

POLITECHNIKA POZNAŃSKA
Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki
Instytut Inżynierii Środowiska i Instalacji Budowlanych
Zakład Zaopatrzenia w Wodę i Biogospodarki

Rozprawa doktorska

**Usuwanie związków organicznych z wody podczas filtracji
przez złoża biologicznie aktywnych filtrów węglowych**

Removal of organic compounds from water during filtration
through biologically active carbon filters



mgr inż. Dorota Holc

Dziedzina nauk inżynierijno-technicznych

Dyscyplina naukowa: inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka

Promotor: dr hab. inż. Alina Pruss, profesor uczelni

Promotor pomocniczy: dr inż. Małgorzata Komorowska-Kaufman

Poznań, 2023 r.

Spis treści:

Streszczenie	3
Abstract.....	4
Wykaz publikacji stanowiących podstawę rozprawy doktorskiej	5
Wykaz pozostałego dorobku doktoranta	7
1. Wprowadzenie.....	10
2. Tezy, cel badawczy i zakres pracy	16
3. Metodyka badań	19
4. Wyniki badań	22
5. Podsumowanie	23
6. Bibliografia.....	25
Załączniki:	31

Streszczenie

Wody powierzchniowe oraz podziemne w swoim składzie mogą zawierać złożoną mieszaninę związków organicznych, które aby nie stwarzać problemów z jakością wody przeznaczonej do spożycia przez ludzi, powinny zostać z nich usunięte. Wysoka skuteczność usuwania rozpuszczonej materii organicznej z wody podczas filtracji przez biologicznie aktywne filtry węglowe powoduje, że filtry te są coraz częściej włączane w ciąg technologiczny stacji uzdatniania wody. Biofiltracja realizowana jest przez mikroorganizmy, zdolne do metabolizowania zanieczyszczeń w reakcjach utleniania i redukcji. Procesy te zachodzą w złożach filtracyjnych, na powierzchni których rozwija się błona biologiczna. Rozwój biofilmu następuje po dłuższym okresie pracy złoża, przy zachowaniu optymalnych warunków tlenowych, temperatury oraz dopływu substancji biogennej. Celem niniejszej pracy było poznanie powiązań pomiędzy aktywnością biologiczną filtrów, a skutecznością eliminacji związków organicznych z wody. Podstawą przygotowania rozprawy były badania przeprowadzone na modelu fizycznym biologicznie aktywnych filtrów węglowych. Jako pierwsze, w ramach niniejszej pracy przeprowadzono badania nad możliwością przyspieszenia biologicznego wpracowania złoża filtracyjnego poprzez recyrkulację popłuczyn. Wyniki badań i analiz zostały zaprezentowane w **Publikacji I**. W kolejnym etapie prac badawczych analizowano wpływ aktywności mikrobiologicznej złoża na efektywność usuwania związków organicznych z wody w procesie biofiltracji. W pracy wykazano, że rodzaj mikroorganizmów zasiedlających złoża filtrów węglowych ma istotny wpływ na efektywność usuwania z wody związków organicznych w procesie biofiltracji, uzyskane wyniki przedstawiono w **Publikacji II**. W trakcie zrealizowanych badań pilotowych uwzględniono również specyfikę substancji organicznych występujących w wodach naturalnych. Potwierdzono, że zależności występujące między różnymi długościami fal, pomagają w charakteryzowaniu materii organicznej, wyniki badań i analiz zostały zaprezentowane w **Publikacji III**. Model filtrów węglowych były eksploatowane przez pięć lat, co umożliwiło wykorzystanie i porównanie różnych metod kontroli pracy filtra, poszczególne metody zestawiono ze sobą, a wyniki badań i analiz zostały zaprezentowane w **Publikacji IV**. **Cykl ww. publikacji dostarcza nowej wiedzy na temat zależności między parametrami procesowymi biofiltracji, a aktywnością oraz rodzajem mikroorganizmów bytujących w złożu filtra.**

Abstract

Surface and underground waters may contain a complex mixture of organic compounds that should be removed, so as not to cause problems with the quality of water intended for human consumption. The high efficiency of removing dissolved organic matter from water during filtration through biologically active carbon filters means that these filters are increasingly included in the technological line of water treatment plants. Biofiltration is carried out by microorganisms capable of metabolising pollutants in oxidation and reduction reactions. These processes take place in filter beds, on the surface of which a biological membrane develops. The development of biofilm occurs after a longer period of bed operation while maintaining optimal oxygen conditions, temperature, and inflow of biogenic substances. The aim of this study was to discover the relationship between the biological activity of filters and the effectiveness of the elimination of organic compounds from water. The basis for the preparation of the dissertation was research conducted on a physical model of biologically active carbon filters. As the first, as part of this work, research was carried out on the possibility of accelerating the biological work-in of the filter bed by recirculating washings. The results of the tests and analyzes were presented in Publication I. In the next stage of research, the effect of the microbiological activity of the bed on the efficiency of removing organic compounds from water in the biofiltration process was analysed. The work showed that the type of microorganisms that inhabit the carbon filter bed has a significant impact on the efficiency of the removal of organic compounds from water in the biofiltration process. The results obtained are presented in Publication II. During the pilot studies, the specificity of organic substances present in natural waters was also taken into account. It was confirmed that the relationships between different wavelengths help in the characterization of organic matter, the results of research and analysis were presented in Publication III. The carbon filter model was operated for five years, enabling the use and comparison of various filter operation control methods, individual methods were compared with each other, and the results of tests and analyses were presented in Publication IV. The publication provides new knowledge on the relationship between biofiltration process parameters and the activity and type of microorganisms living in the filter bed.

Wykaz publikacji stanowiących podstawę rozprawy doktorskiej

Zgodnie z Ustawą z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce [tekst jednolity Dz. U. 2021 poz. 478 Art. 187, ust. 3]: „Rozprawę doktorską może stanowić praca pisemna, w tym monografia naukowa, **zbiór opublikowanych i powiązanych tematycznie artykułów naukowych**, praca projektowa, konstrukcyjna, technologiczna, wdrożeniowa lub artystyczna, a także samodzielna i wyodrębniona część pracy zbiorowej.”

Cykl czterech opublikowanych i powiązanych tematycznie publikacji powstał w oparciu o badania technologiczne zrealizowane w Instytucie Inżynierii Środowiska i Instalacji Budowlanych Politechniki Poznańskiej w okresie 5 lat, tj. od 2015 r. do 2020 r. Jestem pierwszym autorem wszystkich czterech publikacji.

- I. **Holc D.**, Pruss A., Michałkiewicz M., Cybulski Z. *Przyspieszenie wpracowania filtrów węglowych – doświadczenia z badań technologicznych w skali pilotowej*, Dymaczewski Z., Jeż-Walkowiak J., Urbaniak A.: *Zaopatrzenie w wodę, jakość i ochrona wód*, Poznań-Kudowa Zdrój, 2016, 683-703, Polskie Zrzeszenie Inżynierów i Techników Sanitarnych. Oddział Wielkopolski.

Dorota Holc w ww. publikacji przygotowała metodykę badań, wykonała analizy laboratoryjne jakości wody, w tym badania mikrobiologiczne, zinterpretowała uzyskane wyniki, dokonała przeglądu literatury oraz opracowała wnioski.

Wkład indywidualny w pracę: 70%

- II. **Holc D.**, Pruss A., Michałkiewicz M., Cybulski Z. *Efektywność usuwania związków organicznych podczas oczyszczania wody w procesie filtracji przez biologicznie aktywny filtr węglowy z identyfikacją mikroorganizmów*. *Rocznik Ochrona Środowiska*, 18 (2), 2016, 235-246.

Impact Factor: 0.705, 5-letni Impact Factor: 0.748, 15 pkt. MNiSW

Dorota Holc w ww. publikacji przygotowała metodykę badań, wykonała analizy laboratoryjne jakości wody, w tym badania mikrobiologiczne, zinterpretowała uzyskane wyniki, dokonała przeglądu literatury oraz opracowała wnioski.

Wkład indywidualny w pracę: 70%

- III. **Holc D.**, Pruss A., Komorowska-Kaufman M. *The Possibility of Using UV Absorbance Measurements to Interpret the Results of Organic Matter Removal in the Biofiltration Process. Rocznik Ochrona Środowiska*, 20 (1), 2018, 326-341.

Impact Factor: 0.563, 5-letni Impact Factor: 0.748, 15 pkt. MNiSW

Dorota Holc w ww. publikacji przygotowała metodykę badań, wykonała analizy laboratoryjne jakości wody, w tym badania mikrobiologiczne, zinterpretowała uzyskane wyniki, dokonała przeglądu literatury oraz opracowała wnioski.

Wkład indywidualny w pracę: 60%

- IV. **Holc D.**, Mądrecka-Witkowska B., Komorowska-Kaufman M., Szeląg-Wasielewska E., Pruss A., Cybulski, Z. *The application of different methods for indirect microbial development assessment in pilot scale drinking water biofilters. Archives of Environmental Protection*, 47 (3), 2021, 37-49.

Impact Factor: 1.872, 5-letni Impact Factor: 1.522, 100 pkt. MNiSW

Dorota Holc w ww. publikacji przygotowała metodykę badań, wykonała analizy laboratoryjne jakości wody, w tym badania mikrobiologiczne, współuczestniczyła w interpretacji uzyskanych wyników oraz opracowaniu wniosków końcowych.

Wkład indywidualny w pracę: 25%

Wykaz pozostałego dorobku doktoranta

Publikacje:

1. **Holec D.**, Lewicka A., Pruss A., Komorowska-Kaufman M. *Use of absorbance UV to interpret transformations of organic compounds during filtration by biologically active carbon filters - experiments of pilot scale technological investigations*, W: Book of abstracts: *IWA Polish young water professionals conference: Water, Wastewater and Energy in Smart Cities*, 12-13 September 2017, Cracow, Poland: book of abstracts: IWA Poland, 2017, 60-61.
2. Mądrecka B., Komorowska-Kaufman M., Pruss A., **Holec D.** *Testy aktywności metabolicznej w badaniach biodegradacji materii organicznej w złożach biologicznie aktywnych filtrów węglowych*, W: *Proceedings of the II International Scientific-Practical Conference, Water supply and wastewater disposal: designing, construction, operation and monitoring*, 18-20 October, 2017, Lviv, red. Orachewska D., Bobush O., Lviv, Ukraine: National University Lviv Polytechnic, 2017, 26-27.
3. Mądrecka B., Komorowska-Kaufman M., Pruss A., **Holec D.** *Metabolic activity tests in organic matter biodegradation studies in biologically active carbon filter beds*. W: *Water Supply and Wastewater Disposal*, red. Sobczuk H., Kowalska B., Lublin, Polska: Politechnika Lubelska, 2018, 163-177.
4. **Holec D.**, *Uzdatnianie barwnych wód podziemnych*, *Technologia wody*, 3 (59), 2018, 22-26.
5. **Holec D.**, Pruss A., Komorowska-Kaufman M., Mądrecka B., Cybulski Z. *The sorption of organic compounds from water during technological start-up of carbon filters*, In: *E3S Web of Conferences*, vol. 100, 2019, s. 00027-1-00027-8, EDP Sciences.
6. **Holec D.**, Pruss A., Komorowska-Kaufman M., Mądrecka B., Szelaż-Wasielewska E., Cybulski Z. *Examination of microbiological activity of carbon filters used to remove organic compounds from water*, In: *2nd IWA Polish Young Water Professionals Conference: Emerging Technologies in Water and Wastewater Sector*, 12-14 February 2020, Warsaw, Poland: book of abstracts: IWA Poland, 2020, 56-57.
7. Mądrecka-Witkowska B., Komorowska-Kaufman M., Pruss A., **Holec D.**, Trzebny A., Dabert M., *Mikroorganizmy biologicznie aktywnych filtrów węglowych stosowanych do oczyszczania wody przeznaczonej do spożycia przez ludzi*, W: *XI Ogólnopolska*

Konferencja Hydromikrobiologiczna Hydromicro 2021 „Mikroorganizmy wodne – zagrożenia i nadzieje”, 09-11 czerwca 2021, Sopot, Polska: książka abstraktów, 2021, 63.

Konferencje:

1. 1st IWA Polish Young Water Professionals Conference Water, Wastewater and Energy in Smart Cities, Kraków, 12-13.09.2017 r.
Wygłoszenie referatu: Holc D., Pruss A., Komorowska-Kaufman M.: Use of absorbance UV to interpret transformations of organic compounds during filtration by biologically active carbon filters - experiments of pilot scale technological investigations,
2. XVI Konferencja Naukowo-Techniczna Woda-Ścieki-Człowiek-Środowisko, Licheń Stary k. Konina, 15-16.03.2018 r.
Wygłoszenie referatu: Holc D., Dąbek R.: Usuwanie barwy z wody podziemnej. Studium przypadku,
3. XVII Konferencja Naukowo-Techniczna Woda-Ścieki-Człowiek-Środowisko, Licheń Stary k. Konina, 13-15.03.2019 r.
Wygłoszenie referatu: Holc D.: Badania pilotażowe wstępem do budowy stacji uzdatniania wody. Studium przypadku

Działalność popularyzująca naukę:

1. **Wolontariusz** w programie europejskim: Noc Naukowców edycja 2015 i 2016, warsztaty naukowo-badawcze dla dzieci w wieku 5 - 7 lat pn.: *Skąd się bierze woda w kranie?*
Wyróżnienie wolontariusz Nocy Naukowców rok 2015.
2. **Członek zespołu** w programie europejskim: Noc Naukowców edycja 2017, 2018 i 2019, warsztaty naukowo-badawcze dla dzieci w wieku 5 - 7 lat pn.: *Skąd się bierze woda w kranie?*

Aktywność naukowa:

1. Wykonawca w projekcie: 01/13/SBAD/0913 „Wysokoefektywne metody oczyszczania wody i ścieków oraz unieszkodliwianie odpadów”, 1.01.2017 do 30.11.2018, kierownik: dr hab. inż. Zbysław Dymaczewski, prof. PP
2. Wykonawca w projekcie: 01/13/DSMK/0864 „Wykorzystanie nowoczesnych metod identyfikacji mikroorganizmów do badań biologicznie aktywnych filtrów węglowych”, 1.01.2019 do 30.11.2020, kierownik: dr Beata Mądrecka
3. Wykonawca w projekcie: 0713/SBAD/0936 „Usuwanie substancji organicznych z wody w procesach jej oczyszczania”, 1.01.2019 do 30.11.2020, kierownik: dr hab. inż. Alina Pruss, prof. PP
4. Wykonawca w projekcie: 0713/SBAD/0948 „Doskonalenie metod, urządzeń i systemów inżynierii środowiska na rzecz zrównoważonego rozwoju”, 1.01.2021-30.11.2022, kierownik prof. dr hab. inż. Janusz Wojtkowiak
5. Wykonawca w projekcie: 504101/0713/SBAD/0947 „Analiza metod projektowania i eksploatacji układów w inżynierii środowiska”, 1.01.2021-30.11.2022, kierownik: dr inż. Jędrzej Bylka

1. Wprowadzenie

W wodach naturalnych obecna jest mieszanina substancji organicznych określana mianem naturalnej materii organicznej. Definiuje się ją jako złożoną mieszaninę związków chemicznych o różnych właściwościach, których źródłem są rozkładające się szczątki roślinne i zwierzęce [Urbanowska et al., 2016; Fu et al., 2017; Korotta-Gamage, & Sathasivan, 2017; Pietrzyk & Papciak, 2018; Dong et al., 2019; Moona et al., 2019]. Wyróżnia się dwie zasadnicze formy występowania naturalnej materii organicznej: rozpuszczony węgiel organiczny (RWO) i zawieszony węgiel organiczny (ZWO), ich suma stanowi całkowitą zawartość węgla oznaczaną jako ogólny węgiel organiczny (OWO). RWO stanowi około 90% materii organicznej i tworzą go: ultra małe bakterie, aminokwasy, cukry proste, hydroksykwas, czy kwasy tłuszczowe. Do ZWO zalicza się z kolei zooplankton, glony, pierwotniaki, zawiesina bakterii oraz substancje organiczne wyługowane z gleb i roślin [Pietrzyk & Papciak, 2016]. Naturalna materia organiczna pochodząca z ekosystemu wodnego charakteryzuje się niską zawartością związków fenolowych i składników aromatycznych. Substancje organiczne pochodzące ze środowiska glebowego posiadają wyższą zawartość ligniny i związków aromatycznych [Fu et al., 2017]. Składniki tworzące materię organiczną mogą mieć właściwości hydrofobowe lub hydrofilowe. Frakcja hydrofobowa to na ogół związki humusowe, na które składają się kwasy humusowe, kwasy fulwowe i huminy. Stanowią one około 50% całkowitego węgla organicznego w wodzie, charakteryzują się wysoką zawartością węgla aromatycznego, strukturą fenolową oraz wiązaniem podwójnym sprzężonym. Związki o właściwościach hydrofilowych zawierają więcej węgla alifatycznego i związków azotowych, takich jak: węglowodany, cukry i aminokwasy [Korotta-Gamage & Sathasivan, 2017; Fu et al., 2017; Pietrzyk & Papciak, 2018].

Naturalna materia organiczna wywiera duży wpływ na jakość wody ujmowanej i może powodować problemy w procesach jej uzdatniania i dystrybucji. Przyczynia się do powstawania niepożądanego smaku, zapachu czy barwy wody oraz negatywnie oddziałuje na poszczególne procesy uzdatniania wody. Prowadzi do tworzenia się niepożądanych produktów ubocznych dezynfekcji, w tym trihalometanów i kwasów halogenooctowych. Ponadto, pozostałości naturalnej materii organicznej powodować mogą wtórny rozwój zanieczyszczeń w sieci wodociągowej, poprzez ponowny wzrost bakterii i korozję rur [Gibert et al., 2015; Dhawan et al., 2016; Szuster-Janiaczyk, 2016; Urbanowska et al., 2016].

Kaleta et al., 2017; Pietrzyk & Papciak, 2017; Korotta-Gamage & Sathasivan, 2017; Fu et al., 2017; Holc et al., 2019; Dos Santos & Daniel, 2020]. W celu ograniczenia rozwoju mikroorganizmów w sieci wodociągowej powszechnie stosuje się odpowiednie dawki środków dezynfekujących, takich jak chlor, dwutlenek chloru, monochloramina, których pozostałości zabezpieczają wodę przed jej wtórnym zanieczyszczeniem [Oh et al. 2018]. W przypadku obecności w wodzie naturalnej materii organicznej zastosowanie chloru jako dezynfektant, spowoduje, że przereaguje on ze związkami organicznymi przez co stężenie chloru się zmniejsza. Zapotrzebowanie wody na środek chemiczny wzrasta, a dodatek zwiększonej dawki chloru wpływa na zwiększenie zagrożenia powstawania szkodliwych produktów ubocznych. Podobna zależność występuje również z innymi środkami dezynfekcyjnymi jak np. dwutlenek chloru, chloraminy, brom czy ozon. Do powstawania szkodliwych produktów ubocznych dezynfekcji przyczynia się zarówno frakcja hydrofilowa i hydrofobowa naturalnej materii organicznej, przy czym udział frakcji hydrofobowej jest dwukrotnie większy niż hydrofilowej [Korotta-Gamage & Sathasivan, 2017].

Obecne w wodzie związki organiczne mogą również utrudniać usuwanie innych zanieczyszczeń w niej występujących, np. związków żelaza z wód podziemnych. Związki żelaza występują najczęściej w połączeniu z kwasami humusowymi. Kationy Fe(II) i Fe(III), a także ich hydroksykompleksy mogą tworzyć wraz z ligandami organicznymi koloidalne lub w różnym stopniu rozpuszczalne połączenia metaloorganiczne. Powstawanie tych połączeń zwiększa intensywność barwy, a także utrudnia lub wręcz uniemożliwia utlenianie Fe(II) do Fe(III) [Kłosok-Bazan, 2013; Pruss et al., 2021].

Eliminacja naturalnej materii organicznej, szczególnie frakcji hydrofilowej z wody przeznaczonej do spożycia przez ludzi jest wyzwaniem dla technologii uzdatniania wody. W ciągu ostatnich 20 lat zaobserwowano wzrost jej stężenia w wodach naturalnych. Przyczynę upatruje się w zmianach klimatu - wzroście temperatury wody i powietrza, intensywnych opadach atmosferycznych, wzroście w atmosferze stężenia dwutlenku węgla i zmniejszającym się osadzaniu kwasów [Korotta-Gamage & Sathasivan, 2017; Fu et al., 2017].

W stacjach uzdatniania wody realizowane są wieloetapowe procesy uzdatniania, mające na celu zapewnić najwyższą jakość wody dostarczanej do konsumentów, zgodną z wymaganiami stawianymi przez obowiązujące normy. Jednym z podstawowych etapów

oczyszczania wody jest filtracja szeroko stosowana ze względu na swoje zalety, m.in.: wysoką efektywność w usuwaniu drobnych cząstek stałych, niskie zużycie energii, czy niskie koszty eksploatacji [Vignola et al., 2018]. Związki organiczne, w tym szczególnie związki humusowe, są trudne do usunięcia przez konwencjonalne systemy oczyszczania wody oparte na napowietrzaniu, sedymentacji oraz filtracji wody [Kaleta et al., 2017]. W usuwaniu związków organicznych stosowane są metody łączone - tradycyjne takie jak: koagulacja, flokulacja, sedymentacja, filtracja wraz z zaawansowanymi: ozonowanie, adsorpcja na węglu aktywnym, biofiltracja czy techniki membranowe [Gibert et al., 2015].

Jak pokazują badania skuteczność usuwania przyswajalnego węgla organicznego przez systemy oparte na koagulacji, sedymentacji, filtracji i dezynfekcji wynosi mniej niż 30%, a całkowitego węgla organicznego 22%. Przy uzupełnieniu ciągu technologicznego o biofiltrację, skuteczność usuwania tych frakcji wzrasta do 60% i 74% [Tchórzewska et al., 2018].

Biologiczne procesy oczyszczania wody realizowane są przez mikroorganizmy, zdolne do metabolizowania zanieczyszczeń w reakcjach utleniania i redukcji. Biodegradowalny rozpuszczony węgiel organiczny jest źródłem węgla dla drobnoustrojów zasiedlających złoża filtrów. W początkowej fazie eksploatacji BAF dominuje proces sorpcji, natomiast po zaadsorbowaniu odpowiedniej ilości zanieczyszczeń i przy zapewnieniu korzystnych warunków do rozwoju mikroorganizmów dominującym procesem staje się biodegradacja [Kaarela, 2015; Holc et al., 2016; Papciak et al., 2016; Papciak & Pietrzyk, 2017; Zamorska, 2018; Mądrecka et al., 2018; Moona et al., 2019]. Poza biodegradowalną frakcją w filtrach biologicznie aktywnych są również usuwane inne domieszki takie jak: farmaceutyki, fenole, trihalometany, czy pestycydy [Desmarti et al., 2018; Bai, 2022].

W złożach filtrów biologicznie aktywnych stosuje się materiały filtracyjne, które pozwalają drobnoustrojom na tworzenie biofilmu, należą do nich: piasek, antracyt, granulowany węgiel aktywny lub materiały syntetyczne. Najczęściej jako złoża filtracyjne wykorzystywany jest granulowany węgiel aktywny. Dzięki porowatej strukturze złoża to jest podatne na działanie kolonizacyjne mikroorganizmów [Olesiak & Stępiak, 2014; Holc et al., 2018; Kołaski et al., 2019]. Rodzaj zastosowanego węgla aktywnego, według badań, ma wpływ na zdolność mikroorganizmów do zasiedlania złoża, co przekłada się na procesy zachodzące w złożu i efektywność oczyszczania wody [Lis et al., 2016; Xu et al., 2021].

Węgiel aktywny różni się między sobą charakterystyką powierzchni oraz rozkładem wielkości porów. Struktura węgla aktywnego ma największy wpływ na liczbę miejsc aktywnych dla rozwijającego się biofilmu. Najkorzystniejszy jest nieregularny kształt oraz makroporowata struktura, co zapewnia dobrą ochronę przed naprężeniami ścinającymi. Mikroporowata struktura ma pewne ograniczenia w postaci małych por, które nie pozwalają na wnikanie bakterii o większych rozmiarach [Dos Santos & Daniel, 2020]. Jak pokazują ostatnie badania różnorodność drobnoustrojów jest zależna od rodzaju medium filtracyjnego. Badania prowadzone przez naukowców z Wielkiej Brytanii wykazały, że w filtrach wypełnionych węglem aktywnym rozwija się bardziej różnorodna społeczność niż w filtrach, gdzie materiał filtracyjny stanowi piasek [Vignola et al., 2018; Kirisits et al., 2019].

Biofilm to złożona społeczność mikroorganizmów heterotroficznych i autotroficznych rozwijających się na podłożu stałym lub na powierzchni komórek innych organizmów [Olesiak & Stępnik, 2014; Tchórzewska-Cieślak et al., 2018]. Komórki bakteryjne i grzyby wchodzące w skład błony biologicznej wytwarzają zewnątrzkomórkową substancję polimeryczną tzw. EPS (z ang. extracellular polymeric substances). Jest to rodzaj macierzy złożonej z polisacharydów, kwasów nukleinowych, lipidów oraz białek, która jest odpowiedzialna za wytrzymałość i spójność biofilmu. Ułatwia ona także dostęp do substancji odżywczych. Ukształtowana społeczność mikroorganizmów składa się w 90% z EPS i tylko w 10% z bakterii. Poszczególne składniki biofilmu różnią się pod względem wielkości i struktury zależnie od warunków fizjologicznych oraz stanu środowiska. Mikroorganizmy tworzące biofilm potrafią wyspecjalizować się i mogą odznaczać się inną morfologią oraz metabolizmem od komórek wolnopływających tego samego gatunku [Kołwzan, 2011; Lis et al., 2016; Czyżewska-Dors et al., 2018].

Rozwój biofilmu następuje po dłuższym okresie pracy złoża, przy zachowaniu optymalnych warunków tlenowych, temperatury, pH oraz dopływu substancji biogennych [Kołwzan, 2011; Olesiak & Stępnik, 2014; Gibert et al., 2013; Kaarela et al., 2015; Korotta-Gamage & Sathasivan, 2017]. Powstanie rozwiniętego biofilmu powoduje wzrost aktywności biologicznej złoża, co ma wpływ na wydłużenie jego zdolności adsorpcyjnych, poprzez biodegradację wcześniej zaadsorbowanej materii organicznej [Kołwzan, 2011; Gibert et al., 2013; Olesiak & Stępnik, 2014;; Kaarela et al., 2015]. Rozwój biofilmu może zostać

spowolniony m.in. przez obecność w wodzie substancji toksycznych: metali ciężkich, pestycydów, a także endotoksyn, które mogą wydzielać się podczas dłuższych przerw w pracy filtra. Endotoksyny są wydzielane przez większość bakterii Gram-ujemnych, mają one wpływ na częściowe wymycie błony biologicznej, co w konsekwencji powoduje zmniejszoną aktywność mikrobiologiczną złoża [Anderson et al., 2005].

Za biodegradację związków organicznych zaadsorbowanych na powierzchni węgla aktywnego odpowiadają wyłącznie bakterie heterotroficzne żyjące w wodzie i glebie. Dotychczasowe badania potwierdzają, że wśród nich najczęściej spotykane są bakterie z rodzajów: *Pseudomonas*, *Acinetobacter*, *Rhodococcus*, *Mycoplana*, *Amycolata*, *Arhobacter*, *Xanthobacter*, czy *Bacillus* [Olesiak & Stępnia, 2014; Lis et al. 2016], a także bakterie z klas: α -Proteobacteria i β -Proteobacteria [Kaarela et al., 2015]. Zbadanie składu jakościowego i ilościowego bakterii zasiedlających złoża filtracyjne, ma istotne znaczenie ponieważ różne mikroorganizmy wykorzystują różnego typu substancje organiczne jako źródło węgla, co ma zasadniczy wpływ na efektywność ich eliminacji z wody [Lis et al., 2016]. W złożu filtrów biologicznie aktywnych zauważalne jest pionowe rozwarstwienie w zasiedlaniu przez mikroorganizmy. Wpływ na to ma zmienne stężenie tlenu rozpuszczonego, które maleje wraz ze wzrostem głębokości złoża oraz zawartość substancji biogennej. Wynika to z różnicy w stężeniu tlenu i zawartości składników odżywczych na różnych głębokościach złoża filtracyjnego [Kołaski et al., 2019; Qi et al., 2019; Dos Santos & Daniel, 2020].

Aktywność powstałego biofilmu wzrasta wraz z jego grubością, jednak tylko do pewnego momentu. Grubość biofilmu ma wpływ na przenikanie składników odżywczych z wody do biofilmu oraz decyduje o oporach. Po osiągnięciu maksymalnej grubości utrudnione jest przenikanie tlenu i składników odżywczych do społeczności mikroorganizmów, w konsekwencji jego aktywność spada [Korotta-Gamage & Sathasivan, 2017]. W procesie biofiltracji istotne jest kontrolowanie wzrostu biomasy, która może doprowadzić do zapchania złoża oraz oderwania fragmentu biofilmu i przedostania się do filtratu. Rozwój biofilmu można kontrolować poprzez okresowe płukanie [Komorowska-Kaufman et al., 2018; Dos Santos & Daniel, 2020]. Zastosowanie znajduje płukanie wsteczne za pomocą wody lub mieszaniny wodnopowietrznej, w kierunku odwrotnym do procesu filtracji. Płukanie złoża powoduje fluidyzację medium i uwalnianie są substancje organiczne lub nieorganiczne związane ze złożem do popłuczyn. Częstotliwość płukania jest istotnym

parametrem wpływającym na wydajność filtracji i powinna wynikać ze spadku ciśnienia lub natężenia przepływu oraz wysokiego poziomu mętności i zawiesiny filtratu [Korotta-Gamage & Sathasivan, 2017].

2. Tezy, cel badawczy i zakres pracy

Tezy

Teza 1. Istnieje możliwość szybszego biologicznego wpracowania filtrów węglowych

Wpracowanie złoża filtracyjnego trwa od kilku do kilkunastu tygodni i zależy od wielu czynników takich jak: temperatura wody, rodzaj i stężenie związków organicznych, stężenie tlenu oraz rodzaj i granulacja materiału filtracyjnego. Istotne są także pH dopływającej wody, rodzaj zanieczyszczeń oraz stężenie substancji toksycznych. Szybkość rozwoju błony biologicznej zależy także od liczby i rodzaju obecnych w wodzie bakterii i innych mikroorganizmów [Holc et al., 2016]. Prowadzono badania nad możliwością przyspieszenia biologicznego wpracowania złoża filtracyjnego poprzez recyrkulację popłuczyn, co dało bardzo korzystny efekt. Mikroorganizmy znajdujące się w popłuczynach zasiedliły całe złożo filtracyjne, a zawarte w pożywce substancje biogenne umożliwiły ich szybki, masowy rozwój. Obecność mikroorganizmów w obu filtrach została potwierdzona w badaniach bakteriologicznych oraz identyfikacyjnych. Dla prawidłowego działania filtrów niezbędna jest ciągła kontrola rozwoju biofilmu i procesów biochemicznych występujące w złożu filtracyjnym z jego udziałem.

Teza 2. Rodzaj mikroorganizmów zasiedlających złożo filtrów węglowych ma istotny wpływ na efektywność usuwania z wody związków organicznych w procesie biofiltracji

Odmienny sposób wpracowania złożeń przyczynił się do różnic w składzie gatunkowym mikroorganizmów budujących błonę biologiczną. W jednej kolumnie filtracyjnej zidentyfikowano następujące szczepy bakterii: *Pseudomonas fluorescens*, *Pseudomonas stutzeri* oraz *Myroides sp.* Z kolei w drugiej oznaczono następujące szczepy bakterii heterotroficznych: *Pseudomonas putida*, *Pseudomonas aeruginosa* oraz *Acinetobacter baumannii*. Wszystkie zidentyfikowane mikroorganizmy należą do bakterii Gram-ujemnych, które łatwo kolonizują różnorodne powierzchnie tworząc biofilm [Holc et al., 2016].

Odmiennie szczepy bytujące w złożach filtracyjnych miały wpływ na efektywność usuwania z wody zanieczyszczeń. Odnotowane różnice w efektywności usuwania związków

organicznych z wody między analizowanymi kolumnami filtracyjnymi wynosiły nawet 10%.

Teza 3. Absorbancja UV mierzona dla różnych długości fal może być tanią i skuteczną metodą pośredniego określenia frakcji materii organicznej

W trakcie prowadzonych badań uwzględniono również specyfikę substancji organicznych występujących w wodach naturalnych. Ta heterogeniczna mieszanina związków jest trudna do określenia za pomocą standardowych wskaźników jakości wody, takich jak: chemiczne zapotrzebowanie na tlen (ChZT), ogólny węgiel organiczny (OWO), absorbancja UV₂₅₄. Coraz bardziej przydatny okazuje się pomiar absorbancji UV mierzona dla różnych długości fal. Grupy funkcyjne związków organicznych pochłaniających promieniowanie UV i VIS to chromofory. Uważa się, że różne chromofory są identyfikowane przez różne długości fal. Na podstawie wartości absorbancji można określić całkowitą zawartość rozpuszczonego węgla organicznego i związków organicznych o wysokiej zawartości pierścieni aromatycznych, które uważa się za prekursorów ubocznych produktów dezynfekcji lub utleniania, a te dla technologii uzdatniania wody są najistotniejsze. Zauważono, że zależności występujące między dwoma różnymi długościami fal, jak na przykład: 254 nm/204 nm, 254 nm/436 nm, czy 250 nm/365 nm, pomagają w charakteryzowaniu materii organicznej. Absorbancja UV jest popularnym i względnie prostym wskaźnikiem określającym zawartość zanieczyszczeń organicznych w wodzie, co pozwala na efektywne wykorzystanie tego rodzaju pomiarów na stacjach uzdatniania wody do monitorowania procesów biodegradacji i sorpcji [Holc et al., 2018].

Cel przeprowadzonych badań

Celem rozprawy doktorskiej pt. „Usuwanie związków organicznych z wody podczas filtracji przez złoża biologicznie aktywnych filtrów węglowych” było poznanie zależności między parametrami procesowymi biofiltracji a aktywnością mikroorganizmów bytujących w złożu filtra oraz poszerzenie aktualnego stanu wiedzy w tym zakresie.

Zakres przeprowadzonych badań

Zakres pracy obejmował dwa główne obszary badawcze:

- a. Zbadanie wpływu aktywności mikrobiologicznej filtrów na efektywność usuwania naturalnej materii organicznej z wody.

W ramach badań sprawdzono także możliwość przyspieszenia biologicznego wpracowania złoża filtracyjnego poprzez recyrkulację popłuczyn, co okazało się bardzo skuteczne.

- b. Poznanie składu gatunkowego drobnoustrojów kolonizujących złoża biologicznie aktywnych filtrów węglowych.

W ramach badań sprawdzono kilka metod pozwalających na ocenę wzrostu biofilmu.

3. Metodyka badań

Badania prowadzono przez pięć lat na stanowisku badawczym uruchomionym w laboratorium Instytutu Inżynierii Środowiska i Instalacji Budowlanych Politechniki Poznańskiej w kwietniu 2015 r. [Holc et al., 2016a, 2016b, 2018, 2019, 2021]. Instalacja pilotowa składała się z dwóch kolumn filtracyjnych o średnicy wewnętrznej 100 mm i wysokości 3,0 m. Złoże filtracyjne stanowił węgiel aktywny WG-12 (prod. Gryfskand Sp. z o. o., Hajnówka, Polska), wykonany ze specjalnego, niskopopiołowego węgla połączonego spoiwem i aktywowanego parą wodną. Wysokość złoża filtracyjnego wynosiła 2,10 m. Kolumny filtracyjne zostały umieszczone w płaszczu wodnym, o stałym przepływie wody w kierunku od dołu do góry, co pozwalało na utrzymanie stałej temperatury na całej wysokości złoża. Instalacja były wyposażone w króćce do poboru próbek wody równomiernie rozmieszczone w całym przekroju pionowym złoża oraz analogicznie rozmieszczone króćce do poboru próbek złoża. Filtracja na filtrach odbywa się przy ciśnieniu wynoszącym około 2,0 m słupa wody, co odzwierciedla pracę otwartych filtrów pospiesznych. Oba filtry eksploatowano przy zachowaniu tych samych warunków hydraulicznych. Natężenie wody dopływającej na filtry wynosiło średnio 20 dm³/h, a czas kontaktu 50 minut. Ze względu na małe straty hydrauliczne w trakcie cyklu badań płukanie złożów prowadzono po zakończeniu cyklu. Na uwagę zasługuje fakt, że stanowisko badawcze zostało zaprojektowane i wykonane w taki sposób, aby istniała możliwość poboru próbek wody oraz złoża filtracyjnego w profilu filtrów bez konieczności ich wyłączenia z eksploatacji. Badania pozwoliły na wypracowanie metodyki poboru próbek złoża do analiz mikrobiologicznych.



Rys. 1. Zdjęcie stanowiska badawczego podczas eksploatacji obu filtrów

W pierwszym etapie badań, prowadzonym od kwietnia 2015 r. do lipca 2017 r. kolumny filtracyjne różniły się między sobą sposobem wpracowania złoża. Pierwsza kolumna filtracyjna (F1) została zasiedlona przez bakterie występujące w wodzie wodociągowej z sieci. Druga kolumna (F2) została uprzednio zaszczipiona popłuczynami z filtrów węglowych eksploatowanych na Stacji Uzdatniania Wody. W trakcie wpracowywania złoża do recyrkulowanych popłuczyn dodawano substancje odżywcze w postaci chlorku amonu i fosforanu potasu. Etap recyrkulacji popłuczyn trwał 16 dni. Przez cały ten okres monitorowano stężenia substancji biogennych. Po okresie zaszczipiania złoża, obie kolumny były zasilane wodą wodociągową z sieci miejskiej.

W drugim etapie badań trwającym od marca 2018 r. do lipca 2020 r., filtry zostały wypełnione świeżym złożem z węgla aktywnego WG-12. Kolumny zostały zróżnicowane między sobą sposobem zasilania w wodę. Pierwsza kolumna filtracyjna (F1) zasilana była ponownie wodą wodociągową, a druga kolumna filtracyjna (F2) zasilana była wodą modelowaną, ze związkami humusowymi.

Analizowano zmiany jakości fizyczno-chemicznej i bakteriologicznej wody w profilu złoża filtracyjnego. Analizy wykonywano zgodnie z wytycznymi Standard Methods, badano następujące parametry: pH, temperatura, tlen rozpuszczony, zasadowość, utlenialność, stężenie OWO, absorbancja dla różnych długości fali (204 nm, 250 nm, 254 nm, 272 nm, 365 nm, 436 nm), przewodnictwo elektrolityczne, potencjał redox, mętność. Równolegle wykonywano badania mikrobiologiczne liczebności bakterii psychrofilnych oraz badano aktywność mikrobiologiczną z wykorzystaniem testu esteraz (test FDA). Dla wybranych próbek wykonano identyfikację gatunkową bakterii przy użyciu diagnostycznego automatycznego systemu Vitek 2 Compact (bioMerieux).

4. Wyniki badań

Przeprowadzono badania nad efektywnością usuwania związków organicznych z wody podczas filtracji przez złoża biologicznie aktywnych filtrów węglowych. Skuteczność usuwania związków organicznych z wody określono na podstawie oznaczeń utlenialności ($\text{ChZT}_{\text{KMnO}_4}$), zawartości ogólnego węgla organicznego (OWO) oraz absorbancji UV_{254} . Średnie wartości parametrów wody podczas badań wynosiły: pH 7,3, zasadowość $171,0 \text{ mgCaCO}_3/\text{dm}^3$, stężenie tlenu rozpuszczonego $8,05 \text{ mgO}_2/\text{dm}^3$, utlenialność ($\text{ChZT}_{\text{KMnO}_4}$) $3,59 \text{ mgO}_2/\text{dm}^3$, zawartość OWO $4,77 \text{ mg}/\text{dm}^3$, absorbancja $\text{UV}_{254} 0,0173 \text{ cm}^{-1}$.

W trakcie badań odnotowano obniżenie utlenialności w zakresie 87÷51%, osiągnięte maksimum wynosiło 90%. Wyniki zawartości ogólnego węgla organicznego wykazały obniżeni parametru w zakresie 50-93%. Spadek wartości absorbancji UV_{254} przez większość czasu osiągał 100%. Przeprowadzone badania wykazały, że prowadzony proces filtracji daje bardzo dobre efekty usuwania substancji organicznej z wody.

Zmierzony stosunek ubytku utlenialności do spadku stężenia tlenu rozpuszczonego (wskaźnik Eberharda-Madsena-Sontheimera/EMS) w wodzie podczas filtracji świadczy, że złożo w każdym cyklu filtracyjnym było biologicznie aktywne. Wyniki te potwierdziły również przeprowadzone badania aktywności mikrobiologicznej z wykorzystaniem testu esteraz (test FDA). Obecność bakterii psychrofilnych w wodzie pobranej z filtrów, wskazuje na aktywność mikrobiologiczną złoża oraz dopływ wraz z filtrowaną wodą biodegradowalnych substancji organicznych. Bakterie najliczniej rozwijały się na głębokości 45 i 85 cm, a w miarę wzrostu głębokości ich liczba ulegała zmniejszeniu. W próbkach złoża najwięcej bakterii oznaczono na głębokości 45 cm i 85 cm. W głębszych warstwach złoża rozwój bakterii ograniczały: niskie stężenie tlenu oraz mniejsze stężenie związków organicznych.

Identyfikacja bakterii wykazała, że w analizowanym złożu obecne były następujące szczepy: *Pseudomonas putida*, *Pseudomonas aeruginosa*, *Acinetobacter nosocomialis*, *Acinetobacter pittii*, *Acinetobacter baumannii*, *Acinetobacter calcoaceticus*. Z uwagi na fakt, że *Pseudomonas putida* i *Pseudomonas aeruginosa* to bakterie odpowiedzialne m.in. za rozkład związków organicznych niewątpliwie przyczyniły się one do obniżenia zawartości biodegradowalnej frakcji materii organicznej obecnej w filtrowanej wodzie.

5. Podsumowanie

Badaniom poddano proces biofiltracji prowadzony w złożu biologicznie aktywnych filtrów węglowych. Rozwijający się biofilm jest zdolny do przetwarzania oraz biodegradacji zanieczyszczeń zaadsorbowanych w porach i na powierzchni ziaren. Na początku pracy filtrów usunięcie rozpuszczonej materii organicznej następuje przez adsorpcję fizyczną. Po dłuższym czasie pracy filtrów, biodegradacja przeważa nad adsorpcją. **Przyspieszenie biologicznego wpracowania złoża filtracyjnego poprzez recyrkulację popłuczyn dało bardzo dobre wyniki.** Mikroorganizmy znajdujące się w popłuczynach wprowadzanych do filtra zasiedliły złożo filtracyjne, a podawane substancje biogenne umożliwiły ich szybki i masowy rozwój. Wyniki badań FDA próbek wody pobranych z profilu pionowego kolumn filtracyjnych potwierdziły, że złożo filtracyjne było aktywne biologicznie w całej swojej miąższości. Porównując wyniki dla obu kolumn, wyższe wartości aktywności zaobserwowano w kolumnie F2. Świadczy to o bardziej rozwiniętym biofilmie, do czego przyczyniło się wcześniejsze zaszczepienie złoża. **Odmienny sposób wpracowania złoża przyczynił się do różnic w składzie gatunkowym mikroorganizmów budujących błonę biologiczną.**

Badania potwierdziły, że filtracja przez złożo biologicznie aktywnych filtrów węglowych obniża zawartość związków organicznych w wodzie – badanie utlenialności, OWO i absorbancji UV₂₅₄.

Identyfikacja bakterii wykazała, że w analizowanym złożu obecne były następujące szczepy: *Pseudomonas putida*, *Pseudomonas aeruginosa*, *Acinetobacter nosocomialis*, *Acinetobacter pittii*, *Acinetobacter baumannii*, *Acinetobacter calcoaceticus*. Z uwagi na fakt, że *Pseudomonas putida* i *Pseudomonas aeruginosa* to bakterie odpowiedzialne m.in. za rozkład związków organicznych niewątpliwie przyczyniły się one do obniżenia zawartości biodegradowalnej frakcji materii organicznej obecnej w filtrowanej wodzie.

W trakcie prowadzonych badań uwzględniono również specyfikę substancji organicznych występujących w wodach naturalnych. Ta heterogeniczna mieszanina związków jest trudna do określenia za pomocą standardowych wskaźników jakości wody, takich jak: chemiczne zapotrzebowanie na tlen (ChZT), rozpuszczony węgiel organiczny, absorbancja UV₂₅₄. W tym celu coraz bardziej przydatna okazuje się absorbancja UV mierzona dla różnych długości fal. Na podstawie wartości absorbancji można określić całkowitą zawartość rozpuszczonego węgla organicznego i związków organicznych o

wysokiej zawartości pierścieni aromatycznych, które uważa się za prekursory ubocznych produktów dezynfekcji lub utleniania. Absorpcja UV jest popularnym i względnie prostym wskaźnikiem określającym zawartość zanieczyszczeń organicznych w wodzie, co pozwala na efektywne wykorzystanie tego rodzaju pomiarów na stacjach uzdatniania wody do monitorowania procesów biodegradacji i sorpcji.

Dla prawidłowego działania filtrów niezbędna jest ciągła kontrola rozwoju biofilmu i procesów biochemicznych występujące w złożu filtracyjnym z jego udziałem. **W wynikach badań nie wykazano korelacji między liczbą bakterii HPC a aktywnością mikrobiologiczną mierzoną metodą FDA.** Pomimo swojej niedoskonałości ciągłe badanie społeczności mikrobiologicznej filtra BAC metodą HPC pozwala na ocenę etapu powstawania biofilmu i jego aktywności mikrobiologicznej. Chociaż metody TCC umożliwiają bardzo precyzyjne określenie liczby komórek bakteryjnych, jest to czasochłonne, wymaga specjalistycznego sprzętu laboratoryjnego i przeszkolonego personelu. Metoda biochemiczna może dostarczyć dodatkowych informacji o strukturze taksonomicznej lub zmianach mikroorganizmów w biofilmach, ale zawiera ograniczoną listę mikroorganizmów, które można zidentyfikować za pomocą testów projektowych. **Oznaczanie aktywności mikrobiologicznej z wykorzystaniem FDA jest najbardziej użyteczną, tanią i szybką metodą, którą można zastosować w standardowym laboratorium stacji uzdatniania wody. Dostarcza cennych informacji, które mogą stanowić wsparcie dla operatorów filtrów biologicznie aktywnych i mogą być wykorzystane jako rutynowa kontrola procesu biofiltracji, obok metody HPC wymaganej przez przepisy prawa.**

6. Bibliografia

- Anderson W. B., Mayfield C. I., George Dixon D., & Huck P. M. (2005). Endotoxins in Drinking Water: Occurrence, Inactivation, and Potential Risk to Human Health. Proc. 2005 WQTC, Quebec.
- Bai, Xi & Dinkla, Inez & Muyzer, Gerard. (2022). Microbial ecology of biofiltration used for producing safe drinking water. *Applied Microbiology and Biotechnology*. 106. 1-17. 10.1007/s00253-022-12013-x.
- Bruno, A., Sandionigi, A., Magnani, D., Bernasconi, M., Pannuzzo, B., Consolandi, C., Camboni T., Labra M., & Casiraghi, M. (2021). Different Effects of Mineral Versus Vegetal Granular Activated Carbon Filters on the Microbial Community Composition of a Drinking Water Treatment Plant. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 9, 166.
- Czyżewska-Dors E, Dors A., Pomorska-Mól M. (2018). Właściwości biofilmu bakteryjnego warunkujące oporność na antybiotyki oraz metody zwalczania. *Życie Weterynaryjne*, 93 (11), 765-771.
- Desmiarti, R., Morishita, Y., Fujisawa, T., Ishiguro, Y., Yamada, T., & Li, F. (2018). Characteristics of Nanoparticles in Drinking Water Treatment using Biological Activated Carbon. In *MATEC Web of Conferences* (Vol. 156, p. 03039). EDP Sciences.
- Dhawan S., Basu O. D., & Banihashemi B. (2016). Influence of nutrient supplementation on DOC removal in drinking water biofilters. *Water Science and Technology: Water Supply*, 17(2), 422-432.
- Dong, X., Bäcker, L. E., Rahmatullah, M., Schunk, D., Lens, G., & Meckenstock, R. U. (2019). Quantification of microbial degradation activities in biological activated carbon filters by reverse stable isotope labelling. *Amb Express*, 9(1), 1-7.
- Dos Santos, P. R., & Daniel, L. A. (2020). A review: organic matter and ammonia removal by biological activated carbon filtration for water and wastewater treatment. *International journal of environmental science and technology*, 17, 591-606.

- Fu, J., Lee, W. N., Coleman, C., Meyer, M., Carter, J., Nowack, K., & Huang, C. H. (2017). Pilot investigation of two-stage biofiltration for removal of natural organic matter in drinking water treatment. *Chemosphere*, 166, 311-322.
- Gibert O., Lefevre B., Fernandez M., Bernat X., Paraira M., Calderer M., Martinez-Llado X. (2013). Characterising biofilm development on granular activated carbon used for drinking water production, *Water Research*, 47, 1101-1110.
- Gibert O., Lefèvre B., Teuler A., Bernat X., & Tobella J. (2015). Distribution of dissolved organic matter fractions along several stages of a drinking water treatment plant. *Journal of Water Process Engineering*, 6, 64-71.
- Holc D., Pruss A., Michałkiewicz M., & Cybulski Z. (2016). Effectiveness of organic compounds removing during water treatment by filtration through a biologically active carbon filter with the identification of microorganisms. *Annual Set The Environment Protection*, 18, 235-246 (in Polish).
- Holc D., Pruss A., Michałkiewicz M., & Cybulski Z. (2016). Acceleration of carbon filters activation - experiments of pilot scale technological investigations. *Water supply and water quality*. 683-703 (in Polish).
- Holc D., Pruss A., & Komorowska-Kaufman M. (2018). The Possibility of Using UV Absorbance Measurements to Interpret the Results of Organic Matter Removal in the Biofiltration Process. *Annual Set The Environment Protection*, 20, 326-341.
- Holc D., Pruss A., Komorowska-Kaufman M., Mądrecka B., & Cybulski Z. (2019). The sorption of organic compounds from water during technological start-up of carbon filters. *E3S Web of Conferences*, 100, 00027-1-00027-8.
- Holc, D., Mądrecka-Witkowska, B., Komorowska-Kaufman, M., Szelaż-Wasielewska, E., Pruss, A., & Cybulski, Z. (2021). The application of different methods for indirect microbial development assessment in pilot scale drinking water biofilters. *Archives of Environmental Protection*, 47(3).

- Jjagwe, J., Olupot, P. W., Menya, E., & Kalibbala, H. M. (2021). Synthesis and application of Granular activated carbon from biomass waste materials for water treatment: A review. *Journal of Bioresources and Bioproducts*, 6(4), 292-322.
- Kaarela O. E., Harkki H. A., Palmroth M. R. T., & Tuhkanen T. A. (2015). Bacterial diversity and active biomass in full-scale granular activated carbon filters operated at low water temperatures. *Environmental Technology*, 36, 681-692.
- Kaleta J., Kida M., Koszelnik P., Papciak D., Puskarewicz A., & Tchórzewska-Cieślak B. (2017). The use of activated carbons for removing organic matter from groundwater. *Archives of Environmental Protection*, 43(3), 32-41.
- Kaleta J., Puskarewicz A., & Papciak D. (2017). Ocena skuteczności procesu adsorpcji w usuwaniu substancji humusowych z wody. *Inżynieria Ekologiczna*, 18(4) (in Polish).
- Kirisits, M. J., Emelko, M. B., & Pinto, A. J. (2019). Applying biotechnology for drinking water biofiltration: advancing science and practice. *Current opinion in biotechnology*, 57, 197-204.
- Kłosok-Bazan, I. (2013). Usuwanie żelaza występującego w połączeniach organicznych z wód podziemnych. *Ekonomia i Środowisko*, (2), 137-143.
- Kołaski P., Wysocka A., Pruss A., Lasocka-Gomuła I., Michałkiewicz M., & Cybulski Z. (2019). Removal of Organic Matter from Water During Rapid Filtration through a Biologically Active Carbon Filter Beds – a Full Scale Technological Investigation, *Annual Set The Environment Protection*, 21.
- Kołwzan B. (2011). Analysis of biofilms – their formation and functioning, *Annual Set The Environment Protection*, 33, 3-14 (in Polish).
- Komorowska-Kaufman, M., Ciesielczyk, F., Pruss, A., & Jesionowski, T. (2018). Effect of sedimentation time on the granulometric composition of suspended solids in the backwash water from biological activated carbon filters. In *E3S Web of Conferences* (Vol. 44, p. 00072). EDP Sciences.

- Korotta-Gamage, S. M., & Sathasivan, A. (2017). A review: Potential and challenges of biologically activated carbon to remove natural organic matter in drinking water purification process. *Chemosphere*, 167, 120-138.
- Liao X., Chen C., Wang Z., Wan R., Chang C. H., Zhang X., & Xie S. (2013). Changes of biomass and bacterial communities in biological activated carbon filters for drinking water treatment. *Process Biochemistry*, 48(2), 312-316.
- Lin W., Yu Z., Zhang H., & Thompson I. P. (2014). Diversity and dynamics of microbial communities at each step of treatment plant for potable water generation. *Water research*, 52, 218-230.
- Lis A., Pason Ł., & Stępnia L. (2016). Review of Methods Used to Indication of Biological Carbon Filters Activity. *Inżynieria i Ochrona Środowiska*, 19(3), 413-425 (in Polish).
- Liu C., Olivares C. I., Pinto A. J., Lauderdale C. V., Brown J., Selbes M. & Karanfil T., (2017). The control of disinfection byproducts and their precursors in biologically active filtration processes, *Water research*, 124, 630–653.
- Mądrecka B., Komorowska-Kaufman M., Pruss A., & Holc D. (2018). Metabolic activity tests in organic matter biodegradation studies in biologically active carbon filter beds. *Water Supply and Wastewater Disposal*, 163-177.
- Moona, N., Wunsch, U. J., Bondelind, M., Bergstedt, O., Sapmaz, T., Pettersson, T. J., & Murphy, K. R. (2019). Temperature-dependent mechanisms of DOM removal by biological activated carbon filters. *Environmental Science: Water Research & Technology*, 5(12), 2232-2241.
- Nemani, V. A., McKie, M. J., Taylor-Edmonds, L., & Andrews, R. C. (2018). Impact of biofilter operation on microbial community structure and performance. *Journal of water process engineering*, 24, 35-41.
- Oh S., Hammes F., & Liu W. T. (2018). Metagenomic characterization of biofilter microbial communities in a full-scale drinking water treatment plant. *Water research*, 128, 278-285.

- Olesiak P., Stępnik L. (2014). Metody intensyfikacji procesu sorpcji w uzdatnianiu wody. Interdyscyplinarne zagadnienia w inżynierii i ochronie środowiska, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 621-634 (in Polish).
- Papciak D., Kaleta J., Puskarewicz A., & Tchórzewska-Cieślak B. (2016). The use of biofiltration process to remove organic matter from groundwater. *Journal of Ecological Engineering*, 17(3).
- Papciak D., Pietrzyk A. (2017). Usuwanie substancji biogenych w procesie biofiltracji na złożach granulowanego węgla aktywnego, Monografia AGH, 203-208 (in Polish).
- Pietrzyk A., & Papciak D. (2016). Organic matter in natural water – forms and methods for determining. *Czasopismo Inżynierii lądowej, środowiska i architektury*, (63, nr 2/I), 241-252.
- Pietrzyk A., Papciak D. (2018). The effectiveness of organic matter removal in unit processes of the technological groundwater treatment system. In *E3S Web of Conferences* (Vol. 44, p. 00142). EDP Sciences.
- Pruss A., Komorowska-Kaufman M., & Mądrecka B. (2018). The impact of the contact time on the effectiveness of organic compounds removal from water - pilot scale investigation. *Water Supply and Wastewater Disposal*, 251.
- Pruss, A., Komorowska-Kaufman, M., & Pruss, P. (2021). Removal of organic matter from the underground water - a pilot scale technological research. *Applied Water Science*, 11, 1-10.
- Qi, W., Li, W., Zhang, J., Wu, X., Zhang, J., & Zhang, W. (2019). Effect of biological activated carbon filter depth and backwashing process on transformation of biofilm community. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 13(1), 15.
- Szuster-Janiaczyk A. (2016). The microbiological evaluation of deposits come from water network on the example of selected water supply system. *Annual Set The Environment Protection*, 18, 815-827.

- Tchórzewska-Cieślak B., Papciak D., Pietrucha-Urbanik K., & Pietrzyk A. (2018). Approach to tap water safety analysis in terms of biostability. In E3S Web of Conferences (Vol. 59, p. 00005). EDP Sciences.
- Tchórzewska-Cieślak B., Papciak D., Pietrucha-Urbanik K., & Pietrzyk A. (2018). Safety analysis of tap water biostability. *Architecture, Civil Engineering, Environment*. 11. 149-154. 10.21307/ACEE-2018-015.
- Urbanowska, Agnieszka & Kabsch-Korbutowicz, Malgorzata. (2016). Characteristics of natural organic matter removed from water along with its treatment. *Environment Protection Engineering*. 42. 10.37190/160213
- Vignola, M., Werner, D., Wade, M. J., Meynet, P., & Davenport, R. J. (2018). Medium shapes the microbial community of water filters with implications for effluent quality. *Water research*, 129, 499-508.
- Xu, Yuqing & Lu, Zedong & Sun, Wenjun & Zhang, Xiaohui. (2021). Influence of pore structure on biologically activated carbon performance and biofilm microbial characteristics. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*. 15. 10.1007/s11783-021-1419-1.
- Zamorska J. (2018). Biological stability of water after the biofiltration process. *Journal of Ecological Engineering*, 19(5).

Załączniki:

1. **Holec D.**, Pruss A., Michałkiewicz M., Cybulski Z. Przyspieszenie wpracowania filtrów węglowych – doświadczenia z badań technologicznych w skali pilotowej, Dymaczewski Z., Jeż-Walkowiak J., Urbaniak A.: Zaopatrzenie w wodę, jakość i ochrona wód, Poznań-Kudowa Zdrój, 2016, 683-703, Polskie Zrzeszenie Inżynierów i Techników Sanitarnych. Oddział Wielkopolski.
2. **Holec D.**, Pruss A., Michałkiewicz M., Cybulski Z. Efektywność usuwania związków organicznych podczas oczyszczania wody w procesie filtracji przez biologicznie aktywny filtr węglowy z identyfikacją mikroorganizmów. Rocznik Ochrona Środowiska, 18 (2), 2016, 235-246.
3. **Holec D.**, Pruss A., Komorowska-Kaufman M. The Possibility of Using UV Absorbance Measurements to Interpret the Results of Organic Matter Removal in the Biofiltration Process. Rocznik Ochrona Środowiska, 20 (1), 2018, 326-341.
4. **Holec D.**, Mądrecka-Witkowska B., Komorowska-Kaufman M., Szelaąg-Wasielewska E., Pruss A., Cybulski, Z. The application of different methods for indirect microbial development assessment in pilot scale drinking water biofilters. Archives of Environmental Protection, 47 (3), 2021, 37-49.