

dr inż. Marcin Krukowski

Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie,
Instytut Inżynierii Środowiska
e-mail: marcin_krukowski@sggw.edu.pl
ORCID: 0000-0002-4010-7916

dr inż. Andrzej Brandyk

Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie,
Centrum Wodne
e-mail: andrzej_brandyk@sggw.edu.pl
ORCID: 0000-0002-6021-5340

dr hab. inż. Adam Koziol

Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie,
Instytut Inżynierii Środowiska
e-mail: adam_kozioł@sggw.edu.pl
ORCID: 0000-0002-4059-8639

dr inż. Piotr Siwicki

Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie,
Instytut Inżynierii Środowiska
e-mail: piotr_siwicki@sggw.edu.pl
ORCID: 0000-0002-3097-8662

prof. dr hab. inż. Janusz Kubrak

Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie,
Instytut Inżynierii Środowiska
e-mail: janusz_kubrak@sggw.edu.pl
ORCID: 0000-0001-7322-4951

dr hab. Adam Kiczko, prof. SGGW

Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie,
Instytut Inżynierii Środowiska
e-mail: adam_kiczko@sggw.edu.pl
ORCID: 0000-0003-0213-2413

SKUTECZNOŚĆ USUWANIA ZANIECZYSZCZEŃ ROPOPOCHODNYCH POCODZĄCYCH Z WÓD SPŁYWAJĄCYCH Z USZCZELNIONYCH POWIERZCHNI W ODDZIELACZU CIECZY LEKKICH

Abstrakt

Przedmiotem przeprowadzonych badań technologicznych był zaprojektowany prototyp oddzielacza cieczy lekkich (własne rozwiązanie producenta krajowego) – urządzenia powszechnie stosowanego w inżynierii sanitarnej do usuwania (podczyszczania) ze ścieków węglowodorów ropopochodnych. Warunkiem dopuszczenia urządzenia do stosowania go w praktyce inżynierskiej w instalacjach kanalizacyjnych jest uzyskanie odpowiednich pozwoleń. W tym celu na potrzeby producenta zostały wykonane odpowiednie badania oddzielacza na przygotowanym stanowisku doświadczalnym, zgodnie z obowiązującymi wytycznymi (normą). Zasadniczym celem była ocena efektywności usuwania (podczyszczania) węglowodorów ropopochodnych przez prototyp oddzielacza, w którym zastosowany został system podczyszczania w postaci lamelowego pakietu

zaprojektowanego na przepływ nominalny $Q = 1,5$ l/s, oraz zaprojektowanego przez producenta (własna koncepcja) zbiorczego układu odpływowego ścieków z urządzenia. Dodatkowo określono sprawność oddzielacza przy zmiennym przeciążeniu hydraulicznym oraz sprawdzono odporność urządzenia na wymywanie zgromadzonej objętości węglowodorów ropopochodnych przy przepływie maksymalnym (zaprojektowany na pięciokrotne zwiększenie przepływu nominalnego). Uzyskane wyniki z przeprowadzonych badań technologicznych pozwoliły wykazać, czy zaprojektowany prototyp (koncepcja producenta) oddzielacza został zaprojektowany prawidłowo, spełniając wymagania określone w obowiązujących przepisach oraz dodatkowo wybranych kryteriach technologicznych.

Słowa kluczowe: oddzielacz olejowy, pakiet lamelowy, węglowodory ropopochodne, efektywność usuwania ropopochodnych

EFFICIENCY OF REMOVAL OF PETROLEUM POLLUTANTS FROM WATER RUNOFF FROM SEALED SURFACES IN A LIGHT LIQUID SEPARATOR

Abstract

The subject of conducted technological research was the designed prototype of a light liquids separator (own solution devised by a domestic manufacturer). The device is commonly used in sanitary engineering to remove (pretreat) petroleum hydrocarbons from wastewater. Approval of the device for use in engineering practice in sewerage systems necessitates obtaining the relevant permits. For this purpose, appropriate tests of the separator were carried out on a prepared test bench for needs of the manufacturer, in accordance with the applicable guidelines (standard). The main objective was to evaluate the efficiency of removal (sub-treatment) of petroleum hydrocarbons by the prototype separator, in which the sub-treatment system was applied in the form of a lamella package, designed for a nominal flow of $Q = 1.5$ l/s and the original drainage system of the device. Additionally, the efficiency of the separator was determined at variable hydraulic overloading and the resistance of the device to washing out the accumulated volume of petroleum hydrocarbons at maximum flow (designed for five times the nominal flow) was controlled. The results obtained from the conducted technological tests allowed proving whether the designed prototype (producer's concept) of the separator has been designed properly, in a way meeting the requirements specified in valid regulations and additionally selected technological criteria.

Keywords: oil-water separator, media coalescing (cartridge), petroleum hydrocarbons, effectiveness of oil removal

1. Wstęp

Realizowany w ostatnich latach (planowany na przyszłość) rozwój sieci komunikacji drogowej [10], baz transportowych, stacji benzynowych czy też infrastruktury przemysłowej w naszym kraju powoduje, że powiększają się obszary potencjalnie zagrożone zanieczyszczeniami bardzo niebezpiecznymi (toksycznymi) węglowodorami ropopochodnymi szeroko opisywanymi w literaturze [2, 11, 12, 16, 19, 24]. Zanieczyszczenia te, dostając się do gleby czy też wód, trafiają do łańcucha pokarmowego, którego ostatnim ogniwem jest niestety człowiek [17]. Ze względu na

szczególną szkodliwość tych substancji dla środowiska, funkcjonują odpowiednie regulacje prawne, które należy spełnić przy wprowadzaniu do wód lub do ziemi ścieków, a także przy odprowadzaniu wód opadowych lub roztopowych do wód lub do urządzeń wodnych [21]. Dotyczy to terenów przemysłowych, składowych baz transportowych, dróg krajowych, wojewódzkich oraz powiatowych klasy G oraz parkingów o powierzchni większej niż 0,1 ha. Spłukiwane z wyżej wymienionych terenów w sposób bezpośredni z zanieczyszczonej powierzchni szczelnej poprzez naturalnie występujące opady deszczu (wody opadowe oraz roztopowe) dostają się do otwartych lub zamkniętych systemów kanalizacyjnych. Konkludując, powstające ścieki opadowe są produktem transformacji opadu w spływ powierzchniowy [7].

Równie istotnym aspektem w obowiązujących przepisach jest kwestia jakości odprowadzanych ścieków pochodzących dla przykładu z myjni samochodowych czy też parkingów (jako przykłady miejsc ciągle obciążonych skażeniem węglowodorami ropopochodnymi). Muszą być spełnione wymagania określone w obwieszczeniu Ministra Infrastruktury i Budownictwa z 28 września 2016 r. w sprawie sposobu realizacji obowiązków dostawców ścieków przemysłowych oraz warunków wprowadzania ścieków do urządzeń kanalizacyjnych, gdzie jest określona zawartość substancji ropopochodnych, która nie może być większa niż 15 mg/l [15].

Bardzo ważne jest zatem efektywne przeciwdziałanie, aby w sposób skuteczny wyeliminować tego typu substancje ze ścieków opadowo-roztopowych, zgodnie z obowiązującymi przepisami [15, 21]. Do podczyszczania tego typu ścieków w praktyce wykorzystuje się odolejące cieczy lekkich, które stanowią jedno z powszechnie stosowanych rozwiązań technicznych instalowanych w instalacjach kanalizacyjnych ogólnie opisywanych w literaturze [1, 6, 8, 18, 23].

Ze względu na brak dostępnej (opublikowanej) wiedzy na ten temat występuje utrudnienie wykonania badań modelowych. Dlatego też warto, aby wyniki badań tego typu urządzeń były publikowane, aby dostępna wiedza pozwoliła doskonalić metody badawcze oraz projektować coraz efektywniejsze urządzenia niezbędne do usuwania (podczyszczania) ze ścieków węglowodorów ropopochodnych.

Podstawową funkcją stosowanych oddzielaczy jest wyseparowanie substancji lekkich w wyniku zjawiska flotacji [3]. W procesie tym wpływająca ciecz lekka tworzy w zbiorniku separatora zawieszinę o gęstości mniejszej niż ośrodek rozpraszający (woda-ściek). W wyniku oddziaływania sił grawitacyjnych dochodzi do rozdziału substancji o różnych gęstościach, co powoduje, że krople cieczy lekkich wypływają i gromadzą się na powierzchni ścieków, tworząc warstwę pływającą (olejową).

Samo zjawisko flotacji dotyczy (powstaje) w głównej mierze separatorów typu grawitacyjnego w szczególności o układzie poziomym zbiornika. W praktyce wykorzystywane są oddzielacze tzw. koalescencyjne, gdzie zjawisko grawitacyjne flotacji jest wspomagane zjawiskiem koalescencji [25, 26], dzięki czemu można pro-

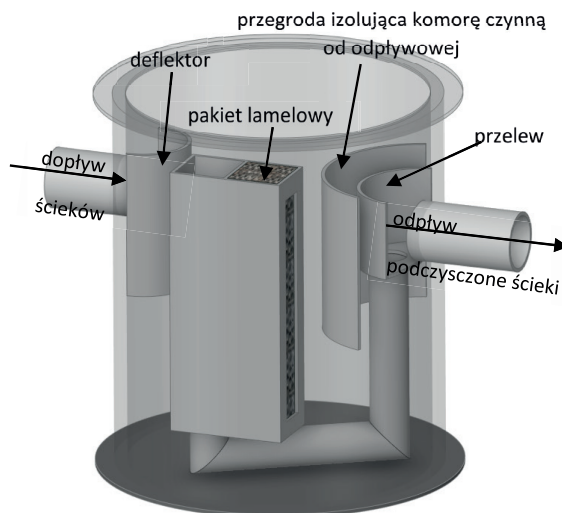
jektować urządzenia o mniejszych gabarytach. W urządzeniach tych stosowane są odpowiednie wkłady, którymi mogą być maty sorpcyjne [4], gąbki filtracyjne (pianka poliuretanowa) [5, 20, 27] lub gotowe pakiety lamelowe czy też stosowane układy żaluzjowe o różnej konfiguracji płyt.

Dzięki zastosowaniu takich technicznych rozwiązań w oddzielaczach przepływ hydrauliczny strumienia ulega stabilizacji i przepływając przez zastosowany i wybrany wkład, wpływa się na zintensyfikowanie się procesu cieczy lekkiej. W rezultacie zwiększana jest znacznie efektywność podczyszczania ścieków z zanieczyszczeń ropopochodnych w stosunku do prostych oddzielaczy grawitacyjnych bez zastosowania wymienionych rozwiązań.

2. Metodyka badań

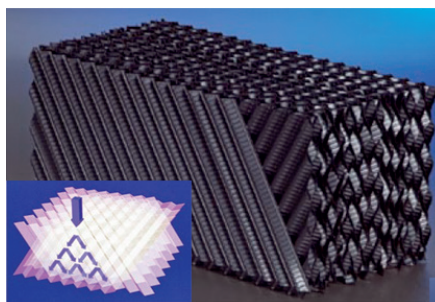
Do badań technologicznych wykorzystano prototypowy, pionowy i jednokomorowy separator koalescencyjny (model fizyczny 1:1) o przepływie nominalnym $Q = 1,5$ l/s (podstawowa cecha każdego separatora służąca do hydraulicznego wymiarowania na maksymalny strumień ścieków przepływający przez separator), zbudowany w postaci cylindrycznego zbiornika z tworzywa PEHD (rys. 1) o średnicy wewnętrznej $D_w = 0,8$ m, w którym zastosowano wkład (pakiet) lamelowy (rys. 2). Jest to wkład o przepływie wielostrumieniowym (o strukturze krzyżowej), wykonany z tworzywa o silnym pofałdowaniu i powierzchni oleofilnej. Zainstalowany pionowo w komorze czynnej pakiet charakteryzuje się również bardzo dużą powierzchnią kontaktu z przepływającym ściekiem zawierającym węglowodory ropopochodne. Powierzchnia kontaktu podawana przez producenta to ok. 240 [m^2/m^3]. Zastosowanie takiego wkładu wpływa na zmniejszenie prędkości przepływu i uzyskując dłuższy czas zatrzymania ścieków w komorze odolejacza, wpływa się na zwiększoną intensywność procesu flotacji, a tym samym na proces koalescencji. Do separatora ścieki są kierowane rurą wlotową do niewielkiej komory stabilizującej przepływ przez zastosowanie deflektora, a odprowadzane są rurą odpływową zakrzywioną pod kątem prostym (syfonem) w kierunku dna separatora. Odpływ wody podczyszczonej jest zabezpieczony przegrodą izolacyjną przed przedostawaniem się gromadzonych węglowodorów ropopochodnych w komorze czynnej. Na odpływie producent zastosował własnego projektu system zbiorczy odpływu podczyszczonych ścieków. Dodatkowo separator został wyposażony w automatyczne urządzenie zamykające wypływ wód z jego wnętrza, w przypadku gdy pojemność zgromadzonych cieczy lekkich osiągnęłaby maksymalny poziom, co zabezpiecza przed ewentualnym skażeniem środowiska przy przedostaniu się ropopochodnych do instalacji.

Badania technologiczne separatora przeprowadzono na stanowisku doświadczalnym, wykonanym zgodnie z wymaganiami określonymi w normie PN-EN



Rys. 1. Schemat poglądowy badanego prototypu odolejacza

Źródło: opracowanie własne



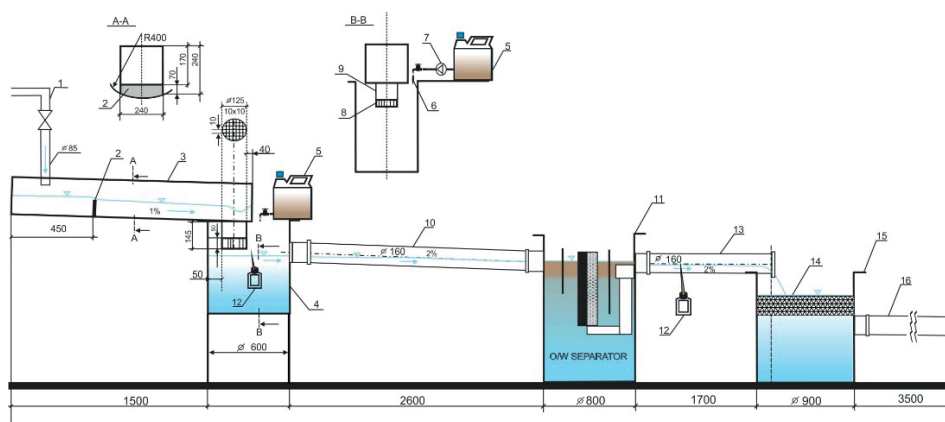
Fot. 1. Zastosowany wkład lamelowy, wielostrumieniowy o strukturze krzyżowej w separatorze (firmy GEA 2H Water Technologies)

Źródło: [28]

858 [13, 14] w Laboratorium Hydraulicznym SGGW w Warszawie. Schemat stanowiska przedstawiono na rys. 2. Stanowisko zasilano w wodę wodociągową za pośrednictwem rurociągu doprowadzającego o średnicy DN 85 (1), wyposażonego w zawór regulacyjny i przepływomierz elektromagnetyczny o zakresie pomiarowym od 1 l/s do 15 l/s. Początkowym elementem stanowiska badawczego jest kanał dopływowy (3) wykonany z tworzywa PEHD z zainstalowanym przelewem (2) i rurą wylotową zakończoną kratką o średnicy oczek 10 mm × 10 mm do ukierunkowania strumienia płynącej wody. Następnie woda kierowana jest do komory mieszania (4), gdzie jednocześnie za pomocą pompy perystaltycznej (7) precyzyjnie dozowana jest ciecz lekka (olej opałowy) (5). Mieszanina obu cieczy dalej prze-

plywa przewodem zasilającym (10) o średnicy DN 160 do badanego separatora (11), w którym zachodzi proces oczyszczania dopływających ścieków. Oczyszczony ścieki z separatora rurociągiem odprowadzającym kierowane są do zbiornika odpływowego (15) wypełnionego częściowo materiałem sorpcyjnym (14), którego celem jest zabezpieczenie niezatrzymanej przez separator części dozowanej cieczy lekkiej. Ze zbiornika odpływowego oczyszczona woda kierowana (16) jest do odpływu kanalizacyjnego.

W przewodzie odprowadzającym oczyszczone ścieki z separatora zainstalowano urządzenie do poboru próbek. Zgromadzone w naczyniach pomiarowych próbki, o ustalonej objętości 1 litra, poddawane były analizie stężeń substancji ropopochodnych metodą chromatografii gazowej w akredytowanym laboratorium chemicznym w Warszawie.



Rys. 2. Schemat stanowiska badawczego według normy PN EN 858-1

1 – rurociąg doprowadzający DN 85 z zaworem regulującym, 2 – przelew, 3 – kanał dopływowy, 4 – komora mieszania, 5 – zbiornik na olej napędowy, 6 – przewód dozujący olej DN 12, 7 – pompa perystaltyczna (dozująca), 8 – krata kierunkowa strumienia, 9 – rura wylotowa z kanału dopływowego DN 125, 10 – przewód zasilający DN 160, 11 – separator, 12 – przewód odpływowy z rurką do poboru próbek, 13 – przewód odpływowy DN 160, 14 – materiał sorpcyjny (sorbent), 15 – zbiornik odpływowy, 16 – przewód odpływowy do kanalizacji

Źródło: opracowanie własne

2.1. Wyznaczenie niezbędnych parametrów do realizacji badań technologicznych (przykładowe obliczenia dla przepływu nominalnego)

W celu uzyskania sprawności przedmiotowego oddzielacza zakres wykonanych badań obejmował wykonanie testu dla zadawanego przepływu nominalnego

$Q = 1,5$ l/s, dla przepływu nominalnego zwiększonego dwukrotnie ($2 \times Q = 3$ l/s) i dla przepływu zwiększonego czterokrotnie ($4 \times Q = 6$ l/s). Dodatkowo został wykonany test na wymywanie zgromadzonych węglowodorów ropopochodnych w objętości zaprojektowanej przez producenta urządzenia przy przeciążeniu hydraulicznym, czyli zadawanym zwiększonym pięciokrotnie przepływie nominalnym, określanym jako przepływ maksymalny ($Q_{\max} = 5 \times Q = 7,5$ l/s). Przeciążenie hydrauliczne dla Q_{\max} jest badaniem dodatkowym niezwiązanym z normą [13, 14], którego celem jest określenie odporności na ewentualne wymywanie zgromadzonej cieczy lekkiej w urządzeniu w objętości zaprojektowanej przez producenta (dla testowanego urządzenia przyjęto $V_{oi} = 0,06$ m³ dla warstwy oleju wynoszącej $h_{oi} = 0,097$ m). Przed przystąpieniem do badań do komory separatora wiano wodę, a następnie uzupełniono przygotowanym olejem opałowym. Następnie uruchomiono pompy, gdzie przewodem doprowadzającym dozowano odpowiednią ilość wody w ilości przepływu maksymalnego $Q_{\max} = 5 \times Q = 7,5$ l/s przez 15 minut.

Należy dodać, że w obecnych regulacjach prawnych nie ma obowiązku podczyszczania maksymalnego spływu deszczowego z infrastruktury drogowej dróg (Q_{\max}), co powoduje, że projektuje się separatory tylko na wymaganą część spływu deszczowego, określaną jako przepływ nominalny Q . Przepływy deszczowe większe od nominalnych mogą być odprowadzane do odbiorników bez podczyszczania przy zastosowaniu systemów burzowych [9].

Przed wykonaniem testów zostały przeprowadzone pomiary i obliczenia. Zgodnie z normą [13, 14] po obmiarze geometrycznym separator należało wypełnić wodą i zmierzyć maksymalny statyczny poziom wody $h_s = 0,6$ m (pomierzona wartość dla separatora) oraz obliczyć odpowiadającą temu poziomowi objętość czynną komory separatora $V_k = 0,302$ m³. Dla tych ustalonych wielkości obliczono niezbędny czas trwania próby technologicznej. Zgodnie z normą minimalny czas trwania jednego badania wynosi 15 min (bez względu na uzyskane obliczenia), co wynika z czasu trwania deszczu i jego efektu tworzenia pierwszej fali splukującej ze zlewni największe zanieczyszczenia [6, 8]. W trakcie badań należy utrzymywać maksymalny dopuszczalny strumień wody Q w granicach tolerancji $\pm 2\%$ i przy stałym strumieniu dodawać 5 ml/l (podania strumienia objętości oleju 0,5% przepływu nominalnego Q , zatem określona ilość dozowanego oleju wynosi 7,5 ml dla $Q = 1,5$ l/s) cieczy lekkiej z tolerancją $\pm 5\%$ przez cały czas trwania testu technologicznego T [13, 14].

$$T = T_E + T_p$$

gdzie: T – całkowity czas trwania testu technologicznego, T_E – okres trwania pomiaru, T_p – zbieranie próbek (określone na 5 minut).

Próbki są pobierane po okresie T_E co jedną minutę. Natomiast podstawowy czas trwania pomiaru T_E jest obliczany jako czterokrotna wymiana objętości komory czynnej ze wzoru:

$$T_E = \frac{4 \cdot V_K}{Q \cdot 60} = \frac{4 \cdot 0,302}{0,0015 \cdot 60} = 13,04 \text{ min.}$$

gdzie: V_K – obliczona objętość komory separatora w m^3 .

Obliczona objętość komory wynosi $V_K = 0,302 \text{ m}^3$ dla maksymalnego poziomu statycznego wody w separatorze $h_s = 0,6 \text{ m}$.

$$V_K = \frac{\pi \cdot D_W^2}{4} \cdot h_s = \frac{\pi \cdot 0,8^2}{4} \cdot 0,6 = 0,302 \text{ m}^3$$

Zatem przyjmuje się czas trwania próby dla przepływu nominalnego $Q = 1,5 \text{ l/s}$ $T = 15 \text{ min} + 5 \text{ min} = 20 \text{ min}$.

Objętość wody niezbędna do badań technologicznych dla czasu $T = 20 \text{ min} = 1200 \text{ s}$ to:

$$V_w = Q \cdot T = 1,5 \text{ l/s} \cdot 1200 \text{ s} = 1800 \text{ l}$$

Podkreślić należy, że w badaniach dla przyjętych przepływów obliczony czas był niższy niż czas minimalny określony w normie. Dla $Q = 1,5 \text{ l/s}$ czas $T_E = 13,04 \text{ min}$; dla $Q = 3 \text{ l/s}$ czas $T_E = 6,72 \text{ min}$ i dla $Q = 6 \text{ l/s}$ czas $T_E = 3,36 \text{ min}$. Dlatego też we wszystkich przypadkach prowadzonych badań czas prowadzonych pomiarów został przyjęty jako minimalny, czyli 15 minut (według normy).

Jeśli chodzi o zapotrzebowanie na lekki olej opałowy o gęstości $\rho = 0,85 \text{ g/cm}^3 \pm 0,015 \text{ g/cm}^3$ i temperaturze 14°C , to niezbędna ilość wynosi według obliczeń:

5 ml – 1 l

$$x \text{ ml} - 1800 \text{ l to } x = \frac{5 \cdot 1800}{1} = 9000 \text{ ml} \approx 9,0 \text{ l}$$

Jako ciecz lekką użyto oleju opałowego o gęstości $0,853 \text{ g/cm}^3$ w temp. 14°C określoną na podstawie techniki wagowej. Wlano do czystego, wytarowanego naczynia (cylinder pomiarowy) 1000 cm^3 oleju opałowego, a następnie zważono ciecz wraz z naczyniem na wadze laboratoryjnej. Wartość liczbową gęstości wyznaczono z zależności:

$$\rho = \frac{m_1 - m_2}{V}$$

gdzie: m_1 – masa cieczy wraz z naczyniem, m_2 – masa naczynia, $m_1 = 1855,1 \text{ g}$; $m_2 = 1000 \text{ g}$; $V = 1000 \text{ cm}^3$

$$\rho = \frac{1855,1 - 1000}{1000} = 0,8553 \text{ g/cm}^3$$

Olej napędowy był podawany do zbiornika mieszania (rys. 2, pkt 4) przy użyciu bardzo dokładnej pompy perystaltycznej firmy Masterflex L/S, dozującej według producenta z dokładnością do $\pm 0,1\%$ (fot. 2).



Fot. 2. Pompa perystaltyczna Masterflex wraz ze zbiornikiem dozowanego oleju opałowego

Źródło: opracowanie własne

Dla wyznaczonych czasów dozowano do instalacji ustalone ilości oleju opałowego, które są przedstawione i zestawione z niezbędnymi parametrami koniecznymi do przeprowadzenia badań technologicznych (tab. 1).

Tab. 1. Obliczone parametry do przeprowadzenia badań technologicznych

Parametry	Q	T _E	T	V _w	V _s	V _c
	[l/s]	[s]/[min]	[s]/[min]	[l]	[ml/s]	[ml]/[l]
Separator	1,5	900/15	1200/20	1800	7,5	9000/9
	3	900/15	1200/20	3600	15	18000/18
	6	900/15	1200/20	7200	30	36000/36
	7,5*	900/15	900/15	6750	-	60000/60

Q – zadany w instalacji przepływ; T_E – czas trwania badania (testu); T – całkowity czas trwania badania; V_w – objętość wody zużytej do badań; V_s – objętość dozowanego czynnika w badaniu; V_c – całkowita objętość oleju opałowego zużyta na jedno badanie (dozowany olej opałowy podczas całego czasu T trwania testu), * – badanie przeciążeniowe dla przepływu maksymalnego (dodatkowe) sprawdzające, jak zachowuje się zdeponowana ciecz lekka w urządzeniu o objętości zaprojektowanej przez producenta (włano 60 litrów do komory czynnej)

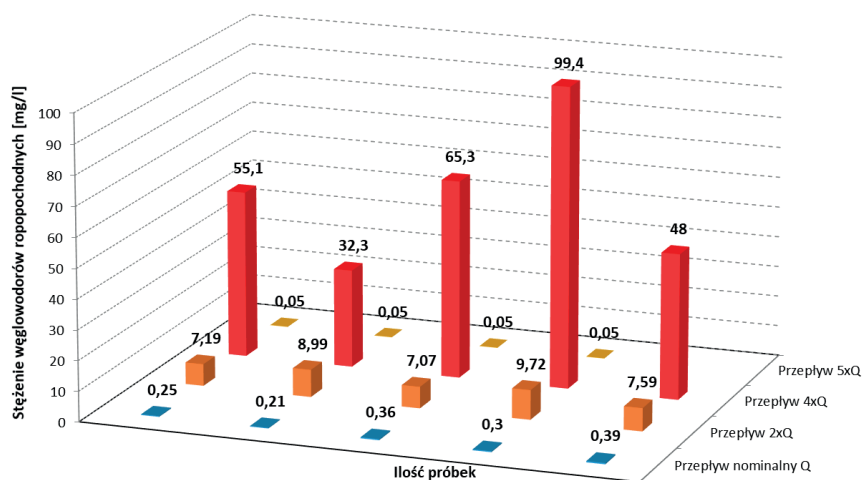
Źródło: opracowanie własne

Podczas realizowania badań technologicznych ustawiany był i zadawany każdorazowo przyjęty przepływ w przewodzie doprowadzającym wodę wodociągową do instalacji badawczej pochodzącej z autonomicznego systemu zainstalowanego w laboratorium hydraulicznym. System składa się ze zbiorników zapasowych znajdujących się pod laboratorium o pojemności ok. 120 m³, z systemu pięciu

pomp tłoczących o sumarycznej, teoretycznej przepustowości $0,5 \text{ m}^3$ oraz zbiornika górnego (utrzymującego stałe ciśnienie) o objętości ok. 5 m^3 . Do pomiaru natężenia przepływu zostanie wykorzystany przepływomierz elektromagnetyczny do pomiaru ciągłego firmy ENKO MPP-03, na którym z wysoką dokładnością do $\pm 0,5\%$ (wg producenta) podawano wodę z systemu zasilającego w ilości dla każdego oddzielnie zrealizowanego testu, dla ustalonego przepływu nominalnego $Q = 1,5 \text{ l/s}$; dla dwukrotnego zwiększonego przepływu $2 \times Q = 3 \text{ l/s}$; dla czterokrotnie zwiększonego przepływu $4 \times Q = 6 \text{ l/s}$ oraz dla pięciokrotnie zwiększonego przepływu $5 \times Q = 7,5 \text{ l/s}$.

2.2. Wyniki badań technologicznych

Po ustalonym okresie T_E trwania pomiaru wg normy [13, 14] w jednonominutowych odstępach czasu w miejscu do poboru próbek (rys. 2, pkt nr 12) pobrano ścieki oczyszczone przez separator z przewodu odpływowego w ustalonej objętości 1 litra (pięć próbek przez ostatnie pięć minut jednego trwającego testu). Odmienne tryby poboru próbek był realizowany w przepływie maksymalnym Q_{\max} , gdzie pobrano cztery próbki (po pierwszej, piątej, dziesiątej i piętnastej minucie badań). Analizę stężeń substancji ropopochodnych wykonano zgodnie z normą [13, 14] metodą chromatografii gazowej z detektorem płomieniowo-jonizacyjnym (GC-FID). Próbki zostały przygotowane do analiz według procedury określonej w normie PN-EN ISO 9377-2 (według informacji akredytowanego laboratorium). Wyniki analiz stężeń węglowodorów ropopochodnych przedstawiono graficznie na rysunku nr 3.



Rys. 3. Zbiorcze wyniki badań stężenia substancji ropopochodnych na odpływie z separatora

Źródło: opracowanie własne

Z uzyskanych wyników przeprowadzonych badań wynika, że została wykryta obecność substancji ropopochodnych na odpływie z separatora. Wartość minimalna wynosiła niewiele ponad 0,2 mg/l (0,21 mg/l), natomiast wartość maksymalna blisko 100 mg/l (99,4 mg/l). Uśrednione wartości stężenia węglowodorów ropopochodnych wynoszą dla przepływu nominalnego $Q = 0,3$ mg/l, dla dwukrotnego przeciążenia hydraulicznego $2 \times Q = 8,11$ mg/l i dla czterokrotnego przeciążenia hydraulicznego $4 \times Q = 60,02$ mg/l.

W przypadku przeprowadzonego testu z pięciokrotnym przeciążeniem w każdym pobranych czterech próbkach wartości stężenia węglowodorów ropopochodnych były śladowe (poniżej 0,05 mg/l). Należy w tym przypadku podkreślić fakt, że w tym teście badano, czy zgromadzony olej jest podczas maksymalnego przepływu wymywany (włano olej opałowy do komory czynnej w objętości zaprojektowanej przez producenta – tab. 1).

2.3. Określenie sprawności odolejacza

Na podstawie uzyskanych wyników analizy próbek na obecność węglowodorów ropopochodnych została określona sprawność (wykorzystano uśrednione wartości z badań dla każdego zadawanego przepływu w realizowanym teście).

Zatem sprawność usuwania substancji ropopochodnych w badanym separatorze można określić ze wzoru [22]:

$$E = \frac{C_{IN} - C_{OUT}}{C_{IN}} \cdot 100\%$$

gdzie: E – skuteczność usuwania węglowodorów ropopochodnych [%]; C_{IN} – stężenie wskaźnika zanieczyszczeń w ściekach dopływających [mg/l]; C_{OUT} – stężenie zmierzone (uśrednione dla wszystkich próbek) substancji ropopochodnych w ściekach oczyszczonych [mg/l].

Obliczone wyniki sprawności poszczególnych urządzeń przedstawiono w poniższym rozdziale i zilustrowano na wykresie końcowym, zbiorczym, tj. rys. 3.

W badaniach dozowano 5 ml paliwa olejowego o gęstości $\rho = 0,8553$ g/cm³, na litr wody to stężenie w ściekach surowych wynosiło:

$$C_{IN} = 5 \cdot 0,8553 = 4,2765 \text{ g/l} = 4276,5 \text{ mg/l}$$

Obliczenia efektywności redukcji zanieczyszczeń ropopochodnych na podstawie wykonanych badań technologicznych dla uśrednionych wartości stężeń węglowodorów ropopochodnych przedstawione są poniżej.

$$E_{1,5} = \frac{4276,5 - 0,3}{4276,5} \cdot 100\% = 99,99\%$$

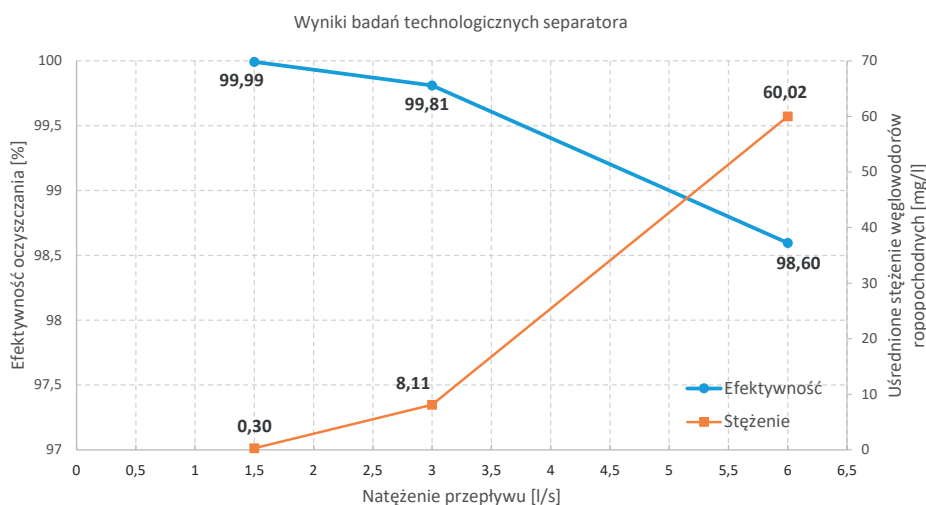
$$E_3 = \frac{4276,5 - 8,11}{4276,5} \cdot 100\% = 99,81\%$$

$$E_6 = \frac{4276,5 - 60,02}{4276,5} \cdot 100\% = 98,59\%$$

W rezultacie dla przepływu nominalnego Q efektywność separacji cieczy lekkiej to $E_{1,5} = 99,99\%$; dla dwukrotnie zwiększonego przepływu $2 \times Q = 3$ l/s efektywność separacji cieczy lekkiej to $E_3 = 99,81\%$; dla czterokrotnie zwiększonego przepływu $4 \times Q = 6$ l/s efektywność separacji cieczy lekkiej to $E_6 = 98,59\%$. Wyniki przedstawiono w tabeli zbiorczej nr 2 i na rys. 4.

Tab. 2. Wyniki obliczonej efektywności separacji cieczy lekkiej na odpływie z odolejacza na podstawie uśrednionych stężeń ropopochodnych

Lp.	Dla przepływu Q [l/s]	Oznaczenie	Uśrednione stężenie węglowodorów [mg/l]	Wyznaczona efektywność E separacji cieczy lekkiej [%]
1	1,5	$E_{1,5}$	0,3	99,99
2	3	E_3	8,11	99,81
3	6	E_6	60,02	98,59



Rys. 4. Efektywność separacji cieczy lekkiej w separatorze oraz uśrednione wartości stężeń oznaczonych węglowodorów ropopochodnych w funkcji zmiany natężenia przepływu

Uzyskane wyniki obliczeń efektywności separacji cieczy lekkiej potwierdzają wysoką sprawność technologiczną analizowanego urządzenia. Jednakże jedynie w dwóch badaniach separatora uzyskano na odpływie stężenia węglowodorów ropopochodnych, które spełniają wymogi co do odpływu zanieczyszczenia z urządzenia według obowiązującego w naszym kraju aktu prawnego (maksymalnie 15 mg/l) rozporządzenia Ministra Gospodarki Morskiej i Żeglugi Śródlądowej [21].

3. Dyskusja wyników

Separator lamelowy jest stosowany w celu podczyszczania ścieków deszczowych w większych zlewniach, w systemach kanalizacji rozdzielczej. Znajduje swoje zastosowanie przy wylotach miejskich kolektorów deszczowych, lotniskach, dużych parkingach czy też centrach logistycznych. Główną zaletą separatorów lamelowych jest to, że mogą podczyszczać wodę o przepływach większych niż przepływy nominalne (nawet do kilkukrotnego przekroczenia przepływu nominalnego). W związku z tym urządzenia te powinny być tak zaprojektowane, aby również gwarantować odporność na wymywanie zgromadzonych węglowodorów ropopochodnych.

Z opracowanych i przeprowadzonych badań i otrzymanych wyników pomiarów wykonanych zgodnie z normą PN-EN 858 można stwierdzić, że separator z zastosowanym pakietem lamelowym został prawidłowo zaprojektowany (wielkość dobrana na przepływ nominalny). Zastosowany pakiet lamelowy (wielostrumieniowy) skutecznie wyseparowuje w komorze czynnej węglowodory ropopochodne.

Świadczą o tym uzyskane wyniki sprawności pracy separatora – na czystej wodzie wodociągowej, która dla przepływu nominalnego $Q = 1,5$ l/s wynosi $E_{1,5} = 99,99\%$; dla dwukrotnie zwiększonego przepływu nominalnego $2 \times Q = 3$ l/s to $E_3 = 99,81\%$ i dla czterokrotnie zwiększonego przepływu $4 \times Q = 6$ l/s to $E_6 = 98,59\%$. W odniesieniu do normy PN-EN 858 dla przepływu nominalnego Q zastosowany lamelowy system podczyszczania spełnia wymogi co do kwalifikowania urządzenia do I klasy (≤ 5 mg/l). Natomiast w przypadku przeciążenia hydraulicznego dwukrotnego zwiększenia przepływu nominalnego $2 \times Q$ i czterokrotnie zwiększonego $4 \times Q$, pomimo uzyskania wysokiej sprawności oczyszczania ścieków, urządzenie to klasyfikowane jest do separatora należącego do II klasy (≤ 100 mg/l). W przypadku czterokrotnie zwiększonego przepływu nominalnego $4 \times Q$ wyniki stężeń węglowodorów ropopochodnych przekraczają dopuszczalną wartość zawartą w akcie prawnym [21].

Wykonany test przeciążeniowy separatora podczas przepływu maksymalnego (pięciokrotnego przeciążenia przepływu nominalnego $5 \times Q$) przeszedł pozytywnie. Uzyskane wyniki badań stężenia węglowodorów ropopochodnych przedsta-

wione na rys. 3 świadczą, że przez cały test praktycznie zdeponowana ciecz lekka (przewidziana objętość gromadzenia oleju) nie zostaje wymywana z komory separatora. Średnia wartość z badanych próbek wynosiła poniżej $C_{OUT} = 0,05$ mg/l (ilość śladowa). Świadczy o tym również zmierzona wartość warstwy oleju opałowego w zbiorniku podczas zakończenia badania, która nie zmieniła się podczas prowadzonego testu przeciążeniowego przez 15 minut i wynosiła $h_{ol} = 0,097$ m (nie zmieniła się przez cały test).

Można stwierdzić, że podczas ewentualnych intensywnych opadów zgromadzone ilości cieczy lekkich w urządzeniu będą bezpieczne i nie powinny być wymywane z komory odolejacza.

References/Bibliografia

1. Chen C., Weng D., Mahmood A., Chen S., Wang J., *Separation mechanism and construction of surfaces with special wettability for oil/water separation*, „ACS Applied Materials & Interfaces” 2019, 11, p. 11006–11027.
2. Cockerham L., Shane B., *Basic Environmental Toxicology*, CRC Press, Boca Raton 1994.
3. El-Samak A. et al., *Designing Flexible and Porous Fibrous Membranes for Oil Water Separation – A Review of Recent Developments*, „Polymer Reviews” 2020, 60, p. 671–716.
4. Fahim M., Akbar A., *Removal of fine oily hazes from wastewater using deep fibrous bed coalescer*, „Journal of Environmental Science and Health. Part A: Environmental Science and Engineering” 1984, 19(3), p. 299–319.
5. Guo G., Liu L., Dang Z., Fang W., *Recent Progress of Polyurethane-Based Materials for Oil/Water Separation*, „Nano” 2017, 12.
6. Kotowski A., *Podstawy bezpiecznego wymiarowania odwodnień terenów*, t. 1, *Sieci kanalizacyjne*, Wydawnictwo Seidel-Przywecki, Warszawa 2015.
7. Królikowska J., *Urządzenia inżynierskie z ruchem wirowym stosowane na sieci kanalizacyjnej do zmniejszenia ładunku zawiesiny w ściekach deszczowych*, „Inżynieria Ekologiczna” 2011, 26, s. 156–170.
8. Królikowska J., Królikowski A., *Wody opadowe. Odprowadzanie, zagospodarowanie, podczyszczanie i wykorzystanie*, Wydawnictwo Seidel-Przywecki, Warszawa 2012, s. 9–11, 23, 245.
9. Krukowski M., Koziół A., Siwicki P., Brandyk A., Majewski G., *Hydrauliczne warunki przepływów w systemach obejściowych stosowanych w instalacjach do usuwania cieczy lekkich*, „Acta Scientiarum Polonorum Formatio Circumiecus” 2017, 16(3), s. 187–199.
10. Kuryłowicz W., *Wizja Infrastruktury transportu oraz rozwoju sieci transportowych do roku 2033 ze szczególnym uwzględnieniem obecnych planów inwestycyjnych GDDKiA*. Rekomendacje do koncepcji Przestrzennego Zagospodarowania Kraju, Warszawa 2007.
11. Kuppusamy S., Maddela N.R., Megharaj M., Venkateswarlu K., *Total Petroleum Hydrocarbons: Environmental Fate, Toxicity, and Remediation*, Springer, Cham 2019.
12. Lu Y., Song S., Wang R., Liu Z., Meng J., Sweetman A.J. et al., *Impacts of soil and water pollution on food safety and health risks in China*, „Environment International” 2015, 77, 5–15. DOI: 10.1016/j.envint.2014.12.010.

13. Norma PN-EN 858-1:2005: Instalacje oddzielaczy cieczy lekkich (np. olej i benzyna). Część 2: Dobór wielkości nominalnych, instalowanie, użytkowanie i eksploatacja. PKN, Warszawa 2005.
14. Norma PN-EN 858-1:2005/A1 (zmiany do PN-EN 858-1:2005): Instalacje oddzielaczy cieczy lekkich (np. olej i benzyna). Część 1: Zasady projektowania, właściwości użytkowe i badania, znakowanie i sterowanie jakością, PKN, Warszawa 2007.
15. Obwieszczenie Ministra Infrastruktury i Budownictwa z 28 września 2016 r. w sprawie sposobu realizacji obowiązków dostawców ścieków przemysłowych oraz warunków wprowadzania ścieków do urządzeń kanalizacyjnych (Dz.U. z 2016 r. poz. 1757).
16. Pinedo J., Ibañez R., Lijzen J.P.A., Irabien A., *Human risk assessment of contaminated soils by oil products: total TPH content versus fraction approach*, „Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal” 2014, v. 20, no 5, p. 1231–1248.
17. Radwan K., Ślosorz Z., Rakowska J., *Efekty środowiskowe usuwania zanieczyszczeń ropopochodnych*, „Bezpieczeństwo i Technika Pożarnicza” 2012, nr 3, s. 107–114.
18. Rao D.G., Senthilkumar R., Byrne J.A., Feroz S., *Wastewater treatment: advanced processes and technologies*, FL: CRC Press, Boca Raton 2012.
19. Reichle D.E., Harwell M.A., Kelly J.R., Kimball K.D. and Levin S.A., *Ecotoxicology: Problems and Approaches*, Springer, New York 1989.
20. Rosenfeld I., Wasan D.T., *Coalescence of drops in a liquid-liquid dispersion by passage through a fibrous bed*, „The Canadian Journal of Chemical Engineering” 1974, 52(1), p. 3–10.
21. Rozporządzenie Ministra Gospodarki Morskiej i Żeglugi Śródlądowej z 12 lipca 2019 r. w sprawie substancji szczególnie szkodliwych dla środowiska wodnego oraz warunków, jakie należy spełnić przy wprowadzaniu do wód lub do ziemi ścieków, a także przy odprowadzaniu wód opadowych lub roztopowych do wód lub do urządzeń wodnych (Dz.U. z 2019 r. poz. 1311).
22. Sawicka-Siarkiewicz H., Błaszczyk P., *Urządzenia kanalizacyjne na terenach zurbanizowanych. Wymagania techniczne i ekologiczne*, Wydawnictwo Instytutu Ochrony Środowiska, Warszawa 2007.
23. Sincero AP., Sincero GA., *Physical–Chemical Treatment of Water and Wastewater*, CRC Press, Upper Saddle River 2002.
24. Singer M. et al., *Effects of dispersant treatment on the acute aquatic toxicity of petroleum hydrocarbons*, „Archives of Environmental Contamination and Toxicology” 1998, 34, p. 177–187.
25. Šećerov Sokolović R.M., Vulić T.J., Sokolović S.M., *Effect of fluid flow orientation on the coalescence of oil droplets in steady-state bed coalescers*, „Industrial & Engineering Chemistry Research” 2006, 45(11), p. 3891–3895.
26. Vengadasalam K., *Computational modelling of coalescence filtration proces*, PhD thesis, University of Leeds 2016.
27. Yong J., Huo J., Chen F., Yang Q., Hou X., *Oil/water separation based on natural materials with super-wettability: Recent advances*, „Physical Chemistry Chemical Physics” 2018, 20, p. 25140–25163.
28. <https://www.2hwatertechnologies.co.uk> [dostęp: 18.02.2022].