal, 2023)

Metoda membranowa	Mikrofiltracja > 0,1 μm	Ultrafiltracja > 0,01 μm	Nanofiltracja > 0,001 μm	Odwrócona osmoza < 0,001 μm
Zanieczyszczenia usuwane z wody	Zooplankton, glony, bakterie, zawiesiny	Makromolekuły $M > 500$ g/mol, wirusy, koloidy	Związki organiczne $M > 200$ g/mol, dwuwartościowe jony.	Jednowartościowe jony
Wymagany zakres ciśnień	0,2-5,0 bar	1,0 -10 bar	5-10 bar	10-150 bar
Membrany	porowate	porowate	nieporowate z ładunkiem	nieporowate bez ładunku

[Tekst alternatywny: w tabeli 2 przedstawiono podział ciśnieniowych metod membranowych na 4 kategorie, odpowiednio mikrofiltrację, ultrafiltrację, nanofiltrację oraz odwróconą osmozę, wskazano rosnące zdolności separacyjne w zależności od wymaganego zakresu ciśnień wynoszącego od 0,2 bar dla mikrofiltracji, aż do 150 bar dla odwróconej osmozy; ze wzrostem ciśnienia możliwe jest usunięcie z wody odpowiednio: zooplanktonu, glonów, bakterii, zawiesin ogólnych, wirusów, makromolekuł o masie molowej powyżej 500 g/mol na membranach porowatych; związków organicznych o masie molowej powyżej 200 g/mol oraz jonów dwuwartościowych na nieporowatych membranach z ładunkiem oraz jonów jednowartościowych na nieporowatych membranach pozbawionych ładunku]

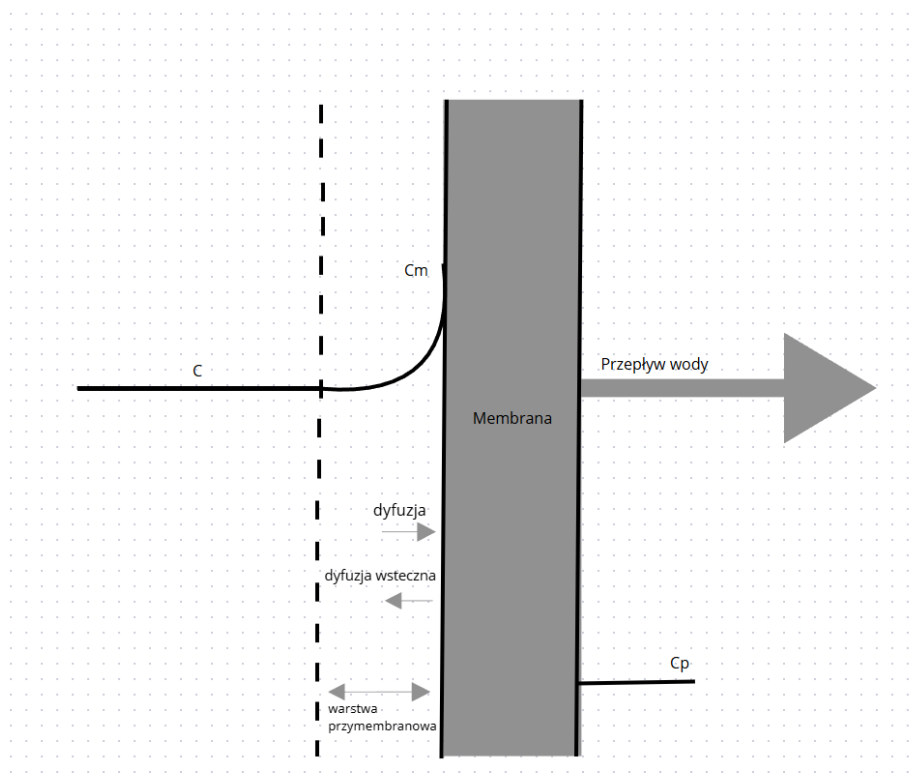
Z kolei procesy prądowe, jak elektrodializa, wykorzystują pole elektryczne do oddzielania jonów i są stosowane m.in. do odsalania wody. Obok tradycyjnych zastosowań, rozwijają się też techniki specjalistyczne, takie jak perwaporacja (usuwanie lotnych związków organicznych), destylacja membranowa (procesy cieplne), czy kontaktory membranowe do absorpcji gazów. Co istotne, metody membranowe coraz częściej łączone są w układy hybrydowe, które zwiększają skuteczność oczyszczania i obniżają koszty eksploatacji (Bodzek, 2013).

Zastosowanie technik membranowych jest bardzo szerokie – od uzdatniania wody pitnej, przez oczyszczanie ścieki przemysłowych, po kontrolę zanieczyszczeń powietrza. Membrany wykorzystuje się m.in. w przemyśle spożywczym, tekstylnym, farmaceutycznym oraz w nowoczesnych bioreaktorach. W warunkach rosnącej presji ekologicznej i zaostrzających się przepisów prawnych, technologie membranowe są coraz częściej wdrażane jako niezawodne narzędzia odnowy wody.

Odwrócona osmoza (ang. reverse osmosis, RO) to jeden z najważniejszych procesów membranowych wykorzystywanych w inżynierii środowiska, szczególnie w uzdatnianiu wody i oczyszczaniu ścieków. Zaliczana jest do grupy technik

ciśnieniowych, w których główną siłą napędową jest różnica ciśnienia po obu stronach membrany. W odwróconej osmozie ciecz (np. woda zanieczyszczona) przepływa przez nieporowatą, półprzepuszczalną membranę, która zatrzymuje niemal wszystkie cząsteczki rozpuszczone (sole, związki organiczne, jony), przepuszczając jedynie cząsteczki wody. Proces zachodzi w kierunku przeciwnym do naturalnej osmozy – stąd jego nazwa – co wymaga zastosowania wysokiego ciśnienia (zwykle od 10 do 80 bar), większego niż ciśnienie osmotyczne roztworu. Membrany do RO (rys. 6) charakteryzują się bardzo wysoką selektywnością i umożliwiają:

- Usuwanie jonów jednowartościowych i dwuwartościowych (np. Na^+ , Ca^{2+} , Cl^- , NO_3^-),
- Eliminację metali ciężkich,
- Usuwanie związków organicznych małocząsteczkowych,
- Odsalanie wody morskiej i słonej,
- Usuwanie azotanów i mikrozanieczyszczeń.



Rys. 6. Zjawiska przymembranowe w czasie procesu odwróconej osmozy
(opracowanie własne na podstawie Nawrocki, 210)

[Tekst alternatywny: Na rysunku 6 przedstawiono zjawiska przymembranowe w czasie procesu odwróconej osmozy. Przepływ wody przez membranę prowadzi do jej separacji od soli w efekcie czego stężenie soli przy membranie C_m jest wyraźnie wyższe niż w nadawie C . Ta polaryzacja stężeń jest źródłem dyfuzji wstecznej soli do nadawy. Jednocześnie zachodzi dyfuzja soli przez membranę, jednak jej szybkość jest wielokrotnie niższa, niż dyfuzji rozpuszczalnika. W efekcie w permeacie uzyskujemy wodę odsoloną o śladowej zawartości soli C_p]

Ilość wody przepływającej przez membranę charakteryzującą się przepuszczalnością L_p można obliczyć ze wzoru (1):

$$J_w = L_p \cdot (\Delta P - \Delta \pi) \quad (1)$$

- ✓ gdzie:
- ✓ J_w – strumień permeatu, $m^3/m^2 \cdot s$
- ✓ L_p – stała przepuszczalności membrany dla wody, $m^3/m^2 \cdot s \cdot Pa$
- ✓ ΔP – różnica ciśnień hydraulicznych, tj. różnica między ciśnieniem nadawy, a ciśnieniem permeatu po drugiej stronie membrany, Pa
- ✓ $\Delta \pi$ – różnica ciśnień osmotycznych pomiędzy roztworem zasilającym, a permeatem; to ciśnienie działa przeciwnie do ciśnienia hydraulicznego, kierując wodę z powrotem do strony zasilającej, Pa

Natomiast ilość substancji rozpuszczonej przechodzącej przez membranę nie zależy od ΔP tylko od stałej przepuszczalności membrany B oraz różnicy stężeń ΔC co zostało opisane przy pomocy równani (2). Wynika stąd, że podwyższenie ciśnienia nadawy zwiększy przepływ wody przez membranę bez zmiany ilości substancji rozpuszczonej przechodzącej do permeatu (Kowal A.L. 2023).

$$F_s = B \cdot \Delta C \quad (2)$$

- ✓ gdzie:
- ✓ F_s – ilość substancji rozpuszczonej przechodzącej przez membranę, $kg/m^2 \cdot s$
- ✓ B – stała przepuszczalności substancji rozpuszczonej, m/s
- ✓ ΔC – różnica stężeń soli w roztworach rozdzielonych membraną, kg/m^3

W procesie RO strumień zasilający (np. ścieki lub woda surowa) dzielony jest na dwa Permeat (filtrat) – oczyszczona woda, która przeszła przez membranę oraz retentat (koncentrat) – odrzucone zanieczyszczenia i substancje zatrzymane przez membranę.

Strona 20 z 37

Do niewątpliwych zalet metody odwróconej osmozy możemy zaliczyć (Bodzek M. 2012; Kowal A.L. 2023):

- Bardzo wysoką skuteczność oczyszczania,
- Ograniczony zakres stosowania chemikaliów,
- Możliwość odzysku/odnowy wody o wysokiej czystości,
- Wszechstronność – od uzdatniania wody pitnej po przemysłowe oczyszczanie ścieków,
- Malejące koszty odsalania dzięki ciągłemu spadkowi cen wyposażenia materiałowego oraz dostępu do know-how, obecnie ok.: 0,25-035 USD/m³.

Do wad systemu możemy zaliczyć:

- Wysokie zużycie energii związane z wytwarzaniem odpowiedniego ciśnienia,
- Ryzyko foulingu (zatykania membrany osadami organicznymi, nieorganicznymi lub mikrobiologicznymi),
- Wysoki koszt inwestycyjny i eksploatacyjny,
- Wymagana wstępna filtracja strumienia zasilającego,
- Recykling wody technologicznej i odzysk wartościowych składników.

3. Odnowa wody w kosmosie

3.1. Odzysk wody na ISS

W przestrzeni kosmicznej stwierdzenie, że woda jest niezbędna do życia zyskuje zupełnie nowe znaczenie. Podczas gdy na Ziemi przeciętny mieszkaniec krajów rozwiniętych zużywa od kilkudziesięciu do ponad 100 dm³/d, na Międzynarodowej Stacji Kosmicznej (ISS) każdy astronauta ma do dyspozycji zaledwie około 4 litrów. W warunkach mikrogravitacji każdy kilogram ładunku transportowanego z Ziemi oznacza ogromne koszty i ograniczoną przestrzeń, stąd woda ma wartość strategiczną. Z tego powodu na ISS wdrożono jeden z najbardziej zaawansowanych na świecie systemów odzyskiwania wody – Water Recovery System (WRS), będący częścią większego systemu podtrzymywania życia – Environmental Control and Life Support System (ECLSS). Na ISS nie istnieje pojęcie „ścieki”. Każda forma wilgoci jest zbierana i poddawana procesowi oczyszczania. System odzysku wody pozyskuje ją z różnych źródeł (źródło: opracowanie własne na podstawie <https://nauka.tvp.pl>):



- Kondensatu z powietrza,
- Moczu astronautów,
- Pozostałości po higienie osobistej,
- Systemów technicznych – takich jak układy chłodzenia.

Pierwszym procesem w systemie odzysku wody na ISS jest oczyszczenie moczu przy użyciu technologii próżniowej destylacji (Urine Processor Assembly - UPA). Mocz jest podgrzewany, a następnie odparowywany. Powstała para wodna jest kondensowana, oddzielając wodę od zanieczyszczeń organicznych, soli i amoniaku. Produktem ubocznym tego procesu jest solanka (brine) – skoncentrowany odpad magazynowany do późniejszej utylizacji.

Na Międzynarodowej Stacji Kosmicznej (ISS) system wychwytu oraz zarządzania wilgocią jest elementem kluczowym. W zamkniętej atmosferze stacji para wodna powstaje (źródło: opracowanie własne na podstawie <https://nauka.tvp.pl>) :

- podczas oddychania astronautów,
- na skutek utraty wody w następstwie pocenia się astronautów,
- ogrzewania artykułów spożywczych,
- innych, w tym procesów realizowanych w ramach badań naukowych.

ISS jest hermetyczna, a system wentylacji zapewnia krążenie powietrza. Para wodna jest kondensowana na chłodnicach (tzw. Condensing Heat Exchangers), które ochładzają przepływające powietrze. Powietrze styka się z zimną powierzchnią co prowadzi do wykroplenia para wodnej. Woda z kondensacji jest odprowadzana do zbiorników systemu Water Recovery System (WRS). Tam jest oczyszczana, filtrowana i używana ponownie do produkcji wody do spożycia oraz opcjonalnie do elektrolizy wody w celu produkcji tlenu. Ponadto system Environmental Control and Life Support System (ECLSS) utrzymuje wilgotność względną na poziomie ~40–60%. Zbyt niski poziom wilgotności względnej wysusza śluzówki, zaś jej zbyt wysoka wartość może być przyczyną niekontrolowanej kondensacji na ścianach ISS. Ostatecznie więc wydychana przez astronautów para wodna z trafia do obiegu wody. Odzyskana z UPA woda oraz kondensat z powietrza trafiają do WPA – systemu filtracyjnego, który składa się z:



- Filtrów mechanicznych i węglowych – usuwających zawiesiny oraz związki organiczne,
- Filtrów katalitycznych – rozkładających amoniak,
- Reaktorów chemicznych oraz biologicznych – do eliminacji trudno rozkładalnych substancji,
- Żywic jonowymiennych (kationitów silnie kwaśnych pracujących w cyklu wodorowym oraz anionitów słabo zasadowych pracujących w cyklu wodorotlenowym) – które usuwają metale oraz aniony mocnych kwasów.

Filtry z włókniny szklanej pełnią funkcję filtrów cząstkowych i mają za zadanie usunięcie zawiesin ogólnych i są stosowane jako wstępny etap pre-filtracji. Usuwane są jedynie te zanieczyszczenia, których średnice zastępcze są większe niż $1\ \mu\text{m}$. Następnie w procesie mikrofiltracji ($0,1\text{--}1\ \mu\text{m}$) oraz ultrafiltracji ($0,01\text{--}0,1\ \mu\text{m}$) usuwa się zanieczyszczenia mikrobiologiczne, w tym większość wirusów. W odróżnieniu od systemów naziemnych, klasyczna odwrócona osmoza (RO) nie jest stosowana na ISS ze względu na trudności związane z kontrolą separacji faz ciecz-gaz w warunkach mikrogravitacji. Lepsze efekty zapewniają procesy destylacyjne i sorpcyjne. Po oczyszczeniu, woda jest dezynfekowana – w amerykańskich modułach ISS stosuje się jodowanie, natomiast w rosyjskich – srebro koloidalne. Środki te zapobiegają rozwojowi mikroorganizmów w systemie obiegu. Regularnie pobierane są próbki wody do analizy, przy czym podstawowe parametry (np. pH, przewodność) sprawdza się bezpośrednio na stacji, a dokładniejsze testy przeprowadzane są na Ziemi. Woda na ISS musi spełniać rygorystyczne standardy NASA i ESA, wyższe niż normy wody do spożycia przez ludzi w aspekcie dopuszczalnej twardości ogólnej ($\leq 100\ \text{mgCaCO}_3/\text{dm}^3$) oraz przewodnictwa elektrycznego $< 500\ \mu\text{S}/\text{cm}$

Oczyszczona woda trafia do zbiorników i jest wykorzystywana:

- do spożycia,
- do przygotowywania liofilizowanych posiłków,
- do higieny osobistej,
- jako medium chłodzące w systemach technicznych Stacji.

Nowoczesnym dodatkiem do systemu WRS jest moduł BPA - Brine Processor Assembly (BPA). Głównym zadaniem BPA jest odzysk wody z solanki, która jest produktem ubocznym działania Urine Processor Assembly (UPA), czyli systemu odzyskującego wodę z moczu astronautów. UPA wykorzystuje destylację próżniową do separacji wody od moczu, ale pozostawia po sobie skoncentrowaną solankę, która nadal zawiera pewne ilości wody. Przed wprowadzeniem BPA, ta solanka była usuwana ze stacji, co ograniczało ogólną wydajność odzysku wody. BPA został



zaprojektowany i zainstalowany na ISS jako demonstracja technologii, aby znacząco zwiększyć stopień odzysku wody. Kluczowym elementem BPA jest membrana do destylacji membranowej, jednak w przeciwieństwie do odwróconej osmozy, gdzie ciśnienie hydrauliczne "przeciska" wodę przez membranę, w destylacji membranowej siłą napędową jest różnica ciśnień cząstkowych pary wodnej po obu stronach membrany. BPA wykorzystuje wymuszony obieg powietrza z kabiny stacji kosmicznej. Ciepłe i suche powietrze jest przepuszczane nad powierzchnią membrany, po której drugiej stronie znajduje się solanka. Woda z solanki, pod wpływem różnicy ciśnień pary i temperatury, odparowuje przez mikroporowatą, hydrofobową membranę. Membrana przepuszcza parę wodną, ale nie przepuszcza cieczy i tym bardziej - rozpuszczonych w niej soli. Powstała wilgotna para wodna miesza się z powietrzem w kabinie stacji. Następnie, podobnie jak para wodna pochodząca z oddychania załogi i potu, jest ona zbierana przez istniejące na stacji systemy kondensujące WPA, gdzie skrapla się i jest dalej przetwarzana do picia. System WRS odzyskuje obecnie ok. 90–95% wody, a dzięki BPA udało się osiągnąć efektywność bliską 98%. Taki poziom odzysku jest nie tylko kluczowy dla przyszłych misji na Księżyc czy Marsa, ale także inspiruje technologie naziemne. Systemy odzysku wody z ISS znajdują zastosowanie, m.in. w instalacjach cywilnych w rejonach dotkniętych suszą, przy braku dostępu do czystej wody. Zamknięty obieg wody na ISS to oczywiście konieczność. Jak żartobliwie ujął to astronauta Donald Roy Pettit: „Na ISS dzisiaj pijesz wodę, którą wczoraj oddałeś do toalety.” Dzięki zaawansowanym technologiom odzysku oraz odnowy wody możliwa jest transformacja ścieków w wodę, która nie tylko jest sanitarnie pewna, ale często jej jakość przewyższa wodę spożywaną przez statystycznego mieszkańca aglomeracji w Polsce. Można śmiało stwierdzić, że systemy odnowy wody stanowią fundament dla misji realizowanych w kosmosie, są ponadto inspiracją dla nowatorskich rozwiązań w aspekcie inżynierii sanitarnej.

4. Obliczanie i wymiarowanie urządzeń do oczyszczania wody

4.1. Komora napowietrzania

Do obliczeń przyjmuje się następujące parametry i założenia:

- wydajność stacji uzdatniania wody Q [$\frac{m^3}{d}$]
- do napowietrzania wody w projektowanym układzie przyjmuje się dysze napowietrzające
- hydrauliczne obciążenie powierzchni komory napowietrzania przyjmuje się z przedziału $q_h = 3 \div 8 \frac{m^3}{m^2 \cdot h}$

Powierzchnię komory napowietrzania oblicza w oparciu o poniższy wzór:

$$F_{nap.} = \frac{Q}{q_h} [m^2] \quad (3)$$

gdzie:

$F_{nap.}$ - powierzchnia komory napowietrzania [m^2]

Q - wydajność stacji uzdatniania wody podziemnej [$\frac{m^3}{h}$]

q_h - hydrauliczne obciążenie powierzchni komory napowietrzania [$\frac{m^3}{m^2 \cdot h}$]

Obliczenie ilości dysz do napowietrzania wody

Ilość dysz w komorze napowietrzania oblicza się w oparciu o poniższy wzór:

$$N_d = F_{nap} \cdot n [szt] \quad (4)$$

gdzie:

N_d – ilość dysz w komorze napowietrzania [szt]

$F_{nap.}$ - powierzchnia komory napowietrzania [m^2]

n – liczba dysz na każdy m^2 powierzchni komory [$\frac{szt}{m^2}$]

- Przykład obliczeniowy

Założenia do obliczeń:



$$Q = 9600 \frac{m^3}{d} = \frac{9600 \frac{m^3}{d}}{24h} = 400,0 \frac{m^3}{h}$$

$$q_h = 4 \frac{m^3}{m^2 \cdot h}$$

$$n = 1 \frac{\text{szt.}}{m^2}$$

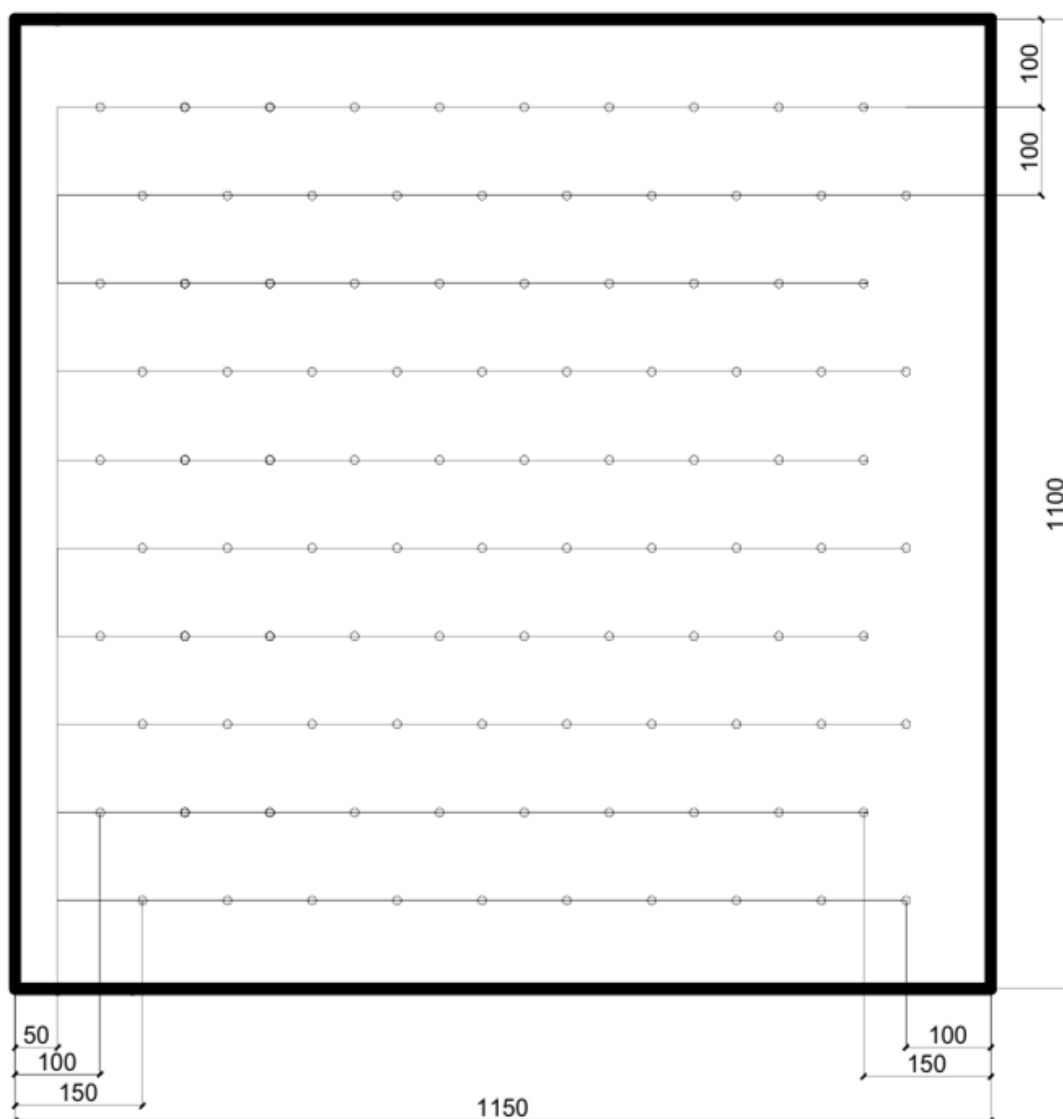
Ze wzoru (3) obliczono:

$$F_{nap.} = \frac{400,0}{4} = 100 m^2$$

Ze wzoru (4) obliczono:

$$N_d = 100 * 1 = 100 \text{ szt.}$$

Obliczona powierzchnia komory napowietrzania wynosi $100 m^2$, a ilość dysz równa jest 100 szt. Przyjęto 10 rzędów przewodów wodociągowych, a na każdym przewodzie po 10 dysz amsterdamskich. Po rozmieszczeniu dysz na przewodach wodociągowych w komorze napowietrzania z uwzględnieniem minimalnych założonych odległości między dyszami oraz odległości przewodów od ścian komory napowietrzania (zgodnie z rys. 7), rzeczywista powierzchnia komory napowietrzania to wynosi $F_{nap.rz.} = 11,0 m \times 11,5 m = 126,5 m^2$.



Rys. 7. Schemat komory napowietrzania wraz przewodami oraz dyszami
(opracowanie własne)

[Tekst alternatywny: Na rysunku 7 przedstawiono widok z góry komory napowietrzania o wymiarach 11,0 m na 11,5 m – czarna gruba linia. Cienkimi szarymi liniami zaznaczono przewody wodociągowe ułożone rzędami co 0,1 m, na których znajdują się dysze (szare kółka).]

4.2. Komora reakcji (osadnik)

Do obliczeń przyjmuje się następujące parametry i założenia:

- na podstawie analizy jakości wody surowej, według parametru zawartości żelaza Fe [mg/dm³], przyjmuje się czas zatrzymania wody T_z w komorze reakcji (osadniku) w wysokości:

$$T_z = 40 \div 60 \text{ min dla } F_e \geq 5 \frac{\text{mg}}{\text{dm}^3}$$

$$T_z = 30 \text{ min dla } F_e \leq 5 \frac{\text{mg}}{\text{dm}^3}$$

Przyjęto do obliczeń $T_z = 40 \text{ min} = 0,67 \text{ h}$

Obliczenie objętości komory reakcji

Objętość komory reakcji (osadnika) została obliczona w oparciu o poniższy wzór:

$$V_{KR} = Q \times T_z \text{ [m}^3\text{]} \quad (5)$$

gdzie:

V_{KR} – objętość komory reakcji [m³]

Q – wydajność stacji [$\frac{\text{m}^3}{\text{h}}$]

Ze wzoru (5) obliczono:

$$V_{KR} = 400,0 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \times 0,67 \text{ h} = 268,0 \text{ m}^3$$

Obliczenie wysokości komory reakcji

Wysokość komory reakcji powinna mieścić się w przedziale $4 \text{ m} > h_{\text{sr}} > 1 \text{ m}$

Wysokość komory reakcji (osadnika) oblicza się w oparciu o poniższy wzór:

$$h_{\text{sr}} = \frac{V_{KR}}{F_{\text{nap.rz.}}} \text{ [m]} \quad (6)$$

gdzie:

h_{sr} – wysokość komory reakcji [m]

V_{KR} – objętość komory reakcji [m³]

$F_{\text{nap.rz.}}$ – powierzchnia komory napowietrzania [m²]

Ze wzoru (6) obliczono:

$$h_{\text{sr}} = \frac{268,0}{126,5} = 2,12 \text{ m}$$

Warunek $4 \text{ m} > h_{\text{sr}} > 1 \text{ m}$ został spełniony.

4.3. Filtry odżelaziające - odmanganiające

Do obliczeń przyjmuje się następujące parametry i założenia:

- prędkość filtracji $v_s = 5 \div 20 \left[\frac{m}{h}\right]$, przyjęto $v_s = 10 \frac{m}{h}$
- obciążenie hydrauliczne filtrów $V = 8 \div 10 \left[\frac{m^3}{m^2 \times h}\right]$, przyjęto $V = 8 \frac{m^3}{m^2 \times h}$

Obliczenie sumarycznej powierzchni filtrów

Sumaryczną powierzchnię filtrów ciśnieniowych oblicza się w oparciu o poniższy wzór:

$$F_f = \frac{Q}{V_s} [m^2] \quad (7)$$

gdzie:

F_f – sumaryczna powierzchnia filtrów [m^2]

Q – wydajność stacji [$\frac{m^3}{h}$]

v_s – założona prędkość filtracji [$\frac{m}{h}$]

Ze wzoru (7) obliczono:

$$F_f = \frac{400}{10} = 40 m^2$$

Obliczenie ilości filtrów

Ilość filtrów oblicza wyznaczono na podstawie wzoru poniżej:

$$n_f = \frac{F_f}{F_{ff}} [szt] \quad (8)$$

gdzie:

n_f – ilość filtrów ciśnieniowych [szt.]

F_f – sumaryczna powierzchnia filtrów [m^2]

F_{ff} – powierzchnia filtracji pojedynczego filtra ciśnieniowego [m^2]

Powierzchnię pojedynczego filtra dobieramy o dane katalogowe producentów filtrów. Na rysunku 7 przedstawiono przykładową kartę katalogową firmy KOTŁOREMBUD.

PODSTAWOWE WYMIARY FILTRÓW

Typ	Średnica nominalna DN [mm]	Wysokość całkowita H [mm]			h1 [mm]	h2 [mm]	h3 [mm]		Króćce dn, dn' [mm]	Otwory zasypowe a/b [mm]	Powierzchnia filtracyjna P [m ²]	Masa [kg]		
		A1	A2	A3			A2	A3				A1	A2	A3
FCP2	800	2463	2420	2337	300	824	2044	1974	50	176 / 256	0,50	290	295	300
FCP3	1000	2563	2521	2437	300	875	2094	2025	80	176 / 256	0,78	385	395	400
FCP4	1200	2715	2669	2540	350	925	2144	2025	100	176 / 256	1,13	525	535	540
FCP5	1400	2813	2772	2641	350	976	2196	2076	100	320 / 420	1,54	680	690	700
FCP6	1600	2967	2922	2741	400	1076	2246	2076	150	320 / 420	2,01	860	880	890
FCP7	1800	3067	3022	2841	400	1128	2296	2128	150	320 / 420	2,54	995	1020	1030
FCP8	2000	3171	3126	2945	400	1180	2348	2180	150	320 / 420	3,14	1445	1470	1485
FCP9	2100	3221	3176	2995	400	1205	2373	2205	150	320 / 420	3,46	1540	1570	1580
FCP10	2200	3271	3226	3045	400	1230	2398	2230	150	320 / 420	3,80	1675	1700	1710
FCP11	2400	3371	3326	3145	400	1280	2448	2280	150	320 / 420	4,52	1870	1900	1915

Rys. 8. Przykładowa karta katalogowa z podstawowymi wymiarami filtrów pospiesznych firmy „KOTŁOREMBUD”

[Tekst alternatywny: Na rysunku 8 przedstawiono tabelę z katalogu firmy produkującej filtry pospieszne. Na czerwonym polu w nagłówku w poszczególnych kolumnach kolejno przedstawiono typ, średnicę nominalną DN, wysokość całkowitą H (pola A1, A2, A3), wysokości h1, h2 i h3 (tu: pola A2 i A3), króćce dn, dn', otwory zasypowe a/b, powierzchnię filtracyjną, masę (pola A1, A2, A3). Poniżej w wierszach podano wartości liczbowe dla każdego typu filtra. Pomarańczową linią podkreślono typ filtra wybranego do dalszych obliczeń.]

Na podstawie rysunku 8 dobrano przy sumarycznej powierzchni filtracji $F_f = 40 \text{ m}^2$, filtry ciśnieniowe pospieszne firmy KOTŁOREMBUD typu FCP10 o powierzchni filtracji pojedynczego filtra równej $3,8 \text{ m}^2$ i średnicy nominalnej $DN = 2200 \text{ mm}$.

Ze wzoru (8) obliczono:

$$n_f = \frac{40}{3,8} = 10,52 \approx 11 \text{ szt.}$$

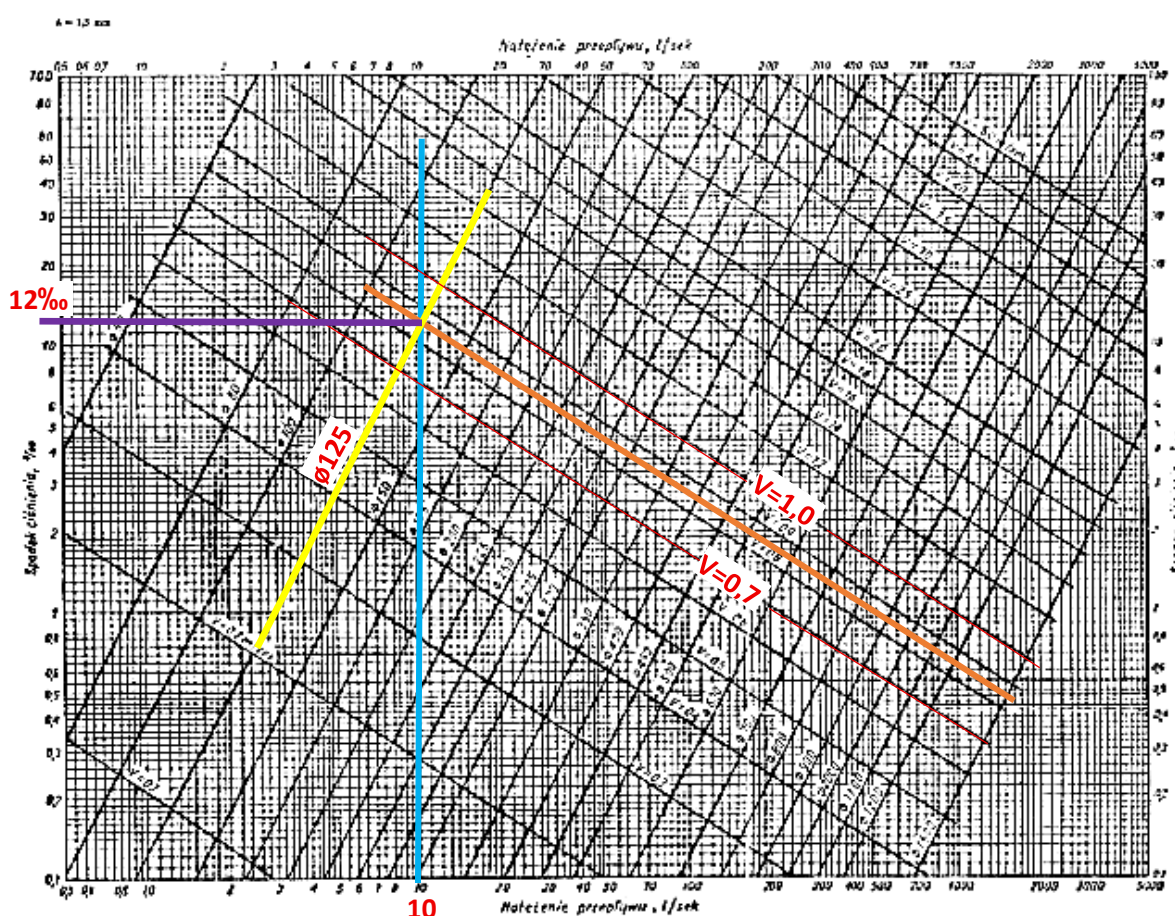
4.4. Przewody wodociągowe

Przewody wodociągowe doprowadzające wodę do komory napowietrzania i filtrów dobiera się w oparciu o nomogram Colebrooka-White'a lub przy wykorzystaniu

oprogramowania komputerowego udostępnianego na stronach producentów rur, np. programu Uponor Infra 5.0 (<https://www.uponor.com/pl-pl/infra/centrum-obslugi/uponor-infra-360/projektowanie-i-obliczenia>).

Dobór w oparciu o nomogram.

Nomogram zostanie udostępniony studentom w czasie zajęć. Poniżej przedstawiono sposób korzystania z nomogramu w celu doboru średnic przewodów wodociągowych. Nomogramy mogą być sporządzane dla różnych materiałów rurociągów, temperatur czynnika, czy współczynników chropowatości bezwzględnej.



Rys. 9. Przykładowy nomogram dla przewodów wodociągowych stalowych, temperatury wody $t=10^{\circ}\text{C}$, współczynnika chropowatości bezwzględnej $k=1,5\text{ mm}$

[Tekst alternatywny: Na rysunku 9 przedstawiono nomogram do doboru średnic i strat ciśnienia przewodów wodociągowych. Na osi poziomej znajdują się wartości natężenia przepływu w l/sec (osie poziome są u dołu i góry wykresu dla ułatwienia odczytu), na osiach pionowych znajdują się wartości strat ciśnienia w promilach (osie pionowe są z

prawej i lewej strony wykresu dla ułatwienia odczytu). Osie skośne nachylone pod kątem ostrym w kierunku lewym określają prędkości przepływu w m/s. Osie skośne nachylone pod kątem ostrym w kierunku prawym określają średnice nominalne przewodów w mm. Linia niebieską zaznaczono wartość przepływu 10 l/sek. Kolorem czerwonym zaznaczono przedział prędkości – wartość $v = 0,7$ m/s i 1,0 m/s. Linia żółtą zaznaczono dobraną dla danego przepływu średnicę 125 mm. Kolorem pomarańczowym zaznaczono prędkość przepływu przy zadanym przepływie i dobranej średnicy przewodu. Kolorem fioletowym zaznaczono odczytaną wartość strat ciśnienia w promilach.]

Założenia do doboru średnicy z nomogramu:

- natężenie przepływu $Q = 10$ l/sek
- zakres prędkości 0,7-1,0 m/s (zakresy prędkości zależą od rodzaju przewodu wodociągowego, np. rurociąg zasilający komorę napowietrzania 1,5-2,0 m/s)

Aby dobrać średnicę przewodu wodociągowego z nomogramu Colebrooka-White'a (rys. 9) należy:

1. Poprowadzić pionową linię (niebieski kolor) od znalezionej punktu przepływu Q do przecięcia się z odpowiednimi liniami ukośnymi przyjętego zakresu prędkości przepływu (czerwone linie).
 2. Dla danego przedziału prędkości szukamy przecięcia linii wyznaczonego przepływu ze skośną linią dla danej średnicy. W zadanym przedziale jest tylko możliwy dobór średnicy 125 mm (linia żółta). W przypadku szerokiego przedziału prędkości możliwy jest dobór kilku średnic. Należy pamiętać, że im mniejsza średnica, tym większa prędkość przepływu i większa strata ciśnienia, co jest istotne przy doborze strat hydraulicznych w całym systemie wodociągowym.
 3. Punkt przecięcia linii przepływu (niebieski kolor) i dobranej średnicy (żółty kolor) pozwala odczytać rzeczywistą prędkość przepływu (wyinterpolowano pomiędzy wartości 0,8 i 0,9 m/s wartość $v=0,96$ m/s). Podobnie rzut tego punktu poziomo na oś pionową pozwala odczytać wielkość spadku w wysokości 12 ‰. Spadek ten umożliwia obliczenia strat liniowych ciśnienia w układzie dla danej średnicy.
- Znając zależności na nomogramie między wartościami możemy korzystać z niego w różny sposób, np.: do określenia natężenia przepływu dla danej średnicy przy znanej lub zakładanej prędkości przepływu.

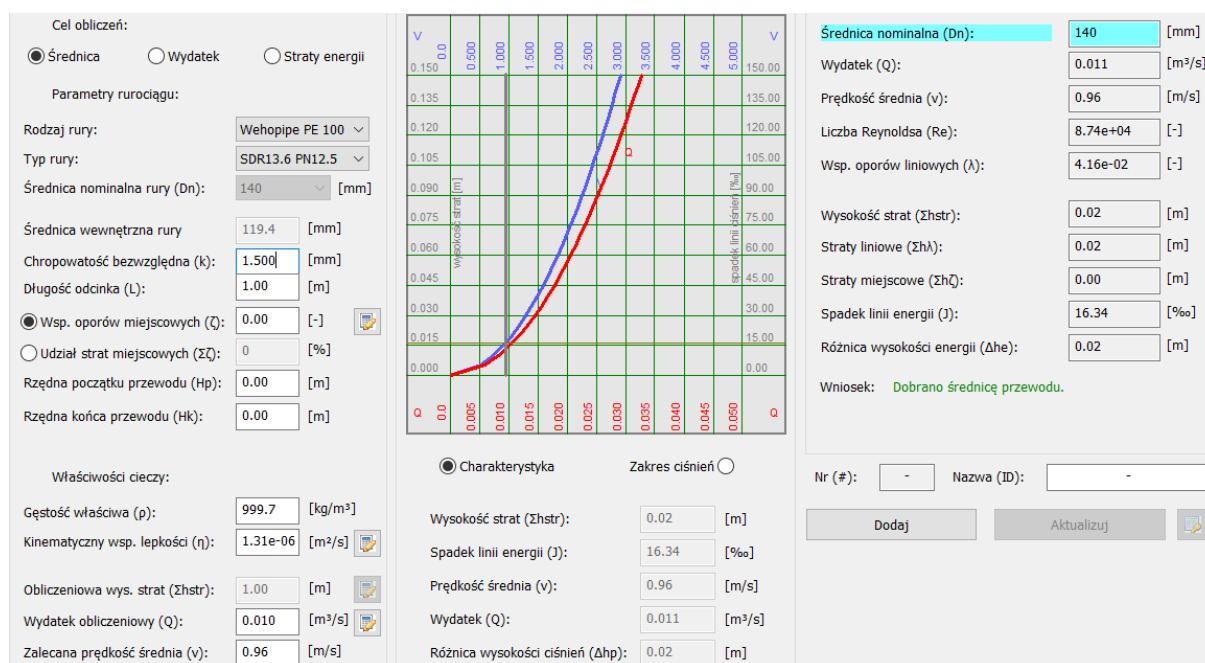
Dobór w oparciu o program Uponsor Infra 5.0

Po otwarciu programu należy wybrać zakładkę „Przewód ciśnieniowy – obliczenia hydrauliczne”, a następnie wpisać odpowiednie wartości w zależności, czy celem

obliczeń jest dobór średnicy, określenie wydatku lub strat energii. Przykładowe okno programu przedstawia rysunek 10.

Założenia do doboru średnicy z programu:

- Dla porównania wyników z doбором średnicy wg nomogramu przyjęto podobne założenia i wielkości parametrów obliczeniowych
- natężenie przepływu $Q = 10 \text{ l/s}$
- prędkość przepływu $0,96 \text{ m/s}$
- program umożliwia dobór średnic tylko dla rurociągów wykonanych z polietylenu (PE), zamiast standardowego współczynnika chropowatości bezwzględnej dla rur PE równego $0,010 \text{ mm}$, przyjęto $k=1,5 \text{ mm}$



Rys. 10. Zrzut ekranu programu Uponor Infra 5.0 – moduł obliczeń hydraulicznych przewodów ciśnieniowych [<https://www.uponor.com/pl-pl/infra>]

[Tekst alternatywny: Na rysunku 10 przedstawiono zrzut okna programu do obliczeń hydraulicznych rurociągów ciśnieniowych. Po stronie lewej mamy okienka do wpisywania wartości zakładanych do obliczeń, w części środkowej wizualizację charakterystyki rurociągu – niebieska linia przedstawia krzywą prędkości, czerwona krzywą wydatku. Po stronie prawej okna zaprezentowane są wyniki obliczeń – do odczytu, nieedytowalne.]

Aby dobrać średnicę przewodu wodociągowego w programie (rys. 10) należy:

1. Wybrać cel obliczeń – średnica
2. Rodzaj rury – tylko Wehopipe PE100
3. Typ rury – SDR13.6 PN12.5 lub SDR11 PN16
4. Chropowatość bezwzględna – 1,5mm (dla potrzeb ćwiczenia), standardowo 0,010mm
5. Długość odcinka – w tym przypadku 1m
6. Współczynnik oporów miejscowych – 0,0 [-]
7. Rzędne – nieistotne
8. Gęstość właściwa i kinematyczny współczynnik lepkości ustawiony standardowo dla 10°C
9. Wydatek obliczeniowy - wciskamy kalkulator obok wartości umożliwiające wpisanie wartości dla różnych jednostek przepływu, wpisujemy 10 l/s i wciskamy „Przelicz”. Pojawia się wartość 0,010 m³/s
10. Wpisujemy prędkość przepływu 0,96 m/s (dla potrzeb ćwiczenia)
11. Odczytujemy wyniki obliczeń:
 - średnica nominalna 140 mm – dla rurociągów z PE jest to średnica zewnętrzna, dla ciśnienia 12,5 MPa grubość ścianki wynosi 10,3 mm, co daje średnicę wewnętrzną 119,4 mm (z nomogramu dobrano 125 mm – dla stalowych przewodów podawana jest średnica wewnętrzna)
 - wydatek rzeczywisty wyniósł 11 l/s
 - prędkość średnia 0,96 m/s
 - wysokość straty 0,02 m
 - spadek linii energii 16,34 ‰

Wniosek – wyniki doboru z nomogramu i programu Uponor bardzo zbliżone.

4.5. Dawka chloru

Dawkę chloru do dezynfekcji wody oblicza się na podstawie wzoru poniżej:

$$D = \frac{M * 1000}{V} \left[\frac{mg}{dm^3} \right] \quad (9)$$

gdzie:

D – dawka chloru $\left[\frac{mg}{dm^3} \right]$,

M – masa dodanego chloru [g],

V – objętość wody [dm³].



Typowe stężenia robocze

- Woda pitna – zwykle 0,2–0,5 mg/dm³ wolnego chloru resztkowego (po kontakcie).
- Woda w basenie – zwykle 0,3–0,6 mg/ dm³ wolnego chloru resztkowego.
- Woda do dezynfekcji instalacji (np. szokowa) – 3–5 mg/ dm³, czasem więcej.

Korekta na „chloropochłaniałość” wody

W praktyce dodany chlor reaguje z substancjami organicznymi, żelazem, manganem itp. – czyli część dawki jest zużywana. Dlatego dawka obliczona musi być wyższa niż docelowe stężenie wolnego chloru.

Na przykład:

- jeśli chcemy uzyskać 0,3 mg/l wolnego chloru,
- a „chloropochłaniałość” wynosi 0,7 mg/l,
- to dawka powinna wynieść 0,3 + 0,7 = 1,0 mg/l.

Przykład obliczenia

Chcemy zdezynfekować 10 m³ (10 000 l) wody tabletkami chloru (1 tabletka = 5 g aktywnego chloru).

- Masa chloru: 5 g = 5000 mg
- Dawka dla 10 000 dm³

Ze wzoru (9) obliczono:

$$D = \frac{5 * 1000}{10000} = 0,5 \frac{mg}{dm^3}$$

5. Spis literatury

- ✓ materiały zwarte:
 - Bodzek.M., (2012). Usuwanie metali ze środowiska wodnego za pomocą metod membranowych. Stan wiedzy. *Monografie Komitetu Inżynierii Środowiska PAN* 100, 47-82.
 - Kowal A.L., Świdorska-Bróż M., Wolska M. (2023). Oczyszczanie wody. Procesy jednostkowe oczyszczania wody, tom 2, Wydawnictwo Naukowe PWN SA, Warszawa
 - Kowal A. L. (1997). Odnowa wody. Podstawy teoretyczne procesów, Wrocław
 - Łomotowski J., Szpindor A.(2002). Nowoczesne systemy oczyszczania ścieków. Arkady, Warszawa
 - Nawrocki J. (2010). Uzdatanianie wody. Procesy fizyczne, chemiczne i biologiczne. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa
 - Van Loon G.W., Duffy S.J. (2008). Chemia środowiska, Wydawnictwo Naukowe PWN SA, Warszawa
- ✓ artykuły naukowe:
 - Konieczny K. (2013). Procesy membranowe w uzdatnianiu wody do picia – przykłady zastosowań w Polsce, *Instal*, 5, 48-53
 - Muszyńska J., Gawdzik J.(2025). Modeling water coagulation processes with K_2FeO_4 using central composite design. *Desalination and Water Treatment*, 322, 1-15
 - Zawadzki P., Wiesner-Sękała M. (2024). Advanced wastewater reclamation- a response of the municipal sector to climate change and water scarcity, *Instal*, 12, 65-74
- ✓ akty prawne:
 - Rozporządzenie Ministra Zdrowia z dnia 7 grudnia 2017 r. w sprawie jakości wody przeznaczonej do spożycia przez ludzi (Dz. U. 2017 poz. 2294)
 - Ustawa z dnia 20 lipca 2017 r. Prawo wodne (Dz. U. 2017 poz. 1566 z późniejszymi zmianami)
- ✓ źródła internetowe:
 - <https://nauka.tvp.pl/70873703/nasa-odzyskuje-98-wody-dostarczanej-na-iss> (dostęp: 24.07.2025)
 - <https://strateg.stat.gov.pl/#/obszary-tematyczne/26> (dostęp: 24.07.2025)
 - <https://www.uponor.com/pl-pl/infra/centrum-obslugi/uponor-infra-360/projektowanie-i-obliczenia> (dostęp: 29.09.2025)