

Wybrane zagadnienia związane z projektowaniem separatorów substancji ropopochodnych

Selected issues related to the design of oil-water separators

ALEKSANDRA SAMBOR, ZBIGNIEW FERENC, AGNIESZKA KOLANEK

DOI 10.36119/15.2025.1.5

Zanieczyszczenie środowiska wodno-glebowego substancjami ropopochodnymi wynika z powszechnego zastosowania ropy naftowej i jej pochodnych, jako podstawowego surowca do produkcji energii, w przemyśle chemicznym, w zakładach przemysłowych oraz w środkach transportu. Separatory ropopochodnych to urządzenia służące do oddzielania substancji ropopochodnych (takich jak: oleje, paliwa, smary, itp.) od wód opadowych lub ścieków przemysłowych. Ich projektowanie jest kluczowe dla ochrony środowiska, gdyż pozwalają one na skuteczne usuwanie szkodliwych substancji z wód, które mogą przedostać się do środowiska, powodując zanieczyszczenie wód gruntowych oraz powierzchniowych.

W analizowanej literaturze nie stwierdzono informacji dotyczącej spójnej, obliczeniowej metody projektowania separatorów. W normie PN-EN 858-1 podano jedynie założenia do doboru tych urządzeń. Projektowanie separatorów związków ropopochodnych wymaga analizy wielu czynników, w tym uwzględnienia właściwych norm i przepisów prawnych, aby zapewnić skuteczność i zgodność z wymaganiami ochrony środowiska.

W pracy przedstawiono nową ścieżkę postępowania podczas projektowania separatorów ropopochodnych, która mogłaby stanowić rozszerzenie normy PN-EN 858-1 o wzory stosowane w obliczeniach hydraulicznych tych urządzeń i pozwolić na optymalizację wymiarów separatorów w zależności od wielkości dostępnego terenu do ich montażu, przy zachowaniu wymaganej skuteczności separacji.

Słowa kluczowe: zanieczyszczenie, wody opadowe, substancje ropopochodne, separatory

Pollution of water and soil environment with oil substances results from the common use of oil and its derivatives, as a basic raw material for energy production, in the chemical industry, in industrial plants and in transportation vehicles. Oil-water separators are devices used to separate petroleum substances (such as oils, fuels, lubricants, etc.) from rainwater or industrial wastewater. Their design is crucial for environmental protection, as they allow the effective removal of hazardous substances from water that can enter the environment, causing groundwater and surface water pollution. No information on a consistent, computational method for designing separators was found in the literature reviewed. PN-EN 858-1 only provides assumptions for the selection of these devices. The design of oil-water separators requires the analysis of many factors, including consideration of relevant standards and legislation to ensure efficiency and compliance with environmental requirements.

This paper presents a new path forward in the design of oil-water separators, which could be an extension of PN-EN 858-1 to include the formulas used in the hydraulic calculations of these devices, and allow the sizing of separators to be optimized according to the size of the available land for their installation, while maintaining the required separation efficiency.

Keywords: pollution, rainwater, oil substances, separators

Wstęp

Zanieczyszczenie środowiska wodno-glebowego substancjami ropopochodnymi stale wzrasta wraz ze zwiększonym zapotrzebowaniem na produkty naftowe [12]. Wynika z powszechnego zastosowania ropy naftowej i jej pochodnych, jako podstawowego surowca do produk-

cji energii, w przemyśle chemicznym, w wielu zakładach przemysłowych oraz w środkach transportu. Emisja do środowiska ropy naftowej lub jej produktów stanowi poważne zagrożenie ze względu na rozprzestrzenianie się, migrację, trwałości i kumulację w środowisku [2, 23].

Jednym z najważniejszych czynników migracyjnych jest wysokość i rodzaj opa-

du oraz wielkość powierzchni odpływu i sposób jej zagospodarowania. Wody opadowe i roztopowe charakteryzują się dużą zmiennością pod względem ilościowym i jakościowym [14], szczególnie w przypadku spływu z terenów miejskich (ulice, drogi, place). Znaczącą rolę odgrywają zawiesiny. Badania stężeń zanieczyszczeń w samej zawieszynie wskazują,

dr inż. Aleksandra Sambor <https://orcid.org/0000-0002-1904-5415>, dr inż. Zbigniew Ferenc <https://orcid.org/0000-0002-3821-1394> – Politechnika Wroclawska, Katedra Gospodarki Wodno-Ściekowej i Technologii Odpadów, Wrocław, Polska

dr inż. Agnieszka Kolanek <https://orcid.org/0000-0002-2305-5763> – Politechnika Wroclawska, Katedra Gospodarki Wodno-Ściekowej i Technologii Odpadów, Wrocław, Polska; Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, Państwowy Instytut Badawczy, Warszawa, Polska.

Adres do korespondencji/ Corresponding author: agnieszka.kolanek@pwr.edu.pl

że od 82 do 99% węglowodorów mineralnych obciążających ścieki deszczowe zawiera się w zawieszynie [5]. Z tego powodu zawieszina powinna być oddzielona od ścieków i utylizowana.

Istotną cechą substancji ropopochodnych, będących produktami destylacji ropy naftowej, jest ich odporność na rozkład beztlenowy i hamowanie rozkładów tlenowych. Tworzą one na powierzchni lustra wody warstwę „filmu”, która uniemożliwia dostęp tlenu zawartego w powietrzu atmosferycznym do zanieczyszczeń zawartych w wodach, powodując hamowanie procesu samooczyszczania [6]. Maksymalne stężenie zanieczyszczeń ropopochodnych w wodach deszczowych występuje zwykle na początku spływu deszczu o natężeniu jednostkowym do $15 \text{ dm}^3/\text{s ha}$, które stanowią zwykle ok. 90% rocznych wysokości opadów. Zgodnie z Polską Normą PN-S-02204 Drogi samochodowe – Odwadnianie dróg [16], w tym czasie występuje zjawisko spłukiwania, określone jako pierwsza fala deszczu.

Ze względu na szkodliwość i cechy substancji ropopochodnych konieczne jest stosowanie urządzeń pozwalających na ograniczenie odpływu tych zanieczyszczeń z miejsca ich powstania lub odseparowanie ich z wód płynących, stojących, jak również wód opadowych lub ścieków.

Separatory to urządzenia służące do oddzielania m.in. substancji ropopochodnych (takich jak: oleje, paliwa, smary, itp.) od wód opadowych lub ścieków przemysłowych. Ich projektowanie wymaga uwzględnienia wielu czynników, w tym właściwych norm oraz przepisów prawnych. Są one kluczowe dla ochrony środowiska, ponieważ pozwalają na skuteczne usuwanie szkodliwych substancji z wód, które mogą przedostać się do środowiska wodno-glebowego, powodując jego zanieczyszczenie.

Podstawy prawne i wytyczne techniczne podczyszczania wód opadowych

Zgodnie z Rozporządzeniem Ministra Gospodarki Morskiej i Żeglugi Śródlądowej z dnia 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 „wody opadowe lub roztopowe przed zmieszaniem ze ściekami bytowymi, wodami z odwodnienia mogą być wprowadzane do wód lub do urządzeń wodnych oraz

do ziemi pod warunkiem, że nie zawierają zawiesziny ogólnej w ilościach większych niż 100 mg/l , a węglowodorów ropopochodnych w ilościach większych niż 15 mg/l [22]. Zatem wody opadowe i roztopowe z zanieczyszczonej powierzchni szczelnej terenów usługowych, komunikacyjnych oraz przemysłowych, wprowadzane do wód lub do ziemi, nie powinny zawierać substancji zanieczyszczających w ilościach przekraczających wytyczne zarządzenia. Jednocześnie przy projektowaniu separatorów, oprócz Rozporządzenia, należy uwzględnić wytyczne zawarte w dwuczęściowej normie PN-EN 858-1 [17, 18] oraz PN-EN 858-2 [19].

W normie PN-EN 858-1 Instalacje oddzielaczy cieczy lekkich (np. olej i benzyna); Część 1: Zasady projektowania, właściwości użytkowe i badania, znakowanie i sterowanie jakością [18], szczegółowo określono powołania normatywne, terminy i definicje, klasy separatorów oraz wymagania gabarytowe i materiałowe. Natomiast „zasady projektowania” zostały ograniczone do założeń obliczeniowych dla separatorów wykonywanych na miejscu. Według tych zasad określono wartości minimalne: powierzchni wodnej separatora, jego objętość całkowitą oraz objętość gromadzenia cieczy lekkiej. Powyższe parametry są zależne od wielkości nominalnej (NS), zatem:

- powierzchnia wody, m^2 $A_{\min} = 0,2 \cdot NS$,
- objętość całkowita, m^3 $V_{\min} = 0,5 \cdot NS$,
- objętość gromadzenia cieczy lekkiej, m^3 $V_{1\min} = 0,03 \cdot NS$.

Taki sposób przedstawienia „zasad projektowania” pozwala na poprawny dobór urządzeń, ale nie jest wystarczający do ich indywidualnego zaprojektowania. Prezentowana forma podejścia do projektowania, preferuje typowe rozwiązania z gotowych podzespołów bez uwzględniania lokalnych warunków projektu czy adaptacji już istniejącej infrastruktury do nowych zastosowań. Natomiast wskazane jest, by w PN-EN 858-1 zostały ujęte wytyczne techniczne i zasady projektowania separatorów według określonej ścieżki postępowania, zrozumiałej i wykonalnej dla każdego inżyniera z branży sanitarnej czy budownictwa.

Propozycja uzupełnienia PN-EN 858-1

Celem niniejszej pracy jest opracowanie ścieżki postępowania podczas projektowania separatorów ropopochodnych, która mogłaby stanowić rozszerzenie nor-

my PN-EN 858-1 o dodatkowy algorytm obliczeniowy dla separatorów komorowych i lamelowych zintegrowanych z piaskownikami. Algorytm ten pozwoli na rozszerzenie oferty separatorów, które będzie można zastosować w terenie o ograniczonej powierzchni do ich montażu, przy zachowaniu wymaganej skuteczności separacji i optymalizacji wymiarów urządzenia.

Separatory zawieszin zintegrowane z piaskownikiem

Część główną separatora stanowi komora, w której oddzielana jest ciecz lekka od wody, a także następuje jej okresowe magazynowanie. Jeżeli separator jest zintegrowany z osadnikiem dodatkowo następuje zatrzymywanie zawieszin łatwoopadających niesionych przez wody opadowe. Zgodnie z PN-EN 858-1, w przypadku prefabrykowanych instalacji oddzielaczy pojemność gromadzenia się cieczy lekkiej powinna wynosić $10Q_N$ (gdzie Q_N to wielkość nominalna separatora w dm^3), gdy zamontowane są automatyczne urządzenia zamykające i co najmniej $15Q_N$ jeżeli nie zastosowano tych urządzeń. Podstawą do określenia niniejszej pojemności jest ciecz lekka o gęstości $0,85 \text{ g/cm}^3$.

W procesie sedymentacji następuje oddzielenie zawieszin łatwoopadających od cieczy. Na proces ten ma wpływ temperatura, stopień zagnicia ścieków oraz rodzaj zawieszin.

Zmiany temperatury wpływają istotnie na skuteczność procesu sedymentacji. W przypadku wystąpienia podwyższonej temperatury następuje obniżenie skuteczności sedymentacji, ponieważ może zachodzić efekt zagniwania ścieków. Skutkuje to powstaniem gazów, które unoszą zawieszinę na powierzchnię. Jednocześnie zachodzić może przyspieszenie opadania zawieszin ze względu na mniejszą wartość współczynnika lepkości ciepłych ścieków w porównaniu z zimnymi. Zatem w przypadku obniżenia temperatury, z powodu wyższej wartości lepkości ścieków, sedymentacja przebiega wolniej, ale też spada stopień zagniwania ścieków.

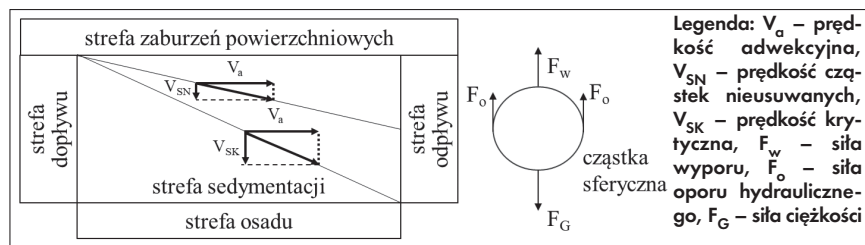
Podstawowym parametrem wpływającym na proces sedymentacji jest rodzaj zawieszin: wymiar, kształt i gęstość cząstek. Zawiesziny o dużej gęstości opadają szybciej niż zawiesziny lekkie. W przypadku ścieków deszczowych ok. 70% zawieszin stanowią zawiesziny mineralne łatwoopadające [8]. Przyjęto założenie, że cząstki zawieszin ziarnistych opadają oddzielnie, nie oddziaływują na siebie i nie zmieniają podczas sedymentacji wielkości, kształtu i gęstości. Przyjmuje się ponadto, że prędkość ich opadania jest stała.

W tabeli 1 przedstawiono przewidywane efekty usuwania zawiesiny ze ścieków opadowych. Wynika z niej, że im mniejsze jest obciążenie hydrauliczne osadnika, tym mniejsze ziarna są zatrzymywane w osadniku, co skutkuje wyższym stopniem redukcji zawiesiny ogólnej [20].

Tabela 1. Orientacyjny stopień redukcji zawiesiny wód opadowych w osadniku [16]
Table 1. Approximate reduction rate of suspended rainwater in the settling pond [16]

Maksymalne obciążenie hydrauliczne	[m ³ /m ² *h]	7	14	36
Minimalna średnica zatrzymanych zawieszonych ziarnistych	[μ]	60	90	150
Stopień redukcji zawiesiny ogólnej	[%]	80	70	60

W procesie sedymentacji, w ujęciu teoretycznym, cząstki stałe przemieszczają się poziomo w wyniku przenoszenia adwekcyjnego – V_a (prędkość adwekcyjna) oraz pionowo pod wpływem sił grawitacji (prędkość sedymentacji: V_{SN} – prędkość cząstek nieusuwananych, V_{SK} – prędkość krytyczna). Proces ten przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Schemat ruchu cząstek w procesie sedymentacji [1]
Fig. 1. Scheme of particle movement in the sedimentation process [1]

Bilans sił działających na sedymentującą cząstkę można zapisać następująco:

$$m_c \cdot \frac{dV_s}{dt} = F_G - F_W - F_O$$

gdzie:

- m_c – masa sedymentującej cząstki, kg,
- V_s – prędkość sedymentacji, m/s,
- F_G – siła grawitacji, N,
- F_W – siła wyporu, N,
- F_O – siła oporu, N.

Prędkość opadania cząstek ziarnistych (V_s) opisuje równanie Stokesa (w zakresie ruchu laminarnego):

$$V_s = \frac{(\rho_c - \rho_w) \cdot g \cdot d_c^2}{18\mu}$$

gdzie:

- d_c – średnica cząstki kulistej,
- ρ_c – gęstość cząstki,
- ρ_w – gęstość wody,
- μ – lepkość dynamiczna cieczy,
- g – przyspieszenie ziemskie, m/s².

W zakresie ruchu burzliwego obowiązuje wzór Newtona na prędkość opadania [9, 15, 24]:

$$V_s = \sqrt{\frac{3,03gd_c(\rho_c - \rho_w)}{\rho_w}}$$

gdzie:

- d_c – średnica cząstki kulistej,
- ρ_c – gęstość cząstki,
- ρ_w – gęstość wody,
- μ – lepkość dynamiczna cieczy,
- g – przyspieszenie ziemskie, m/s².

Natomiast dla ruchu przejściowego obowiązuje równanie Allena [15]:

$$V_s = 0,2 \left[\left(\frac{\rho_c - \rho_w}{\rho_w} \right)^{0,72} \frac{d_c^{1,18}}{\left(\frac{\mu}{\rho_w} \right)^{0,45}} \right]$$

gdzie:

- d_c – średnica cząstki kulistej,
- ρ_c – gęstość cząstki,
- ρ_w – gęstość wody,
- μ – lepkość dynamiczna cieczy.

Podstawowym parametrem w procesie opadania jest krytyczna prędkość sedymentacji (V_{sk}), która dla osadnika o przepływie poziomym wynosi [11]:

$$V_{sk} = \frac{Q}{F_{os}}$$

gdzie:

- Q – strumienia objętości ścieków, m³/h,
- F_{os} – powierzchni osadnika,

Zatem głębokość czynna piaskownika – H wynosi:

$$V_{sk} = \frac{H}{T_H} \Rightarrow H = V_{sk} \cdot T_H$$

gdzie:

- T_H – czasu przetrzymania ścieków, s.

Z przeprowadzonych badań nad zanieczyszczeniami wód deszczowych z autostrad we Francji [13] wynika, że większość zawiesiny stanowi piasek, którego 79% cząstek stanowią cząstki o średnicy $d \geq 200\mu\text{m}$ (próby pobrane w kanale pomiarowym). Dla średnicy ziarna piasku $d = 0,20 \text{ mm}$, według Kalbskopfa dla $v_0 = 0,99 \text{ cm/s}$ wydzieli się 90% piasku o $d \geq 0,20 \text{ mm}$, a dla $v_0 = 0,78 \text{ cm/s}$ wydzieli się 85% [13]. Można zatem przyjąć, że akceptowalną średnicą cząstek usuwanej zawiesiny mineralnej jest średnica $d = 200\mu\text{m}$.

Separatory substancji ropopochodnych

W separatorach cieczy lekkich, do których trafiają wody deszczowe z zanieczyszczonych powierzchni szczelnych z terenów miast, ulic, parkingów, autostrad i zakładów przemysłowych, zachodzi proces flotacji naturalnej. W przypadku oczyszczania wód deszczowych w separatorach na proces flotacji wpływają czynniki charakteryzujące powierzchnię flotowanych cząstek [4]. Czynniki te to: potencjał powierzchniowy i potencjał elektrokinetyczny oraz charakter powierzchni

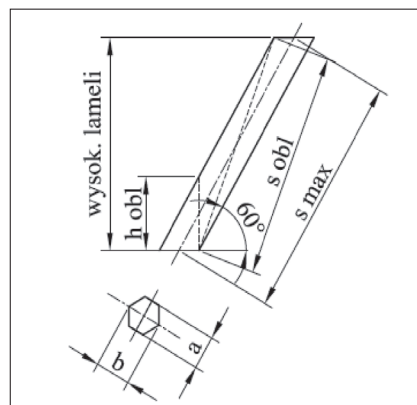
(hydrofobowy lub hydrofilowy) związany z powyższymi potencjałami.

Proces flotacji opisuje to samo prawo, co proces sedymentacji [7, 21] – prawo Stokesa. Ze względu na ciężar właściwy cząstki, który jest mniejszy od ciężaru cieczy, wektor prędkości jest skierowany ku górze. Równanie Stokesa mówi, że prędkość wznoszenia się cząstek zależy od średnicy cząstek i różnicy gęstości między cząsteczką a cieczą. Zatem rozmiar cząstek substancji ropopochodnych jest istotny. Równanie Stokesa dobrze opisuje prędkość wznoszenia się cząstek, dla cząstek o średnicy w zakresie od 10 – 200 μm [21].

Jeżeli założyć, że występuje jednorodna strefa dopływu zanieczyszczeń do flotatora, to rozkład wielkości cząstek na wejściu do kanału jest również jednorodny w całym polu przekroju. Wszystkie cząstki mające prędkość flotacji wyższą od prędkości założonej będą usuwane bez względu na miejsce wprowadzenia do kanału, nato-

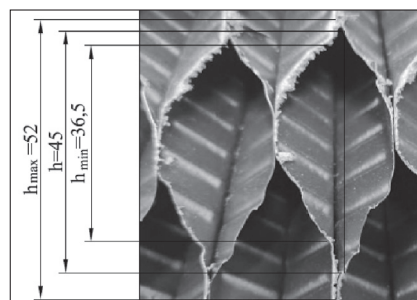
- model ruchu cząstki oleju w wodzie ze stałą prędkością flotacji, zależną od średnicy cząstki,
 - maksymalna liczba $Re = 0,5 Re_{kryt'}$, gdzie krytyczna wartość liczby Reynoldsa dla przewodów kołowych wynosi $Re_{kryt} a = 2320$ (według PN-76/M-34034 przepływ laminarny występuje dla $Re < 2300$),
 - lepkość dynamiczną przyjęto jak dla wody w temperaturze 10°C , $\mu = 1,31 \cdot 10^{-3} \text{Ns/m}^2$,
 - gęstość cieczy/wody, $\rho = 1000 \text{kg/m}^3$,
 - gęstość cząstki/olej napędowy, $\rho_{cz} = 850 \text{kg/m}^3$,
 - przyspieszenie ziemskie, $g = 9,81 \text{m/s}^2$.
- Zależność prędkości flotacji od tych zmiennych wyliczono zgodnie z prawem Stokesa, a wyniki obliczeń przedstawiono w tabeli 2.

Zgodnie z zaleceniami American Petroleum Institute (API) [3] optymalny kąt



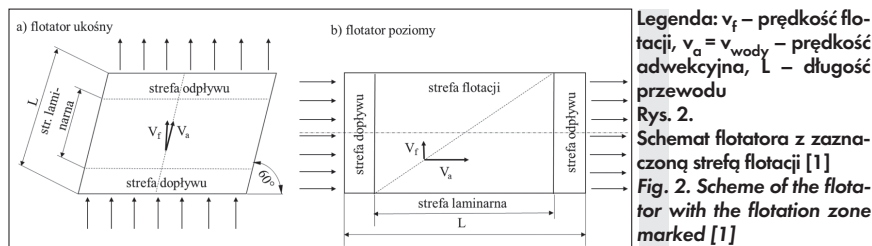
Rys. 3. Schemat budowy pojedynczej lameli przyjętej do obliczeń

Fig. 3. Scheme of the structure of a single lamella used in the calculations



Fot. 1. Odształcenia technologiczno-montażowe przykładowej lameli przyjętej do obliczeń

Fig. 1. Technological and assembly deformations of an example lamella used in the calculations



Legenda: v_f – prędkość flotacji, $v_a = v_{wody}$ – prędkość adwekcyjna, L – długość przewodu

Rys. 2. Schemat flotatora z zaznaczoną strefą flotacji [1]

Fig. 2. Scheme of the flotator with the flotation zone marked [1]

miast cząstki mające prędkość flotacji mniejszą niż założoną będą usuwane w ilości proporcjonalnej do wysokości flotacji (rys.2) i położenia w polu wlotu do lameli.

Czysta powierzchnia cząstek oleju jest hydrofobowa i polarna. Cząstki o takiej powierzchni wykazują zdolności do autoflotacji, autotokoalescencji i samoczynnego wypływania na powierzchnię wody. Prędkość flotacji zależy od średnicy flotującej cząstki, różnicy gęstości wtarcenie i cieczy oraz lepkości dynamicznej cieczy.

Ścieżka postępowania podczas projektowania separatorów ropopochodnych na przykładzie projektowania separatora lamelowego

Poniżej przedstawiono ścieżkę postępowania podczas projektowania separatorów ropopochodnych na przykładzie obliczeń hydraulicznych, które należy wykonać podczas projektowania separatora lamelowego dla związków ropopochodnych.

Ze względu na dużą zmienność rozmiaru i kształtu flotujących cząstek oleju, wykonano obliczenia prędkości dla średnic cząstki kulistej: 200, 150, 100 μm .

Do obliczeń przyjęto następujące założenia wstępne:

Tabela 2. Prędkość flotacji cząstek według prawa Stokesa
Table 2. Particle flotation velocity according to Stokes' law

średnica cząstki kulistej oleju	μm	200	150	100
średnica zastępcza kropli	m	0,0002	0,00015	0,0001
gęstość cieczy/wody	kg/m^3	1000	1000	1000
gęstość cząstki oleju	kg/m^3	850	850	850
lepkość dynamiczna (jak dla wody)	$\text{kg/m} \cdot \text{s}$	0,00131	0,00131	0,00131
prędkość floatacji	cm/s	0,24962	0,14041	0,0624

nachylenia lamel powinien wynosić 60 stopni (przy założeniu okresowego ich przedmuchiwania). Takie rozwiązanie pozwala uniknąć problemów eksploatacyjnych separatorów związanych z zapychaniem się lamel.

Do dalszych analiz przyjęto wymiary pojedynczego kanału lameli, powszechnie stosowanej, zgodnie z rysunkiem 3.

W oparciu o prezentowany model (rys. 3) przyjęto:

- kąt nachylenia kanału lameli: 60° (zgodny z zaleceniami API),
- wymiary pojedynczego kanału: $a \times b = 24 \times 26 \text{mm}$,
- obliczeniową wysokość drogi flotacji, $h_{obl} = 52 \text{mm}$,
- obliczeniową długość drogi flotacji, $s_{obl} = 332,4 \text{mm}$,
- maksymalną długość drogi flotacji, $s_{max} = 346,4 \text{mm}$,

- średnicę zastępczą $d_{zast} = 22,2 \text{mm}$. Natomiast, ze względu na odształcenia technologiczno-montażowe lameli, co przedstawiono na fotografii nr 1, przyjęto do obliczeń:

- wysokość drogi flotacji, $h_f = h = 45 \text{mm}$,
- maksymalną wysokość lameli $h_{max} = h_{oblicz}$,
- maksymalną długość drogi flotacji, $s_f = 300 \text{mm}$.

Dla przyjętej wysokości drogi flotacji wyznaczono czas potrzebny do wyflotowania cząstek oleju na maksymalnej wysokości flotacji h_f . Wyznaczono również maksymalną prędkość przepływu wody v_{wody} (tzw. prędkość krytyczną $v_{kryt, wody}$) dla drogi flotacji s_f , co przedstawiono w tabeli 3.

Wg Heidricha [10] średnia prędkość przepływu ścieków w pakietach w stosunku do prędkości krytycznej musi zostać

Tabela 3. Prędkość krytyczna cząstek dla drogi $s_f = 0,30$ m
Table 3. Critical velocity of particles for the path $s_f = 0.30$ m

średnica cząstki kulistej oleju	μm	200	150	100
prędkość floatacji	cm/s	0,24962	0,14041	0,0624
czas floatacji	s	18,03	32,05	72,12
prędkość krytyczna wody	cm/s	0,9682	0,5446	0,242

pomniejszona przez współczynnik kształtu kanału oraz współczynnik miarodajności prędkości opadania:

$$V_{sr} = \frac{u}{A \cdot B} \left(\sin \Theta + \frac{L}{C} \cos \Theta \right)$$

gdzie:

- v_{sr} – średnia prędkość w pakietach, m/s,
- u – prędkość floatacji kropelek oleju, m/s,
- A – współczynnik miarodajności prędkości floatacji kropelek oleju,
- B – współczynnik charakteryzujący kształt przekroju poprzecznego pakietu,
- Θ – kąt nachylenia osi strug względem poziomu,
- L – długość pakietów liczona po drodze przepływu ścieków, m,
- C – charakterystyczny wymiar przekroju poprzecznego pakietu przepływowego, m.

Do obliczeń przyjęto następujące współczynniki:

- współczynnik zmniejszający miarodajności prędkości floatacji, $A = 1,25$,
- współczynnik kształtu kanału: jak dla przekroju kwadratowego, $B = 11/8$.

Po uwzględnieniu współczynników: zmniejszającego miarodajność prędkości floatacji oraz współczynnika kształtu kanału, wyznaczono średnią prędkość przepływu przez kanał lameli dla określonych średnic cząstki kulistej oleju, a wyniki obliczeń przedstawiono w tabeli 4.

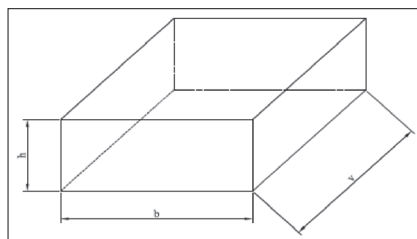
Tabela 4. Średnia prędkość przepływu przez kanał lameli
Table 4. Average flow velocity through the lamella channel

średnica cząstki kulistej oleju	μm	200	150	100
średnica zastępc. kropli	m	0,0002	0,00015	0,0001
czas floatacji	s	18,03	32,05	72,12
prędkość floatacji	cm/s	0,24962	0,14041	0,0624
prędkość krytyczna wody	cm/s	1,664	0,936	0,416
prędkość wody po korekcie	cm/s	0,9682	0,5446	0,242
prędkość max. wg API = 1,525	cm/s	vwody < vAPI	vwody < vAPI	vwody < vAPI

Należy zauważyć, że przy tak przyjętych założeniach projektowych kryterium maksymalnej prędkości przepływu wg API [3] jest spełnione dla wszystkich rozpatrywanych średnic cząstek kulistych oleju.

W następnym kroku, do wyliczenia powierzchni czynnej flotatora, przyjęto model jednowarstwowego przepływu całej rozpatrywanej objętości przez kanał przepływowy o wymiarach $b \times h$ i określonej prędkości średniej (rys. 4).

Dla wyliczonej prędkości średniej, wyznaczono z równania ciągłości przepływu, pole przekroju poprzecznego:



Legenda: $h = h_f$ – wysokość floatacji, b – szerokość kanały przepływowego, $v = v_{sr}$ – prędkość adwekcyjna w lameli

Rys. 4. Jednowarstwowy model przepływu przez lamelę
Fig. 4. The single-layer model of flow through the lamellas

$$A = Q/v_{sr}$$

gdzie:

- v_{sr} – średnia prędkość przepływu, m/s,
- Q – strumień objętości przepływającej cieczy, m^3/s ,
- A – pole przekroju poprzecznego/powierzchnia czynna, m^2 .

Jednocześnie należy pamiętać, że pole A określa się ze wzoru:

$$A = h_f \cdot b$$

gdzie:

- h_f – wysokość floatacji, m,
- b – szerokość czynna kanały przepływowego, m.

Zatem na podstawie wielkości powierzchni A wyznaczamy szerokość czynną kanału b (m), która dla Q (m^3/s) wynosi:

$$h_f \cdot b = Q/v_{sr}$$

$$b = \frac{Q}{h_f \cdot v_{sr}}$$

oraz obliczamy powierzchnię czynną floatacji separatora ze wzoru:

$$F = b \cdot s_f$$

Do dalszych analiz przyjęto średnicę cząstki zawsze usuwalnej $d = 100 \mu\text{m}$, stąd:

- v_{sr} (v_{wody} po korekcie wg Heidricha) $= v_{wody}$ dla $100 \mu\text{m} = 0,2421$ cm/sek,
- prędkość floatacji $v_{f=100 \mu\text{m}} = 0,06240$ cm/sek,
- czas floatacji t_f dla $100 \mu\text{m} = 72,12$ s,

- rzeczywista droga przepływu laminarnego $L_{rz} = v_{sr} \cdot t_f = 17,45$ cm,
- pole powierzchni pojedynczego kanału $A = 0,000432 \text{ m}^2$ (wg rys.3),
- średnica zastępcza pojedynczego kanału $d_{zast} = 0,0222$ m,
- założone pole powierzchni czynnej lameli $F_L = 220 \text{ m}^2/\text{m}^3$.

Po uwzględnieniu powierzchni czynnej F_L wymagana objętość V_L lameli wynosi:

$$V_L = \frac{F}{F_L}$$

Uwzględniając wymiary produkcyjne przykładowej lameli (szer. x wys. x dł. $_{max} = 300 \times 300 \times 2600$ mm), długość pojedynczej lameli L_L wynosi:

$$L_L = \frac{V_L}{a \cdot h}$$

gdzie:

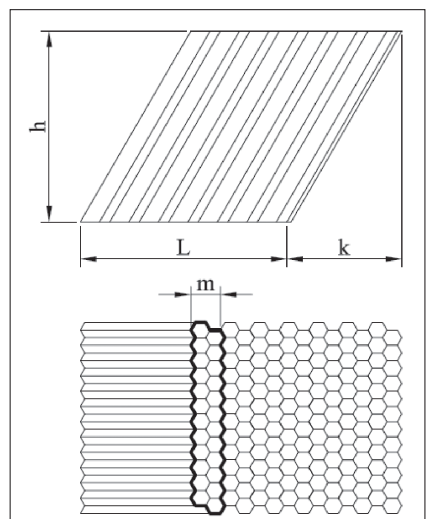
- V_L – objętość lameli, m^3 ,
- a – szerokość lameli, m,
- h – wysokość lameli, m.

Obliczenia szerokości kanału b , wymaganej objętości oraz długości obliczeniowej lameli dla wybranych przepływów, przy założeniach obliczeniowych podanych w tabeli 5, przedstawiono w tabeli 6. W celu określenia rzeczywistej długości lameli przyjęto jednostkowy moduł o wymiarach opartych o geometrię przykładowej

Tabela 5. Założenia obliczeniowe do wyznaczenia długości lameli
Table 5. Calculation assumptions for determining the length of the lamella

Table 5. Calculation assumptions for determining the length of the lamella

wysokość lameli	μm	0,3
szerokość lameli	m	0,3
powierzchni czynnej lameli	m^2/m^3	220
masa wysokość floatacji h_f	m	0,045
prędkości średnie, v_{wody} dla $100 \mu\text{m}$	m/s	0,002421
obliczeniowa droga przepływu, s_f	m	0,3



Legenda: h – wysokość lameli, L – długość rzeczywista/użyteczna, k – długość nieużyteczna, m – długość modułu jednostkowego

Rys. 5. Schemat przyjętego jednostkowego modułu lamelowego
Fig. 5. Scheme of the adopted unit lamella module

Tabela 6. Szerokości czynne kanału oraz długości obliczeniowe lameli dla wybranych przepływów
Table 6. Active channel widths and design lengths of lamellas for selected flows

przepływ	dm ³ /s	10	50	100
przepływ nominalny Q	m ² /m ³	0,01	0,05	0,10
szerokość czynna kanału F	m	91,807	459,034	918,068
powierzchnia czynna kanału F	m ²	27,542	137,71	275,42
objętość lameli V _l	m ³	0,1252	0,626	1,2519
długość obliczeniowa lameli L _l	m	1,391	6,955	13,91

lameli. Szerokość i wysokość modułu przyjęto jak w lameli, natomiast jako długość przyjęto wymiar podwójnego szeregu kanałów, o wymiarze $m = 46,2$ mm (rys. 5).

Przyjęty moduł jednostkowy posiada 24 pojedyncze kanały. Pole powierzchni pojedynczego kanału wynosi $A_0 = 0,000432$ m², a średnica zastępcza $d_0 = 0,0222$ m. Długość modułu wynosi $m = 0,0462$ m, natomiast długość nieużyteczna $k = 0,180$ m.

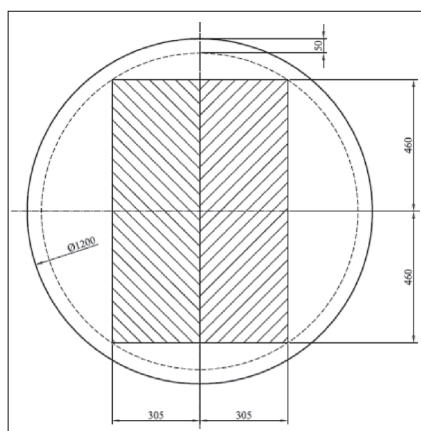
Po obliczeniu szerokości czynnej kanału oraz długości obliczeniowej lameli można przystąpić do określenia wymiarów zbiornika separatora. W tym celu należy określić maksymalną długość lameli, którą ze względów konstrukcyjnych (montażowych) będzie można umieścić w zbiorniku, a która stanowi wielokrotność długości modułu ($m = 0,0462$ m).

Do dalszych obliczeń przyjęto, że zbiornik separatora będzie miał kształt cylindryczny i zostanie wykonany z kręgów betonowych o średnicy DN1200, dostępnych w bieżącej ofercie handlowej.

W założeniach konstrukcyjnych mocowania lameli w separatorze przyjęto:

- obwodowa obudowa pojedynczej lameli, 2 g (grubość) = 2 x 2,5 mm = 5 mm,
- obudowa mocująca lamel do ścian bocznych separatora 50 mm,

Dla powyższych założeń wyznaczono maksymalną długość lameli dla zbiornika separatora o średnicy DN1200, która wynosi $L_{max} = 920$ mm. Przykładowe rozmieszczenie pakietów lamel w wybranym zbiorniku separatora przedstawiono na rys. 6.



Rys. 6. Maksymalna długość lameli dla zbiornika separatora DN1200
Fig. 6. Maximum lamella length for DN1200 separator tank

W kolejnym kroku należy mieć również na uwadze, że według pkt. 8.3.3, PN – EN 858-1:2005 [17] „Określanie wielkości nominalnej i klasy” wyniki obliczeń projektowych należy zweryfikować w badaniach eksperymentalnych w celach określenia rzeczywistej klasy i wielkości nominalnej separatorów. Podobne zalecenia przedstawione są w wytycznych American Petroleum Institute, API PUBLICATION 421, Monographs on Refinery Environmental Control-Management of Water Discharges: Design and Operation of Oil-Water Separators [3].

Podsumowanie i wnioski

W wyniku przeprowadzonych prac opracowano nowe wytyczne postępowania podczas projektowania separatorów ropopochodnych, jako propozycję rozszerzenia normy PN-EN 858-1. Na podstawie zaproponowanego algorytmu do projektowania separatorów ropopochodnych, rozszerzonego o wzory stosowane w obliczeniach hydraulicznych tych urządzeń, będzie możliwa optymalizacja wymiarów separatorów w zależności od wielkości dostępnego terenu do ich montażu, przy zachowaniu wymaganej skuteczności separacji.

Należy również pamiętać o zweryfikowaniu wyników obliczeń w badaniach laboratoryjnych przeprowadzonych zgodnie z normą PN – EN 858-1:2005 i zalecanymi w wytycznych American Petroleum Institute, API PUBLICATION 421, Monographs on Refinery Environmental Control-Management of Water Discharges: Design and Operation of Oil-Water Separators.

LITERATURA

[1] Adamski W., Modelowanie systemów oczyszczania wód, PWN, Warszawa 2002.
 [2] Adynkiewicz-Piragas M., Kolanek A., Kryza J., i inni, Gospodarka starymi zanieczyszczeniami na terenie lotniska powojenskogo od badań historycznych do koncepcji rewitalizacji (lotnisko Krzywa, Polska), IMGW-PIB, Wrocław, 2014
 [3] American Petroleum Institute, API PUBLICATION 421, Monographs on Refinery Environmental Control-Management of Water Discharges: Design and Operation of Oil-Water Separators, First Edition, February 1990
 [4] Anielak A. M.: Chemiczne i fizykochemiczne oczyszczanie ścieków. PWN, Warszawa 2000.
 [5] Borysewicz R., Obsługa separatorów substancji ropopochodnych, osadników wielostrumieniowych, metody utylizacji usuwanych z nich odpadów, Seminarium IOŚ „Odprowadzanie wód opadawych z terenów zurbanizowanych

– problemy prawne, techniczne i ekologiczne”, Jachranka 30.05 – 01.06.1999 r.
 [6] Dymaczewski Z. i inni, Poradnik eksploatatora oczyszczalni ścieków, PZITS, Poznań 1995
 [7] Edel R., Odwodnienie dróg, Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, Warszawa 2010
 [8] Fidalá-Szope M., Najlepsze, dostępne, ekonomicznie uzasadnione techniki oczyszczania ścieków opadawych, Seminarium IOŚ NT. „Odprowadzanie wód opadawych z terenów zurbanizowanych – problemy prawne, techniczne i ekologiczne”, Jachranka 30.05-01.06.1999r.
 [9] Guerra P., Fitzgerald K., Caranci B., Eldridge J.; Low Reynolds Number Oil/Water Separator HD Q-PAC Results Superior to Those Predicted by Stoke’s Law; LANTEC, <https://www.lantec.com>, dostęp: 05.07.2021
 [10] Heidrich Z., Witkowski A., Urządzenia do oczyszczania ścieków, projektowanie przykłady obliczeń; Wydawnictwo „Seidel-Przywecki”, wyd. II, Warszawa 2010
 [11] Khan E., Virojnagud W., Ratpukdi T., Use of biomass sorbents for oil removal from gas station runoff. Chemosphere 2004, vol. 57, str. 681-689, <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2004.06.028>
 [12] Kolanek A., Określenie zanieczyszczeń gleby produktami ropopochodnymi w wybranym regionie. Praca dyplomowa, niepublikowana, PWR, Wrocław, 1997
 [13] Legret M., Pagotto C., Evaluation of pollutant loadings in the runoff waters from a major rural highway. The Science of Total Environment 1999, vol. 235, str. 143-150, [https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(99\)00207-7](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(99)00207-7)
 [14] Malmur R., Pluta K., Badanie efektywności usuwania zawieszin ze ścieków opadawych przy zastosowaniu zbiornika retencyjnego. Instal nr 10/2024 (468) str. 30-37, DOI 10.36119/15.2024.10.5
 [15] Moosai R., Dawe R., Gas attachment of oil droplets for gas flotation for oily wastewater cleanup. Separation and Purification Technology 2003, vol. 33, str. 303-314, [https://doi.org/10.1016/S1383-5866\(03\)00091-1](https://doi.org/10.1016/S1383-5866(03)00091-1)
 [16] PN-S-02204:1997 Drogi samochodowe – – Odwodnienie dróg, grudzień 1997r.
 [17] 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, 2005r.
 [18] PN-EN 858-1:2005/A1:2007 Instalacje oddzielaczy cieczy lekkich (np. olej i benzyna); Część 1: Zasady projektowania, właściwości użytkowe i badania, znakowanie i sterowanie jakością, 2007r.; wersja polska
 [19] PN-EN 858-2:2005 Instalacje oddzielaczy cieczy lekkich (np. olej i benzyna); Część 2: Dobór wielkości nominalnych, instalowanie, użytkowanie i eksploatacja; kwiecień 2005r.; wersja polska
 [20] PN-EN 752:2017-06, Zewnętrzne systemy odwadniające i kanalizacyjne – – Zarządzanie systemem kanalizacyjnym, marzec 2017r.
 [21] Płaza G. A., Bioremediacja gruntów zanieczyszczonych związkami ropopochodnymi z terenu rafinerii metodą bioprzymy, Monografia nr 47, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2006.
 [22] Rozporządzenie Ministra Gospodarki Morskiej i Żeglugi Śródlądowej z dnia 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 opadawych lub roztopowych do wód lub do urządzeń wodnych, Dz.U. 2019, poz. 1311
 [23] Włodarczyk-Makuła M., Zagrożenie zanieczyszczenia środowiska wodnego związkami ropopochodnymi, Lab. 1/2016, str. 12 – 16
 [24] Yao K. M., Theoretical study of high-rate sedimentation, J. Water Poll. Control Fed., 1970, 42, No 2, 218-228, <https://www.jstor.org/stable/25036470>